

การออกแบบและสร้างเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิทัล
ในระบบงานข่ายสายโทรศัพท์ตอนนอก

ปริญญานิพนธ์
ของ
พรทิพย์ นุ่มอินทร์

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต วิชาเอกอุตสาหกรรมศึกษา

พฤษภาคม 2545

ลิขสิทธิ์เป็นของ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

๖๒๑. 385

พ ๒๓๙๗

ร. ๒

การออกแบบและสร้างเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอล
ในระบบงานข่ายสายโทรศัพท์ตอนนอก

บทคัดย่อ

ของ

พรทิพย์ นุ่มอินทร์

- ๘ ต.ค. ๒๕๔๕

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต วิชาเอกอุตสาหกรรมศึกษา

พฤษภาคม ๒๕๔๕

๒๑๔๙๐๔

พรทิพย์ นุ่มอินทร์. (2545). *การออกแบบและสร้างเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอล ในระบบงานโทรศัพท์ต่อนอก*. ปรินญาณพนธ์ กศ.ม (อุตสาหกรรมศึกษา). กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. คณะกรรมการควบคุม : อาจารย์ ดร. ไพรัช วงศ์ยุทธไกร, ผศ.ดร.ธีระพล เทพหัสดิน ณ อยุธยา

การวิจัยครั้งนี้มีจุดมุ่งหมายวิจัยเพื่อออกแบบและสร้างเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอล ในระบบงานข่ายสายต่อนอกและเพื่อหาประสิทธิภาพของการใช้งานของเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอลในระบบงานข่ายสายต่อนอก

เครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดิน แบบดิจิตอลในระบบงานโทรศัพท์ต่อนอกซึ่งได้มีการจัดทำเป็นลำดับขั้นโดยการออกแบบและสร้างแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ ซึ่งสามารถจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับได้ 3 ระดับคือ 10 มิลลิแอมแปร์ 1 มิลลิแอมแปร์ และ 0.1 มิลลิแอมแปร์ ส่วนวัดแรงดันไฟฟ้าได้ขนาดของสัญญาณ 120 มิลลิโวลท์ที่ความถี่ 500 เฮิรตซ์ และส่วนแสดงผลที่สามารถแสดงผลออกมาเป็นชนิดเจ็ดเซกเมนต์แบบ 3(1/2)

เครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอลซึ่งต้องเป็นไปตามมาตรฐานขององค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทยตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินได้สามย่านคือ (0-19.99) โอห์ม, (20-199.9) โอห์ม และ (200-1999) โอห์ม ตามลำดับ

ทำการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอลโดยนำไปเปรียบเทียบกับเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินตามมาตรฐานขององค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย ผลทดสอบสรุปได้ว่า

1. ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอลเมื่อนำมาตรวจวัดความต้านทานดิน ณ สถานที่ต่างๆซึ่งผลที่ได้มีความผิดพลาดคิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 3.63

2. ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอลเมื่อนำมาตรวจวัดความต้านทานที่ทราบค่าทั้งสามย่านซึ่งผลที่ได้มีความผิดพลาดคิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 2.18, 0.95 และ 2.94 ตามลำดับ

3. ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอลเมื่อนำมาตรวจวัดความต้านทานจุดลงดิน แบบวัดแยกค่าความต้านทานจุดลงดินออกจากระบบลงดินรวมซึ่งมีความผิดพลาดคิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 3.68

4. ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอลเมื่อนำมาตรวจวัดความต้านทานดิน แบบวัดรวมค่าความต้านทานจุดลงดินทั้งระบบลงดินซึ่งมีความผิดพลาดคิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 116.79 ซึ่งเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอลไม่เหมาะสมสำหรับวิธีการตรวจวัดแบบนี้

เครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอลในระบบงานข่ายสายต่อนอกนี้ สามารถตรวจวัดค่าความต้านทานจุดลงดิน แบบวัดแยกค่าความต้านทานจุดลงดินออกจากระบบลงดิน ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

Pornthip Numeinth. (2002). *Design and Construct of Digital Earth Tester Device for Outside Plant Telephone Systems*. Master thesis. M.Ed.(Industrial Education). Bangkok : Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor Committee: Dr.Pairust Vongyuttakrai, Assit.Prof.Dr.Teerapol Thephasadin Na Ayuthaya

The objective of this was to conduct an experiment, result of which will become the bases to design and construct a digital earth tester device for outside plant telephone system and to test its efficiency.

In order to design and construct this device, all equipment and functions were divided in 3 main parts. The first is consisted of a current source, which can supply 3 levels of amperes. 10 milliamperes, 1 milliamperes and 0.1 milliamperes. The second part consisted of voltmeter, which can measure up to 120 millivoltages at the frequency of 500 Hertz. The third part consisted of is the digital display part which is contained the analog to digital converter and also 3.5 digits of 7 segment.

The digital earth tester device can measure earth resistance the result of experiment show that 3 levels (0-19.9) Ohms, (20-199.9) Ohms, and (200-1,999) Ohms.

To test the efficiency of this device, three electrode methods to compare with the standards specified by Telephone Organization of Thailand (TOT.) was used. Detail of the result of the experiment conducted on the Digital Earth Tester device by using the level of loudness as criterions are as follows:

1. Earth resistance experiment has an average error 3.63 percentage.
2. Resistance experiment consisted of 3 levels of 1(0-19.9) Ohms), 2) (20-199.9) Ohms and 3) (200-1,999) Ohms have an average error of 2.18 percentages, 0.95 percentages and 2.94 percentages, respectively.
3. Single ground rod resistance experiment to separate the ground telephone system has an average error of 3.68 percentages.
4. Single ground rod resistance experiment that included ground telephone system has an average error of 116.79 percentages. The digital earth tester did not support this measure.

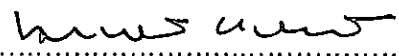
The result of the experiment showed that the digital earth tester for outside plant telephone system could measure earth resistance at 0-2,000 Ohms and have an efficiency similar to equal to TOT's earth tester.

ปริญญานิพนธ์
เรื่อง

การออกแบบและสร้างเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิทัล
ในระบบงานข่ายสายโทรศัพท์ตอนนอก

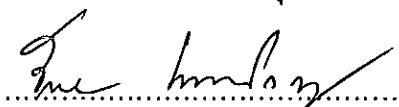
ของ
นางสาวพรทิพย์ นุ่มอินทร์

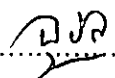
ได้รับอนุมัติจากบัณฑิตวิทยาลัยให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต วิชาเอกอุตสาหกรรมศึกษา
ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

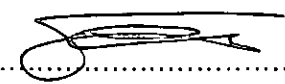

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.นภาพร หะวานนท์)
วันที่ 4 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2545

คณะกรรมการสอบปริญญานิพนธ์


..... ประธาน
(อาจารย์ ดร.ไพรัช วงศ์ยุทธไกร)


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล เทพหัสติน ณ อยุธยา)


..... กรรมการที่แต่งตั้งเพิ่มเติม
(อาจารย์ ดร.อุปวิทย์ สุวคันธกุล)


..... กรรมการที่แต่งตั้งเพิ่มเติม
(อาจารย์โอภาส สุขหวาน)

ประกาศคุณูปการ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้ สำเร็จลงด้วยความอนุเคราะห์ในการให้คำปรึกษาแนะนำ ด้วยความเอาใจใส่ดูแลได้อย่างเรียบร้อยสมบูรณ์ดีเยี่ยมจาก ดร. ไพรัช วงศ์ยุทธไกร ซึ่งได้สละเวลาเป็นประธานควบคุมปริญญานิพนธ์ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ ผศ.ดร.ธีระพล เทพหัสดิน ณ อยุธยา ที่สละเวลาเป็นกรรมการควบคุมปริญญานิพนธ์ พร้อมทั้งให้การแนะนำและคำปรึกษาต่างๆ ด้วยความเอาใจใส่ และข้อเสนอแนะต่างๆ ทำให้ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ ดร. อุพิทย์ สุวคันธกุล ดร.ละเอียต รัชเผ่า อาจารย์สุดใจ เห่งสีไพร และอาจารย์โอภาส สุขหวาน ที่กรุณาร่วมเป็นกรรมการสอบให้ข้อเสนอแนะและแนวคิดต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อการรวบรวม ข้อมูลรูปเล่มงานวิจัยที่เสร็จเรียบร้อยสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณ อาจารย์เชาวลิต ชรรมิวิริยะกุล ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร ที่กรุณาให้ข้อมูล ข้อเสนอแนะต่างๆ รวมถึงสถานที่ อุปกรณ์ และเครื่องมือที่ใช้ในการออกแบบ และสร้าง ช่วยให้เกิดความสำเร็จในตัวเครื่องของผลงานวิจัยสามารถนำมาสรุปผลงานวิจัยได้ทั้งหมด

ขอขอบพระคุณ คุณทวีพร เพ็ชรชะอุ่ม ฝ่ายวิศวกรรมระบบโทรคมนาคม ส่วนมาตรฐานอุปกรณ์โทรคมนาคมและอุปกรณ์ทั่วไป กองมาตรฐานเครื่องมือวัด องค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย ที่กรุณาให้ข้อมูลและข้อเสนอแนะต่างๆ

ขอขอบพระคุณ คุณชนนท์ ธิติศักดิ์ คุณนพดล อินทร์ประสิทธิ์ คุณอำพล ชูขาว และเจ้าหน้าที่แผนก Implement ฝ่ายวิศวกรรม บริษัทไทยฟลูอิดา ยูนิคอมเอ็นจิเนียริ่ง จำกัด ที่กรุณาให้ความร่วมมือในการจัดสถานที่ อุปกรณ์ และเครื่องมือในการทดสอบตามมาตรฐานองค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย

ขอขอบพระคุณ คุณฉัตรเพชร บุญยกต และ คุณนงลักษณ์ พานทอง ที่ได้ให้คำปรึกษาแนะนำช่วยเหลือติดต่อด้านประสานงาน สนับสนุนด้านการจัดข้อมูลและรูปเล่มของงานวิจัย จนทำให้การวิจัยครั้งนี้สำเร็จลงด้วยความเรียบร้อย

ขอขอบพระคุณ คุณเรืองเพชร ชาลาธนาวุฒิ คุณสุมาลี ทะรินทร์ และคุณรังสรรค์ ศรีคำภา ที่ให้ความช่วยเหลือด้านการจัดพิมพ์ ตรวจสอบ แก้ไข ให้รูปเล่มมีความถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

อนึ่ง ผู้วิจัยได้รับการสนับสนุนและให้กำลังใจเป็นอย่างยิ่ง จากคณาจารย์และกรรมการบริหารหลักสูตร สาขาวิชาอุตสาหกรรมศึกษา ทุกท่าน ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณอย่างสูง

นอกจากนี้ ผู้จัดทำขอขอบคุณเพื่อนร่วมรุ่น ปริญญาโท หลักสูตรวิชาอุตสาหกรรมศึกษาทุกท่าน และเพื่อนชมรมกอล์ฟ เฟรชชี ทุกท่าน ที่ให้กำลังใจ และท่านอื่นๆที่ไม่สามารถกล่าวชื่อนามได้ทั้งหมด ซึ่งมีส่วนช่วยเหลือแนะนำ สนับสนุนให้การวิจัยครั้งนี้เรียบร้อยเป็นอย่างดี

สุดท้ายนี้ที่ผู้วิจัยจะลืมไม่ได้คือ ผู้วิจัยขอโน้มระลึกถึงพระคุณของบิดา มารดา ที่ดูแลเอาใจใส่และให้กำลังใจ มาโดยตลอด คือคุณพ่อทองหล่อ และคุณแม่ขจี นุ่มอินทร์ ที่ให้ความช่วยเหลือสนับสนุน ในการทำปริญญานิพนธ์ ด้วยความรักความเมตตา และการให้กำลังใจอย่างท่วมท้น อย่างหาประมาณมิได้ จึงขอกราบคุณพระคุณทั้งสองท่าน ด้วยความเคารพอย่างยิ่ง

พรทิพย์ นุ่มอินทร์

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ภูมิหลัง.....	1
ความมุ่งหมายของการวิจัย.....	2
ความสำคัญของการวิจัย.....	2
ขอบเขตของการวิจัย.....	3
นิยามศัพท์เฉพาะ.....	3
สมมติฐานในการวิจัย.....	5
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	6
ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับระบบโทรศัพท์.....	6
บทนำ.....	6
การจำแนกประเภทสายต่อนนอก.....	6
จำแนกโดยข่ายสาย (Net work)	6
การแบ่งประเภทโดยวิธีการวางสาย.....	8
แบ่งตามระบบการส่ง.....	10
ความต้องการของงานทางด้านออกแบบวางสายต่อนนอก.....	13
การพัฒนางานทางด้านข่ายสายโทรศัพท์ต่อนนอก.....	16
ข้อสำคัญที่จะต้องคำนึงถึงในการออกแบบ.....	16
สายเคเบิลโทรศัพท์ประเภทต่างๆ.....	17
สายเคเบิลที่ลวดตัวนำเป็นโลหะ (Metallic Cable)	17
สายแบบที่ฉนวนเป็นกระดาษและเปลือกหุ้มสายเป็นตะกั่ว.....	17
เคเบิลฉนวนกระดาษ (Paper insulated stalpeth cable).....	21
เคเบิล PEF-LAP Junction cable.....	23
เคเบิล ชนิด Local PEF-P.....	23
Colour coded poly ethylene insulated and sheath	27
สายเคเบิลชนิด Jelly filled cable.....	32
สายเคเบิล Armored cable.....	32
Self support Distribution wire.....	33
สายเคเบิลแกนร่วม (Coaxial Cable)	35
สายเส้นใยแก้ว (Optical Fiber)	39
ระบบการจ่ายสาย.....	44
ระบบการจ่ายสาย.....	44
ระบบการจ่ายสายที่แท้จริง.....	46

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
2 (ต่อ)	ระบบการจ่ายสายเคเบิลต้นทาง.....	51
	ขั้นตอนเปลี่ยนแปลงไปสู่อนาคต.....	55
	ระบบจ่ายสายผู้เช่าแบบใหม่.....	58
	ระบบการจ่ายสายใต้ดิน (UG-system)	58
	แนวโน้มในระบบการจ่ายสาย.....	62
	แนวความคิดสำหรับจ่ายสายผู้เช่าแบบใหม่.....	75
	ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับระบบลงดิน.....	76
	สายดิน.....	76
	พิกัดความต้านทานไฟฟ้า (Resistivity)	81
	แนวความคิดในลักษณะการเกิดค่าความต้านทานบนวัตถุ.....	83
	Cubical of soil on earth	84
	Single ground rod	85
	หน้าที่ของหลักดิน	86
	วัตถุประสงค์การต่อลงดิน (Purpose of earthing)	87
	Ground potential ในระบบต่อลงดิน.....	87
	แท่งหลักดิน (Grounding).....	88
	ความต้านทานจุดลงดิน.....	88
	มาตรฐานการตรวจสอบงานขั้วตอนนอก.....	89
	การตรวจสอบค่าทางไฟฟ้า และความต้านทานดิน	89
	ความต้านทานของการต่อลงดิน.....	89
	ทฤษฎีในงานอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการออกแบบเครื่องวัดจุดลงดิน.....	89
	ทฤษฎีไดโอด.....	89
	ไดโอดรอยต่อพีเอ็นแบบต่างๆ	89
	ซีเนอร์ไดโอด.....	90
	วงจรเครื่องมือวัดต่างๆ ทางอิเล็กทรอนิกส์.....	91
	มิเตอร์ใช้ตัวเรียงกระแส (Rectifier meter).....	91
	โวลต์มิเตอร์อ่านค่าขอด.....	91
	โวลต์มิเตอร์อ่านค่าขอดถึงขอด.....	91
	วงจรป้องกันแอมมิเตอร์.....	92
	วงจรป้องกันโวลมิเตอร์.....	92
	จุดทำงานของทรานซิสเตอร์.....	93
	ทรานซิสเตอร์เป็นวงจรขยาย.....	95
	ออปแอมป์.....	96

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
วงจรรขยายกำลัง.....	104
2 (ต่อ) การกำเนิดรูปคลื่น.....	113
หลักการของระบบดิจิตอล.....	119
การวัดประสิทธิภาพ.....	126
วิธีวัดค่าความต้านทานของการต่อลงดิน.....	126
การออกแบบและสร้างวงจรเครื่องวัดจุดลงดินแบบดิจิตอล.....	130
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..	133
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	135
เกณฑ์ข้อกำหนดของการออกแบบและสร้างเครื่องในการวิจัย.....	135
ลำดับขั้นตอนในการวิจัย.....	135
4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	148
ผลการทดสอบและวิเคราะห์ข้อมูลการใช้เครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดิน	
แบบดิจิตอล.....	149
5 สรุป อภิปรายผล ข้อเสนอแนะ.....	158
ความมุ่งหมายของการวิจัย.....	158
ความสำคัญของการวิจัย.....	158
สมมุติฐานในการวิจัย.....	158
การดำเนินการวิจัย.....	158
สรุปผล.....	159
อภิปรายผล.....	161
ข้อเสนอแนะ.....	162
บรรณานุกรม.....	163
ภาคผนวก.....	166
ภาคผนวก ก หนังสือขอความอนุเคราะห์.....	167
ภาคผนวก ข รายละเอียดเกี่ยวกับอุปกรณ์.....	169
ภาคผนวก ค การทดสอบและภาพประกอบเกี่ยวกับการสร้าง.....	212
ภาคผนวก ง คู่มือการใช้เครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอล	
ในระบบงานข่ายสายตอนนอก.....	219
ประวัติย่อของผู้วิจัย.....	226

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 กำหนดสัญญาณที่สูญเสียของสายส่ง จากชุมสายโทรศัพท์ไปยังผู้เช่า	13
2 ค่าความต้านทานทางกระแสไฟตรงของสายส่ง จากชุมสายโทรศัพท์ไปยังผู้เช่า	14
3 การไม่สมดุลของค่า Capacitance	20
4 สีของฉนวนหุ้มลวดตัวนำ	30
5 สีเทปพลาสติกที่พันรอบแต่ละ Unit	30
6 ระบบสายส่งของ Balance Cable	37
7 ระบบสายส่งของ Coaxial Cable	38
8 วัสดุที่ใช้ทำลาย	39
9 ชนิดของสายเคเบิลที่ใช้ส่งสัญญาณดิจิทัล	56
10 ปัจจัยการทำเครือข่าย Subscriber Loop	63
11 ประเภทของสายส่ง	65
12 รูปแบบเครือข่ายของ Subscriber Loop	67
13 ปัจจัยการจัดทำข่ายสายผู้เช่า	68
14 พื้นที่จัดทำสำหรับแต่ละรูปแบบ	69
15 ตัวอย่างสำหรับจัดทำในแต่ละรูปแบบ	70
16 ชนิดของสายที่ใช้งาน	72
17 ขนาดของสายดินทองแดง	77
18 สูตรสำหรับคำนวณหาความต้านทานของการต่อลงดิน	79
19 ข้อดีและข้อเสียของวงจรขยายที่ใช้หม้อแปลง	107
20 แสดงการนับเลขในระบบเลขฐานสองเปรียบเทียบกับระบบเลขฐานสิบ	123
21 แสดงตัวเลขในระบบเลขฐานสิบหกเปรียบเทียบกับระบบเลขฐานสิบ	124
22 วิธีเขียนตัวเลขในระบบฐานต่างๆ	125
23 การตรวจวัดประสิทธิภาพความต้านทานจุดลงดิน (วัดรวม).....	146
24 การตรวจวัดประสิทธิภาพความต้านทานจุดลงดิน (วัดแยก).....	147
25 แสดงการเปรียบเทียบค่าความต้านทานที่วัดได้จากเครื่องตรวจวัดมาตรฐานกับเครื่องที่สร้างขึ้น โดยค่าความต้านทานอยู่ในช่วง 1 - 199.9 โอห์ม ซึ่งอยู่ในย่านวัดที่ 1 และ 2	149
26 แสดงการเปรียบเทียบค่าความต้านทานจุดลงดินแบบวัดแยกที่วัดได้จากเครื่องตรวจวัดมาตรฐาน เทียบกับเครื่องตรวจวัดที่ผู้วิจัยได้สร้างขึ้น.....	150
27 แสดงการเปรียบเทียบค่าความต้านทานจุดลงดินแบบวัดรวมที่วัดได้จากเครื่องตรวจวัดมาตรฐาน เทียบกับเครื่องตรวจวัดที่ผู้วิจัยได้สร้างขึ้น.....	152
28 แสดงการเปรียบเทียบค่าความต้านทานจากเครื่องดิจิทัลมัลติมิเตอร์กับเครื่องที่สร้างขึ้น โดยค่าความต้านทานอยู่ในช่วง 1 - 19.99 โอห์ม.....	154

บัญชีตาราง (ต่อ)

ตาราง	หน้า
29 แสดงการเปรียบเทียบค่าความต้านทานจากเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์กับเครื่องที่สร้างขึ้น โดยค่าความต้านทานอยู่ในช่วง 20.0 - 199.9 โอห์ม.....	155
30 แสดงการเปรียบเทียบค่าความต้านทานจากเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์กับเครื่องที่สร้างขึ้น โดยค่าความต้านทานอยู่ในช่วง 200 - 1999 โอห์ม.....	156
31 รายละเอียดตัวเก็บประจุ ของแหล่งกระจายไฟฟ้าคงที่.....	170
32 รายละเอียดไดโอด ของแหล่งกระจายไฟฟ้าคงที่.....	170
33 รายละเอียดทรานซิสเตอร์ ของแหล่งกระจายไฟฟ้าคงที่.....	170
34 รายละเอียดตัวต้านทานของแหล่งกระจายไฟฟ้าคงที่.....	170
35 รายละเอียดตัวเก็บประจุ ของวงจรขยายสัญญาณไฟฟ้าแบบกลับเฟส.....	171
36 รายละเอียดตัวต้านทาน ของวงจรขยายสัญญาณไฟฟ้าแบบกลับเฟส.....	171
37 รายละเอียดตัวเก็บประจุ ของอุปกรณ์ที่ใช้ส่วนแสดงผล.....	171
38 รายละเอียดไดโอด ของอุปกรณ์ที่ใช้ส่วนแสดงผล.....	171
39 รายละเอียดตัวต้านทาน ของอุปกรณ์ที่ใช้ส่วนแสดงผล.....	172

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 ตัวอย่างการวางสายเคเบิลผู้เช่าสาย	7
2 เป็นการวางสาย Feeder Cable และ Distribution Cable	8
3 แสดงการวางสาย Junction และ สาย Toll Cable	8
4 แผ่นคอนกรีตวางป้องกัน	9
5 แสดงการวางสายเคเบิลใต้ดินแบบฝังโดยตรงและวิธีการป้องกันสาย	9
6 (1) หลักการเบื้องต้นการ Modulation	10
6 (2) ส่งหลายวงจรโดยใช้ความถี่สูง	11
6 (3) การส่งแบบ 2-W และ 4-W	11
6 (4) การส่งแบบ 4-W ความถี่สูง	11
6 (5) การส่งโดยใช้สายเคเบิล 1 เส้น และสายเคเบิล 2 เส้น (a) เคเบิล 1 เส้น (b) เคเบิล 2 เส้น	11
6 (1) - (5) แสดงการผสมคลื่นความถี่ต่ำกับความถี่สูง และการส่งระบบ 2-W 4-W	11
7 การส่งแบบ 2-W ความถี่สูง โดยใช้ ตัวกรองความถี่แยกจากกัน	12
8 ความยาวของสายสามารถวางได้ไกลในการกำหนดสัญญาณที่สูญเสียในสาย 7 db	14
9 กำหนดสัญญาณที่สูญเสียในแต่ละช่วง	14
10 ข่ายสาย trunk และค่าสัญญาณที่สูญเสียในแต่ละช่วง	14
11 (1) อนุญาตเป็น Pulp	18
11 (2) อนุญาตที่หุ้มลวดตัวนำเป็นเทปกระดาษ	18
11 (1) - (2) อนุญาตที่หุ้มเป็นกระดาษ	18
12 แสดงสายเคเบิลที่เปลือกหุ้มเป็นตะกั่วและลวดตัวนำรวมกันเป็นแบบ Unit	18
13 ลวดตัวนำจัดเป็นแบบชั้นๆ (layer type)	19
14 การจัด Unit	19
15 คุณสมบัติสายส่ง	19
16 เปรียบเทียบ Breakdown Voltage	21
17 ค่าแสดงเปรียบเทียบ Electrostatic Unbalance	21
18 (1) โครงสร้างสาย Stalpath	22
18 (2) การจัดเป็น Units	22
19 0.5 mm 1800-pair PEF-LAP Junction cable	23
20 ขบวนการผลิต PFE Insulation	24
21 ภาพตัดขยาย ของ PEF-Insulation	25
22 สายเคเบิล 0.32 มม. 4,000 คู่	25
23 การพันเกลียวแต่ละชั้นมีทิศทางตรงข้ามกัน	25
24 เครื่องพันเกลียว	25
25 ระดับของฟองอากาศและค่า Dielectric ของ PEF-Insulation	26
26 การเปรียบเทียบค่าสูญเสียของสายแบบที่ Insulation เป็นกระดาษกับที่ Insulation เป็น PEF .	26
27 เครื่องพันสายในระบบ S-Z	27
28 สาย CCP-P-SS ในแบบ S-Z	28

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
29 การพันเกลียวในแบบ S-Z และประกอบเป็น Unit	28
30 ขั้นตอนการพันเกลียวในระบบ S-Z	29
31 แสดงคุณสมบัติของสายส่ง	31
32 Steel Tape Armored Cable	32
33 Wire Armored Cable	33
34 แสดงภาพตัดขวางของสายเคเบิล S.D Wire	34
35 เป็นรูปภาพตัดของสาย coaxial เคเบิล 9.5 mm. 18 หลอด	35
36 โครงสร้างของหลอด coaxial 9.5 mm.	35
37 เป็นภาพถ่ายของสาย coaxial	36
38 แสดงขั้นตอนการผลิตสาย coaxial เคเบิล 2.6/9.5 mm.	36
39 เป็น P.E tape และคู่สาย coaxial สายเคเบิลชนิดนี้มี 4, 6, 8, 12 และคู่สายที่อยู่ภายใน มี ขนาด 0.5 และ 0.65 mm.	37
40 แสดงโครงสร้างของสาย coaxial เคเบิลแบบ 1.2/44 mm.	38
41 ข้อดีของสายเส้นใยแก้ว	40
42 ขอบเขตการใช้เส้นใยแก้วในการสื่อสาร	40
43 ชนิดของสายแบ่งตามลักษณะของดัชนีหักเห	41
44 โครงสร้างของสายเส้นใยแสงแบบ SM	42
45 แสดงการสูญเสียพลังงานแสงในลักษณะต่างๆ	43
46 (1) โครงสร้างสายเคเบิลใต้น้ำ	
(2) โครงสร้างของสายเคเบิล	43
(3) สายเคเบิลที่ไม่มีเกราะป้องกันใช้งานในท้องทะเลลึก	
(1) - (3) แสดงโครงสร้างของสายเส้นใยแก้ว	44
47 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนคู่สายเคเบิลกับราคาก่อสร้าง	45
48 ระบบการจ่ายสายแบบสมมาตรและตายตัว	46
49 การจ่ายสายระบบ Link	46
50 การจ่ายสายในระบบ Fixed	47
51 การต่อสายในระบบ Ready access Distribution	48
52 Ready Access Terminal Box	49
53 สายเคเบิลปลายทางที่ต่อ Multiple	50
54 เป็นการต่อสายร่วมกันโดยใช้ CCC	50
55 ระบบการต่อสายระบบคงที่	51
56 ระบบต่อคู่สายร่วมกัน	52
57 การรวม CODA เข้าด้วยกัน	53
58 เครื่องต่อสายและตัวต่อสาย	54
59 แสดงขั้นตอนสูบน้ำคด	57
60 ข่ายสายผู้เช่าระบบใหม่	59

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
61 ตู้ต่อสาย F/D	60
62 สาย CCP-APพร้อมปลั๊กเสียบ	60
63 ตู้ F/D ติดตั้งที่เสา	60
64 ระบบการวางสาย UG-P	61
65 การต่อคู่สายระบบ UG-P	61
66 ระบบการวางสาย UG-H	61
67 ระบบการวางสาย UG-B	62
68 การทำ Subscriber loop แบบต่างๆ	64
69 ระบบ Subscriber carrier	70
70 ระบบจ่ายตรงโดยใช้สายเคเบิลใยแก้ว	71
71 ระบบจ่ายตรงโดยใช้สายเคเบิลแกนร่วม	71
72 ระบบ Loop Distribution	72
73 ระบบ Concentration และ Multiplex โดยใช้สายเคเบิลแบบใหม่	73
74 ระบบ Concentration ใช้สายเคเบิลแกนร่วม	74
75 ระบบ Digital Subscriber Multiplex	74
76 Subscriber Concentration	75
77 รูปร่างของแท่งสายดินแบบขดเป็นกันหอย แท่งกลมยาวและต่อเป็นตารางตาข่าย	77
78 แท่งหลักสายดินรูปครึ่งวงกลมมีรัศมี r_A ถูกฝังอยู่ให้เสมอกับผิวครึ่งทรงกลมพอดี	77
79 กราฟแสดงการแปรเปลี่ยนของค่าความต้านทานจำเพาะของดินเมื่อมีความชื้น (จากรูปเป็นดินเหนียว)	80
80 กราฟแสดงการแปรเปลี่ยนของค่าความต้านทานจำเพาะของดิน (ดินเหนียว) กับอุณหภูมิ เมื่อมีความชื้นในดิน 18.6%	80
81 หลักของการให้นิยาม RESISTIVITY (P) ด้วยการใช้ก้อนปริมาตรลูกบาศก์	82
82 การอธิบายค่า R จากกระจายกระแสไฟฟ้าแบบครึ่งทรงกลม	83
83 การอธิบายค่า จำนวน R ด้วยทฤษฎีทางคณิตศาสตร์	84
84 พิจารณาถึง cubical of soil ที่ประกอบขึ้นของผืนแผ่นดิน หรือ โลก หรือ เรียกว่า Earth model	84
85 การพิจารณาถึง ความนำไฟฟ้าและ/หรือ ความต้านทานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากปริมาตร (Cubical) ชั้นดินที่ต่อร่วมถึงกัน หรือ เรียกว่า แบบจำลองชั้นดินโลก(Earth shell model) ซึ่งให้ผล ปริมาตรสุดท้ายเป็น Remote earth	85
86 สภาพ Grounding ซึ่งแตกต่างกันระหว่าง ระบบ Rod grounding และ Earth grounding	87
87 ตัวอย่างแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในส่วนต่างๆ และส่งผลต่อ ช.ส. ที่ใช้งาน Rod grounding	88
88 กำหนดค่า R_g ที่เหมาะสม เพื่อควบคุม Ground potential ให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัย เพื่อง่าย และสะดวกในการจัดการบริหารระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ	88
89 ซีเนอร์ไดโอด (n) สัญลัษณ์ (ข) ลักษณะแรงดัน-กระแส	90
90 การใช้งานซีเนอร์ไดโอดสำหรับควบคุม	90

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
91 วงจรมอเตอร์วัดแรงดันกระแสสลับ โดยใช้มอเตอร์กระแสตรง	91
92 วงจรโวลต์มิเตอร์อ่านค่าโดยตรง	92
93 วงจรโวลต์มิเตอร์อ่านค่าโดยตรงถึงโดยตรง	92
94 วงจรป้องกันแอมมิเตอร์	92
95 วงจรป้องกันโวลต์มิเตอร์	93
96 ลักษณะทางต้านออกของทรานซิสเตอร์ npn	94
97 วงจรขยายอิมิตเตอร์แบบไบแอสคงตัว	94
98 ลักษณะทางต้านเข้า	95
99 ลักษณะทางต้านออก	95
100 สัญลักษณ์ของออปแอมป์	97
101 สัญลักษณ์อย่างง่ายของออปแอมป์	97
102 ลักษณะถ่ายโอนของออปแอมป์	98
103 วงจรสมมูลของออปแอมป์อุดมคติ	98
104 (1) วงจรขยายกลับขั้ว	
(2) วงจรสมมูลของวงจรขยายกลับขั้ว	99
105 วงจรขยายไม่กลับขั้ว	100
106 วงจรตามแรงดัน	101
107 วงจรบวก	101
108 วงจรลบ	102
109 วงจรอินทิเกรเตอร์	103
110 วงจรดิฟเฟอเรนเชียล	103
111 วงจรขยายอย่างง่าย	105
112 ลักษณะทางต้านออกแสดงรูปคลื่นของกระแส	105
113 วงจรขยายคลาสเอชนิดที่ใช้หม้อแปลง	105
114 ลักษณะทางต้านออกแสดงเส้นโหลด กระแสตรงและเส้นโหลดกระแสสลับ	106
115 วงจรขยายแบบผลัดตั้งที่ใช้ทรานซิสเตอร์ 2 ตัว และส่งกำลังออกทางหม้อแปลง	108
116 รูปคลื่นต่าง ๆ ของวงจรขยายคลาสบีที่มีทรานซิสเตอร์ตัวเดียว	108
117 ตัวอย่างวงจรขยายคลาสบีแบบผลัดตั้ง	110
118 แผนภาพบล็อกของวงจรแอมป์ที่ใช้การป้อนกลับชนิดสุ่มแรงดันผสมแรงดัน	114
119 แผนภาพบล็อกของวงจรแอมป์ที่ใช้การป้อนกลับชนิดสุ่มกระแสผสมกระแส	114
120 วงจรแอมป์เลื่อนเฟส	115
121 วงจรแอมป์แบบบริดจ์ของวิน	116
122 (1) ให้การควบคุมอัตราขยายโดยอัตโนมัติ	
(2) ใช้เซนซิเตอร์เป็น R2	
(3) ใช้ FET เป็นความต้านทานไวแรงดัน(VVR).....	118

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
122 (4) ใช้ไดโอดซีเนอร์เป็นวงจรจำกัดช่วงสูง	
(1) - (4) ตัวอย่างการควบคุมช่วงสูงของการแกว่ง.....	118
123 วงจรแกว่งที่ใช้วงจร T - แฝด	118
124 ลักษณะของสัญญาณดิจิตอล	120
125 สัญญาณดิจิตอลที่ผิดเพี้ยน	120
126 แสดงอุปกรณ์และวงจรที่ใช้ในระบบดิจิตอล	122
127 วงจรการต่อเพื่อวัดค่าความร้อนของการต่อลงดินแบบ Three-Electrode Method	126
128 แห่งหลักสายดินที่ต้องการทราบค่าความต้านทานเมื่อตกลงไปในดิน	127
129 ลักษณะของการปักแท่งขั้วไฟฟ้าในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินของ Wenner	129
130 ลักษณะของการปักแท่งขั้วไฟฟ้าในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินของ Schlumberger ..	129
131 หลักการในการวัดหาความต้านทานในดิน	130
132 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องมือวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอล	131
133 บล็อกไดอะแกรมของแหล่งจ่ายกระแส	132
134 ส่วนแสดงผล	133
135 แสดงขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย	136
136 แหล่งกำเนิดสัญญาณแรงดันที่มีชุดควบคุมขนาดอัตโนมัติ	138
137 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส	139
138 วงจรแปลงแรงดันเป็นกระแสแบบมีวงจรขับกระแส	140
139 วงจรแปลงค่า RMS เป็นแรงดันไฟตรง	141
140 ส่วนแสดงผล	142
141 วงจรเปลี่ยนสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล	142
142 วงจรเครื่องวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอลในระบบงานโทรศัพท์ตอนนอก	145
143 แสดงค่าความต้านทานเปรียบเทียบระหว่างการวัดที่วัดได้จากเครื่องตรวจวัดมาตรฐานและ ที่วัดได้จากเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินที่ผู้วิจัยได้สร้างขึ้น.....	149
144 แสดงค่าความต้านทานจุดลงดิน (วัดแยก) เปรียบเทียบระหว่างค่าที่วัดได้จากเครื่องตรวจวัด มาตรฐานกับเครื่องตรวจวัดที่สร้างขึ้น.....	151
145 แสดงค่าความต้านทานจุดลงดิน (วัดรวม) เปรียบเทียบระหว่างค่าที่วัดได้จากเครื่องตรวจวัด มาตรฐานกับเครื่องตรวจวัดที่สร้างขึ้น.....	153
146 แสดงค่าความต้านทานเปรียบเทียบระหว่างการวัดจากเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ กับเครื่องที่สร้างขึ้น.....	157
147 ลายทองแดงของแผงวงจรเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดิน.....	213
148 แสดงตำแหน่งของอุปกรณ์บนลายทองแดง.....	214
149 การเตรียมการเพื่อการทดสอบ.....	215
150 การตอกแท่งหลักดินอ้างอิงเพื่อใช้ในการทดสอบ.....	216
151 การต่อสายเข้ากับระบบจุดดินรวมของระบบข่ายสายโทรศัพท์ตอนนอก.....	217
152 การทดสอบการทำงานของเครื่องตรวจวัดค่าความต้านทานจุดลงดิน.....	218
153 ด้านหน้าของเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอล.....	222

บทที่ 1

บทนำ

ภูมิหลัง

ความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีด้านโทรคมนาคมในปัจจุบัน ได้พัฒนาไปอย่างรวดเร็วจนกลายเป็นปัจจัยสำคัญต่อการดำเนินชีวิต การพัฒนาเศรษฐกิจและสังคม ตลอดจนความมั่นคงของประเทศ รวมทั้งการพัฒนาประเทศให้สามารถแข่งขันทางด้านธุรกิจกับประเทศอื่นได้โดยไม่เสียเปรียบ และเป็นตัวแปรสำคัญในการยกระดับมาตรฐานชีวิตของประชาชนในประเทศ สนองตอบนโยบายของรัฐบาลที่ต้องการผลักดันให้ประเทศไทยเป็นศูนย์กลางโทรคมนาคมในภูมิภาคนี้ (องค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย ทศท. 2537 : 53) ในสถานการณ์ที่เต็มไปด้วยการแข่งขันกันในทุกๆ ด้าน และทุกรูปแบบ ระบบสื่อสารที่มีประสิทธิภาพเป็นปัจจัยสำคัญที่จะสร้างความได้เปรียบในการแข่งขัน และในขณะเดียวกัน ก็เป็นแรงสนับสนุนการพัฒนาระบบเศรษฐกิจ และสังคมโดยรวมของประเทศ รัฐจึงมุ่งพัฒนากิจการสื่อสารทั้งภายใน และระหว่างประเทศโดยเน้นทั้งด้านปริมาณและคุณภาพ รวมทั้งส่งเสริมการนำเทคโนโลยี และบริการใหม่ๆ ที่เหมาะสมมาใช้ประโยชน์ (การสื่อสารแห่งประเทศไทย 2536 : 18)

แนวโน้มของการพัฒนาทางด้านเทคโนโลยีโทรคมนาคมสัญญาณและวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังเข้าสู่ลักษณะทางด่วนข้อมูล (Information Super-highway) ที่สามารถรองรับการส่งถ่ายข้อมูลภาพและเสียงได้พร้อมกันในเวลาเดียวกัน ด้วยปริมาณมากและความเร็วสูง โครงข่ายโทรคมนาคมและอุปกรณ์สื่อสารต่างๆ อาทิ คอมพิวเตอร์ โทรศัพท์ โทรทัศน์ จะรวมกันเป็นโครงข่ายเดียวที่เชื่อมโยงถึงกันได้ทั้งหมด อุปกรณ์ปลายทางจะมีขนาดเล็กลงมาก และสามารถพกพาได้อย่างสะดวกสบายมากยิ่งขึ้น (แผนวิสาหกิจองค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย ฉบับที่ 4 พ.ศ. 2540 – 2544: 2)

ในระบบงานสร้างขยายข่ายสายโทรศัพท์ที่ังยังมีการพัฒนาที่ไม่หยุดนิ่ง มีการขยายโครงข่ายของความเจริญไปทั่วทั้งภูมิภาค ซึ่งประเทศไทยยังคงต้องเพิ่มศักยภาพในการสื่อสารข้อมูลให้เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้การติดตั้งและขยายระบบงานสร้างขยายข่ายสายจึงต้องมีการดำเนินการติดตั้งเพิ่มเติม ซึ่งงานติดตั้งและงานสร้างขยายข่ายสายในส่วนของเคเบิลนั้นมี 2 ลักษณะ คือ การติดตั้งในดิน (Under Ground) และการติดตั้งบนอากาศ (Aerial) กรณีที่ติดตั้งในดินนั้น จะต้องตึงเคเบิลในท่อ PVC ซึ่งฝังอยู่ภายในดิน โดยทั่วไปลักษณะงานแบบนี้จะอยู่ภายในชุมชน ส่วนกรณีที่ติดตั้งบนอากาศ โดยการใช้การแขวนหรือยึดไปตามแนวเสาไฟฟ้าหรือเสาโทรศัพท์ ซึ่งจะใช้ติดตั้งในเส้นทางที่มีระยะไกล ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับลักษณะของสภาพพื้นที่การติดตั้งเป็นสำคัญ ซึ่งการวางสายเคเบิลอากาศนั้นตามมาตรฐานองค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทยกำหนดไว้ คือ ทุกระยะทาง 200 เมตร จะต้องสร้างจุดลงกราวด์ 1 จุด (ทศท. : 2537 : 41) เพื่อป้องกันอันตรายจากกระแสไฟฟ้าที่จะไหลลงเคเบิล และเพื่อเป็นการให้กระแสไฟฟ้าลงสู่ระบบดิน เพื่อความปลอดภัยหรือลดความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นต่อบุคคล ต่ออาคารสิ่งก่อสร้าง และต่ออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทุกชนิด จึงได้มีระบบการต่อลงดินซึ่งจุดประสงค์ของการต่อลงดิน คือ การจำกัดแรงดันไฟฟ้าของวงจรไม่ให้สูงจนอาจทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าเสียหายเมื่อเกิดแรงดันเกิน เนื่องจากแรงดันกระชาก (surge) ซึ่งอาจเกิดจากไฟฟ้าไม่สม่ำเสมอ หรือ ไฟฟ้า (ฟ้าผ่าเป็นแรงดันกระชากอย่างหนึ่ง) และลดแรงดันไฟฟ้าที่อาจเกิดขึ้นจากการรั่ว หรือ การเหนี่ยวนำที่เปลี่ยน

โลหะของอุปกรณ์ไฟฟ้า ส่วนประกอบ หรือ โครงสร้างอื่นๆ ซึ่งในภาวะปกติไม่มีไฟฟ้า ทั้งนี้เพื่อลดอันตรายจากการสัมผัสของบุคคล (หรือสิ่งมีชีวิตอื่นๆ) และการป้องกันความเสียหาย ที่อาจเกิดขึ้นกับอุปกรณ์ไฟฟ้า

หรือระบบไฟฟ้าในกรณีที่เกิดกระแสลัดวงจรลงดิน โดยทำหน้าที่เป็นตัวนำกระแสที่เกิดขึ้นนี้ให้ไหลผ่านในปริมาณที่มากพอที่จะทำให้อุปกรณ์ป้องกัน (Protective Device) ทำงานได้ ภายในระยะเวลาที่กำหนด (ไพจิตร สุคนธมานและคณะ .2540 : 1)

จากความสำคัญของการต่อลงดินดังกล่าวข้างต้น จะมีความสมบูรณ์ให้ความปลอดภัยต่อผู้ใช้ และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ก็ต่อเมื่อ การต่อลงดินที่หมายถึงการต่อทางไฟฟ้านั้น มีการต่อเสมือนการต่อลงสู่พื้นดิน (Earth) โดยตรง ซึ่งสามารถทำหน้าที่แทนพื้นดินได้ ดังนั้นในการต่อลงดินแต่ละครั้ง ผู้ใช้จำเป็นต้องมีเครื่องมือวัดทางไฟฟ้าที่ใช้วัดค่าความต้านทานจุดลงดินในระบบงานสายโทรศัพท์และใช้วัดเพื่อดำเนินการแก้ไขซ่อมแซมให้ตรงตามข้อกำหนด ซึ่งจะทำให้การวัดความต้านทานในดินนั่นเอง อย่างไรก็ตามเครื่องมือวัดความต้านทานจุดลงดินที่มีใช้อยู่ในประเทศไทยในปัจจุบันนี้ล้วนเป็นเครื่องมือที่ผลิตและนำเข้าจากต่างประเทศ จึงเป็นเครื่องมือที่มีราคาแพงมากทั้งยังเป็นตัวกำหนดต้นทุนการก่อสร้างงานต่อร้อยสายโทรศัพท์ให้สูงขึ้นด้วย แต่จากความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีในประเทศไทยขณะนี้ มีข้อมูลเพียงพอที่จะสนับสนุนหลักการประกอบเครื่องมือวัดความต้านทานจุดลงดิน ซึ่งผู้วิจัยมีแนวความคิดที่จะค้นคว้าออกแบบและสร้างวัสดุอุปกรณ์ต่างที่มีอยู่มาประกอบให้ได้เครื่องมือที่สามารถวัดค่าได้ถึง 2,000 โอห์ม และมีความสอดคล้องตามคุณสมบัติและข้อกำหนดต่างๆตรงตามมาตรฐานขององค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย โดยประสิทธิภาพเทียบเท่ากับเครื่องมือจากต่างประเทศ จึงสามารถทดแทนการนำเข้าเครื่องมือจากต่างประเทศและ ประหยัดเงินตราต่างประเทศ จากการพิจารณาถึงความพร้อมสมบูรณ์ของข้อมูลต่างๆรวมทั้งข้อดีที่จะส่งเสริมให้เสถียรภาพทางธุรกิจของไทยมั่นคงแข็งแรงยิ่งขึ้น จึงทำให้ผู้วิจัยสนใจที่จะออกแบบและสร้างชุดเครื่องมือวัดความต้านทานจุดลงดินขึ้น นอกจากนี้เพื่อเป็นการปรับเปลี่ยนเทคโนโลยีให้เข้ากับโลกดิจิทัล ผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะออกแบบสร้างเครื่องมือวัดความต้านทานจุดลงดินแบบแสดงผลเป็นดิจิทัล เพื่อใช้ในการตรวจสอบวัดค่าความต้านในดินซึ่งสามารถใช้ได้กับงานทั่วไป และยังสามารถใช้ได้กับการตรวจรับงานขององค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย

ความมุ่งหมายของการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ตั้งความมุ่งหมายไว้ดังนี้

1. เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องตรวจวัดค่าความต้านทานจุดลงดิน แบบดิจิทัล ในระบบงานโทรศัพท์ตอนนอก
2. เพื่อหาประสิทธิภาพ ของการใช้งานเครื่องตรวจวัดค่าความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิทัล ในระบบงานโทรศัพท์ตอนนอก

ความสำคัญของการวิจัย

ได้เครื่องตรวจวัดค่าความต้านทานของจุดลงดินแบบดิจิทัลในระบบงานตอนนอกที่สามารถวัดค่าได้ถึง 2,000 โอห์ม ทั้งนี้ยังเป็นการทดแทนการนำเข้าและสามารถประหยัดเงินตราต่างประเทศได้

ขอบเขตของการวิจัย

เพื่อให้การวิจัยในการสร้างเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดิน แบบดิจิตอลในระบบงานโทรศัพท์ตํานานี้บรรลุตามจุดมุ่งหมายที่วางไว้ดังนี้

1. โดยการออกแบบและสร้างเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอลระบบงานโทรศัพท์ที่ใช้วัดความต้านทานจุดหลักดิน (Ground Rod) ซึ่งมีคุณสมบัติ และประสิทธิภาพตามมาตรฐานขององค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย มีขีดความสามารถในการวัด 0 – 2,000 โอห์ม (Ω) ซึ่งแบ่งเป็นย่านของการวัด 3 ย่าน คือ

ย่าน 0.00 – 19.99 โอห์ม ซึ่งมีความละเอียด 0.01 โอห์ม ใช้กระแสทดสอบ 10.0 มิลลิแอมป์
 ย่าน 20.00 – 199.9 โอห์ม ซึ่งมีความละเอียด 0.1 โอห์ม ใช้กระแสทดสอบ 1.0 มิลลิแอมป์
 ย่าน 200.00 – 1999 โอห์ม ซึ่งมีความละเอียด 1.0 โอห์ม ใช้กระแสทดสอบ 0.1 มิลลิแอมป์
 ซึ่งมีส่วนประกอบดังนี้

1.1 เครื่องสร้างสัญญาณทดสอบ ที่ความถี่ 500 Hz จำนวน 1 ชุด

1.2 เครื่องวัด และแสดงผล แสดงผลเป็นตัวเลขทศนิยม 2 ตำแหน่ง 1 ชุด

2. ตัวแปรที่ศึกษา

ประสิทธิภาพการใช้งานของเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอลในระบบงานข่ายสายโทรศัพท์ ตอนนอก

นิยามศัพท์เฉพาะ

การออกแบบชุดเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดิน

หมายถึง การกำหนดลักษณะของอุปกรณ์ไฟฟ้า อิเล็กทรอนิกส์ ที่มีความสัมพันธ์กับการใช้วัสดุอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เพื่อให้สามารถวัดค่าความต้านทานจุดลงดินได้

การสร้างชุดเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดิน

หมายถึง การประกอบวัสดุอุปกรณ์ไฟฟ้า-อิเล็กทรอนิกส์เข้าด้วยกัน และบรรจุลงในกล่องชุดเดียว กัน โดยจัดให้มีความสอดคล้องและสัมพันธ์กันตามแบบที่กำหนด

เครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดิน

หมายถึง ชุดวัสดุอุปกรณ์ไฟฟ้า-อิเล็กทรอนิกส์ที่ผู้วิจัยสร้างขึ้นใช้ตรวจวัดความต้านทานจุดลงดิน ซึ่งปรับเปลี่ยนย่านการวัดและกระแสทดสอบโดยอัตโนมัติ

ความต้านทานจุดลงดิน

หมายถึง ความต้านทานจุดลงดินตามมาตรฐานขององค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย ที่ใช้แสดงค่าการนำกระแสไฟฟ้าจากสายดิน ให้กระจายลงไปในดินซึ่งสามารถวัดค่า และแสดงผลได้ถึง 2,000 โอห์ม

แบบดิจิทัล

หมายถึง สัญลักษณ์ ที่แสดงค่าออกมาเป็นตัวเลข ซึ่งสามารถแสดงค่าได้ตั้งแต่เลข 0 ถึงเลข 9

เครื่องสร้างสัญญาณทดสอบ

หมายถึง เครื่องมือทางไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ที่ผู้วิจัยสร้างขึ้นที่มีความถี่ 500 Mz เพื่อใช้เป็นแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่เพื่อใช้เป็นกระแสทดสอบ

เครื่องวัดและแสดงผล

หมายถึง เครื่องมือทางอิเล็กทรอนิกส์ที่ผู้วิจัยสร้างขึ้นเพื่อใช้วัด สัญญาณทดสอบและแสดงผลของค่าสัญญาณที่วัดได้ออกเป็นตัวเลข

คู่มือการใช้งาน

หมายถึง เอกสารที่แสดงถึงรายละเอียดการใช้งาน การบำรุงรักษาและความปลอดภัยในการใช้งาน

ระบบงานโทรศัพท์ตอนนอก

หมายถึง ลักษณะการสร้างงานวางระบบข่ายสายโทรศัพท์ ที่มีชั้นตอนนอกเหนือจากงานติดตั้งอุปกรณ์ภายในชุมสาย

ประสิทธิภาพ

หมายถึง ลักษณะทางกายภาพในคุณลักษณะทุกประการของเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินที่สามารถวัดและแสดงผลค่าความต้านทานได้ถูกต้องตามเกณฑ์ โดยเปรียบเทียบกับเครื่องปัจจุบันที่ใช้อยู่ในระบบงานข่ายสายตอนนอก ตามมาตรฐานองค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย

รูปลักษณะ

หมายถึง ลักษณะทางการภาพของเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดิน

กรอบแนวคิดในการวิจัย

ตัวแปรที่ศึกษาคือ เครื่องตรวจวัดค่าความต้านทานจุดลงดิน ที่ใช้ในระบบงานสร้างข่ายสายโทรศัพท์ตอนนอก

ตัวแปรที่ศึกษา



บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยศึกษาเพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการออกแบบและสร้างชุดเครื่องมือวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิทัลในระบบงานโทรศัพท์ตอนนอก มีดังต่อไปนี้

1. ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับระบบโทรศัพท์
2. ความรู้เบื้องต้นเกี่ยวกับระบบลงดิน
3. มาตรฐานการสร้างงานจุดลงดินสำหรับงานระบบโทรศัพท์
4. ทฤษฎีในงานอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการออกแบบเครื่องวัดจุดลงดิน
5. การวัดประสิทธิภาพ
6. การออกแบบและสร้างวงจรเครื่องมือวัดความต้านทานจุดลงดิน
7. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับระบบโทรศัพท์

1.1 บทนำ

ในการพูดโทรศัพท์หรือการส่งข่าวสารทางโทรเลขผ่านอุปกรณ์เครื่องโทรศัพท์หรืออุปกรณ์เครื่องโทรเลข สัญญาณต่าง ๆ ทางด้านส่งและทางด้านรับ จะสามารถติดต่อถึงกันได้ โดยผ่านลวดตัวนำ (Conductor)

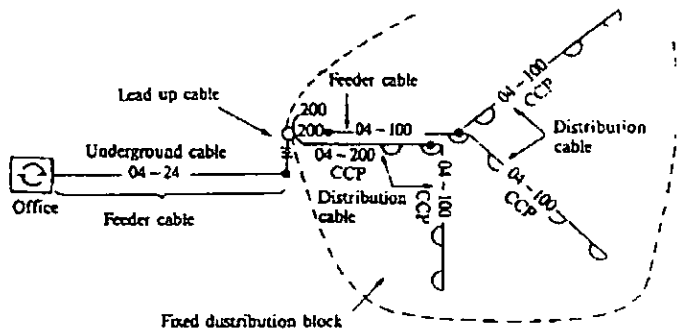
ในข่ายงานทางโทรศัพท์หรือโทรเลขอุปกรณ์ที่ใช้ในทางสื่อสารของผู้ใช้ทั้งหมดจะถูกเชื่อมโยงเข้าที่ทางชุมสายโดยสายเคเบิล ฉะนั้นผู้ใช้บริการทั้งหมดจะสามารถติดต่อถึงกันได้ตามความต้องการ นอกจากนี้ชุมสายที่ตั้งอยู่ในสถานที่ต่าง ๆ ก็จะถูกต่อเชื่อมโยงถึงกันโดยสายเคเบิล เพื่อที่ต้องการให้ผู้ให้บริการสามารถติดต่อ หรือส่งข่าวสารข้อมูลต่าง ๆ ถึงกันได้ ซึ่งประกอบด้วยวัสดุและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้เป็นตัวนำรวมทั้งสิ่งป้องกันและรองรับ ซึ่งเรียกว่า Outside Plant สาย Copper wire, Cable และ Insulated wire ใช้เป็นตัวนำในการส่งข่าวสาร ส่วนเสาไม้กางเขน (Cross-arm) วัสดุ ยึดสาย ฯลฯ สิ่งเหล่านี้เป็นอุปกรณ์รองรับ ส่วนท่อร้อยสาย บ่อพัก และ Manholes ใช้เป็นสิ่งป้องกันสายที่วางใต้ดิน ดังแสดงในภาพประกอบ 1

1.1.1 การจำแนกประเภทสายตอนนอก

1.1.1.1 จำแนกโดยข่ายสาย (Network)

1.1.1.1.1 สาย Subscriber line

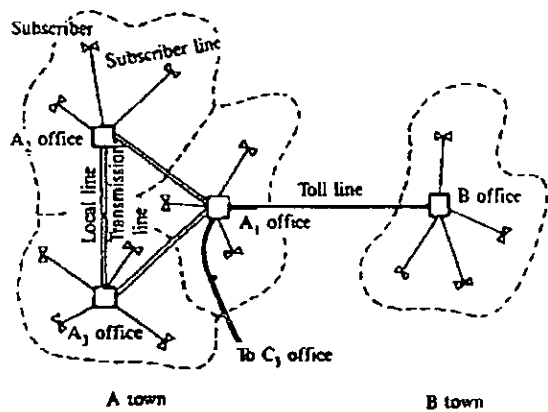
Subscriber line เป็นสายตอนที่ต่อให้ผู้ให้บริการ โทรศัพท์สาธารณะ ตู้สาขา ไปต่อเข้าที่ชุมสายโทรศัพท์กลาง สายเคเบิลที่ใช้งานดังกล่าว เรียกเป็น Subscriber Cable และสายดังกล่าวแยกออกเป็นสองตอน ตอนที่หนึ่งเรียกเป็นสายเคเบิลต้นทาง (Feeder Cable) ส่วนตอนที่สองเรียกสายเคเบิลปลายทาง (Distribution Cable) ซึ่งส่วนแรกคือสายเคเบิลต้นทางเป็นสายที่วางมาจากชุมสายจนกระทั่งถึงจุดที่แยกสายเพื่อที่จะดึงคู่สายไปจ่ายให้ผู้เช่า และส่วนที่สายเคเบิลที่ถูกดึงคู่สายไปจ่ายให้ผู้เช่าเรียกว่าสายเคเบิลปลายทาง ดูภาพประกอบ 1 และภาพประกอบ 2 จุดแยกระหว่างสายเคเบิลต้นทางกับสายเคเบิลปลายทางสามารถแยกที่บ่อพัก หรือตู้ผ่านก็ได้ แล้วแต่การออกแบบขึ้นอยู่กับความสะดวก การประหยัด



ภาพประกอบ 2 เป็นการวางสาย Feeder Cable และ Distribution Cable

1.1.1.1.3 Toll line plant

เป็นงานวางสายที่ต่อระหว่าง Toll office เข้าด้วยกัน ซึ่งตามธรรมดาแล้วจะใช้สาย Coaxial Cable Toll PEF insulated Cable หรือ optical Fiber Cable



ภาพประกอบ 3 แสดงการวางสาย Junction และสาย Toll Cable

1.1.1.2 การแบ่งประเภทโดยวิธีการวางสาย

1.1.1.2.1 งานวางสายเคเบิลอากาศ (over head line plant)

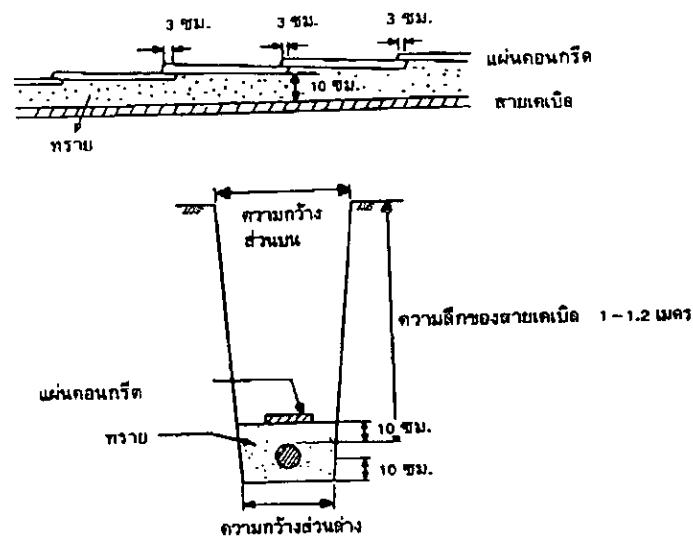
สายส่งที่วางเหนือพื้นดินนั้น ตามธรรมดาแล้ว มักจะถูกรบกวนจากการกระทำของมนุษย์หรือจากสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ ซึ่งส่วนมากแล้วสายที่วางบนพื้นดินจะเป็นสายพวก Subscriber เพราะว่าการวางสายแบบนี้จะประหยัดเมื่อเทียบกับการวางสายใต้ดิน

งานวางสายเหนือพื้นดินนี้จะประกอบด้วยสายเคเบิลประเภทต่าง ๆ ส่วนรองรับที่มีเป็นเสาสายโยง (Guy) สายสะพาน (messenger wire) และอุปกรณ์อื่น ๆ ที่ใช้แขวนสาย งานในการแขวนสายดังกล่าวนี้จะต้องก่อสร้างและติดตั้งให้มีความมั่นคงแข็งแรง เพื่อให้อายุการใช้งานของสายต่อนอกยาวนาน

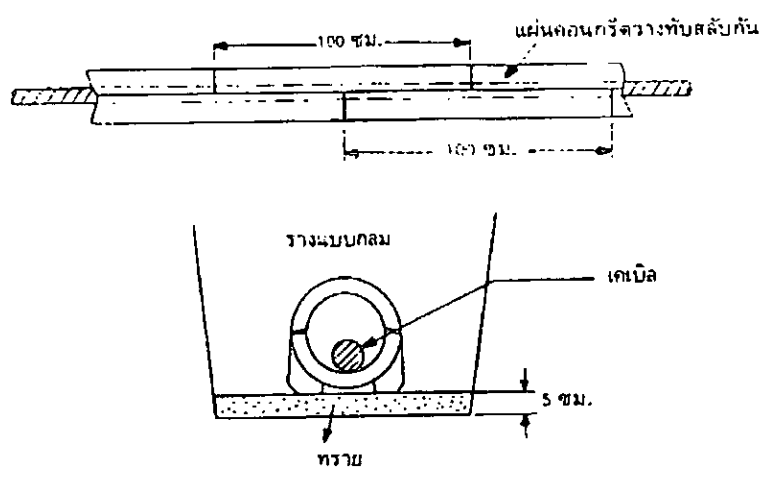
1.1.1.2.2 งานวางสายใต้ดิน

งานวางสายใต้ดิน ซึ่งโดยทั่วไปแล้ว สายจะถูกฝังกลบลงไปใต้ดิน มากกว่า 1 เมตร เพื่อหลีกเลี่ยงการรบกวนจากธรรมชาติ หรือจากการกระทำของมนุษย์ ส่วนราคาก่อสร้างนั้นจะแพงกว่าการวางสายเหนือพื้นดินหลายเท่า สายส่งที่วางใต้ดินนั้นส่วนมากจะเป็นสาย Toll cable สายทางไกลและ

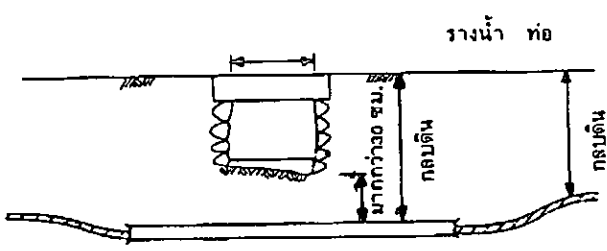
สายเคเบิลต้นทาง สายที่วางใต้ดินจะวางฝังโดยตรง (direct buried Cable) หรือวางในท่อร้อยสายก็ได้ ขึ้นอยู่กับสภาพของถนน การหนาแน่นยานบนถนน หรือความจำเป็นอื่น ๆ ซึ่งจะนำมาใช้ประกอบในการพิจารณาว่าแบบไหนจึงจะเป็นการเหมาะสมและประหยัด สายเคเบิลปลายทาง ถ้ามีความจำเป็นก็จะออกแบบวางเป็นสายใต้ดินก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพของสิ่งแวดล้อม ในเมืองใหญ่ก็มีแนวโน้มที่จะวางสายเคเบิลปลายทางเป็นสายใต้ดินเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ



ภาพประกอบ 4 แผ่นคอนกรีตวางป้องกัน



4.2 รางคอนกรีต



4.3 การป้องกันท่อร้อยสาย

ภาพประกอบ 5 แสดงการวางสายเคเบิลใต้ดินแบบฝังโดยตรงและวิธีการป้องกันสาย

1.1.1.2.3 การวางสายเคเบิลใต้น้ำ

สายที่วางใต้ทะเลสาบหรือในแม่น้ำกว้าง ๆ เรียกว่า Underwater cable ส่วนสายที่วางใต้ท้องทะเลเรียกว่า Submarine cable สายดังกล่าวทั้งสองนั้นจะมีโครงสร้างเป็นพิเศษ ส่วนมากจะเป็นสายที่มีเกราะหุ้ม (Armored Cable)

1.1.1.3 แบ่งตามระบบการส่ง

1.1.1.3.1 การส่งในระบบเสียง (Voice System)

ปกติแล้ว เสียงของคนเราที่พูดสนทนากันทางโทรศัพท์นั้น ไม่มีความจำเป็นที่จะต้องส่งความถี่ ดังกล่าวทั้งหมด ความถี่ในช่วง 300-3400 HZ ที่ใช้ในการพูดคุยทางโทรศัพท์นั้นก็ สามารถที่จะฟังชัดเจนได้ดี ส่วนสายส่งที่ใช้ในระบบนี้ก็คือนำสาย Open wire non-loaded Cable และ loaded Cable การส่งสัญญาณในระบบความถี่เสียงนี้ใช้ส่งสำหรับในส่วนท้องถิ่น, ในระยะทางไกล ๆ , และในระยะทางไม่ไกลนัก

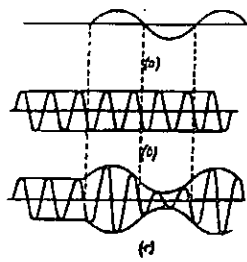
1.1.1.3.2 ในระบบคลื่นพาหะ (Carrier System)

การส่งในระบบคลื่นพาหะนี้ ใช้ความถี่เสียงเข้าไปผสม (Modulate) กับความถี่คลื่นพาหะและจัดให้แถบความถี่กว้างขึ้น เพื่อที่จะ ได้ส่งและรับ พร้อม ๆ กัน หลายช่องสัญญาณ (Channel) ในหนึ่งคู่สายและทางด้านรับนั้น จะต้องมียูปรกรรณสำหรับแยก (Demodulator) เอาสัญญาณความถี่คลื่นพาหะออกให้เหลือแต่ความถี่เสียง การส่งในระบบคลื่นพาหะนั้น มีอยู่หลายระบบด้วยกัน ขึ้นอยู่กับระบบของเครื่องและอุปกรณ์ประกอบต่าง ๆ ยกตัวอย่างเช่น ในระบบ F-24 สามารถส่งได้ 24 ช่องสัญญาณ โดยใช้คู่สายหนึ่งคู่ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเป็นการประหยัดคู่สาย แต่ที่ชุมสายจะต้องมี เครื่องสำหรับผสมความถี่เสียง เข้ากับความถี่คลื่นพาหะ และเครื่องแยกความถี่คลื่นพาหะออก ระหว่างเครื่องส่ง และ เครื่องรับจะต้องติดตั้งสถานีทวนสัญญาณ เพื่อขยายสัญญาณให้มีระดับสูงขึ้นการส่งในระบบนี้ จะไม่เป็นการประหยัด ถ้าการติดต่อสื่อสารระหว่างที่มีระยะทางไกล ๆ และจำนวนผู้ใช้นั้นมีมาก จึงจะเป็นการประหยัดเหมาะที่จะใช้ติดต่อสื่อสารที่มีระยะไกล ๆ และจำนวนผู้ใช้นั้นมีมาก จึงจะเป็นการประหยัด

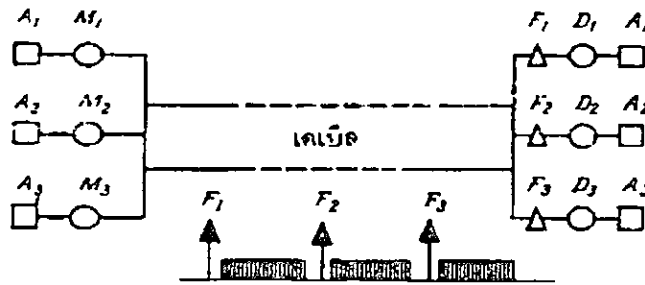
สายที่ใช้ส่งในระบบคลื่นพาหะมีดังนี้

(ก) Open wire carrier system เป็นระบบ ที่เหมาะสมในการสื่อสาร สำหรับการเพิ่มช่องสัญญาณให้กับผู้ต้องการใช้ที่อยู่ห่างไกลออกไปและในเส้นทางนั้นมีการติดตั้งสายประเภทนี้อยู่ก่อนแล้ว การส่งสัญญาณความถี่ในสายดังกล่าวมีอยู่หลายระบบด้วยกัน เช่น ระบบ 2CH, 3CH, 6CH และ 12CH ในปัจจุบันนี้การส่งโดยใช้สาย open wire แทบจะไม่มีใช้เพราะว่าสายที่จะใช้นั้นไม่มีการผลิต

(ข) Non-loaded carrier Cable เป็นสายที่ออกแบบ สำหรับใช้ในระบบ F-24 , F-60 และ X-60 ซึ่งจะต้องวางสายในระยะไกล โดยใช้สายเคเบิล 2 เส้นวางขนานคู่กันไป อีกเส้นหนึ่งสำหรับใช้ส่งและอีกเส้นหนึ่งสำหรับใช้รับ โดยแยกสัญญาณส่งและรับออกจากกัน เพื่อป้องกันการรบกวน (Cross-talk) ซึ่งจะทำให้คุณภาพของเสียงต่ำมาก หรือเรียกว่าการส่งในระบบ 4-wire ดูภาพประกอบ 6 (1) - (5)

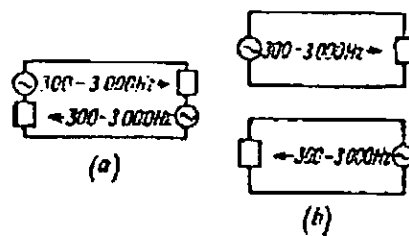


ภาพประกอบ 6 (1) หลักการเบื้องต้นการ Modulation



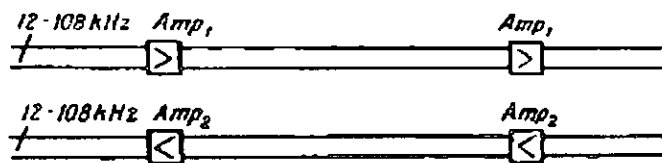
ภาพประกอบ 6 (2) ส่งหลายวงจรโดยใช้ความถี่สูง

A - เครื่องโทรศัพท์ M - ผสมคลื่น F - กรองความถี่ D - แยกความถี่

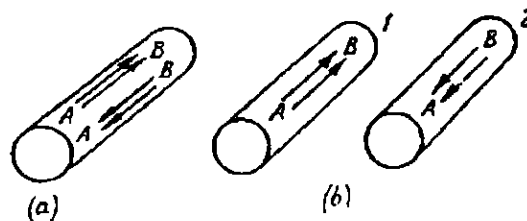


ภาพประกอบ 6 (3) การส่งแบบ 2-W และ 4-W

(a) สาย 2 เส้น (b) สาย 4 เส้น



ภาพประกอบ 6 (4) การส่งแบบ 4-W ความถี่สูง



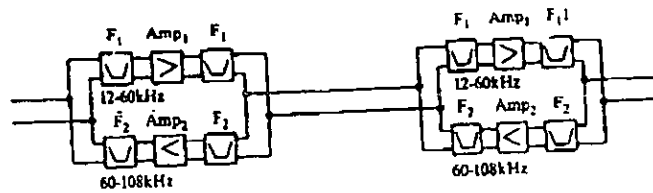
ภาพประกอบ 6 (5) การส่งโดยใช้สายเคเบิล 1 เส้น และสายเคเบิล 2 เส้น

(a) เคเบิล 1 เส้น (b) เคเบิล 2 เส้น

ภาพประกอบ 6 (1) - (5) แสดงการผสมคลื่นความถี่ต่ำกับความถี่สูง และการส่งระบบ 2-W 4-W

(ค) Short-haul Carrier Cable

ในระบบ T-125R ซึ่งใช้สายเคเบิลเป็นแบบ Paper-lead sheath และสายเคเบิล PEF-P toll Cable เป็นสายส่ง เราใช้คู่สาย 1 คู่ สำหรับส่งและรับ โดยมีความถี่ที่ส่งและรับแตกต่างกัน และสายเคเบิลที่ใช้วางใช้เพียง 1 เส้น ระยะทางที่ใช้ส่งประมาณ 25 ก.ม. - 100 ก.ม.



ภาพประกอบ 7 การส่งแบบ 2-W ความถี่สูง โดยใช้ ตัวกรองความถี่แยกจากกัน

(ง) Coaxial Cable

ระบบการส่งเป็นแบบ C-4M, Cp-12 MTr, C-60M และ DC-100M ซึ่งส่งไปในสาย Coaxial cable ชนิด 2.6/9.5 mm. ระบบการส่งแบบ P-4M, และ P-12M สาย coaxial เป็นแบบ 1.2/4.4 mm. ซึ่งสายทั้ง 2 แบบนี้เป็นมาตรฐานที่กำหนด โดย CCITT การออกแบบสาย coaxial ที่มีค่าสูญเสียของสัญญาณน้อยนั้น จะต้องมียอตราส่วนประมาณ 3.6 ในกรณีที่ใช้สาย coaxial เป็นสายส่ง ซึ่งเป็นย่านความถี่สูง จะไม่ทำให้เกิด Cross-talk ดังนั้นไม่จำเป็นที่จะต้องวางสายออกเป็น 2 เส้นเพื่อใช้ในการส่งและรับ ซึ่งจะทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายมาก ไม่เป็นการประหยัด การวางสายเคเบิลส่วนมากจะวางเป็นสายใต้ดิน

คุณสมบัติทั่วไปของสาย coaxial cable มีดังนี้

- (1) การเพี้ยนของสัญญาณมีน้อยเมื่อเทียบกับสายประเภทอื่น ๆ เช่น

Loaded > Carrier > Coaxial

- (2) สัญญาณที่ส่งเข้าไปในสายมีความเร็วสูง การส่งสัญญาณในระบบวิทยุ นั้น จะมีความเร็วเท่ากับแสง แต่การส่งสัญญาณผ่านสายเคเบิลนั้นจะมีความเร็วช้ากว่า ขึ้นอยู่กับประเภทของสายส่ง

Loaded Cable : 7-21% ของความแข็งแรง

Carrier Cable : 64-69% ของความแข็งแรง

Coaxial Cable : 89-95% ของความแข็งแรง

- (3) Cross-talk และเสียงรบกวนต่าง ๆ มีน้อยเพราะสาย Coaxial Cable นั้น แต่ละหลอดจะมี shield หุ้มไว้ที่ Outer conductor และสายเคเบิลแบบนี้ใช้ส่งความถี่สูง จะเกิด skin effect ซึ่งไม่ไปรบกวน circuit ที่อยู่ใกล้เคียงกัน

- (4) มี Loss น้อย (ที่ 100 KHZ) เมื่อเทียบกับสายเคเบิลทั่วไป

α NLC = 1.95 db/km (1.2 m.m Ø)

α COX = 0.75 db/km (2.6/9.5)

ค่าของ α จะเป็นอัตราส่วนกับ $\sqrt{f}$ และค่าของ (frequency characteristic) จะ flat ที่ค่าความถี่สูง

- (5) ค่าของ impedance จะไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นสายชนิดนี้จึงใช้ส่งโทรทัศน์ได้ดี

- (6) แรงเคลื่อนสามารถส่งเข้าไปในสายได้สูงเมื่อเปรียบเทียบกับสายส่งแบบ carrier ซึ่งสามารถส่งได้ 1,000 V ส่วนสาย Coaxial สามารถส่งได้ถึง 5,000 V

(ข) สายเส้นใยแก้ว (Optical Fiber Cable)

สายเส้นใยแสง มีข้อดีอยู่หลายประการเมื่อเปรียบเทียบกับสายเคเบิลประเภทต่างๆ ที่มี

ลวดตัวนำเป็นพวกโลหะ สามารถเอาไปใช้งานในระบบต่าง ๆ ในเครือข่ายทางด้านการสื่อสาร เพราะสายมีน้ำหนักเบา ติดตั้งได้สะดวก มีการสูญเสียของสัญญาณน้อยส่งได้แถบคลื่นกว้าง (Wide band) ซึ่งใช้เป็นสายส่งประเภทต่าง ๆ ได้มากมาย

1.1.2 ความต้องการของงานทางด้านการออกแบบวางสายตอนนอก

งานทางด้านออกแบบวางแผนสายตอนนอกนั้น จะต้องมีความสมบัติทางไฟฟ้าเพียงพอ เพื่อให้การติดต่อสื่อสารมีคุณภาพดี ปราศจากสิ่งรบกวนต่าง ๆ

ฉะนั้นอุปกรณ์ที่ใช้ติดตั้งจะต้องมีความมั่นคงแข็งแรง และป้องกันอันตรายต่าง ๆ จากภัยธรรมชาติการกระทำของมนุษย์ ฯลฯ และงานต่าง ๆ ดังกล่าวนี้อาจต้องกระทำโดยประหยัด เพื่อเป็นงานตอบสนองความต้องการดังกล่าวนี้ที่จะต้องพิจารณาทุก ๆ ขั้นตอนของแนวทางการด้านวิศวกรรมการออกแบบวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ ตลอดจนถึงงานด้านบำรุงรักษา ซึ่งจะได้กล่าวเป็นข้อ ๆ ดังต่อไปนี้

1.1.2.1 ค่าความต้านทานของฉนวน

ตัวค่าของฉนวนที่ห่อหุ้มสาย หรืออุปกรณ์ต่างๆ ที่ไม่ดีก็ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานเสียงรบกวนจากภายนอก และเสียงรบกวนภายในคู่สายหรือวงจรใกล้เคียง ดังนั้นวัสดุที่นำมาใช้เป็นฉนวนจะต้องมีคุณภาพที่ดี ยกตัวอย่างเช่น ถ้าเป็นสาย open wire ลูกถ้วยที่ใช้ติดตั้งสกปรก หรือสายไปแตะพวกกิ่งไม้ก็ทำให้เกิดรูรั่วขึ้นกับเปลือกหุ้มสาย ก็จะทำให้น้ำและความชื้นเข้าไปในสายได้ ซึ่งจะทำให้ฉนวนที่หุ้มลวดตัวนำ เกิดเสื่อมสภาพลงทันที ถ้าเป็นเช่นนั้นแล้ว ก็จะทำให้ความเสียหายกับสายมาก ซึ่งจะเป็นร้อยหรือเป็นพัน ๆ คู่ ดังนั้นพวกสายเคเบิลต้นทางจะต้องอัดแก๊สเพื่อป้องกันน้ำและความชื้นไม่ให้เข้าไปในสายได้ เมื่อเปลือกหุ้มสายเกิดรูรั่วเล็ก ๆ ขึ้น แก๊สที่ใช้อัดเข้าไปในสายนั้นเป็นพวก dry air หรือไนโตรเจนแก๊สก็จะรั่วออก

1.1.2.2 ความคงทนของค่าไดอิเล็กทริก

งานทางด้านข่ายสายตอนนอกนั้น จะเห็นได้ว่า อุปกรณ์ต่างๆ จะทำการติดตั้งไว้ภายนอก ซึ่งมักจะได้รับอันตรายจากฟ้าผ่าหรือจากพวกสายไฟแรงสูง ดังนั้นวัสดุและอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ติดตั้งจะต้องมีความคงทนและป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้นกับอุปกรณ์และชีวิตของมนุษย์ และในสายส่งนั้นจะถูกป้อนแรงไฟเข้าไปด้วย เพื่อที่ไปเลี้ยงสถานีทวนสัญญาณระหว่างเส้นทางที่สายเดินผ่านไป ดังนั้นค่าฉนวนที่หุ้มตัวนำจะมีคุณภาพสูงเพื่อป้องกันไม่ให้อันตรายเกิดขึ้นกับสายส่งได้

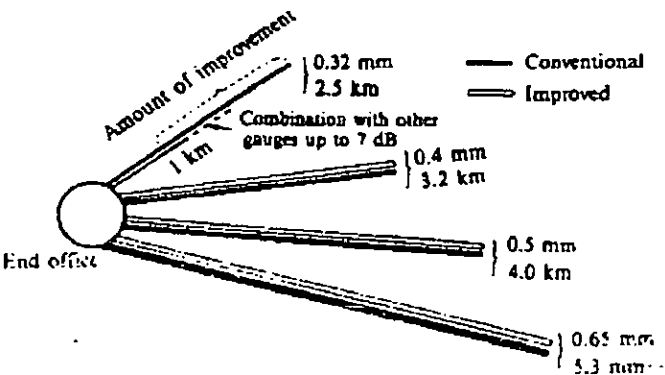
1.1.2.3 การสูญเสียพลังงานและค่าความต้านทานของสายส่ง ต้องอยู่ภายในค่ากำหนดดังแสดงในตาราง 1 และ 2 และภาพประกอบ 8 ใน การจะให้พลังงานที่สูญเสียลดน้อยลงนั้นที่ขึ้นกับอุปกรณ์ที่ใช้ในการติดตั้งและสมิมของสายเคเบิลที่ใช้วาง พร้อมทั้งการกำหนดแผนงานที่จะดำเนินการด้วย

ตาราง 1 กำหนดค่าสัญญาณที่สูญเสียของสายส่ง จากชุมสายโทรศัพท์ไปยังผู้เช่า

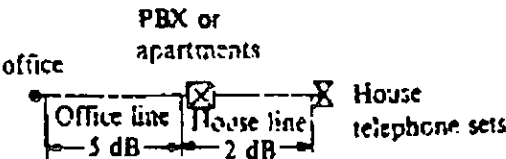
Office Hierarchy	Single Telephone Office Several Telephone Office		Subscriber Loss Allocation	Reference
District Office, Regional Office, Central Office	Single telephone office		8 dB	When line concentrators are used, the loss is allocated between office – line concentrator and line concentrator – subscribers.
	Multi telephone office	Toll office branch office	8 dB	
		Non toll office branch office	7 dB	
End Office	Single telephone office		7 dB	
	Several telephone office			
Subordinate Office			7 dB	

ตาราง 2 ค่าความต้านทานทางกระแสไฟตรงของสายส่ง จากชุมสายโทรศัพท์ไปยังผู้เช่า

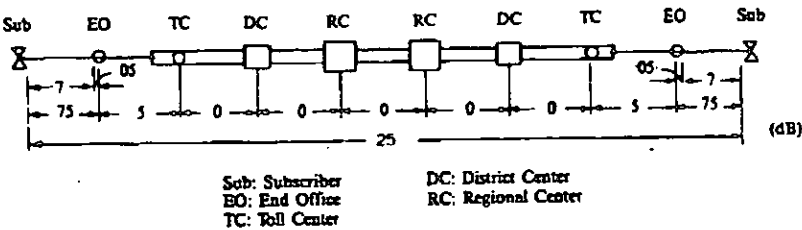
	Switching Equipment	D.C. Resistance	
	Automated A·H type	1,000 Ω	
	Automated crossbar C1·C2 type	1,000 Ω	
	Automated crossbar C3·C4·C5·C400-C460, DEX	1,500 Ω	
	Automated A·H type and crossbar	1,000 Ω	
	Common battery type	800 Ω	
	Magnetic type	1,000 Ω	



ภาพประกอบ 8 ความยาวของสายสามารถวางได้ไกลในการกำหนดสัญญาณที่สูญเสียในสาย 7 dB



ภาพประกอบ 9 กำหนดสัญญาณที่สูญเสียในแต่ละช่วง



ภาพประกอบ 10 ข่ายสาย trunk และค่าสัญญาณที่สูญเสียในแต่ละช่วง

ระยะทางไกลสุดของสายเคเบิลแต่ละขนาดที่วางในเมื่อกำหนดค่าของสายให้ Loss ได้ไม่เกิน 7db เส้นผ่าศูนย์กลางของลวดตัวนำ ขนาด 0.32 ม.ม. สามารถวางได้ไกล 2.5 กิโลเมตร แต่ค่า

Impedance ของขนาด 0.32 มม. จะไม่ Matching กับเครื่องโทรศัพท์แบบ 600 ดังนั้นจึงจำกัดแค่ 1 กิโลเมตร

1.1.2.4 การสมดุลการไฟฟ้า

สาย open wire จำนวนคู่สายที่ติดตั้งบนเสานั้น มีจำนวนหลาย ๆ คู่สาย ส่วนสายเคเบิลเป็นร้อยเป็นพันคู่สายซึ่งรวมอยู่ด้วยกัน เมื่อเป็นเช่นนั้นแล้ว Cross-talk ก็ย่อมจะเกิดขึ้น แต่จะอย่างไรจึงให้ Cross-talk ที่เกิดขึ้นนั้น ให้มีน้อยที่สุดเท่าที่จะทำได้ ในทางทฤษฎีนั้นถ้าสามารถที่จะทำให้เกิดการสมดุลทางไฟฟ้าแล้ว Cross-talk ก็จะไม่เกิดขึ้น ในการลด Cross-talk สำหรับสายเคเบิลนั้นก็คือคู่สายจะตีเกลียวกันไปตลอดความยาวของสายเคเบิล ส่วนสาย open wire นั้นจะทำการไขว้สาย (Transposition)

ถ้าเป็นสายที่ส่งความถี่สูง ก็จะต้องให้ความสำคัญเป็นพิเศษ ในเรื่องของการสมดุลทางไฟฟ้า จะมีการทำ Test splice เพื่อให้ Cross-talk ที่เกิดขึ้นนั้นมีน้อยลง

1.1.2.5 ค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งจะต้องเท่ากันตลอด

ถ้าค่าอิมพีแดนซ์ของสายส่งแต่ละช่วงไม่เท่ากันแล้วก็จะทำให้คุณภาพของสายส่งเลวลง ซึ่งก็จะมีเสียงรบกวนเกิดขึ้น ซึ่งไม่เป็นที่ต้องการ และ ถ้าสายส่งที่ใส่ Loading Coil มีระยะห่างระหว่าง Loading เกินมาตรฐานก็จะทำให้เกิด Echo และ singing ขึ้น ในระบบสายส่งเคเบิลแกนร่วม (coaxial Cable) ถ้าค่าอิมพีแดนซ์ไม่สม่ำเสมอจะทำให้เกิดการสะท้อนกลับของสัญญาณ (reflection) ซึ่งจะทำให้คุณภาพของสายส่งเลวลง ดังนั้น ในขั้นตอนการผลิตและการติดตั้งก็จะทำให้ความสนใจเป็นพิเศษ

1.1.2.6 ความคงทนแข็งแรง

วิศวกรรมทางด้านข่ายสายตอนนอก จะต้องคำนึงถึงสิ่งรบกวนต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นจากภัยธรรมชาติ เช่น พายุไต้ฝุ่น การเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ อุทกภัย ดังนั้นวัสดุอุปกรณ์ ที่จะนำมาใช้ในการติดตั้งจะต้องมีคุณภาพที่ดี และในขั้นตอนการออกแบบนั้นก็ต้องดำเนินถึงเกณฑ์ปลอดภัยของวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการติดตั้งด้วย การกำหนดเส้นทางในการติดตั้งวางสาย ก็จะต้องพิจารณาถึงความปลอดภัย อันจะเกิดจากน้ำท่วม การยุบพังของพื้นดิน ควรจะหลีกเลี่ยงในเส้นทางดังกล่าว ส่วนการฝังสายใต้พื้นดิน ไปตามถนน ซึ่งพื้นดินไม่มั่นคง การเลื่อนไหลของลวดตัวนำ (Conductor) อันเนื่องจากการวิ่งผ่านไปมาของยานพาหนะบนถนน ซึ่งจะต้องพิจารณาให้ความสนใจในการเลือกเส้นทาง และการวางสายในพื้นที่ดังกล่าวจะต้องมีสิ่งป้องกันเพียงพอ

1.1.2.7 การวางสายจะต้องปลอดภัยจากอันตรายและสิ่งรบกวน

เมื่อสายเคเบิลวางใกล้กับสายไฟแรงสูง หรือใกล้กับรถไฟไฟฟ้า ซึ่งจะได้รับอันตรายจากสายไฟแรงสูง และเสียงรบกวน (Noise) ต่าง ๆ เกิดขึ้น ถ้าสายเคเบิลไปแตะกับสายไฟแรงสูงก็จะเกิดอันตรายขึ้นกับผู้ที่ใช้โทรศัพท์ และทำให้อุปกรณ์ต่าง ๆ เกิดการเสียหาย ดังนั้นในการติดตั้งของสายควรจะวางให้ห่างจากสายไฟแรงสูงหรือถ้าไม่มีทางหลีกเลี่ยงได้ก็จะต้องมีอุปกรณ์ป้องกันอันตรายดังกล่าว และในกรณีสายเคเบิลใต้ดินที่วางอยู่ใกล้กับรถไฟไฟฟ้า สายมักจะเกิดการสึกกร่อนทางไฟฟ้า (Electrolytic corrosion) เนื่องจากการรั่วไหลของกระแสไฟ ดังนั้นการวางสายในสถานที่ดังกล่าวควรจะหลีกเลี่ยงหรือหาอุปกรณ์ที่เหมาะสมมาป้องกัน รวมทั้ง การวางสาย open wire หรือสายเคเบิลผ่านไปยังสถานที่ที่มีฟ้าผ่าเกิดขึ้นบ่อยครั้งก็ควรจะมียุทูปกรณ์ป้องกันฟ้าผ่า เพื่อไม่ให้เกิดอันตรายต่อผู้ใช้และอุปกรณ์ที่ติดตั้งไว้

1.1.2.8 การติดตั้งวางสายจะต้องสะดวกต่อการบำรุงรักษา

การเลือกเส้นทางและการติดตั้งอุปกรณ์งานข่ายสายตอนนอก จะต้องคำนึงถึงความสะดวกของงานการบำรุงรักษาเมื่อสายและอุปกรณ์เกิดเสียหาย

1.1.2.9 โครงข่ายงานการวางสายและการติดตั้งจะต้องประหยัด

ตามที่ได้อธิบายมาแล้ววัสดุและอุปกรณ์ต่างๆ จะต้องเลือกให้เหมาะสมกับงาน และความสำคัญของสายที่วางซึ่งมีความแตกต่างกัน เช่น การวางสาย Carrier, สาย coaxial, และสาย optical Fiber ซึ่งจะต้องให้ความระมัดระวังเป็นพิเศษ เพื่อความมั่นคง และคุณภาพของสาย ดังนั้นอุปกรณ์ที่ใช้ก็จะต้องเลือกเพื่อความเหมาะสมและประหยัด

1.1.3 การพัฒนางานทางด้านข่ายสายโทรศัพท์ตอนนอก

ในระยะเริ่มแรกของการวางสายเพื่อการติดต่อสื่อสารนั้นใช้สาย open wire ต่อมาความเจริญของบ้านเมืองมีมากขึ้น ความต้องการใช้โทรศัพท์ก็เพิ่มมากขึ้นเป็นเงาตามตัว ดังนั้นสาย open wire ที่วางอยู่เดิมก็จะต้องรื้อออก โดยเอาสายเคเบิลมาแทนเพราะเหตุว่าสาย open wire นั้นไม่เหมาะสมที่จะใช้เมื่อมีจำนวนผู้ใช้โทรศัพท์มาก เพราะต้องการเนื้อที่ติดตั้งมาก ไม่สวยงาม และยังได้รับผลกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาวะอากาศและสิ่งรบกวนอื่น ๆ อีกมากมาย

สายเคเบิลเหมาะที่จะใช้วางในสถานที่ซึ่งมีผู้ใช้โทรศัพท์มาก เพราะใช้เนื้อที่ในการติดตั้งน้อย สวยงามไม่เกะกะ แต่สายเคเบิลนั้นมีการสูญเสียพลังงานภายในสายมาก เพราะลวดตัวนำมีขนาดเล็กจึงไม่เหมาะสมที่จะใช้วางในระยะทางไกล ๆ ต่อมาได้มีการพัฒนาสาย Loaded เคเบิลขึ้นมาเพื่อที่จะลดพลังงานที่สูญเสียภายในสายให้น้อยลง แต่สายพวก Loaded นั้นก็มีผลเสียตามมาเช่นความเร็วของสัญญาณที่ส่งไปจะช้าลง ไม่สามารถที่จะส่งความถี่สูง ๆ ได้ เนื่องจาก Cut-off Frequency และค่า Impedance ในสายจะไม่คงที่ ซึ่งจะมีปัญหาตามมา เช่นเกิด singing, echo และ time delay

ต่อมาจึงได้พัฒนาเทคนิคการส่งระบบ carrier เพื่อที่จะแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นเหล่านี้ และระบบ Carrier นี้จะดีกว่าและประหยัดกว่าในการส่งระยะทางไกล (Toll circuits) ความก้าวหน้าในการพัฒนาเทคนิคการส่งความถี่สูง ๆ นั้นก็เพื่อต้องการจำนวนช่องสัญญาณส่ง (channel) ให้ได้หลาย ๆ ช่อง สัญญาณที่ส่งเข้าไปใน 1 คู่สาย ต่อมาก็ได้พัฒนาขึ้นเรื่อย ๆ จนสามารถส่งได้เป็นหลายช่องสัญญาณ สายเคเบิลที่ส่งในระบบ Carrier นั้นก็มีขีดจำกัด เกี่ยวกับเรื่อง Cross-talk ในการส่งที่ความถี่สูง ๆ

สายเคเบิลแกนร่วม (Coaxial Cable) จะไม่เกิด Cross-talk ในการส่งความถี่สูง ๆ ปัจจุบันนี้สายเคเบิลแกนร่วมสามารถที่จะส่งได้ 960-10,800 ช่องสัญญาณ ในช่วงเริ่มแรกของการผลิตสายเคเบิลใช้กระดาษเป็นฉนวนหุ้มลวดตัวนำ และใช้ตะกั่วเป็นเปลือกหุ้มสาย (Sheath) แต่ในปัจจุบันนี้วัสดุพลาสติกเป็นฉนวนและเปลือกหุ้มสายเพราะวัสดุพลาสติกนั้นมีข้อดีอยู่หลายอย่าง เช่น ป้องกันความชื้น น้ำหนักเบา ทนต่อการสึกกร่อน ทนแรงไฟได้สูง ทนต่อแรงกระแทกและการสั่นสะเทือนได้ดี

สายเคเบิลที่หุ้มด้วยวัสดุพลาสติกนั้นจะสามารถลดอัตราการเสียหายของสายลงได้อย่างมากและยังง่ายต่อการติดตั้งวางสาย และง่ายในเรื่องการบำรุงรักษา ข้อดีต่าง ๆ ที่ได้อธิบายมาแล้วนี้ นำมาซึ่งการพัฒนาของแนวความคิดใหม่ ๆ ในระบบการจ่ายสาย และในระบบทางวิศวกรรมข่ายสาย

1.1.4 ข้อสำคัญที่จะต้องคำนึงถึงในการออกแบบ

เมื่อได้รับงบประมาณในการก่อสร้างแล้ว ก็จะต้องเริ่มออกแบบงานก่อสร้างของแต่ละงาน ซึ่งจะต้องให้มีความชัดเจนแน่นอนของงานแต่ละงาน โดยคำนึงถึงงบประมาณด้วย ในการกำหนดแผนงานแต่ละงานนั้นก็ต้องมีการประชุมปรึกษาหารือกันในการออกแบบ เพื่อให้ตรงกับจุดประสงค์และความต้องการ รวมทั้งให้เหมาะสมกับสภาพแวดล้อมของสถานที่นั้น ๆ ซึ่งจะต้องคำนึงถึงหัวข้อดังต่อไปนี้

1.1.4.1 ทางด้านเทคนิค

จุดประสงค์สูงสุดของงานก่อสร้างงานด้านข่ายสายโทรศัพท์ ก็คือการให้บริการในการติดต่อสื่อสารให้มีคุณภาพดีที่สุด ซึ่งจะต้องคำนึงถึงทางด้านเทคนิคต่างๆ ด้วย เช่น อุปกรณ์ที่ใช้ในชุมสาย (Switching) สายส่ง ความคงทนแข็งแรง

1.1.4.2 งานออกแบบจะต้องประหยัด

ตามปกติแล้วงานออกแบบก็มีทางเป็นไปได้อยู่หลายแบบด้วยกัน เพื่อให้งานนั้นบรรลุผลตามความมุ่งหมาย ซึ่งในแต่ละแบบนั้นก็จะต้องมีการเปรียบเทียบ เลือกวิธีประหยัดที่สุด และให้ผลประโยชน์สูงสุด

1.1.4.3 นำเอาเทคโนโลยีใหม่ ๆ มาใช้

การติดต่อสื่อสารในระบบต่างๆจะต้องมีการปรับปรุงดัดแปลงเอาเทคโนโลยีใหม่ๆ มาใช้ เช่น ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ ด้านวิศวกรรม ก็เพื่อที่จะเพิ่มประสิทธิภาพในการให้บริการได้สูงขึ้น รวมทั้งโครงการที่จะขยายงานในอนาคตด้วยและแนวโน้มก็ได้นำเทคนิคและอุปกรณ์มาใช้จะต้องไม่มีการเปลี่ยนแปลงในอนาคตอันใกล้

1.1.4.4 สิ่งอำนวยความสะดวกที่ใช้จะต้องคำนึงถึงสถานที่นั้น ๆ ด้วย

อุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ติดตั้งในระบบข่ายสายตอนนอกนั้น จะได้รับอิทธิพลโดยตรง จากสภาพอากาศ ลักษณะของภูมิประเทศ ผังเมือง ถนน และอื่น ๆ อีกมาก การออกแบบก่อสร้างก็จะต้องให้ความแข็งแรง และกลมกลืนกับสภาพแวดล้อมต่าง ๆ

1.1.4.5 อุปกรณ์ที่ใช้ติดตั้งนั้นจะต้องให้ความมั่นใจและมีความมั่นคงแข็งแรง

งานในด้านการติดต่อสื่อสารนั้นมีความสัมพันธ์ใกล้ชิดต่อการให้บริการแก่สังคมเป็นอย่างมาก ดังนั้น อุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้จะต้องให้ความมั่นใจและมั่นคงแข็งแรง ถึงแม้ว่าในกรณีที่อุปกรณ์ได้รับความเสียหายอันเกิดจากแผ่นดินไหว ใต้ฝุ่น ฯลฯ ซึ่งจะต้องรีบแก้ไข ซ่อมแซม ให้คืนสู่สภาพปกติโดยเร็ว เพื่อให้การติดต่อสื่อสารได้ปกติ ตลอดทั้งสิ่งรบกวนต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นก็จะต้องไม่ให้มี

1.1.4.6 พิจารณาถึงการใช้อุปกรณ์ที่มีอยู่ให้เกิดประโยชน์ หรือจะมีการเปลี่ยนแปลง

ให้พิจารณาถึงการใช้อุปกรณ์ที่มีอยู่เดิมให้เกิดประโยชน์ให้มากที่สุด ในเมื่ออุปกรณ์นั้น ๆ ยังสามารถใช้งานต่อไปได้ดี หรือแก้ไขดัดแปลง เพื่อให้การออกแบบนั้นประหยัดขึ้น

1.1.4.7 กำหนดระยะเวลาการออกแบบ

งานก่อสร้างทางด้านข่ายสายนั้นบางครั้งก็จะไม่สะดวก เพราะไปตรงกับงานในฤดูกาลเพาะปลูกการเก็บเกี่ยว และการก่อสร้างถนน ฯลฯ ดังนั้น ระยะเวลาการออกแบบ และการก่อสร้าง ก็จะต้องนำมาพิจารณาด้วย เพื่อให้สอดคล้องสะดวกในการติดตั้งและงานก่อสร้าง เพื่อให้งานนั้นดำเนินไปด้วยความราบรื่น

1.2 สายเคเบิลโทรศัพท์ประเภทต่าง ๆ

สายเคเบิลโทรศัพท์ได้มีการพัฒนาขึ้นมาเรื่อย ๆ เพื่อที่ใช้สายนั้นมีประสิทธิภาพในการทำงานและความเชื่อถือ ตลอดจนเสียค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาต่ำ สะดวกและง่ายในการออกแบบ ในบทนี้จะได้กล่าวถึงสายที่ได้นำมาใช้ในระยะเริ่มแรก จนถึงปัจจุบัน

1.2.1 สายเคเบิลที่ลวดตัวนำเป็นโลหะ (Metallic Cable)

1.2.1.1 สายแบบที่ฉนวนเป็นกระดาษและเปลือกหุ้มสายเป็นตะกั่ว

1.2.1.1.1 การนำเอาสายไปใช้งาน

สายเคเบิลประเภทนี้ จะวางจากชุมสายโทรศัพท์ไปยังบ้านผู้เช่า (subscriber Cable) ซึ่งจะใช้อ้างเป็นสายเคเบิลอากาศ (over head cable) หรือใช้อ้างเป็นสายใต้ดิน (Underground Cable) ก็ได้ซึ่งอยู่กับจำนวนคู่สายเคเบิลและสภาพแวดล้อม สายเคเบิลที่มีจำนวนคู่สายน้อยกว่า 200 คู่จะวางเป็นสายเคเบิลปลายทาง (Distribution Cable) ส่วนสายเคเบิลที่มีจำนวนคู่สายมากกว่า 400 คู่จะให้วางเป็นสายเคเบิล

ต้นทาง (Feeder Cable) สายเคเบิลที่ใช้เป็น Trunk จะมีค่า Capacity Unbalance ต่ำกว่าสาย Subscriber เคเบิล สาย Trunk ตามธรรมดาแล้วจะใช้เป็นพวก Loaded เคเบิล

1.2.1.1.2 โครงสร้างของสาย

1.2.1.1.2.1 ลวดตัวนำ (Conductor) ลวดตัวนำเป็นทองแดงอ่อน (Annealed Copper) มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.4 มม. 0.5 มม. 0.65 มม. และ 0.9 มม.

1.2.1.1.2.2 ฉนวนหุ้ม (Insulation) เป็นเทปกระดาษ (Paper tape) หรือ เป็นแบบ pulp

1.2.1.1.3 Quad

ลวดตัวนำแต่ละเส้นที่ถูกหุ้มฉนวนแล้ว ตามสีที่ต้องการจำนวน 4 เส้น นำมาตีเกลียวเข้าด้วยกันเพื่อทำเป็นแบบ Star-Quad

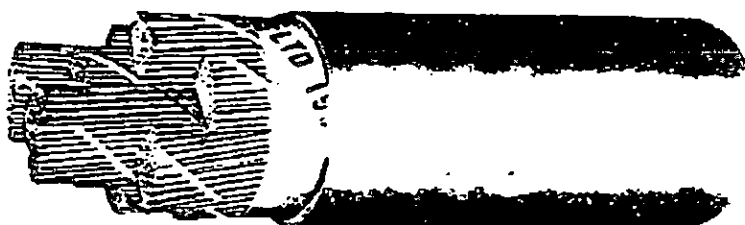
1.2.1.1.4 การพันเกลียวแต่ละชั้น (Stranding)

สายเคเบิลที่มีจำนวนคู่น้อยกว่า 200 คู่จะทำเป็นชั้น ๆ (Layer) และแต่ละชั้นจะมี Tracer Quad อยู่ 1 Quad เพื่อสำหรับการนับคู่สาย

ทิศทางการพันของแต่ละชั้น จะมีทิศทางตรงข้ามกัน ส่วนระยะ pitch ในแต่ละ Quad ที่ใกล้เคียงกันจะมีระยะ Pitch แตกต่างกันไป เคเบิล 100 คู่ ประกอบด้วย 51 Quad และ 200 คู่ ประกอบด้วย 102 Quad สายเคเบิลที่มีจำนวนคู่มากกว่า 400 คู่ จะทำเป็นแบบ Unit ในแต่ละ Unit จะประกอบด้วยหลาย ๆ ชั้น แต่ละชั้นจะมี Tracer Quad อยู่ 1 Quad ส่วน Unit นั้น จะมี Tracer Unit และ unit ธรรมดาเพื่อสะดวกและง่ายในการเลือก Unit

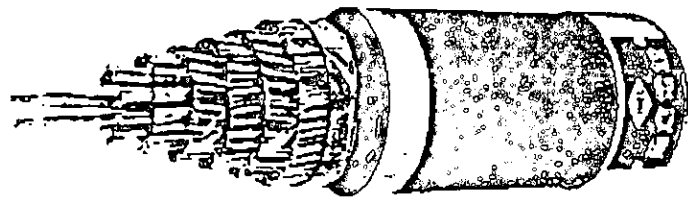


ภาพประกอบ 11(1) ฉนวนเป็น Pulp ภาพประกอบ 11(2) ฉนวนที่หุ้มลวดตัวนำเป็นเทปกระดาษ
ภาพประกอบ 11 ฉนวนที่หุ้มเป็นกระดาษ

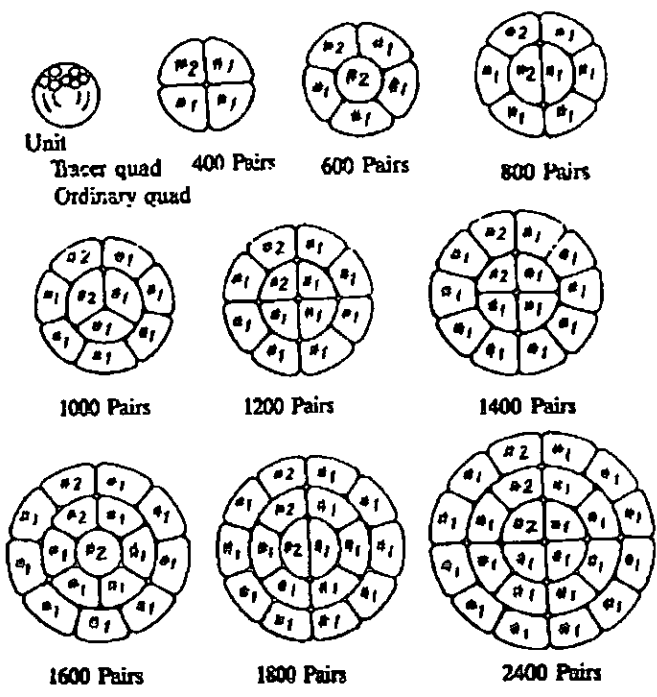


0.5 mm 1200-Pair Unit Type Cable

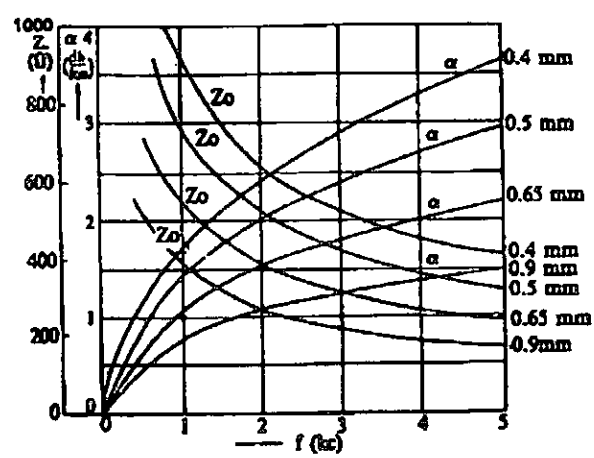
ภาพประกอบ 12 แสดงสายเคเบิลที่เปลือกหุ้มเป็นตะกั่วและลวดตัวนำรวมกันเป็นแบบ Unit



ภาพประกอบ13 ลวดตัวนำจัดเป็นแบบชั้น ๆ (layer type)



ภาพประกอบ14 การจัด Unit



ภาพประกอบ15 คุณสมบัติสายส่ง

1.2.1.1.5 เปลือกหุ้มสาย

เป็นตะกั่วแอลลอย(lead alloy) มีส่วนผสมของดีบุกหรือแอนติโมนีเส้นผ่าศูนย์กลางไม่เกิน 67 มม. เปลือกตะกั่วที่หุ้มสายจะต้องทนแรงดันของแก๊สได้ 3 กิโลกรัม/ตารางเซนติเมตร เป็นเวลานานมากกว่า 1 ชั่วโมง

1.2.1.1.6 คุณสมบัติทางไฟฟ้าทั่วไป

- 1. ความต้านทาน : ค่าสูงสุดที่ 20 °C
 - 0.4 mm 147.5 ohms/km
 - 0.5 mm 93.5 ohms/km
 - 0.65mm 56.5 ohms/km
 - 0.9 mm 29.0 ohms/km
- 2. ค่าความต้านทานของฉนวน
 - ต้องไม่น้อยกว่า 2,000 megohms/km ที่ 20 °C
- 3. ประจุเหนี่ยวนำ
 - ค่าเฉลี่ย : 0.050 microfarads/km ที่ความถี่ 1,000 HZ
- 4. ความทนแรงเคลื่อนของฉนวน
 - D.C 500 Volts ในระยะเวลา 1 นาที
- 5. ความไม่สมดุลของค่าแอดพปาซิแตนซ์ ค่าไม่สมดุลของคาปาซิแตนซ์ วัดที่ความถี่ 1,000 HZ จะต้องมิต่ำไม่มากกว่าค่าที่แสดงในตาราง 3

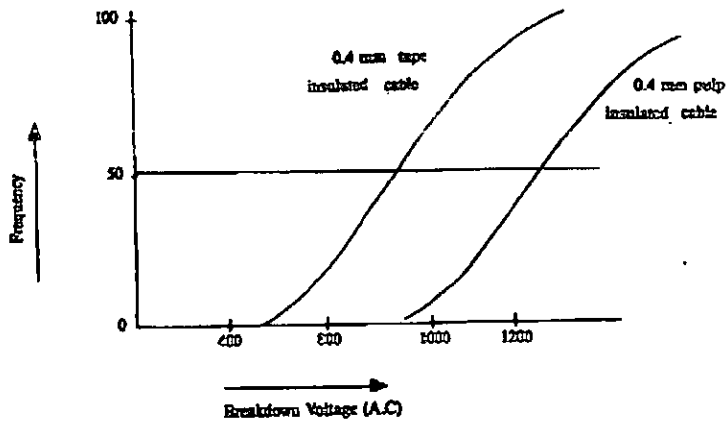
ตาราง 3 การไม่สมดุลของค่า capacitance

	Mean value	Maximum value
Unit type cable	For local use 300 µF/500 m	1,600 µF/500 m
	For junction use 100 µF/150 m	600 µF/150 m
Concentric layer type cable	300 µF/500 m	1,600 µF/500 m

Note: The above table shows the value for standard length $L_0=150$ m or 500 m.
In other cases :
Not less than 100 m.: $\sqrt{L/L_0}$
Less than 100 m.: $\sqrt{100/L_0}$
Key: L = length in meter of cable under test.

สายเคเบิลที่ฉนวนเป็นแบบ pulp นั้นความหนาของ pulp ที่หุ้มลวดตัวนำจะมีความหนาที่หุ้มสม่ำเสมอดีกว่าแบบที่หุ้มด้วยเทปกระดาษ และ pulp จะเกาะติดแน่นอยู่กับลวดตัวนำ ฉะนั้นจึงมีคุณสมบัติดีกว่าแบบเทปกระดาษ ซึ่งสามารถแบ่งเป็นข้อ ๆ ดังนี้คือ

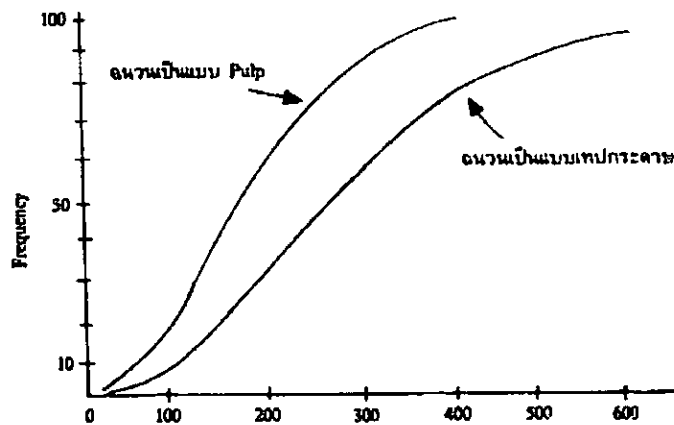
5.1 คุณสมบัติทางไฟฟ้า pulp จะมีค่าทนแรงดันไฟฟ้าสูงกว่า และการไม่สมดุลทางไฟฟ้ามีน้อยกว่า



ภาพประกอบ 16 เปรียบเทียบ Breakdown Voltage

สายเคเบิลแบบ pulp จะมี breakdown voltage สูงกว่าแบบสายเคเบิลที่มีค่าฉนวนเป็นเทปกระดาษประมาณ 20%

ค่า Electrostatic Unbalance ในภาพประกอบ 17 แสดงการทดสอบสายเคเบิลแบบ Star Quad Unit 0.65 มม. 1,000 คู่ ของ pulp Insulated ซึ่งจะเห็นว่าคุณภาพดีกว่าแบบเทปกระดาษ



ภาพประกอบ 17 ค่าแสดงเปรียบเทียบ Electrostatic Unbalance

5.2 ความคงทนในสายเคเบิลแบบ pulp กระดาษจะเกาะติดแน่นกับลวดตัวนำแม้ว่าจะงอ หรือบิดสายไปมากก็ตาม จะไม่ทำให้ลวดตัวนำเกิดตะกันได้ ซึ่งทำให้เกิดการรั่วของกระแสไฟ

1.2.1.2 เคเบิลฉนวนกระดาษ (Paper insulated stalpeth cable)

1.2.1.2.1 การนำเอาไปใช้งาน

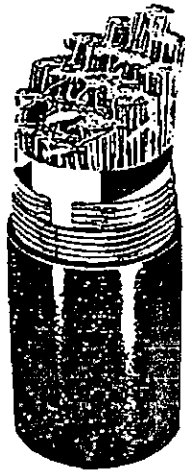
สายเคเบิลประเภทนี้นำไปใช้วางเป็นสายเคเบิลต้นทางสาย Junction จะใช้วางสายเคเบิลใต้ดินหรือใช้แขวนในอากาศก็ได้ ขึ้นอยู่กับขนาดของสายและสภาพของภูมิประเทศ และอีกอย่างหนึ่งสายแบบนี้จะมีน้ำหนักเบากว่าสายแบบที่เปลือกหุ้มสายเป็นตะกั่ว มีสัมประสิทธิ์ความผิดกับต่อร้อยสายน้อยกว่าสายแบบ

เปลือกหุ้มสายเป็นตะกั่ว มีสัมประสิทธิ์ความผิดกับท่อร้อยสายน้อยกว่าสายแบบเปลือกหุ้มเป็นตะกั่ว ดังนั้นการขนส่งและการวางสายจึงทำได้ง่ายกว่าแบบที่เปลือกหุ้มเป็นตะกั่ว นอกจากนี้สายแบบ stalpeth ยังทนต่อการสึกกร่อน การหักงอ การสัมผัสความร้อนและทนต่อการกระแทก

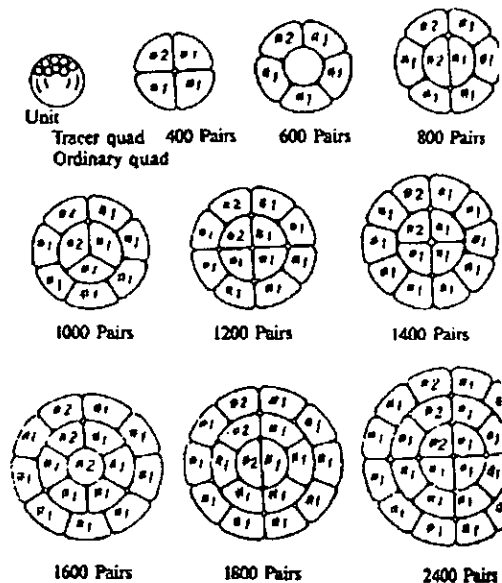
1.2.1.2.2 โครงสร้างของสายเคเบิลฉนวนกระดาก

ลวดตัวนำจะถูกหุ้มด้วยเทปกระดากหรือ Pulp ก็ได้ และลวดตัวนำทั้งหมดจะถูกหุ้มด้วยอะลูมิเนียมและแผ่นเหล็กซึ่งทำเป็นแบบลูกฟูก (Corrugated) เพื่อช่วยในการรอสายเคเบิล

แผ่นอะลูมิเนียมจะหุ้มไปตามความยาวตลอดสายเคเบิล และหุ้มทับด้วย แผ่นเหล็กอีกชั้นหนึ่งและแผ่นเหล็กนั้นจะหุ้มทับกันไม่น้อยกว่า 5 มม. ส่วนตะเข็บจะถูกเชื่อมด้วยความถี่สูง (High frequency heating) เพื่อป้องกันความชื้น ไม่ให้ผ่านเข้าไปได้หลังจากนั้นสายเคเบิลจะนำไปชุบด้วยสารประกอบทางเคมี อีกครั้งหนึ่ง เพื่อให้สารดังกล่าวไปอุดรูปรวเล็กๆซึ่งอาจเกิดจากการเชื่อมตะเข็บที่ไม่สมบูรณ์หลังจากนั้นก็นำไปหุ้มด้วย Polyethylene (PE) โดยวิธีการ Extrude ความโตของลวดตัวนำมีขนาด 0.4 มม. 0.5 มม. 0.6 มม. และ 0.9 มม. โครงสร้างของสายดังแสดงในภาพประกอบ 18(1) (2)



ภาพประกอบ 18 (1) โครงสร้างสาย Stalpath



ภาพประกอบ 18 (2) การจัดเป็น Units

ข้อดีของสาย stalpeth มีดังนี้คือ

- (1) น้ำหนักเบา สามารถที่จะขนย้ายและการติดตั้งทำได้ง่าย
- (2) ในการติดตั้งนั้นเส้นสายประเภทนี้มีความผิดกับท่อร้อยสายน้อย จึงสามารถผลิตสายให้ยาวได้

ให้ยาวได้

- (3) ไม่มีการสึกกร่อนทางไฟฟ้าและทางเคมี ข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นกับสายเคเบิลประเภทนี้มีน้อยกว่า สายเคเบิลที่เปลือกหุ้มเป็นตะกั่ว

- (4) การบำรุงรักษาง่ายและไม่เกิดการเสียหายจากฟ้าผ่า

- (5) ทนต่อการสัมผัสความร้อนได้ดี จึงเหมาะสมที่จะวางสายใต้สะพาน หรือในสถานที่ที่มีการ

จราจรหนาแน่นสาย Stalpath นั้น ย่อมาจาก

St	:	stell
al.	:	Aluminium
Peth	:	polyethylene

1.2.1.3 เคเบิล ชนิด PEF-LAP Junction

สายแบบนี้ เปลือกหุ้มสายเป็น LAP (Laminated aluminium Polyethylene) คุณสมบัติของสายประเภทนี้จะดีกว่าสายแบบ Stalpeth คือ

- (1) ราคาทำสายเคเบิลจะถูกกว่า
- (2) ความคงทนของสายที่ถูกระงอกจากแรงกระแทกจะดีกว่าสายแบบ Stalpeth ที่ฉนวนเป็นกระดาษ
- (3) สาย PEF-LAP นี้จะมี Cross-talk น้อยจึงไม่จำเป็นต้องทำการ test-splice สามารถลดแรงงานในการวางสาย สาย PEF-LAP Junction แสดงในภาพประกอบ 19



ภาพประกอบ 19 0.5 mm 1800-pair PEF-LAP Junction cable

1.2.1.4 เคเบิล ชนิด Local PEF-P

จำนวนเครื่องรับโทรศัพท์ที่ได้เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในเมืองใหญ่ ๆ ซึ่งมีท่อร้อยสายเคเบิลอยู่ใต้ถนนเป็นจำนวนมาก และท่อนี้ส่วนมากใช้กับสายเคเบิลขนาด 0.4 มม. จำนวน 2,400 คู่ ตามปกติแล้วถ้าจำนวนเครื่องรับโทรศัพท์เพิ่ม ก็จะต้องมีการขุดถนน วางท่อร้อยสาย ในเมืองใหญ่ ๆ ที่มีการจราจรหนาแน่นจะทำได้ยาก และราคาค่าก่อสร้างจะแพงมาก เพื่อที่จะขุดปัญหาเหล่านี้ก็ต้องทำสายเคเบิลที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางไม่โตกว่าเส้นเดิมแต่จำนวนคู่สายจะต้องมากขึ้น เพื่อให้พอกับความต้องการ ดังนั้นจึงได้ทำสายที่มีลวดตัวนำขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.32 มม. และฉนวนหุ้มเป็น PEF (Polyethylene Foamed) ขึ้น ซึ่งสามารถทำคู่สายได้ถึง 4,000 คู่ ออกและใช้สายขนาด 0.32 มม. 4,000 คู่แทน

- (1) การนำเอาสายไปใช้งาน

สาย PEF-P ใช้วางเป็นสายเคเบิลต้นทางในเมืองใหญ่

- (2) โครงสร้างของสายเคเบิล ชนิด Local PEF-P

1. เป็นลวดตัวนำมีเส้นผ่าศูนย์กลางเคเบิลต้นทางในเมืองใหญ่
2. ฉนวนเป็นแบบ PEF หนา 0.08 มม. ฟองอากาศ 20%
3. Quad เป็นแบบ Star-Quad
4. Unit ประกอบด้วย 51 Quad Unit สำหรับคู่สายไม่เกิน 1,800 คู่ และ 102 Quad

Unit สำหรับสายเคเบิลที่มีจำนวนคู่มากกว่า 2,400 คู่

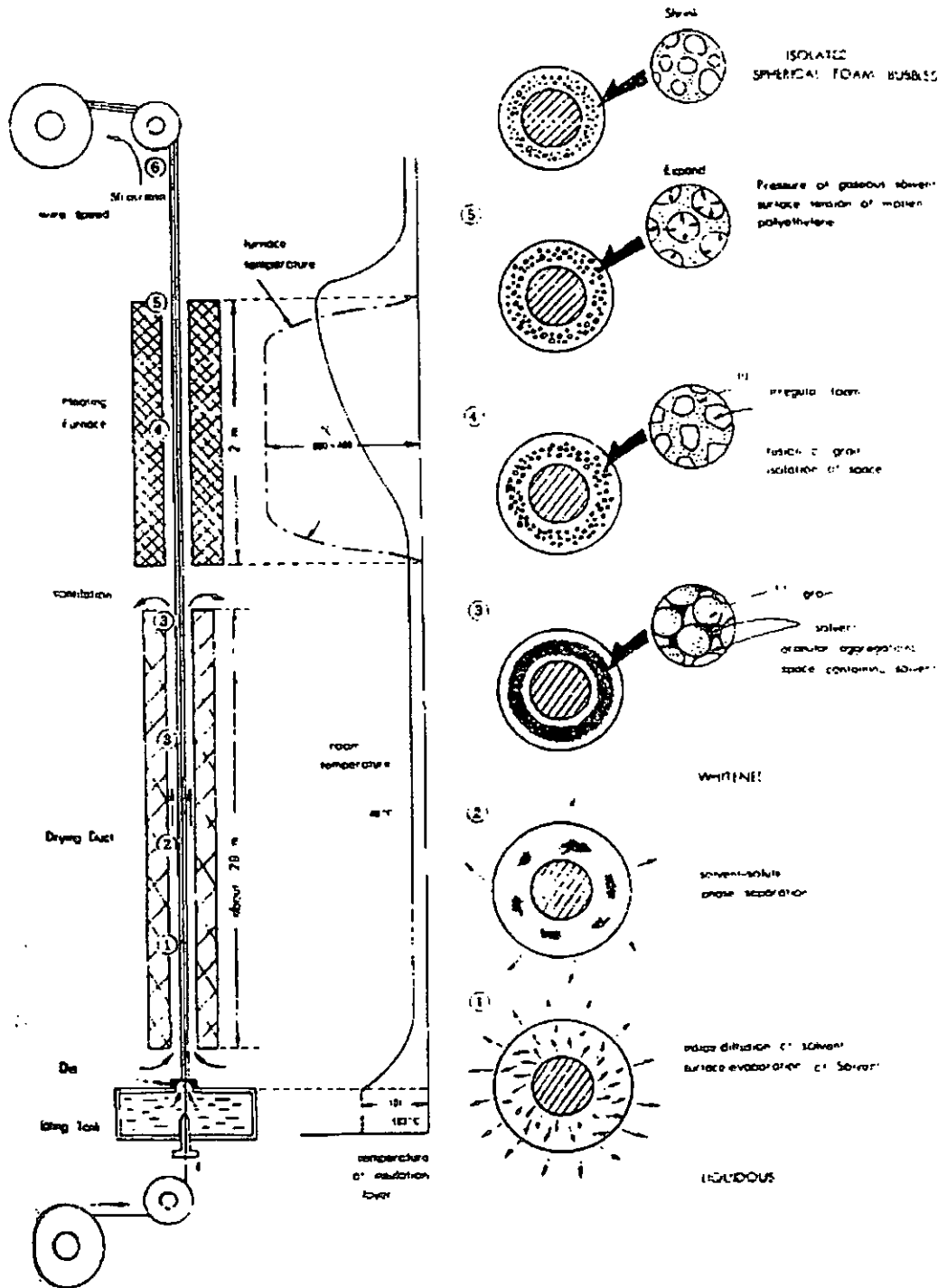
คุณสมบัติทั่วไปของ PEF-Insulation คือ

- (1) มีค่า Dielectric constant น้อยเมื่อเทียบกับสายที่มีฉนวนเป็นกระดาษ
- (2) ตัวฉนวนที่หุ้มสายจะไม่เกิดการเสียหายเมื่อจุ่มลงในน้ำ
- (3) ค่า Dielectric constant สามารถที่จะทำให้มีการเปลี่ยนแปลงอย่างกว้างขวาง คือ

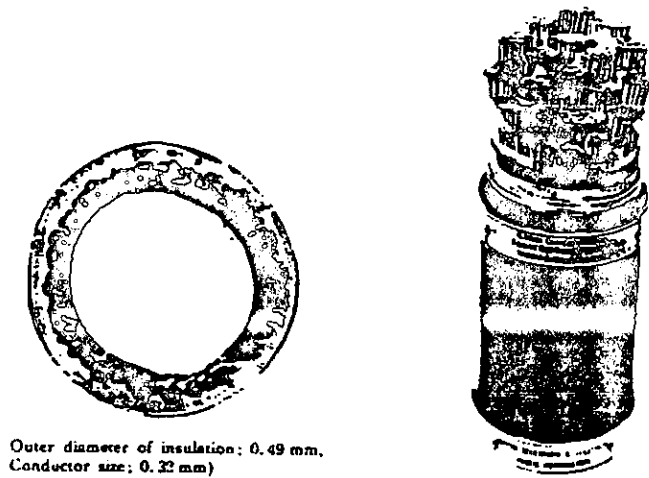
ในช่วง 1.7-1.4 โดยการเปลี่ยนอัตราของฟองอากาศ ดังแสดงในภาพประกอบ 20

(4) ค่า Dielectric loss ใกล้เคียงกับพวก PE ธรรมดา ฉนวนที่เป็นแบบ PEF จะมีค่า loss น้อยกว่า ฉนวนที่เป็นกระดาษ ในเมื่อส่งในระบบคลื่นพาหนะ ทั้งในระยะทางไกลและใกล้

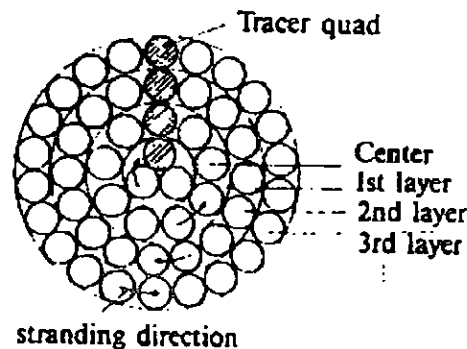
(5) ฉนวนที่เป็น PEF และทำเป็นแบบ Star-Quad จะมีขนาดเล็กกว่าสายเคเบิลที่มีฉนวนเป็นกระดาษ และการที่จะลด Electrostatic coupling ให้น้อยลงอีกนั้นก็โดยการทำ Test joint ในขณะที่วางสายเคเบิล



ภาพประกอบ 20 ขบวนการผลิต PEF Insulation



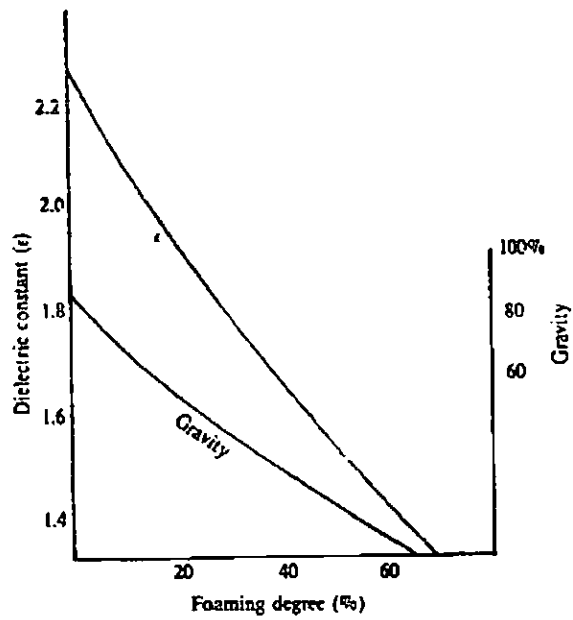
ภาพประกอบ 21 ภาพตัดขยาย ของ PEF-Insulation ภาพประกอบ 22 สายเคเบิล 0.32 มม. 4,000 คู่



ภาพประกอบ 23 การพันเกลียวแต่ละชั้นมีทิศทางตรงข้ามกัน

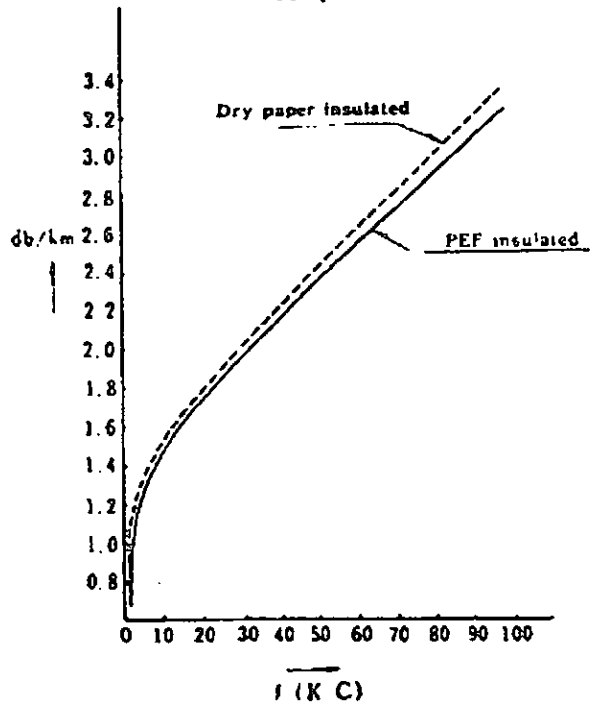


ภาพประกอบ 24 เครื่องพันเกลียว



ภาพประกอบ 25 ระดับของฟองอากาศและค่า Dielectric ของ PEF-Insulation

1. Dry paper insulated } Attenuation constant
2. PEF insulated } of telephone cable
Comparison



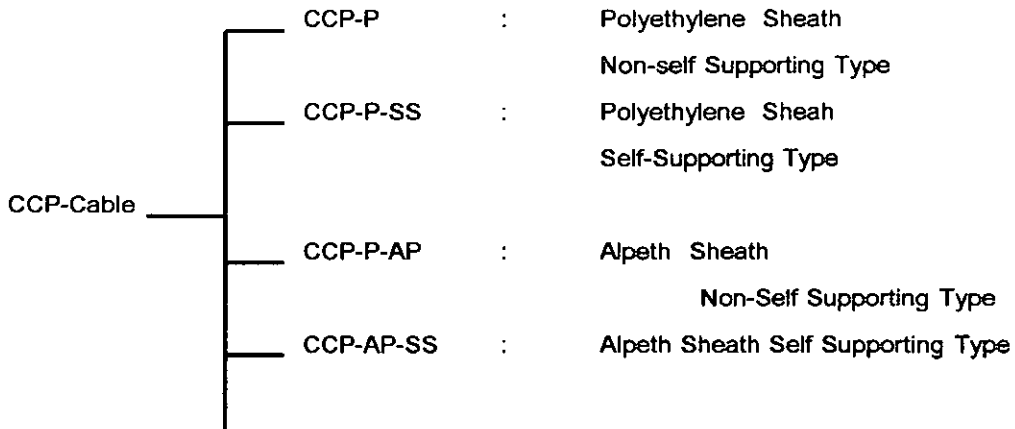
ภาพประกอบ 26 การเปรียบเทียบค่าสูญเสียของสายแบบที่ Insulation เป็นกระดาษกับที่ Insulation เป็น PEF

1.2.1.5 Colour Coded Polyethylene Insulated and Sheath (CCP Cable)

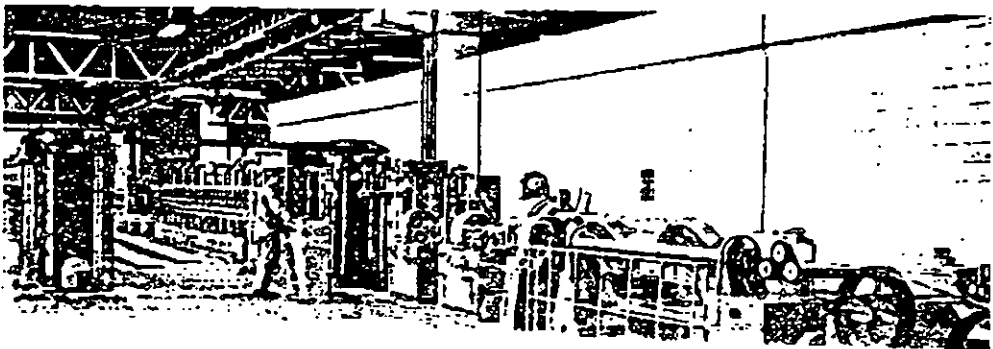
1.2.1.5.1 การนำเอาสายไปใช้งาน

สายประมาณนี้เอาไปใช้เป็นสายที่วางจากชุมสายโทรศัพท์ไปยังเครื่องรับ ซึ่งใช้ร่วมกับ ready-access terminal การพันเกลียวนั้นเป็นแบบ S-Z เพื่อให้ลวดตัวนำมี Sag มากขึ้น ซึ่งจะทำให้การเลือกหา คู่สายที่จะต่อเข้ากับ ready-access terminal ได้ง่ายและสะดวกรวดเร็ว

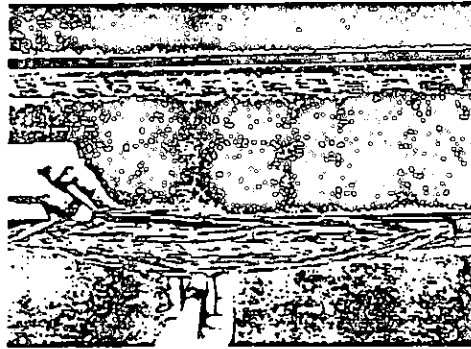
สาย CCP แบ่งออกเป็นหลายแบบด้วยกัน



ในการเลือกใช้สายเคเบิลแต่ละชนิดนั้น จะต้องคำนึงถึงสภาพของภูมิประเทศและสภาพของการติดตั้งเพื่อประหยัด ฉะนั้นสายพวก Self-Supporting จะใช้ในสถานที่ ซึ่งไม่มี Messenger wire ของเก่าเหลืออยู่ ส่วนสาย CCP-AP นั้น จะใช้ติดตั้งในบริเวณที่มีการรบกวนจากธรรมชาติ หรือจากการรบกวนจากสายไฟแรงสูง ในกรณีใช้เป็นเคเบิลอากาศ จะต้องใช้ร่วมกับ ready-access terminal และการติดตั้งสามารถทำได้ง่ายเพราะลวดตัวนำมีฉนวนหุ้มที่มีสีต่าง ๆ กันง่ายต่อการเลือกคู่สาย จึงสามารถนำเอาคู่สายทุกคู่ไปใช้ให้เป็นประโยชน์ได้มากที่สุด ไม่ว่าผู้เช่าจะมีขึ้น ณ จุดใดก็ตาม สาย CCP จะมีความคล่องตัวมากในระบบจ่ายสาย



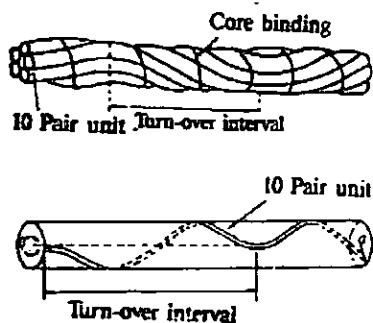
ภาพประกอบ 27 เครื่องพันสายในระบบ S-Z



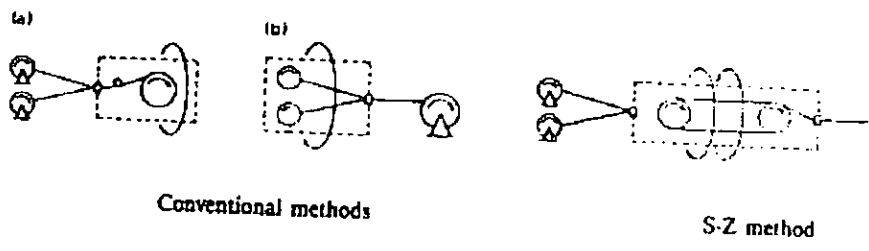
ภาพประกอบ 28 สาย CCP-P-SS ในแบบ S-Z

1.2.1.5.2 โครงสร้าง

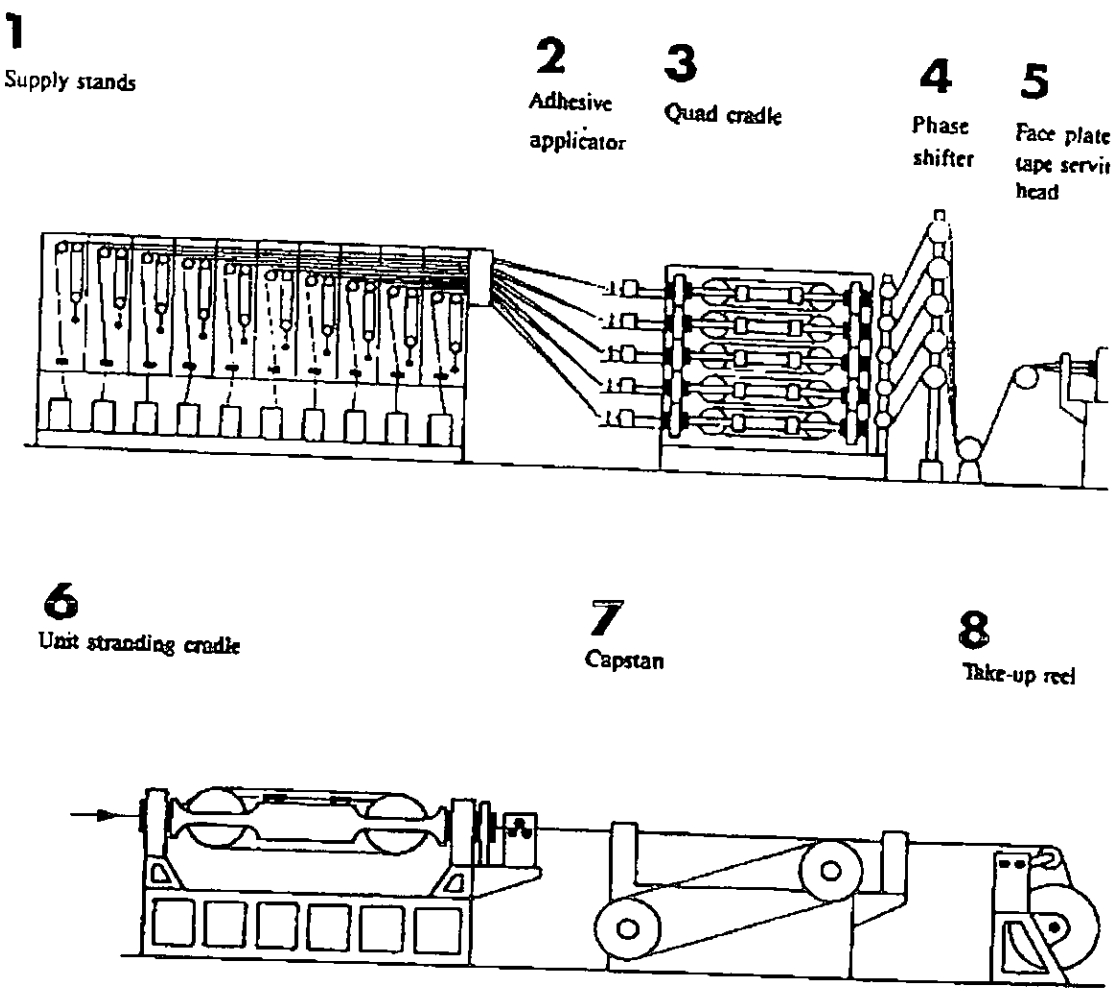
- (1) ลวดตัวนำ เป็นทองแดงมีเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 0.4 มม. 0.5 มม. 0.65 มม. และ 0.9 มม.
- (2) ฉนวน สีที่ใช้เป็นฉนวนคือ P.E มีอยู่ 8 สี คือ สีน้ำเงิน สีเหลือง สีเขียว สีแดง สีม่วง สีขาว สีน้ำตาล สีดำ
- (3) Quad เป็นแบบ Star-Quad type สีขึ้นแต่ละ Quad มี 5 สี สีน้ำเงิน สีเหลือง สีเขียว สีแดง สีม่วง และสีรวม มี 3 สี สีขาว สีน้ำตาล สีดำ



ภาพประกอบ 29 (1) การพันเกลียวในแบบ S-Z ภาพประกอบ 29 (2) เดเบิ้ล unit แบบ Alpath
ภาพประกอบ 29 การพันเกลียวในแบบ S-Z และประกอบเป็น Unit



Layout of S-Z stranding machine



ภาพประกอบ 30 ขั้นตอนการพันเกลียวในระบบ S-Z

ตาราง 4 สีของฉนวนหุ้มลวดตัวนำ

ลำดับ	คู่ที่ 1		คู่ที่ 2	
	เส้นที่ 1	เส้นที่ 2	เส้นที่ 3	เส้นที่ 4
1	น้ำเงิน	ขาว	น้ำตาล	ดำ
2	เหลือง	ขาว	น้ำตาล	ดำ
3	เขียว	ขาว	น้ำตาล	ดำ
4	แดง	ขาว	น้ำตาล	ดำ
5	ม่วง	ขาว	น้ำตาล	ดำ

(4) การพันเกลียวเป็น Unit

1 Unit ประกอบด้วย 5 Quad ดังนั้น 1 Unit ประกอบด้วย 10 คู่ 10 Unit มี 100 คู่ การที่จะจำแนก unit นั้นใช้เทปพลาสติกพันรอบแต่ละ unit ซึ่งเทปที่พันแต่ละ unit จะมีสีแตกต่างกันไป ดังแสดงในตาราง 5

ตาราง 5 สีเทปพลาสติกที่พันรอบแต่ละ unit

ลำดับ	ลำดับคู่สาย	สีของเทปพลาสติก	ลำดับ	ลำดับคู่	สีของเทปพลาสติก
1	1-10	น้ำเงิน	11	101-110	น้ำเงิน+น้ำตาล
2	11-20	เหลือง	12	111-120	เหลือง+น้ำตาล
3	21-30	เขียว	13	121-130	เขียว+น้ำตาล
4	31-40	แดง	14	131-140	แดง+น้ำตาล
5	41-50	ม่วง	15	141-150	ม่วง+น้ำตาล
6	51-60	น้ำเงิน+ขาว	16	151-160	น้ำเงิน+ดำ
7	61-70	เหลือง+ขาว	17	161-170	เหลือง+ดำ
8	71-80	เขียว+ขาว	18	171-180	เขียว+ดำ
9	81-90	แดง+ขาว	19	181-190	แดง+ดำ
10	91-100	ม่วง+ขาว	20	191-200	ม่วง+ดำ

1.2.1.5.3 คุณสมบัติทางไฟฟ้า

(1) ความต้านทานลวดตัวนำทานไฟ DC. ที่ 20 °C

เส้นผ่าศูนย์กลาง

(มม.)	ค่ามาตรฐาน (Ω /km)	ค่าสูงสุด (Ω /km)
0.4	139	147.5
0.5	88.7	93.5
0.65	52.5	56.5
0.9	27.4	29.0

(2) ความต้านทานของฉนวน

ค่าความต้านทานของฉนวนจะต้องไม่น้อยกว่า 5,000 M(Ω /km) วัดระหว่างลวดตัวนำและลวดตัวนำกับดินที่ไฟ DC 500 Volts

(3) ค่า Capacitance เหนี่ยวนำ

ค่าที่วัดได้จะต้องไม่มากกว่าค่าที่กำหนด เมื่อวัดที่ 1,000 H₂

ค่าเฉลี่ยสูงสุด
nF/Km

เคเบิล 50 คู่ หรือน้อยกว่า
เคเบิล 100 คู่ หรือมากกว่า

60
55

(4) ค่าไม่สมดุลของ Capacitance

ค่าเฉลี่ยและค่าสูงสุดของความไม่สมดุลวัดที่ความถี่ 1,000 H₂ ระหว่างคู่สายที่อยู่ใน Quad เดียวกัน จะต้องมียังค่าไม่มากกว่าค่าที่กำหนดดังต่อไปนี้

ความยาวสายเคเบิล : 500 เมตร
จำนวนคู่สาย 50 คู่ หรือน้อยกว่า
จำนวนคู่สาย 100 คู่ หรือมากกว่า

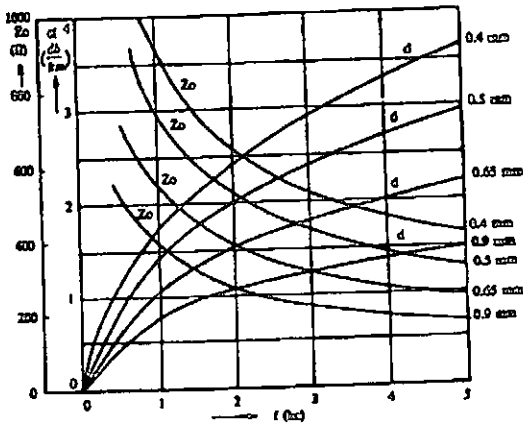
ค่าเฉลี่ย (PF)
-
150

ค่าสูงสุด (PF)
800
800

ในเมื่อหารด้วย L : คือความยาวของสายเคเบิลที่ทำการวัด ถ้า L สั้นกว่า 100 เมตร ก็ให้มีค่าเท่ากับ 100 เมตร

1.2.5.1.4 คุณสมบัติสายส่ง

ในภาพประกอบ 31 เป็นค่า Impedance และค่า Attenuation



ภาพประกอบ 31 แสดงคุณสมบัติของสายส่ง

1.2.1.6 สายเคเบิล ชนิด Jelly Filled

เมื่อน้ำซึมเข้าไปในสายพลาสติกเคเบิลน้ำจะสามารถซึมผ่านช่องว่างของสายเคเบิลไปได้ตลอดสาย และถ้าปล่อยไว้เป็นเวลานาน ๆ ก็จะทำให้เกิดรูเล็กขึ้นที่ฉนวน ซึ่งจะทำให้คุณภาพของสายส่งเสื่อมสภาพลง เช่นค่าความต้านทานของฉนวนต่ำลง สัญญาณสูญเสียไปในสายส่งมาก เกิดเสียงรบกวนต่าง ๆ และทำให้ฉนวนเกิดการสึกกร่อน และยากที่จะทำให้สายแห้งได้

การอัดแก๊สเข้าไปในสายเคเบิลสามารถที่จะป้องกันไม่ให้น้ำเข้าไปในสายได้ แต่ก็เป็นการยากที่จะอัดแก๊สเข้าไปในสายเคเบิลขนาดเล็ก อย่างเช่นสายเคเบิลปลายทาง เพราะสายขนาดเล็กจะมีแรงต้านทานการไหลของแก๊สสูง และยังเป็นปัญหาที่แก๊สไหลไม่ติดต่อกัน ในการแก้ปัญหาที่มีอยู่สองวิธี ซึ่งจะมีผลไม่ทำให้สายเสื่อมสภาพเมื่อน้ำเข้าไป และอีกวิธีหนึ่ง เมื่อน้ำเข้าไปก็ไม่ให้ผ่านเข้าไปตลอดสาย

วิธีแรกคือทำให้ฉนวนมีความหนาขึ้น แต่ในการผลิตสายจะต้องใช้เทคนิคมากและมีราคาแพงในระบบงานการติดตั้งก็ไม่แน่ว่าจะเกิดความบกพร่องขึ้นกับสายหรือไม่

ประการหลังก็โดยการอัดสารประกอบเข้าไปในช่องว่างของสายเคเบิล ซึ่งสารดังกล่าวนี้มีคุณสมบัติต้านทานการไหลของน้ำไม่ให้ซึมผ่านตลอดสาย จากการทดลอง เมื่อเกิดรูรั่วขึ้นกับเปลือกหุ้มสาย น้ำสามารถที่จะซึมผ่านไปได้ประมาณ 6 เมตร เท่านั้น ซึ่งถ้าพิจารณาในเรื่องการผลิตสายราคา และความเชื่อถือแล้ว วิธีการที่สองจึงถูกมาใช้ในปัจจุบัน

คุณสมบัติของสารประกอบ

1. จะต้องไม่ทำให้คุณสมบัติของ Polyethylene เสื่อมสภาพลง
2. จะต้องมีความต้านทานทางไฟฟ้าสูงและไม่เสื่อมสภาพทางไฟฟ้า
3. ง่ายต่อการโค้งงอในขณะวางสายไม่ว่าอุณหภูมิจะสูงหรือต่ำ
4. จะต้องไม่เหนียวมากและสามารถล้างออกได้ง่ายขณะทำการต่อสาย
5. ราคาถูกและสามารถหาได้ง่ายในท้องตลาด

สาย J.F. เคเบิล ส่วนมากแล้วจะใช้วางเป็นสายเคเบิลใต้ดิน (สายเคเบิลปลายทาง) การอัดสารประกอบนั้น ทำในขบวนการผลิตขั้นตอนของการพันเกลียว (Stranding process) เปลือกหุ้มสายนั้นจะเป็นแบบ P. Alpeh. LAP และคุณสมบัติทางไฟฟ้ามันใกล้เคียงกับสายพลาสติกทั่ว ๆ ไป

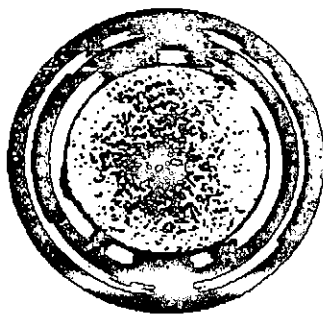
1.2.1.7 สายเคเบิล ชนิด Armored

สายเคเบิลที่ออกแบบไว้สำหรับรับแรงกระทำจากภายนอก ซึ่งจะมีวัสดุป้องกันหลายชั้นเพื่อความคงทนแข็งแรง สายประเภทนี้จะออกแบบใช้งานเป็นสายเคเบิลใต้ดินโดยไม่ได้วางไว้ในท่อร้อยสาย สาย armored นี้จะมีสองแบบคือ แบบใช้เทปแผ่นเหล็กพันรอบเปลือกหุ้มสาย (Steel tape armored Cable) และแบบเส้นลวดเหล็กหุ้ม (Wire armored Cable) แบบเส้นลวดเหล็กหุ้มจะทนแรงดึงหรือแรงกดได้มากกว่าแบบเทปแผ่นเหล็ก

ส่วนประกอบของวัสดุที่ใช้เป็นเกราะป้องกัน

1. Steel tape armored

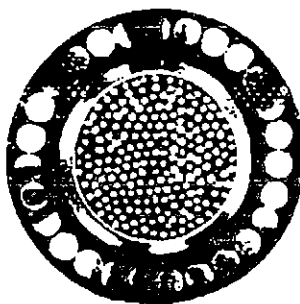
แบบแผ่นเทปเหล็ก : เชือกป่านชุบสารเคมี สารประกอบ Asphalt และน้ำยาปูนขาว



ภาพประกอบ 32 Steel Tape Armored Cable

2. Wire armored

ส่วนประกอบเหมือนกับ Steel tape armored ผิดกันตรงที่สาย wire armored นั้นมีเส้นลวดเหล็กเป็นเกราะป้องกัน ดังแสดงในภาพประกอบ 33 สายประเภทนี้จะใช้วางในบริเวณที่ต้องการความคงทนของสายสูง เช่นวางในแม่น้ำ ทะเลสาบ ในท้องทะเล



ภาพประกอบ 33 Wire Armored Cable

1.2.1.8 Self supporting Distribution wire (SD wire)

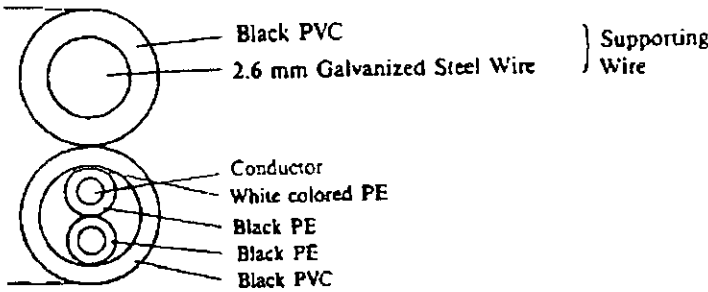
1.2.1.8.1 การใช้งาน

สาย SD Wire ใช้เป็นสายจ่ายไปยังผู้เช่าที่อยู่ในชนบท ในบริเวณที่การคาดคะเนของผู้เช่าในระยะเวลา 15 ปี ไม่เกิน 30 ในบริเวณที่การคาดคะเนนั้นลำบาก หรือพื้นที่ที่ต้องการติดตั้งเพียงชั่วคราว เนื่องจากเหตุผลบางประการ เพราะสายประเภทนี้ทำการติดตั้งง่ายและขนย้ายได้ง่าย

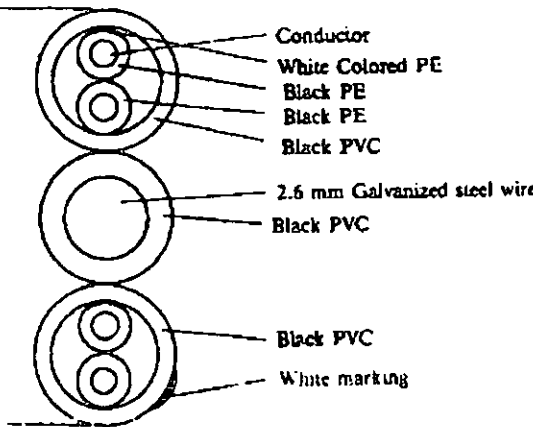
1.2.1.8.2 โครงสร้าง

- (1) ลวดตัวนำ เส้นลวดทองแดงมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.65 มม. และ 0.9 มม.
- (2) ฉนวน ที่หุ้มลวดตัวนำเป็น PE
- (3) คู่สาย ลวดตัวนำ 2 เส้น จะตีเกลียวกันเป็น 1 คู่สาย และ คู่สายนั้นจะหุ้มด้วย P.V.C อีกคู่สาย ลวดตัวนำ 2 เส้น จะตีเกลียวกันเป็น 1 คู่สาย และคู่สายนั้นจะหุ้มด้วย P.V.C อีกครั้งหนึ่ง แสดงในภาพประกอบ 34

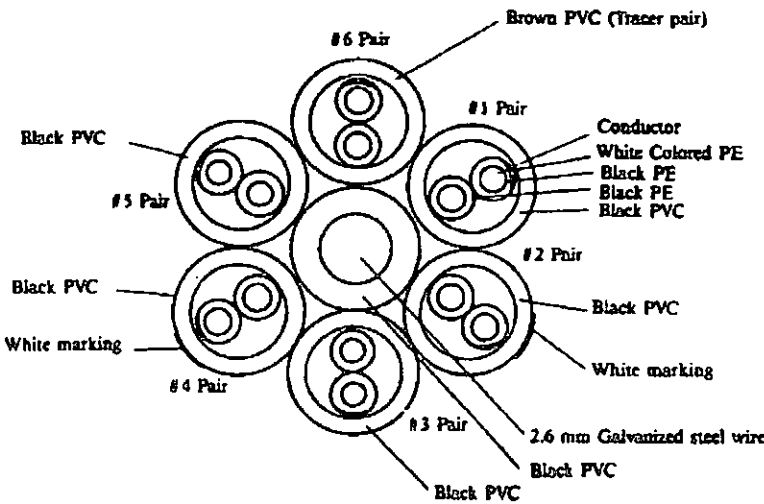
(1) One-pair SD wire



(2) Two-pair SD wire



(3) Six-pair SD wire



ภาพประกอบ 34 แสดงภาพตัดขวางของสายเคเบิล S.D Wire

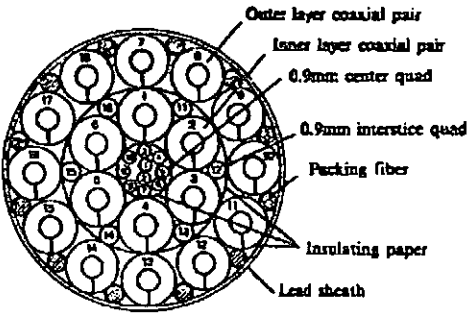
1.2.2 สายเคเบิลแกนร่วม (Coaxial Cable)

1.2.2.1 สาย Coaxial 2.6/9.5 mm.

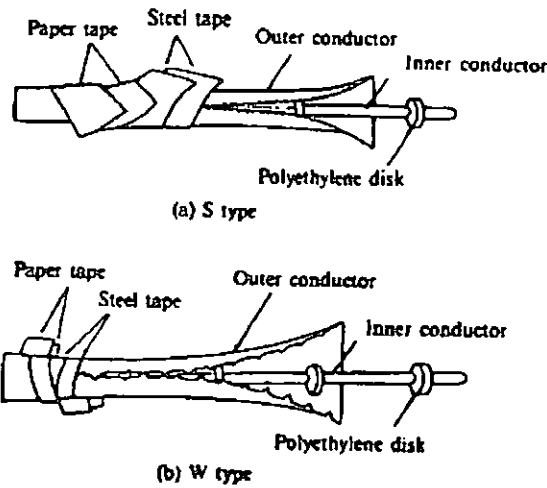
สาย coaxial 9.5 mm. นี้มีเส้นผ่าศูนย์กลางกลางของลวดตัวนำเส้นใน 2.6 มม. และเส้นผ่าศูนย์กลางกลางของลวดตัวนำเส้นนอก 9.5 มม. มีฉนวนเป็นตัวป้องกันไม่ให้เส้นลวดตัวนำชั้นในและนอกแตะถึงกันฉนวนที่ใช้ทำนี้เป็น Polyethylene (PE disk) มีระยะห่างกันประมาณ 33 มม. สาย coaxial แต่ละหลอดจะพันด้วยเทปแผ่นเหล็ก และกระดาษเทป เพื่อป้องกันการรบกวน

จำนวนหลอดของ coaxial ที่ประกอบเป็นสายเคเบิลนั้นมีตั้งแต่ 1,2,4,6,8,12,18 และในสายเคเบิลนั้นบรรจุคู่สายที่ใช้สำหรับ ในระบบควบคุม การบำรุงรักษา และใช้สำหรับเป็นสายส่งในระยะทางไม่ไกลมากนัก (Short haul) ซึ่งมีเส้นผ่าศูนย์กลางกลางของลวดตัวนำ 0.65 มม. หรือ 0.9 มม.

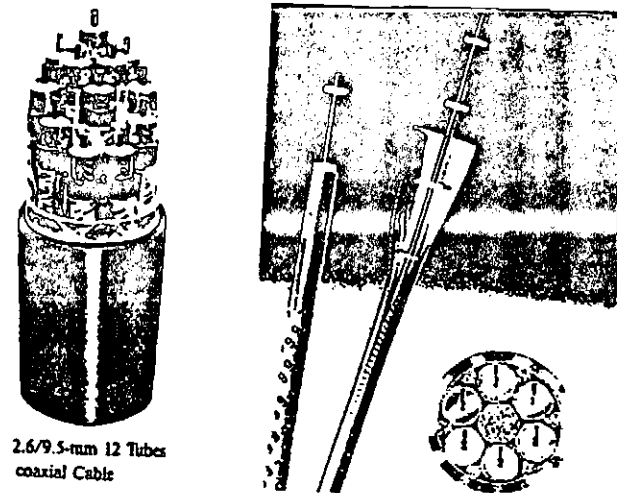
ส่วนสำหรับสาย coaxial นั้นใช้วางในระยะทางไกลๆ และมีจำนวนผู้เข้าที่ต้องการติดต่อกันเป็นจำนวนมาก ๆ โครงสร้างของสายดังแสดงในภาพประกอบ 35



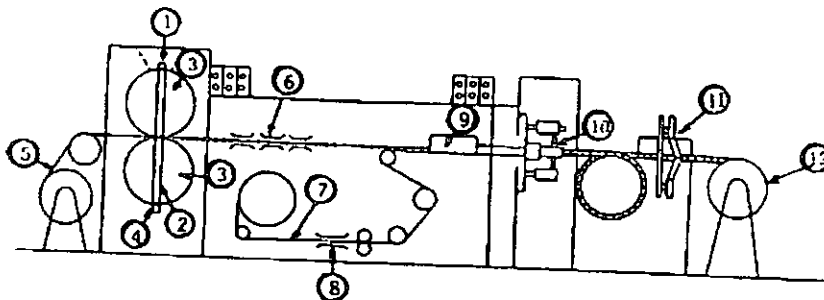
ภาพประกอบ 35 เป็นรูปภาพตัดของสาย coaxial เคเบิล 9.5 mm. 18 หลอด



ภาพประกอบ 36 โครงสร้างของหลอด coaxial 9.5 mm.



ภาพประกอบ 37 เป็นภาพถ่ายของสาย coaxial

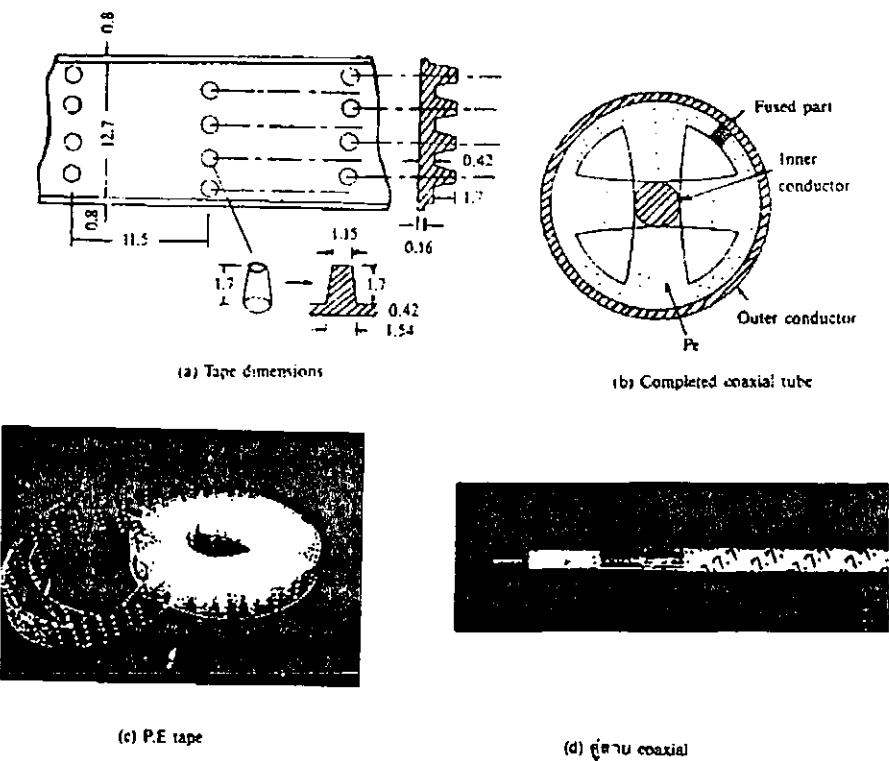


- (1) Hopper (2) Feed Track (3) Applicator Wheel (4) Knife (5) Center Conductor
 (6) Dielectric Strength Testing Equipment (7) Copper Tape (8) Notching Die
 (9) Forming Die (10) Steel Tape (11) Paper Tape (12) Take-up Reel

ภาพประกอบ 38 แสดงขั้นตอนการผลิตสาย coaxial เฉลี่ย 2.6/9.5 mm.

1.2.2.2 สาย coaxial 1.2/4.4 mm.

สายเคเบิลแบบนี้ประกอบด้วยลวดตัวนำเส้นในมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1.2 mm. ลวดตัวนำนอกมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 4.4 mm. และมีฉนวนกันระหว่างลวดตัวนำทั้งสองไม่ให้แตะกัน ฉนวนที่กันนั้นเป็นเทป PE หุ้มเส้นลวดตัวนำด้านใน ดังแสดงในภาพประกอบ 39



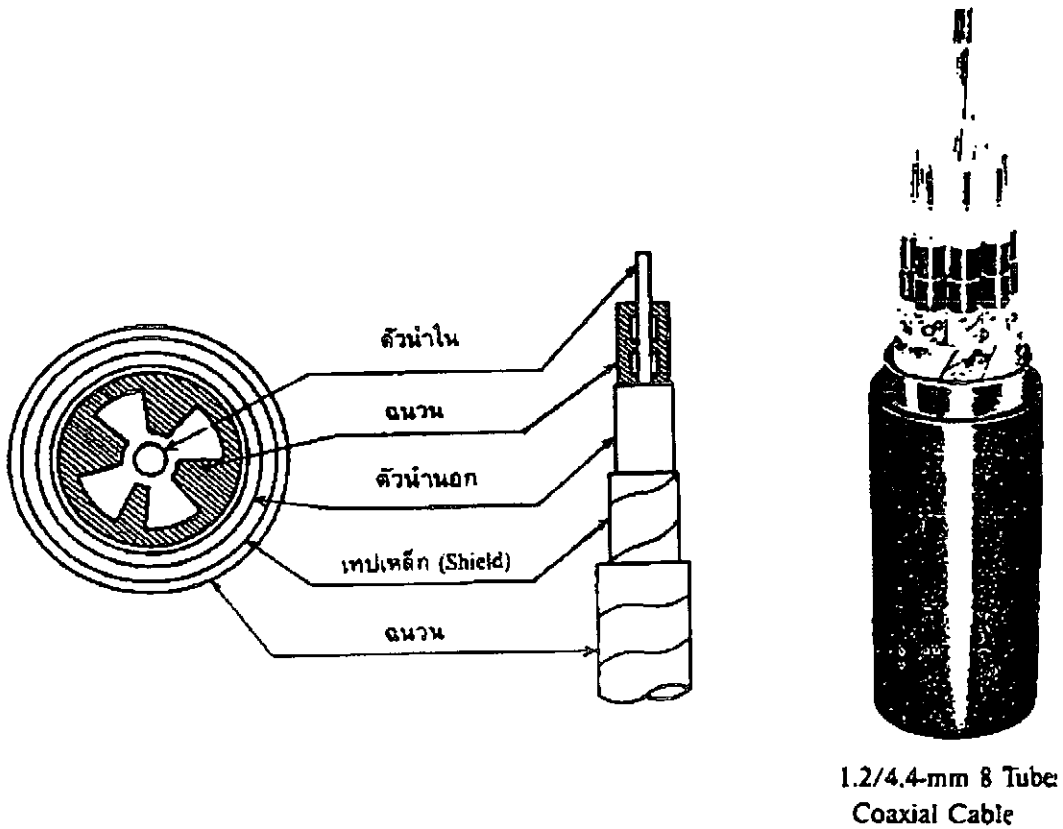
ภาพประกอบ 39 เป็น P.E tape และคู่สาย coaxial สายเคเบิลชนิดนี้มี 4, 6, 8, 12 และคู่สายที่อยู่ภายใน มีขนาด 0.5 และ 0.65 mm

ตาราง 6 ระบบสายส่งของ Balance Cable

ระบบสายส่ง	แถบคลื่นที่ส่ง	ความจุ	ระยะห่างของสถานีทวนสัญญาณ	เคเบิล
Voice band	0.3~3.4 kHz	1 ch	-	Junction PEF cable toll PEF cable
T-12 SR	12~120 kHz	12 ch	9~13 km (max)	toll PEF cable
PCM-24	1.544 Mb/s	24 ch	1.45~4.11 km (max)	Junction PEF cable toll PEF cable

ตาราง 7 ระบบสายส่งของ coaxial Cable

ระบบสายส่ง	แถบคลื่นที่ส่ง	ความจุ	ระยะห่างของ สถานีทวนสัญญาณ	เคเบิล
CP-12M	308~12,435 KHz	Voice 2,700 ch	4.5 km	9.5 mm coaxial cable
			2.0 km	4.4 mm coaxial cable
C-60 M	4,287~61,160 KHz	Voice 10,800 ch 4MTV 9 ch	1.5 km	4.4 mm coaxial cable
DC-100M	97,728 Mb/s	Voice 1,440 ch 4MTV 3 ch	3 km	4.4 mm coaxial cable
DC-400M	400.352 Mb/s	Voice 5,760 ch 4MTV 12 ch	1.5 km	4.4 mm coaxial cable



ภาพประกอบ 40 แสดงโครงสร้างของสาย coaxial เคเบิลแบบ 1.2/44 mm

ตาราง 8 วัสดุใช้ทำสาย

รายการ	โครงสร้าง
ลวดตัวนำใน	เส้นผ่าศูนย์กลาง
ฉนวนกั้นระหว่างตัวนำในและตัวนำนอก	Polyethylene เทป
ตัวนำนอก	เทปทองแดง เส้นผ่าศูนย์กลาง 4.44 มม.
Shielding	แผ่นเทปเหล็ก
ฉนวนระหว่างหลอด	เทปกระดาษพิมพ์หมายเลข
เปลือกหุ้มสาย	ตะกั่ว P.E
จำนวนหลอด	4, 6, 8, 12 หลอด
จำนวนคู่ของ balance	10 ถึง 820 คู่

คุณสมบัติของสาย Coaxial Cable มีดังนี้

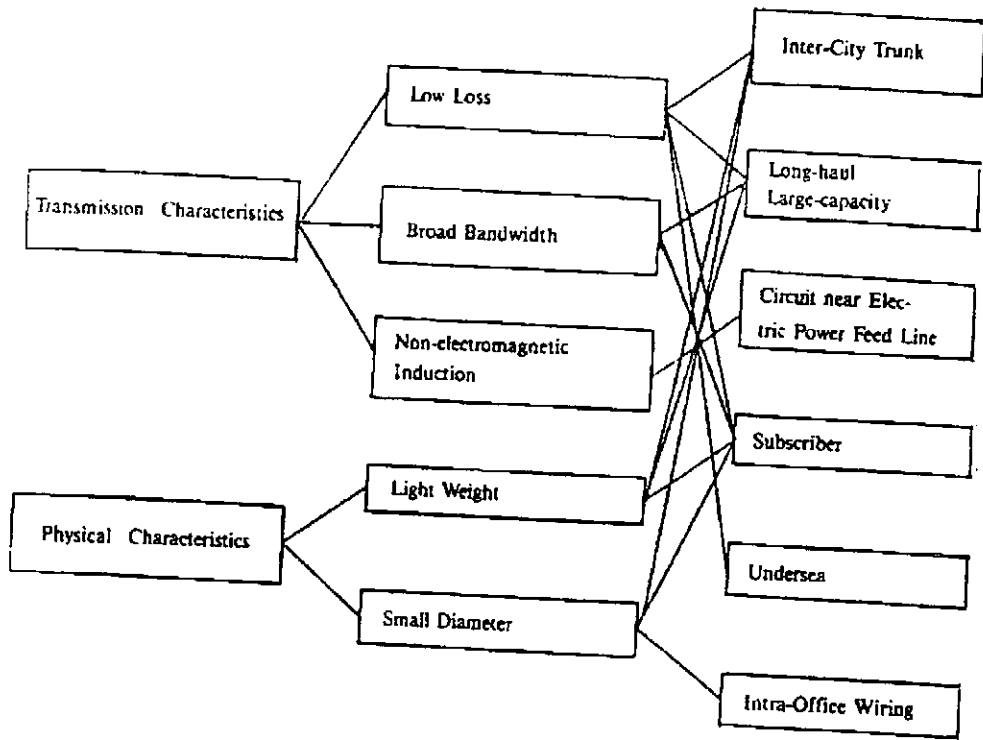
- (1) มีการเพี้ยนของสัญญาณน้อย
Loaded > Carrier > coaxial
- (2) สัญญาณที่ส่งในสายเดินทางไปได้เร็ว ตามปกติแล้วคลื่นที่ส่งออกอากาศจะมีความเร็วเท่ากับความเร็วของแสง แต่ส่งไปตามสายเคเบิลนั้น การเดินทางของสัญญาณนั้นจะมีความเร็วไม่เท่ากัน ซึ่งขึ้นอยู่กับประเภทของสายส่งคือ
Loaded Cable : 7-21% ของความเร็วของแสง
Carrier Cable : 64-69% ของความเร็วของแสง
Coaxial Cable : 89-95% ของความเร็วของแสง
- (3) มี Cross-talk และเสียงรบกวนต่าง ๆ มีน้อยเพราะในสาย Coaxial นั้น มีเทปเหล็กหุ้มไว้ที่ตัวนำ เส้นนอกป้องกันการรบกวนไปยังวงจรใกล้เคียง
- (4) สัญญาณสูญเสียในสายมีน้อย
วัดที่ความถี่ 100 KHz
 $\alpha_{NLC} = 1.95 \text{ db/km (1.2 mm.)}$
 $\alpha_{COX} = 0.75 \text{ db/km}$
- (5) ค่า Impedance จะคงที่
- (6) ทนแรงดันไฟฟ้าได้สูง
สำหรับในสาย Carrier ส่งแรงดันไปในสายได้ประมาณ 1,000 V แต่ในสาย Coaxial นั้นสามารถส่งได้ถึงประมาณ 5,000 V

1.2.3 สายเส้นใยแก้ว (optical Fiber)

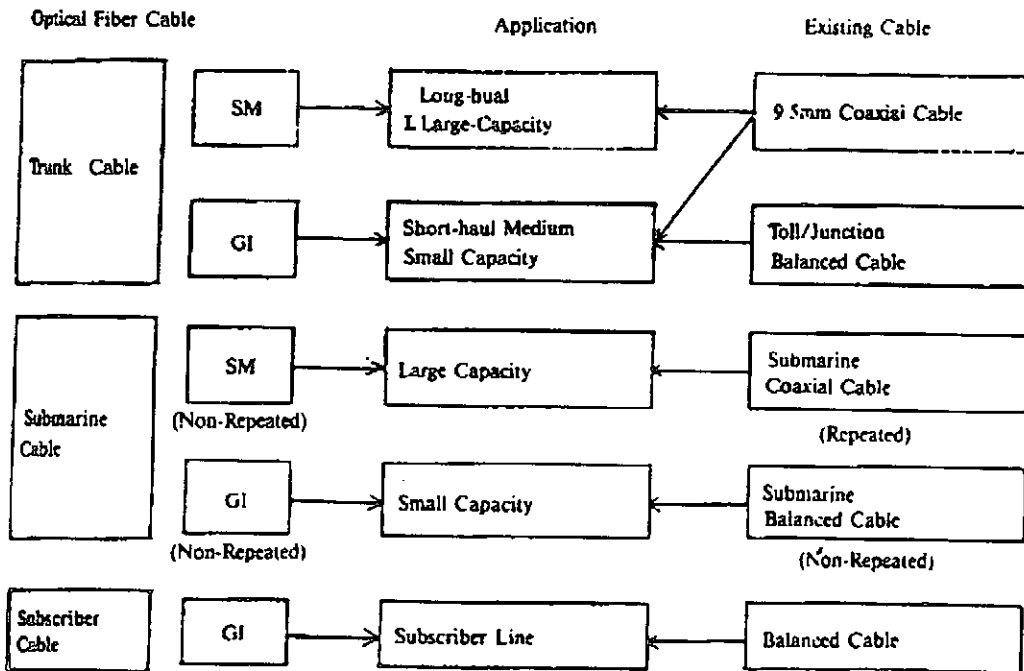
1.2.3.1 ลักษณะเด่นและการนำสายไปใช้งาน

สายใยแก้ว มีข้อดีเมื่อเทียบกับคู่สายเส้นลวดโลหะ คือจะไม่มีผลต่อการรบกวนจากเส้นแรงแม่เหล็ก การสูญเสียสัญญาณในสายมีน้อย มีแถบคลื่นกว้าง ดังนั้นสายใยแก้ว จึงมีความคล่องตัวสูงและประหยัดสำหรับการใช้เป็นสายส่งในระบบดิจิทัลได้หลายรูปแบบ ใช้เป็นสายส่งในระบบโทรศัพท์ภาพ ซึ่งจะมีขึ้นใน

อนาคต ซึ่งคาดว่าสายใยแก้วจะเป็นตัวกลางที่ใช้เป็นสายส่งได้ดีเลิศ สายใยแก้ว ยังมีข้อดีหลายอย่าง ในแง่ของการติดตั้งวางสายและการบำรุงรักษาสาย เพราะสายมีขนาดเล็ก น้ำหนักเบาและสามารถลดจำนวนของสถานีทวนสัญญาณลงได้เป็นอย่างมาก ภาพประกอบ 41 และ 42 แสดงข้อดีของสายและการนำไปใช้งาน



ภาพประกอบ 41 ข้อดีของสายใยแก้ว



SM: Single-Mode, GI: Graded-Index

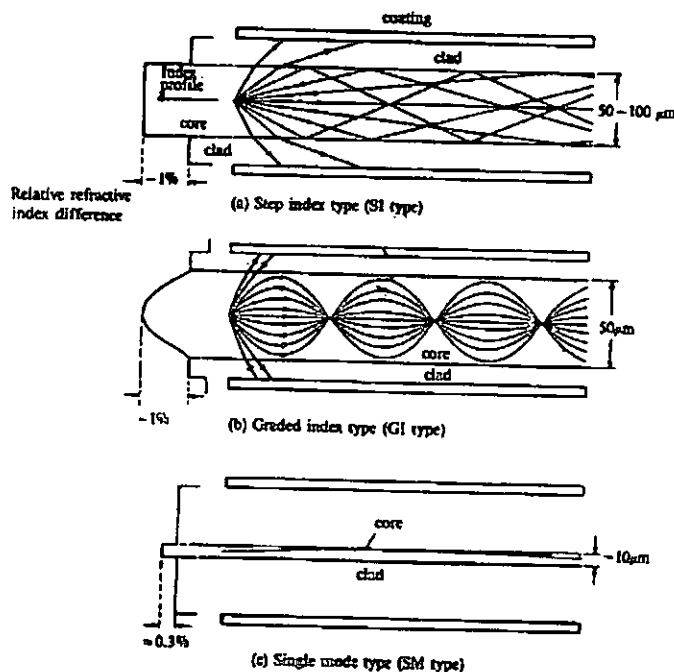
ภาพประกอบ 42 ขอบเขตการใช้สายใยแก้วในการสื่อสาร

ในเรื่องความคงทนแข็งแรงของสายใยแก้วนั้นในตัวของสายใยแก้วเองมีความทนแรงดึงได้สูงกว่าสายลวดทองแดง ประมาณ 10 เท่าและสูงกว่าลวดอะลูมิเนียมประมาณ 20 เท่า เมื่อมีพื้นที่หน้าตัดเท่ากัน

สายเส้นใยแก้วที่ใช้ในด้านการสื่อสารมีอยู่ 2 แบบ ด้วยกัน คือ แบบ SM และ GI สายเส้นใยแก้ว SM มีแบนด์กว้างและพลังงานที่สูญเสียในสายมีน้อย ส่วนสายแบบ GI นั้นการต่อสายทำได้ง่ายมีราคาต่ำเมื่อเทียบกับสายแบบ SM

1.2.3.2 การเดินทางของแสงในสายเส้นใยแก้ว

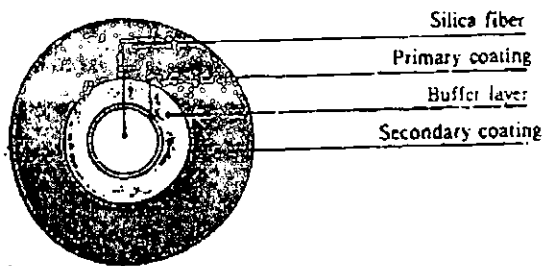
สายเส้นใยแก้วมีอยู่ 3 ชนิด ดังแสดงในรูปที่ 2.32 สายชนิด Step Index(SI) แสงเดินทางในสายนั้นนั้นมีมุมแตกต่างกันสะท้อนไปมาระหว่าง core กับ clad มีรูปลักษณะเป็นแบบขั้นบันได (Step index profile) ส่วน Graded Index (GI) นั้นแสงจะเดินไปและจะโค้งงอกลงในช่วงที่เหมาะสม ส่วน Single Mode (SM) นั้นมีอยู่ Mode เดียวที่เดินทางไป



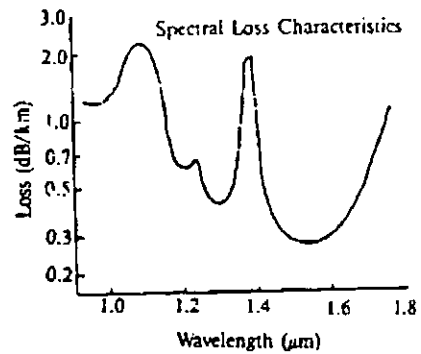
ภาพประกอบ 43 ชนิดของสายแบ่งตามลักษณะของดัชนีหักเห

1.2.3.3 โครงสร้างของสาย

คุณสมบัติของสายเส้นใยแก้วที่ต้องการ คือคุณสมบัติของสายส่ง, ทาง Mechanical สภาพแวดล้อม ฯลฯ การทำสายนั้นอย่างน้อยจะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติดังกล่าวข้างต้น จะต้องทำสายให้อยู่ในลักษณะดังกล่าวนี้จะต้องคงทนแข็งแรง ทนต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม ทนต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ เพื่อตอบสนองความต้องการดังกล่าว สายเส้นใยแก้วจึงถูกหุ้มด้วยพลาสติก 2 หรือ 3 ชั้น โครงสร้างของสายดังแสดงในภาพประกอบ 44



(a) โครงสร้างสายเส้นใยแก้ว



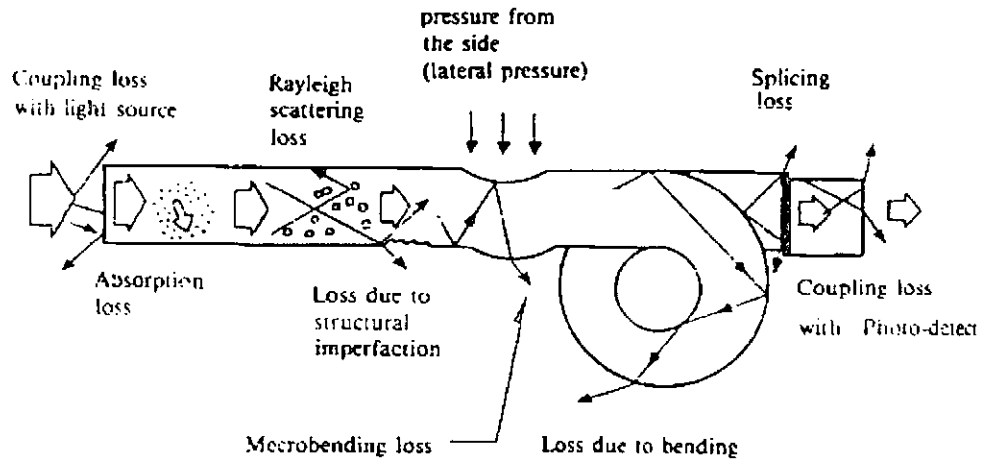
(b) คุณสมบัติของสาย

ภาพประกอบ 44 โครงสร้างของสายเส้นใยแสงแบบ SM

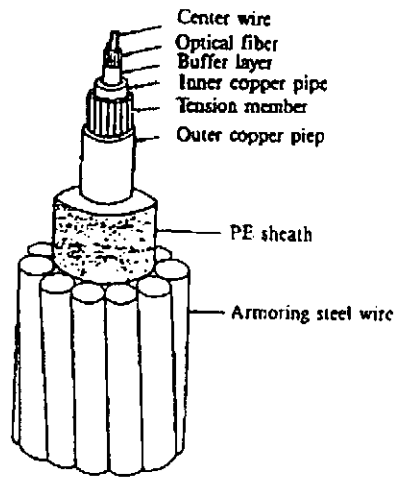
การออกแบบทำสายเคเบิลนั้นแบ่งออกตามลักษณะของโครงสร้างเป็นแบบโครงสร้างแน่นและโครงสร้างหลวม ในกรณีของโครงสร้างแน่นนั้น สายเส้นใยแก้วจะสัมผัสกับลวดสำหรับรับแรงดึงที่อยู่ตรงกลางสายเคเบิล (tension member) ดังนั้นการหดตัวและขยายตัวอันมาจากแรงกระทำภายนอก หรือการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิ สายเส้นใยแก้วและลวดรับแรงดึงจะเปลี่ยนแปลงไปพร้อมกัน

ในกรณีโครงสร้างแบบหลวมสายเส้นใยแก้วจะอยู่ในหลอด ดังนั้นการเคลื่อนไหวของเคเบิลและสายเส้นใยแก้วจึงเป็นอิสระซึ่งกันและกัน และในโครงสร้างแบบหลวม การเคลื่อนไหวของสายเคเบิลทั้งหมดจะแตกต่างกับการเคลื่อนไหวของสายเส้นใยแก้ว ในการค้นคว้านั้น ก็ไม่สามารถที่จะพยากรณ์ได้ว่าสถานะภาพของสายเส้นใยแก้วเป็นอย่างไรเมื่อสายเคเบิลวางอยู่ภายนอก ซึ่งอาจจะเป็นไปได้ว่าสายเส้นใยแก้วอาจจะสัมผัสกับหลอดที่ใดที่หนึ่งก็ได้ เพราะฉะนั้นสายเส้นใยแก้วไม่อาจที่จะเป็นอิสระต่อการสัมผัสกับเคเบิลตลอดไป

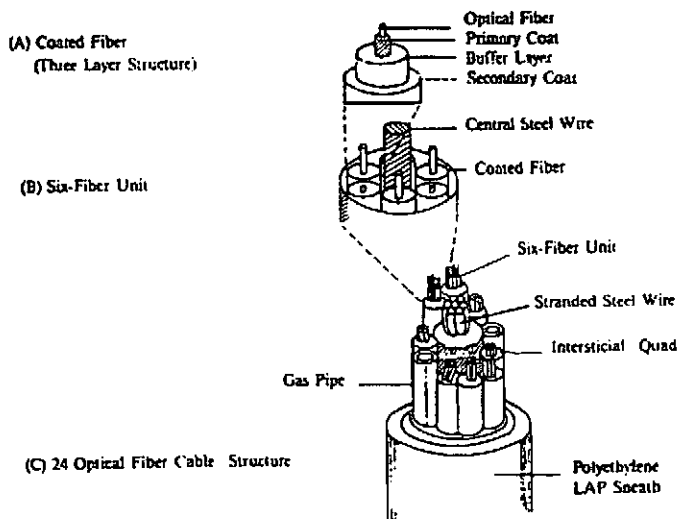
ในกรณีโครงสร้างแบบแน่น ลวดรับแรงดึง (tension member) ไม่เพียงแต่ที่จะป้องกันแรงที่กระทำต่อสายเส้นใยแก้วเท่านั้นแต่ยังช่วยป้องกันสายเส้นใยแก้วอันเกิดจากการหดและขยายตัวของวัสดุพลาสติกที่ทำสายอันเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ ดังนั้น Micro Bending จะไม่เกิดขึ้น การเกิด Micro bending ขึ้นกับสายก็ทำให้เกิดการสูญเสียพลังงานแสงเนื่องจากแสงกระจายออกไป การสูญเสียพลังงานแสงเกิดได้หลายสภาพด้วยกัน ดังแสดงในภาพประกอบ 45 และ 46 เป็นโครงสร้างของสายเคเบิล



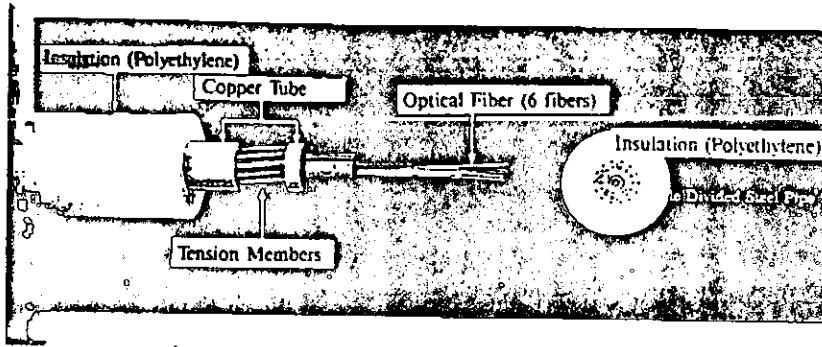
ภาพประกอบ 45 แสดงการสูญเสียพลังงานแสงในลักษณะต่าง ๆ



ภาพประกอบ 46 (1) โครงสร้างสายเคเบิลใต้น้ำ



ภาพประกอบ 46 (2) โครงสร้างของสายเคเบิล



ภาพประกอบ 46 (3) สายเคเบิลที่ไม่มีเกราะป้องกันใช้งานในท้องทะเลลึก

ภาพประกอบ 46 แสดงโครงสร้างของสายเคเบิลใยแก้ว

1.3 ระบบการจ่ายสาย

ในระยะเริ่มแรกนั้นการเดินสายจ่ายไปยังผู้เช่าในงานทางด้านข่ายสายตอนนอกใช้วางสาย open wire เมื่อมีผู้เช่าเพิ่มขึ้นก็สามารถเดินสายเพิ่มขึ้น ซึ่งไม่มีปัญหาหรือไม่จำเป็นที่ต้องเตรียมวางสายไว้ล่วงหน้าสำหรับผู้เช่าที่จะเพิ่มขึ้นในอนาคต ดังนั้น วิธีการจ่ายสายจึงไม่ยุ่งยาก ในโอกาสต่อมาบ้านเมืองเจริญขึ้นความต้องการใช้โทรศัพท์ในด้านธุรกิจก็เพิ่มขึ้นสาย open wire จึงไม่เหมาะสมสำหรับใช้กับจำนวนโทรศัพท์ที่เป็นจำนวนมากจึงได้พัฒนามาใช้สายเคเบิลแทน จึงมีความจำเป็นที่จะต้องวางแผนการวางสายเคเบิลให้มีจำนวนคู่สายให้เพียงพอสำหรับจำนวนผู้เช่าที่จะเพิ่มขึ้นในอนาคต การลงทุนก็จะต้องมีไว้ล่วงหน้าสำหรับแผนงานดังกล่าว

การให้บริการสำหรับจำนวนของผู้เช่าที่จะมีถึงในอนาคตก็จะต้องมีเทคนิคและวิธีการในการคาดคะเนจำนวนความต้องการให้ใกล้เคียงกับความเป็นจริง และวิธีการจ่ายสายก็มีความจำเป็นเพื่อที่จะให้การบริการของความต้องการที่เกิดขึ้นในอนาคตนั้น บรรลุผลและมีประสิทธิภาพ ระบบการจ่ายเคเบิลมีมานานจนกระทั่งได้มีการพัฒนาการทำสายเคเบิลในแบบต่าง ๆ ระบบการจ่ายสายจึงได้มีการคิดเปลี่ยนแปลงให้ง่ายขึ้น ในระยะเวลาที่ผ่านมาเริ่มต้นในระบบการจ่ายสายขึ้นอยู่กับความชำนาญและความนึกคิด ในทางทฤษฎีและการจ่ายสายจะได้อธิบายในหัวข้อดังต่อไปนี้

1.3.1 ระบบการจ่ายสาย

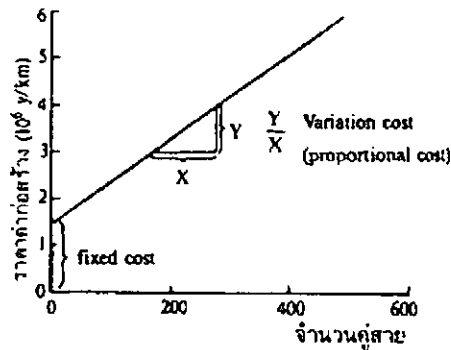
บรรทัดฐานในการจ่ายสายนั้น จะต้องคำนึงว่าสายที่ทำการติดตั้งและการใช้คู่สายจะต้องให้ได้ผลดีที่สุด ประหยัด มีการคล่องตัวและสะดวกในเรื่องการบำรุงรักษา มาตรการของการใช้สายให้บรรลุผลในเรื่องการประหยัดและการคล่องตัวจะได้กล่าวดังต่อไปนี้

1.3.1.1 จุดประสงค์ ในการพัฒนาสายเคเบิล

คือ ต้องการที่จะลดค่าใช้จ่ายต่อคู่สายให้ได้ก็ต่อทำสายเคเบิลให้มีจำนวนคู่มาก ในการออกแบบงานข่ายสายตอนนอกคู่สายที่จะจ่ายไปยังแต่ละพื้นที่นั้นจะต้องมีเพียงพอสำหรับผู้เช่าที่จะมีขึ้นในอนาคต เปรียบเหมือนบริษัทจะต้องมีสินค้าสต็อกไว้สำหรับขายให้ลูกค้าที่ต้องการซื้อ แต่ละสายที่เผื่อไว้นั้นจะมีมากน้อยแค่ไหนนั้น ก็จะต้องพิจารณาดู ซึ่งมีอยู่ 3 ประเด็น คือ

ประเด็นที่หนึ่ง พิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างคู่สายเคเบิลและสเกลกราฟ แสดงในภาพประกอบ 47

ประเด็นที่สอง วิธีการกำหนดคู่สายที่จ่ายให้ในแต่ละพื้นที่คู่สายเหล่านั้นจะต้องถูกใช้หมดตามระยะเวลาที่กำหนด การที่จะไม่ให้มีปัญหาในเรื่องคู่สายไม่พอสำหรับจ่ายนั้นก็ต้องลงทุนอย่างมหาศาล



ภาพประกอบ 47 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนคู่สายเคเบิลกับราคาก่อสร้าง

สิ่งสำคัญในการปฏิบัติคือต้องกำหนดระยะเวลาการรอคอยในแต่ละพื้นที่และพื้นที่ที่จะจ่ายสายนั้นไม่กว้างเกินไป แต่อย่างไรก็ตามจะต้องพิจารณาถึงนโยบายและเงินทุนซึ่งเป็นส่วนสำคัญในการบริหารงาน

ประเด็นที่สาม ก็คือระยะเวลาและวิธีสำหรับการที่จะก่อสร้างเพิ่มในเมื่อจำนวนผู้เช่าในแต่ละพื้นที่เกินจำนวนที่กำหนดไว้ ในการก่อสร้างที่ประหยัดที่สุดก็คือระยะเวลาว่าควรจะเริ่มเมื่อไร หรือระยะเวลาที่คาดว่าจะกำหนดจำนวนคู่สายที่จะวางเสริมเมื่อไร เมื่อจำนวนคู่สายเดิมไม่พอจ่าย (optimum ultimate period) และการลงทุนจัดหาอุปกรณ์เครื่องมือในระยะเวลาที่เหมาะสม (optimum plant) optimum ultimate period ในการออกแบบของสายเคเบิลต้นทาง คือในระยะเวลา 5-7 ปี สำหรับสายเคเบิลปลายทางนั้นระยะเวลา 10-15 ปี

1.3.1.2 การกำหนดขนาดพื้นที่ในการจ่ายสายและระดับการคล่องตัว (degree of Flexible)

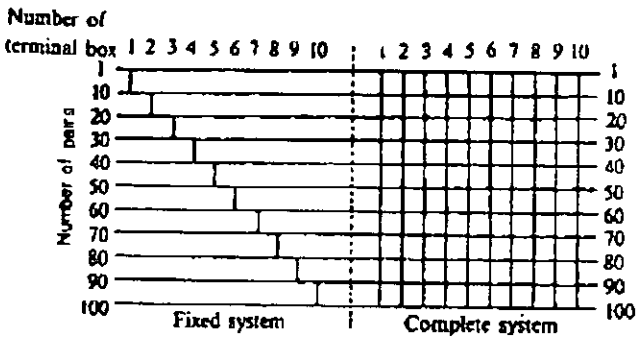
การกำหนดอุปกรณ์ หรือเครื่องมือไว้เป็นจำนวนมากเพื่อการเผื่อไว้ให้กับจำนวนผู้เช่าที่คาดว่าจะมีขึ้นในอนาคตเพื่อจะให้ดำเนินการก่อสร้างวางสายถ้าเป็นไปได้ก็จะต้องทำให้พื้นที่ ที่จะจ่ายสายนั้นมีการตลาดเคลื่อนน้อยที่สุด แต่ในการคาดคะเนจำนวนผู้เช่านั้นอาจจะมากหรือน้อยกว่าความเป็นจริงที่มีขึ้น เพื่อเป็นผลดีในการลดค่าใช้จ่ายก็ควรจะให้ตัวเลขที่เผื่อเหลือเผื่อขาดนั้นน้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้

ปัญหาในการจ่ายสายก็เป็นปัญหาสำคัญที่จะให้ได้ตามเป้าหมายสำหรับพื้นที่จ่ายสายนั้นโดยคู่สายทุกคู่จะต้องถูกใช้ไปหมดตามระยะเวลาที่ได้ตั้งเป้าหมายไว้ (หลังจาก 15 ปี)

ระดับของการคล่องตัวก็เปรียบเหมือนกับการวัดความมีประสิทธิภาพของวิธีการ หรือระบบจ่ายสาย โดยทั่วไประบบการจ่ายจะใช้สายต่อกับคู่สายซ้ำกันกับคู่สายในตู้พักสาย ที่อยู่ใกล้กันหรือใช้สาย Auxiliary ต่อเชื่อมโยงกับตู้พักสายที่อยู่ในพื้นที่นั้น เพื่อทำให้การนำเอาคู่สายไปใช้ได้คล่องตัวมากขึ้น

ระบบการจ่ายสายที่มีความคล่องตัวสูงนั้นคือทุกคู่สายที่อยู่ในพื้นที่การจ่ายสายสามารถที่จะดึงเอาไปใช้ที่ตู้พักสายใด ๆ ก็ได้เพื่อให้เป็น 100 % และในพื้นที่การจ่ายสายที่ไม่มีความคล่องตัวนั้นคือที่จุดต่อนั้น ๆ เป็นอิสระคือไม่สามารถดึงไปใช้ยังจุดอื่น ๆ ได้ซึ่งกำหนดให้เป็น 0

ระบบการจ่ายสายที่มีความคล่องตัว 100% นั้นเรียกว่า ระบบสมบูรณ์และในระบบการจ่ายที่ความคล่องตัวเป็น 0 เรียกว่าระบบตายตัว (Fixed System) ดังแสดงในภาพประกอบ 48



ภาพประกอบ 48 ระบบการจ่ายสายแบบสมบูรณ์และตายตัว

การคาดคะเนในพื้นที่การจ่ายสาย (distribution block) ในการที่จะให้เกิดการคล่องตัวใกล้เคียงกับแบบสมบูรณ์นั้นก็จะต่อสายแบบ Multiple และ Auxiliary เข้าช่วย

1.3.2 ระบบการจ่ายสายที่แท้จริง

1.3.2.1 ระบบการจ่ายสาย

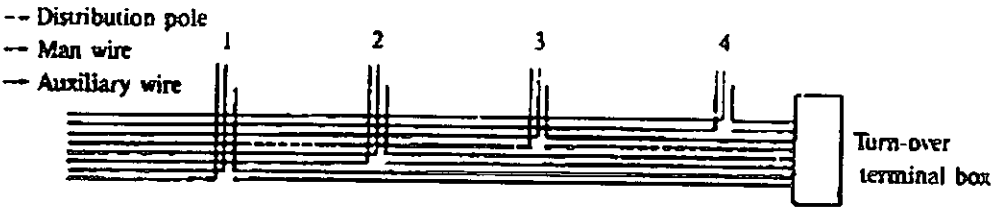
การจ่ายสายในระบบ Ready access ใช้สาย ccc เคเบิลในระบบ Fixed และ Link นั้นใช้สายเคเบิลแบบ Lead Sheath ซึ่งยังคงมีเหลืออยู่

1.3.2.1.1 ระบบการจ่ายใช้ Lead Sheath เคเบิล

1. ระบบการจ่ายสายแบบ Link,

ในระบบนี้ตู้พักสายแต่ละอันมีคู่สายที่ต่อแบบ multiple และ Auxiliary กับตู้พักสายที่อยู่ใกล้เคียงกันเพื่อที่จะให้เชื่อมต่อกับตู้พักสาย ที่จุดอื่น ๆ ที่ติดตั้งอยู่ในพื้นที่จ่ายสายเดียวกันเพื่อให้การใช้คู่สายเกิดการคล่องตัวมากขึ้น Auxiliary wire และ Link wire นั้นจะโยงไปต่อกับตู้ผ่าน (Turn-over terminal box) ติดตั้งไว้ที่ปลายสายและจุดที่ลดคู่สาย

ในระบบนี้จะเกิดการคล่องตัวดีแต่การต่อสายนั้นจะยุ่งยาก จำนวนคู่สายเคเบิลและตู้พักสายจะมีขนาดใหญ่ ตัวอย่างการจ่ายสายดังแสดงในภาพประกอบ 49



ภาพประกอบ 49 การจ่ายสายระบบ Link

2. การจ่ายสายในระบบ Fixed

ในระบบนี้ Terminal box แต่ละอันจะมีทั้ง Multiple wire และ Main wire ส่วน Multiple wire จะต่อกับ Main wire ของ Terminal box ถัดไปเพื่อที่จะให้เกิดการคล้องตัวในการจ่ายสายในระบบนี้จำนวนคู่สายเคเบิลสามารถที่จะลดลงได้ในบางจุดขึ้นอยู่กับ Main wire ที่ถูกดึงไปใช้ ระบบนี้อาจเรียกได้ว่าเป็นระบบ reduction การคล้องตัวในการจ่ายสายจะมีการคล้องตัวน้อยกว่า แบบ Link

ในระบบนี้ข้อดีก็คือจะประหยัดคู่สายของสายเคเบิลปลายทาง ระบบนี้จะจัดทำในพื้นที่ที่มีผู้เช่าไม่มากนักและการโยกย้ายของผู้เช่ามีไม่บ่อยนัก และอีกอย่างหนึ่งก็คือ ในระบบนี้จะขาดการคล้องตัวในเมื่อผู้เช่ามีการโยกย้ายมากขึ้นหรือเมื่อการพยากรณ์ผู้เช่าที่จะมีขึ้นในอนาคตลำบาก



ภาพประกอบ 50 การจ่ายสายในระบบ Fixed

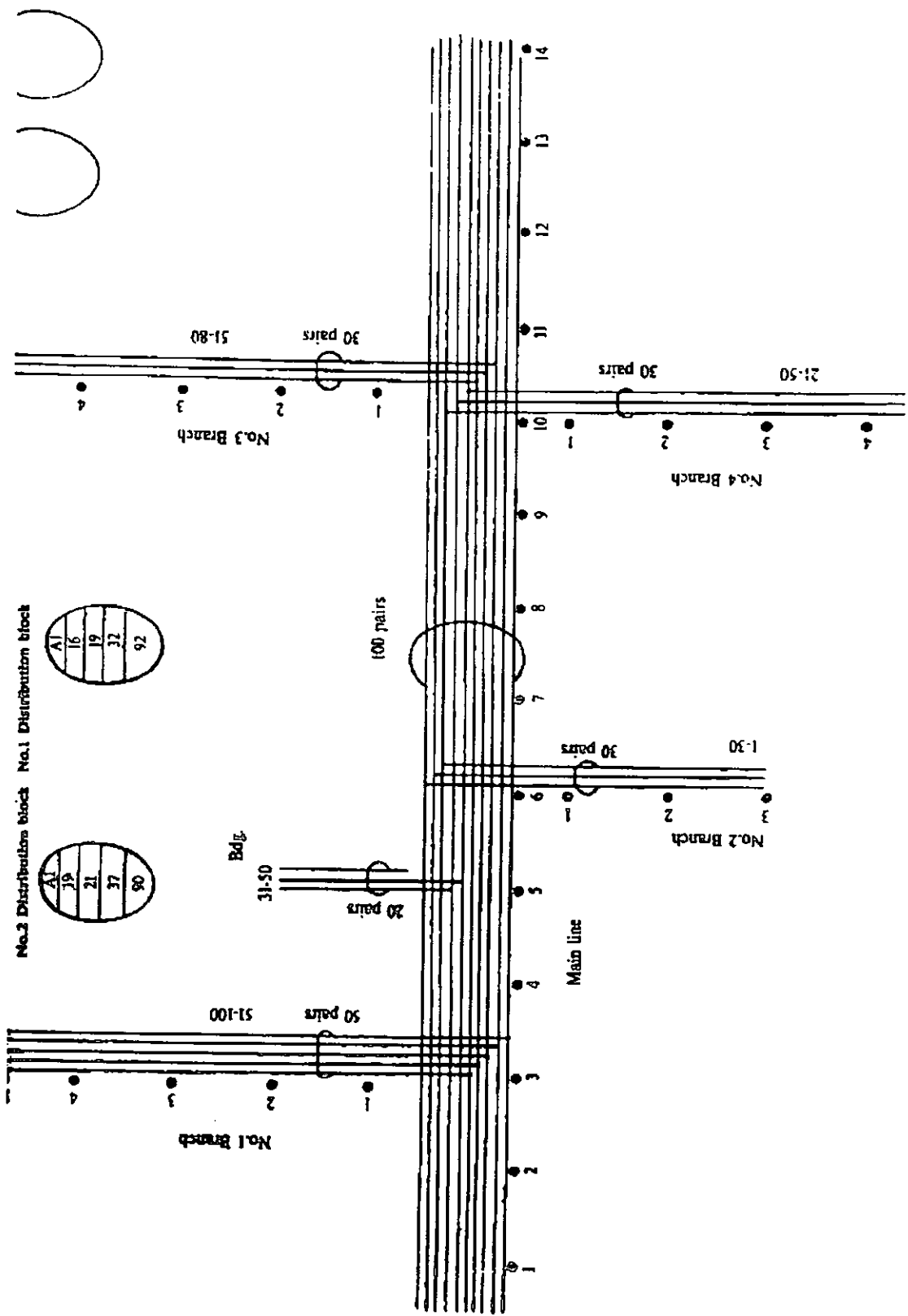
1.3.2.2 การจ่ายสายโดยใช้สาย CCP (Ready access Distribution System)

ในการจ่ายสายโดยใช้เคเบิลชนิด Pb-cable ดังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อ (1) การจ่ายสาย Main wire Multiple wire และ Auxiliary wire เข้าที่ตู้พักสาย (Terminal box) นั้นจำนวนคู่สายที่ป้อนเข้าไปขึ้นอยู่กับความต้องการของผู้ใช้ที่คาดว่าจะมีขึ้นในอนาคตซึ่งตามความเป็นจริงแล้วจำนวนผู้เช่าแต่ละจุดจะไม่เป็นไปตามที่คาดคะเนไว้ บางครั้งไม่สามารถที่จะดึงเอาคู่สายที่เหลืออยู่บางจุดไปใช้ยังจุดอื่นได้ สำหรับการจ่ายสายโดยใช้สาย CCP นั้นสายทุกคู่สามารถที่จะเอาไปใช้ยังจุดใดก็ได้เมื่อมีผู้เช่าต้องการโดยทำการติด ready access terminal box และต่อสายกระจายจากตู้พักสายไปยังผู้เช่า เพราะคู่สายใน Main เคเบิลสามารถทราบได้จากสีว่าเป็นคู่สายคู่ที่เท่าไรที่ยังเหลืออยู่ซึ่งง่ายและสะดวกในการจ่ายสาย คู่สายทุกคู่สามารถที่จะนำไปใช้ได้ทุกคู่ จึงมีการคล้องตัวสูงในการจ่ายสาย

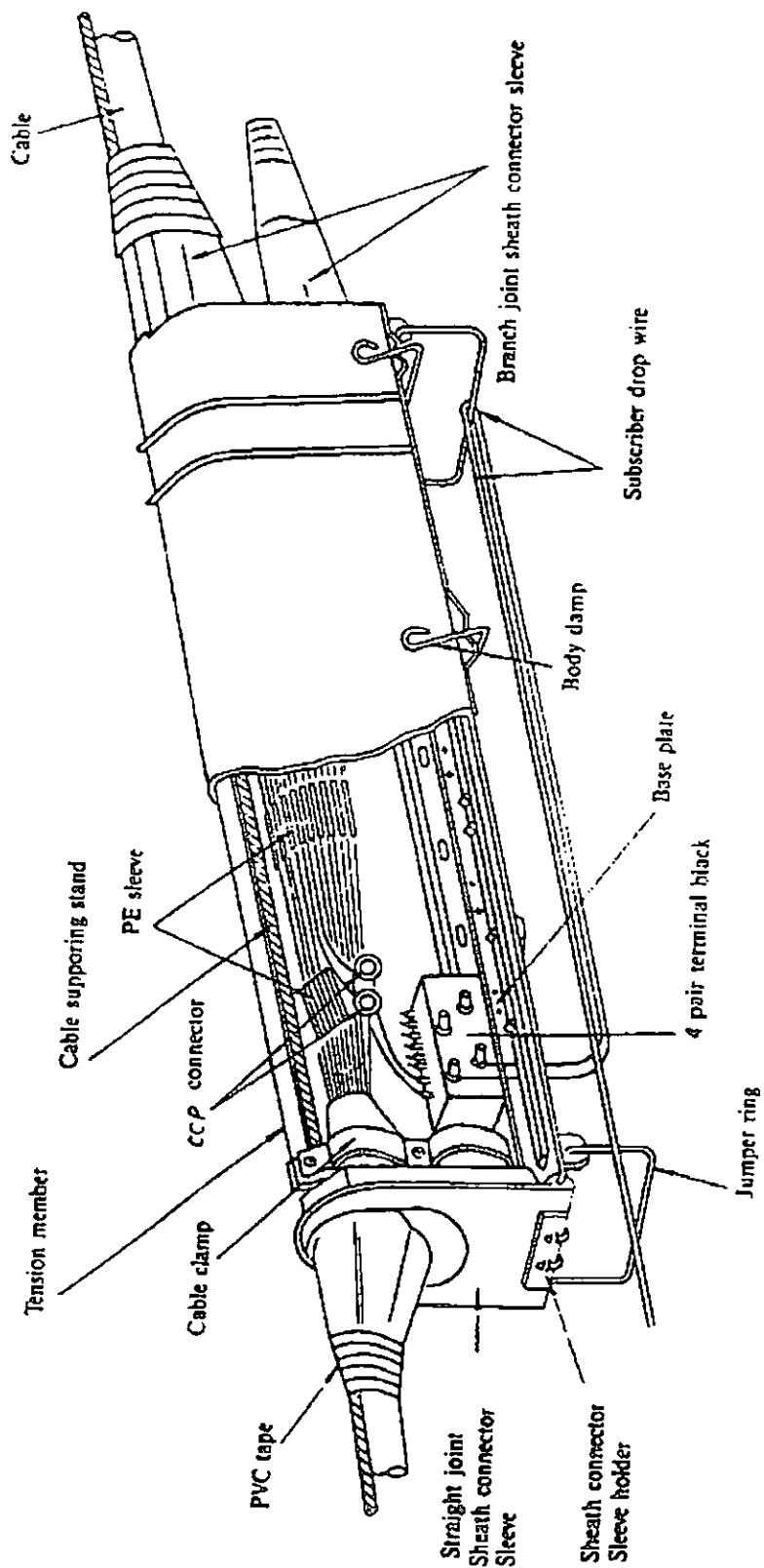
ดังนั้นในการออกแบบจ่ายสาย สิ่งที่สำคัญก็คือว่าจะกำหนดจำนวนคู่สายเคเบิลอย่างไร ที่จุดใดบ้างสามารถที่จะลดจำนวนคู่สายลง หรือให้เหมาะสมกับความต้องการและประหยัด ในภาพประกอบ 51 แสดงการต่อสาย CCP ในระบบ Ready access และในภาพประกอบ 52 เป็น Ready access terminal box ที่ใช้ร่วมกับสาย CCP

1.3.2.3 พื้นที่การจ่ายสาย (Distribution Area)

เพื่อสะดวกในการออกแบบและการบำรุงรักษาอาณาเขตของชุมสายจะแบ่งออกเป็นพื้นที่เล็ก ๆ ซึ่งเรียกว่า พื้นที่การจ่ายสายในพื้นที่ดังกล่าวจะต้องกำหนดว่าในระยะเวลา 15 ปี ข้างหน้าจะมีผู้เช่าเป็นจำนวนเท่าไร แล้วพื้นที่การจ่ายสายจะถูกกำหนดไว้ดังนี้ 180, 90, 45 ซึ่งตัวเลขเหล่านี้คือจำนวนผู้เช่าที่จะมีขึ้นในระยะเวลา 15 ปี ในแต่ละพื้นที่ที่จ่ายสาย และจำนวนคู่สายเคเบิลที่จะป้อนไปในพื้นที่ดังกล่าวคือ 200, 100 และ 50 คู่สาย ตามลำดับ



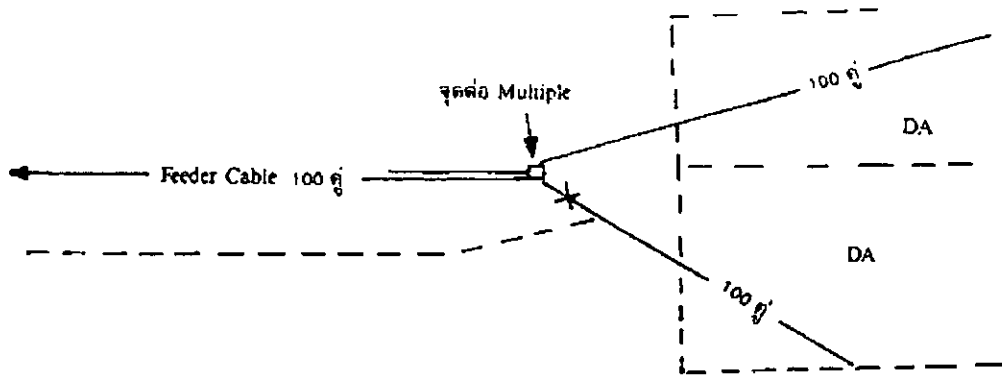
ภาพประกอบ 51 การต่อสายในระบบ Ready access Distribution



ပုံစံ 52 Ready Access Terminal Box

1.3.2.4 พื้นที่การจ่ายสายที่คู่สายต่อร่วมกัน (Multiple Distribution Area)

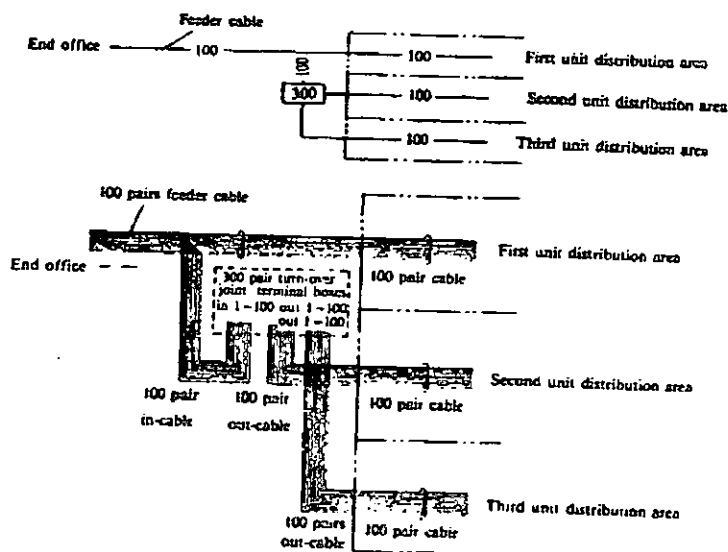
ตามธรรมดาแล้วการวางสายเคเบิลปลายทางนั้นจะต้องมีคู่สายเพียงพอสำหรับผู้เช่าที่จะมีขึ้นในระยะเวลา 15 ปีข้างหน้าส่วนสาย Feeder นั้นคำนึงคู่สายที่จะวางให้เพียงพอสำหรับผู้เช่าที่จะมีขึ้นในระยะเวลา 5 ปี ถ้าในระยะเริ่มต้นการจ่ายจำนวนผู้เช่าในระยะเวลา 5 ปีของ 2 พื้นที่ที่จ่ายสายเมื่อรวมกันแล้วไม่เกิน 100 (ที่จริงแล้วก็ไม่ควรเกิน 70-90) ดังนั้นคู่สายของเคเบิลปลายทางของทั้งสองนั้นควรจะต่อร่วมกัน และต่อเข้ากับ Feeder เคเบิลและหลังจากระยะเวลา 5 ปีในแต่ละพื้นที่จ่ายสายจำนวนผู้เช่าเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เกินจำนวนคู่สายของเคเบิลต้นทางที่วางไว้ ก็ให้วางสายเคเบิลต้นทางเพิ่มขึ้นใหม่ ดังภาพประกอบ 53



ภาพประกอบ 53 สายเคเบิลปลายทางที่ต่อ Multiple

1.3.2.5 ตู้ผ่าน (Cross Connection cabinet)

ในการรวมพื้นที่การจ่ายเข้าด้วยกัน ดังได้กล่าวมาแล้วใน 3.3.3 บางครั้งอาจจะใช้ตู้ CCC เป็นจุดต่อรวมก็ได้และตู้ CCC นี้จะเป็นตัวช่วยให้เกิดการคล่องตัวในการจ่ายสายในข่ายสายผู้เช่า (Subscriber Network) การใช้ CCC เป็นจุดต่อรวมนั้นควรจะทำในพื้นที่จ่ายสายที่จะต่อร่วมกันมากกว่า 2 พื้นที่จ่ายสายขึ้นไป ดังแสดงในภาพประกอบ 54



ภาพประกอบ 54 เป็นการต่อสายร่วมกันโดยใช้ CCC

1.3.3 ระบบการจ่ายสายเคเบิลต้นทาง

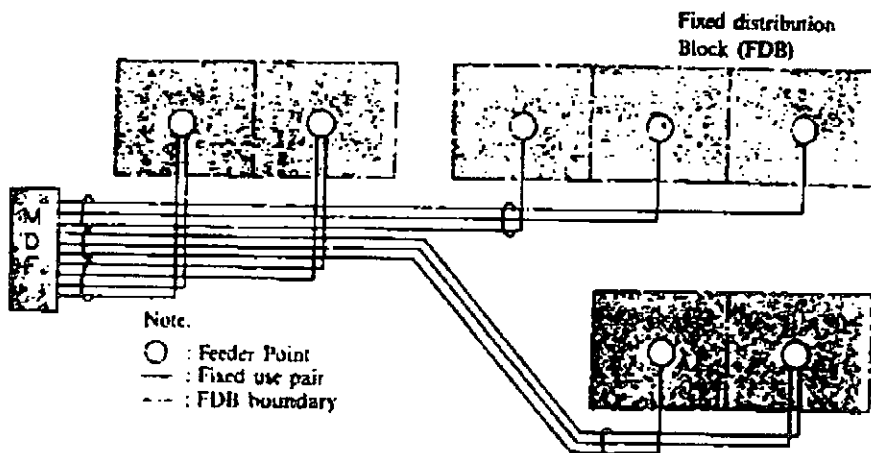
ในปัจจุบันนี้การติดต่อสื่อสารได้เจริญก้าวหน้าเป็นอันมาก และมีความต้องการบริการในระบบแบบน็ดกว้าง เช่น การส่งข้อมูลที่มีความไวสูง การส่งโทรสาร facsimile การส่งภาพ และการส่งโทรศัพท์ เพื่อให้การตอบสนองตามความต้องการและความก้าวหน้าทางเทคโนโลยีในอนาคตสายเส้นใยแก้ว จึงถูกกำหนดมาเป็นสายส่งที่มีประสิทธิภาพเพื่อรับการส่งในระบบ digital และในขณะเดียวกันก็จะต้องมีการดัดแปลงระบบการจ่ายสายให้มีการคล่องตัวและสามารถที่จะเปลี่ยนเข้ากันได้กับระบบใหม่ที่มีขึ้น สิ่งที่สำคัญอย่างยิ่งคือจะต้องตอบสนองความต้องการโทรศัพท์ที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เพื่อให้มีการสมดุลระหว่างการให้บริการกับผู้รับบริการที่จะต้องมีการดัดแปลงข่ายสายที่มีอยู่เดิมเพื่อให้เกิดการคล่องตัวและปรับเข้ากับระบบใหม่ ๆ ที่จะตามมา

จำนวนเครื่องรับโทรศัพท์ที่มีการเปลี่ยนแปลงย้ายจากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง มีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก เนื่องจากการขยายตัวของสังคมและการขยายตัวของผังเมืองกว้างออกไป ซึ่งจะมีผลในการเปลี่ยนแปลงจำนวนเครื่องรับที่ได้พยากรณ์ไว้ก่อน และยังมีผลกระทบเกี่ยวกับอุปกรณ์ซึ่งจะต้องเพิ่มตามขึ้นมาด้วย เนื่องจากการเพิ่มของเครื่องโทรศัพท์ใหม่ที่เกิดขึ้น ดังนั้นก็ต้องปรับปรุงข่ายสายที่มีอยู่เดิมและที่จะวางเพิ่มขึ้นใหม่เพื่อให้เกิดการคล่องตัวมากขึ้นและปรับเข้ากับเทคโนโลยีสมัยใหม่ โดยทั่วไปแล้วข่ายสายผู้เช่าประกอบด้วยข่ายสายเคเบิลปลายทาง และข่ายสายเคเบิลต้นทาง ซึ่งข่ายสายเคเบิลปลายทางในระบบ Ready access เป็นระบบข่ายสายที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ซึ่งได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อ 1.3.1.2 ต่อไปจะกล่าวถึงในระบบข่ายสายเคเบิลปลายทาง

1.3.3.1 คู่สายที่กำหนดให้คงที่ (Fixed use pair) ในภาพประกอบ 55 แสดงการต่อสายเคเบิลต้นทางโดยกำหนดคู่สายต่อเข้ากับตู้ผ่านไวด์ที่ เพื่อจ่ายให้กับผู้เช่าที่อยู่ในพื้นที่ที่กำหนดไว้ (FDB) จำนวนผู้เช่าที่มีขึ้นในแต่ละพื้นที่อาจจะมากหรือน้อยแตกต่างกันไป บางครั้งพื้นที่หนึ่งมีคู่สายเหลือก็ไม่อาจนำคู่สายที่เหลือไปใช้ในพื้นที่ที่ต้องการเพิ่มขึ้นได้ ซึ่งไม่เกิดการคล่องตัวในการจ่ายสาย ในระบบดังกล่าวนี้ได้ใช้ในระยะแรก ๆ ของการบริการ ซึ่งมีผลเสียในระบบจ่ายสายเนื่องจากความไม่คล่องตัว

1.3.3.2 ระบบการต่อคู่สายร่วมกัน (Common pair system)

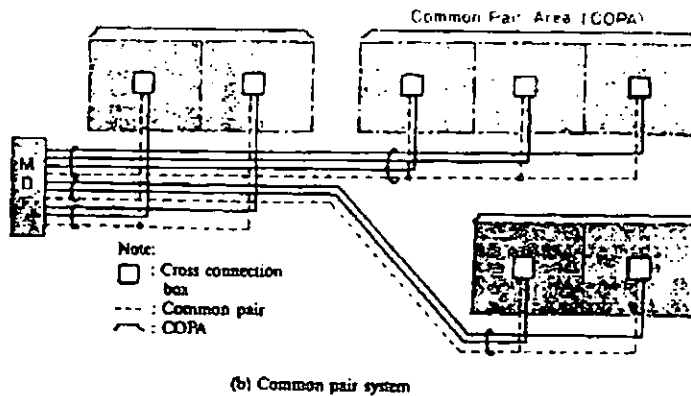
ในการนำเอาสาย CCP เคเบิลมาใช้งานเป็นแบบเคเบิลอากาศก็เพื่อการที่จะปรับปรุงให้เกิดการคล่องตัวในการจ่ายสายและสาย CCP ที่นำมาใช้เป็นเคเบิลต้นทางนั้น ก็จะส่งผลดีในข่ายสายของ



ภาพประกอบ 55 ระบบการต่อสายระบบคงที่

เคเบิลต้นทางหลายประการ ซึ่งเป็นเหตุผลหนึ่งว่าทำไม สาย Pb-cable ที่ใช้งานเป็นสายเคเบิลอากาศนั้นบางครั้งไม่สะดวกที่จะให้บริการแก่ผู้ใช้ได้ เนื่องจากไม่มีจุดต่อที่ตู้พักปลายทาง แทนที่จะพูดว่าไม่มีคู่สายเหลืออยู่ในสายเคเบิลต้นทางตามที่ได้นำเอาสาย CCP เคเบิลมาใช้ในข่ายสายการจ่ายสาย ซึ่งตามทฤษฎีถือว่าสมบูรณ์การรอกอบของผู้ใช้นั้นขึ้นอยู่กับคู่สายเคเบิลต้นทางเคเบิลมีไม่เพียงพอที่จะให้บริการ

การที่จะทำให้ข่ายสายเคเบิลต้นทางมีความคล่องตัวสูง ก็ได้ปรับปรุงเอาการจ่ายสายในระบบการใช้คู่สายร่วมกันมาใช้ ซึ่งเรียกว่า common pair system ดังแสดงในภาพประกอบ 56



ภาพประกอบ 56 ระบบต่อคู่สายร่วมกัน

ในระบบการใช้คู่สายร่วมกันมีจุดเด่น ๆ อยู่หลายประการดังนี้

1. ในการจัดทำ Fixed Distribution Block (FDB) นั้นก็เป็นหลักการเบื้องต้นสำหรับการบริหารและการขยายงานในพื้นที่ของชุมสาย ในการกำหนดอาณาเขตของ FDB นั้นจะต้องคำนึงถึงผู้เช่าที่จะมีขึ้นใน FDB นั้น ๆ ไม่เกิน 600 ไม่เกิน 600 ในระยะเวลา 15 ปีข้างหน้า หรือสูงสุดก็ไม่ควรเกิน 800 (ประมาณ 4 UDB ถ้ากำหนดให้ 200 คู่สายใน 1 UDB) ส่วนอาณาเขต FDB นั้นจะต้องคำนึงถึงสภาพของถนน, แม่น้ำ, ทางรถไฟ หรือสภาพของพื้นที่นั้น

2. Common pair area (COPA) คือการรวม FDB ที่อยู่ใกล้เคียงกัน 2-3 FDB จัดทำเป็น 1 COPA เพื่อทำให้เกิดการคล่องตัวในการใช้คู่สายร่วมกันของ FDB ที่อยู่ภายใน COPA เดียวกัน โดยกำหนดให้คู่สาย Common นั้นมี 200 คู่สายในแต่ละ COPA นอกจากนั้นต้องกำหนดคู่สายเผื่อไว้อีก 100 คู่สายสำหรับที่จะป้อนให้กับผู้เช่าที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเราคาดไม่ถึง

3. คู่สายเคเบิลต้นทาง นั้นออกแบบให้มีจำนวนคู่เพียงพอสำหรับผู้เช่าที่จะมีขึ้นในระยะเวลา 5 ปี ข้างหน้า ส่วนคู่สายของเคเบิลปลายทางนั้นออกแบบไว้ให้มีคู่สายเพียงพอที่จะจ่ายให้กับผู้เช่าที่จะมีขึ้นในระยะเวลา 15 ปีข้างหน้า ดังนั้นบางโอกาสสายเคเบิลต้นทางจะต่อโดยอิสระเข้ากับคู่สายของเคเบิลปลายทาง การลดสัญญาณที่สูญเสียในสายเคเบิลซึ่งเกิดจากการต่อโดย Multiple Tee จึงได้นำเอา CCC มาใช้เพื่อความมุ่งหมายดังกล่าวข้างต้น

1.3.3.3 Common Distribution Area Concept

ในปัจจุบัน COPA เป็นระบบที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน ผลที่ได้ออกไปสำรวจในพื้นที่การจ่ายสาย ซึ่งพบว่าอุปกรณ์ต่าง ๆ ในพื้นที่การจ่ายสายสามารถที่จะเพิ่มประสิทธิภาพการใช้งานให้ได้มากขึ้น ถ้ามีการปรับปรุงขนาดของ COPA ให้มีอาณาเขตมากขึ้นโดยไม่คำนึงถึง FDB ที่อยู่ใกล้กัน จำนวนของ common pair สามารถที่จะยืดหยุ่นโดยการจัดสัดส่วนของการพยากรณ์จำนวนความต้องการที่เพิ่มขึ้น ส่วนคู่สายที่เผื่อไว้ spare

ที่จะถูกรวมเข้ากับ common pair ซึ่งผลดังกล่าวนำมาซึ่งการปรับปรุงในระบบข่ายสายของการจ่ายสายแบบใหม่ สำหรับอนาคตโดยการปรับปรุงระบบ COPA เสียใหม่ ซึ่งระบบใหม่นี้เรียกว่า Common Distribution Area Concept (CODAC)

ข้อดีของระบบ CODAC จะได้กล่าวเป็นข้อ ๆ ดังนี้

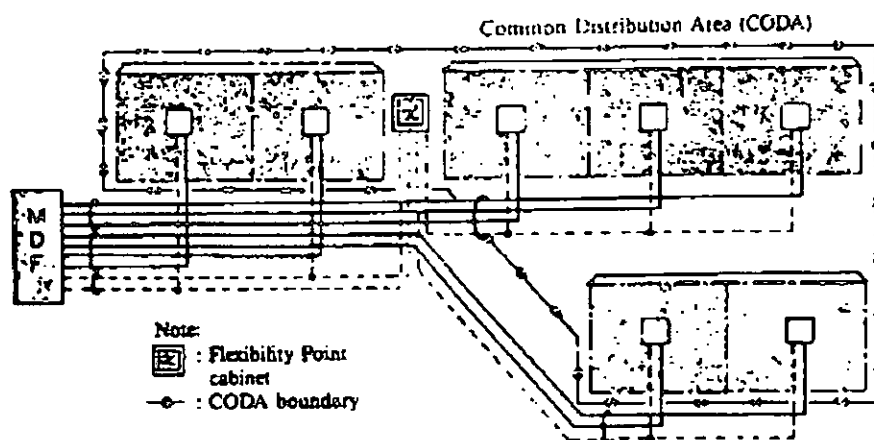
1. Common Distribution Area (CODA) ซึ่งประกอบด้วย FDB ทั้งหมดที่ใช้คู่สายของ Feeder เดเบิลเส้นเดียวกันและอยู่ในเส้นทางเดียวกัน COPA ประกอบด้วย 2 หรือ 3 FDB และหลาย CODA จะทำเป็นหนึ่ง CODA

2. จุดที่ทำให้เกิดการคล่องตัวในการที่จะต่อคู่สายของเคเบิลต้นทางนั้นจะต้องติดตั้งในจุดที่เหมาะสมเพื่อการประหยัดและสะดวกในการจ่ายสาย จุดที่ทำให้เกิดการคล่องนั้นจะติดตั้งตู้ผ่าน ซึ่งใช้เป็นจุดต่อระหว่างเคเบิลต้นทางแต่ละกลุ่มเพื่อให้เกิดการคล่องตัวระหว่างกลุ่มนั้น ๆ ซึ่งแต่ละกลุ่มจะประกอบด้วย 3 ถึง 5 FDB สายต่อพ่วง (Multiple Teeing) จะต่อเข้ากับคู่สายที่ใช้ร่วมกัน (common pair) และโผล่ขึ้นที่ CCB (cross connecting Box) ที่อยู่ใน FDB นั้น ๆ

3. ตู้ FP (Flexibility Point) ที่จะใช้ติดตั้งนั้นจะต้องกำหนดตำแหน่งและให้มีการสมดุลระหว่างค่าใช้จ่ายและเป็นผลดีในเรื่องการประหยัดมาพิจารณาด้วย ตามที่ได้กล่าวมาทั้งหมดนี้ตำแหน่งที่ติดตั้งตู้ FP นี้อาจจะใช้เป็นจุดที่แยกสายเคเบิลต้นทางก็ได้

4. คู่สายที่ใช้ร่วม (common pair) ซึ่งจัดไว้ใน COPA ขนาด 200 คู่ สายก็เตรียมไว้สำหรับผู้เช่าที่เพิ่มขึ้นในอนาคตต่อไป

5. สายที่ต่อให้ผู้เช่าและสายที่ใช้ร่วมกันใน CODAC สามารถที่จะจัดให้ใช้ร่วมกันได้ถึงแม้ว่าจะอยู่ในเคเบิลเดียวกันใน COPA หรือไม่ก็ตาม การบริหารและการปฏิบัติการทำได้ง่ายและสะดวก แผนการจัดทำในระบบ CODAC ดังแสดงในภาพประกอบ 57



(c) CODAC

ภาพประกอบ 57 การรวม CODA เข้าด้วยกัน

ในระบบ CODAC ซึ่งคาดว่าจุด FP นั้นจะมีบทบาทสำคัญเมื่อการวางสายเคเบิลเส้นใหม่สำหรับการโทรคมนาคมในระบบแถบความถี่กว้าง (Broad band) และระบบดิจิทัลซึ่งจะนำมาให้บริการในอนาคตต่อไป

1.3.3.4 การต่อพ่วง (Multiple Tee)

ในการวางสายเคเบิลอากาศ เพื่อจ่ายสายไปยังจุดต่าง ๆ โดยใช้สายเคเบิล CCP เพื่อต้องการ

ให้เกิดการคล่องตัว โดยทั่วไปแล้วคู่สายจะต่อเป็นแบบ Multiple Tee ในการบริการสำหรับเครื่องโทรศัพท์ก็คงไม่มีปัญหาอะไร แต่การต่อแบบ Multiple Tee จะทำให้ที่จุดต่อแยก (Bridge Tap) มีการสูญเสียเพิ่มขึ้น (loss) ถ้าเป็นกรณีในการส่งข่าวสารในระบบดิจิทัลแล้วก็จะทำให้คุณสมบัติของสายส่งเลวลง ดังนั้นจึงไม่ควรต่อแบบ Multiple Tee ควรพิจารณาเตรียมคู่สายไว้สำหรับให้บริการสำหรับแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น การให้บริการในระบบสายส่งแบบดิจิทัล คู่สายที่จะจ่ายไปยังผู้เช่า (ควรจะกำหนดคู่สายไว้ล่วงหน้า 1 หรือ 2 คู่สายต่อเครื่องรับโทรศัพท์ 1 เครื่อง) จะต้องมีการปรับปรุงในเครือข่ายการจ่ายสาย ซึ่งจะต้องพิจารณาในหลายแง่ด้วยกันเช่น

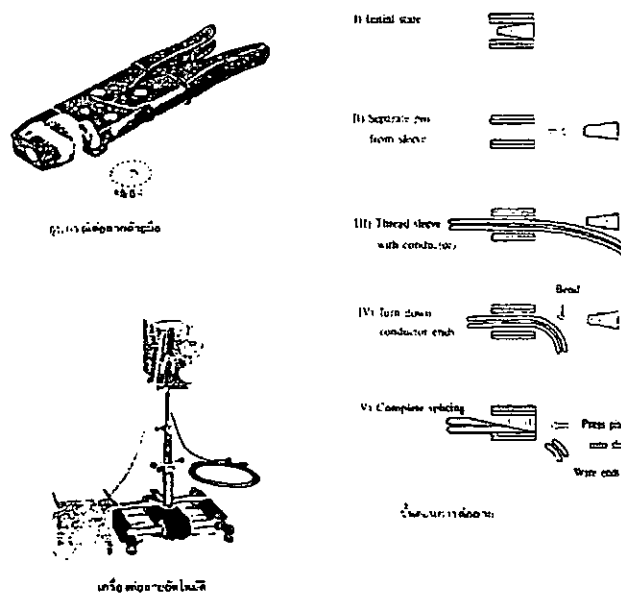
1. การโยกย้ายเครื่องโทรศัพท์จากที่หนึ่งไปยังอีกที่หนึ่ง การยกเลิก, งานติดตั้งซึ่งเป็นปัญหาใหญ่ในการส่งงาน แทนที่จะเป็นปัญหาในการติดตั้งเครื่องโทรศัพท์ขึ้นใหม่

2. ระบบการจองโทรศัพท์ที่ได้มีความก้าวหน้า (ซึ่งรวมถึงอุปกรณ์คู่สายเคเบิลจาก MDF ไปจุดจ่ายสาย, สายกระจาย, สายเดินภายใน เครื่องรับโทรศัพท์จะต้องถูกจองไว้ในกรณีที่มีการโยกย้ายเครื่องจากจุดหนึ่งไปยังจุดหนึ่งและจะต้องคำนึงถึงความต้องการเพิ่มของผู้ที่มีอยู่แล้วอีกด้วย) จำนวนการจองก็จะเพิ่มขึ้นมากยิ่งขึ้น

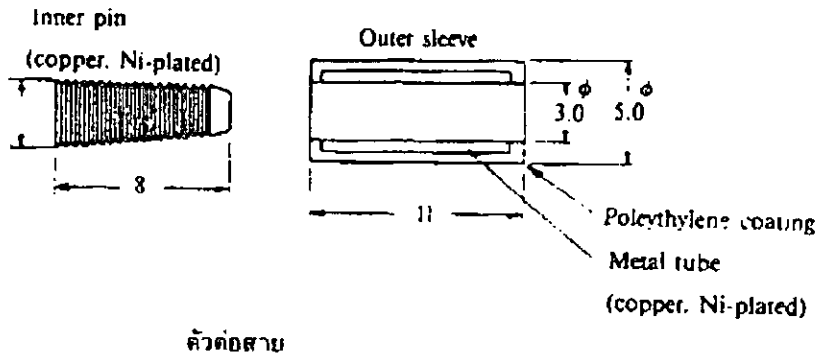
3. ความต้องการที่ไม่ใช่การใช้โทรศัพท์ เช่น การส่งโทรสาร (facsimile) และการส่งในระบบ Telemetry มีแนวโน้มที่สูงขึ้นเรื่อย ๆ

ระบบการจ่ายคู่สายก็ต้องถูกนำมาใช้เพื่อเหมาะสมพร้อมกันไปด้วย อย่างไรก็ตามก็จะต้องคำนึงถึงในเรื่องการคล่องจะลดน้อยลง และจำนวนอุปกรณ์ก็จะเพิ่มขึ้นใน Loop plant สำหรับปัญหาเหล่านี้ ก็ต้องมีการจัดทำหลายรูปแบบเพื่อความเหมาะสมและประหยัดในการจัดระบบจ่ายสายจะทำเฉพาะในข่ายสายเคเบิลปลายทาง ส่วนการคล่องตัวในระบบข่ายสายของสายเคเบิลปลายทางทำได้โดยใช้ตู้ CCB ติดตั้งที่จุดต่อระหว่างสายเคเบิลต้นทาง กับสายเคเบิลปลายทาง

1.3.3.5 ระบบการต่อสาย มีปัญหาอย่างมาก ในโอกาสที่จะเกิดการรบกวน และอุปสรรคต่าง ๆ เช่น ที่จุดต่อสายอาจจะขาดหรือที่จุดต่อทำให้เกิดการสูญเสียของสัญญาณเพิ่มขึ้น อันเนื่องมาจากการต่อแยกออก (Bridge tap) ซึ่งจะมีผลเสียในการส่งระบบแถบความถี่กว้าง (Broad band) เพราะการต่อสายแบบเก่านี้ใช้วิธีที่ตีเกลียวโดยใช้มือ ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาเหล่านี้ และการตอบสนองการส่งอุปกรณ์ช่วยต่อ (connector) ทำการต่อสายของ Junction เคเบิลและสายข่ายสายผู้เช่า ภาพประกอบ 58 แสดงอุปกรณ์ต่อสาย



ภาพประกอบ 58 เครื่องต่อสายและตัวต่อสาย



ภาพประกอบ 58 (ต่อ) เครื่องต่อสายและตัวต่อสาย

1.3.4 การเปลี่ยนแปลงไปสู่อนาคต

ปัจจุบันนี้โครงสร้างของข่ายสายผู้เช่าที่เป็นอยู่ปัจจุบันได้กำหนดให้บริการสำหรับการใช้โทรศัพท์เท่านั้น เครือข่ายขนาดใหญ่ในปัจจุบันได้นำเทคโนโลยีใหม่ ๆ มาใช้ในข่ายสายของผู้เช่า เช่นนำสายเส้นใยแก้วมาใช้ การส่งในระบบดิจิทัลและความก้าวหน้าในการให้บริการติดต่อสื่อสารในหลายรูปแบบ ฉะนั้นเครือข่ายสายที่ได้วางอยู่เดิมแล้วนั้นจะมีการตรวจสอบเพื่อปรับปรุงรูปแบบของเครือข่ายให้มีความยืดหยุ่นและสามารถที่จะใช้ร่วมกับระบบใหม่ได้เป็นอย่างดี

1.3.4.1 เปลี่ยนแปลงไปสู่ระบบ CODAC-STEP1

ในขั้นตอนนี้คู่สายที่ป้อนที่จุด CCB จะมีผลดีในระบบข่ายสายเคเบิลปลายทางและระบบที่เป็นอยู่เดิมที่จะเปลี่ยนไปสู่ระบบ CODAC ของสายเคเบิลต้นทาง ในระบบ CODAC มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องจัดทำ FP สาย Lease line และคู่สายใช้ร่วมกัน (common pair) อาจจะไม่อยู่ในสายเคเบิลเส้นเดียวกัน ถึงแม้ว่าในระบบ CODAC สาย Leased line และ common pair จะอยู่ในเคเบิลเส้นเดียวกันก็ตาม

เมื่อความต้องการในระบบแบนด์กว้างเกิดขึ้นตามฤดูกาล เครื่องรับเหล่านั้นจะใช้สายเคเบิลเส้นเดิมโดยการเลือกคู่สายจาก Leased Pairs ซึ่งจะให้บริการได้ไม่มาก ตามความต้องการหรือกล่าวอีกอย่างหนึ่งคู่สายของ Leased pair ถูกจำกัดดังนั้น การแก้ปัญหาเหล่านี้ก็โดยการดึงคู่สายของ Leased pair ที่มีอยู่ตามจุดต่าง ๆ โดยต่อผ่านสาย common pair ไปยังจุดที่ต้องการใช้ ในกรณีเช่นนี้สาย common pair ไม่เพียงแต่จะช่วยแก้ปัญหาความต้องการที่ผันแปรไปของแต่ละพื้นที่เท่านั้น แต่ยังช่วยในการแก้ปัญหาอันเนื่องมาจากความต้องการให้บริการในระบบแบนด์กว้างที่เกิดขึ้นตามฤดูกาล (random) อีกด้วย

การพิจารณานำเอาเทคนิคต่าง ๆ ของระบบดิจิทัลมาใช้ในข่ายสายผู้เช่าที่จะมีขึ้นในอนาคตนั้น สายเคเบิลที่มีอยู่เดิมแล้วก็จะถูกจำกัดในการใช้ เพราะสายเคเบิลดังกล่าวนั้นฉนวนที่หุ้มลวดตัวนำเป็นกระดาษ (Stalpeth cable) จึงไม่เหมาะสมที่จะใช้ในระบบแบนด์กว้างได้ ดังนั้นก็ได้มีการคิดค้นนำเอาสายเคเบิลชนิดใหม่ที่เหมาะสมมาใช้ในการส่งในระบบดิจิทัล ดังแสดงในตาราง 9 ในขั้นนี้สายเคเบิล DO ถูกนำมาใช้เพราะสามารถที่จะประหยัดค่าใช้จ่ายสำหรับการให้บริการทางโทรศัพท์

ตาราง 9 ชนิดของสายเคเบิลที่ใช้ส่งสัญญาณดิจิทัล

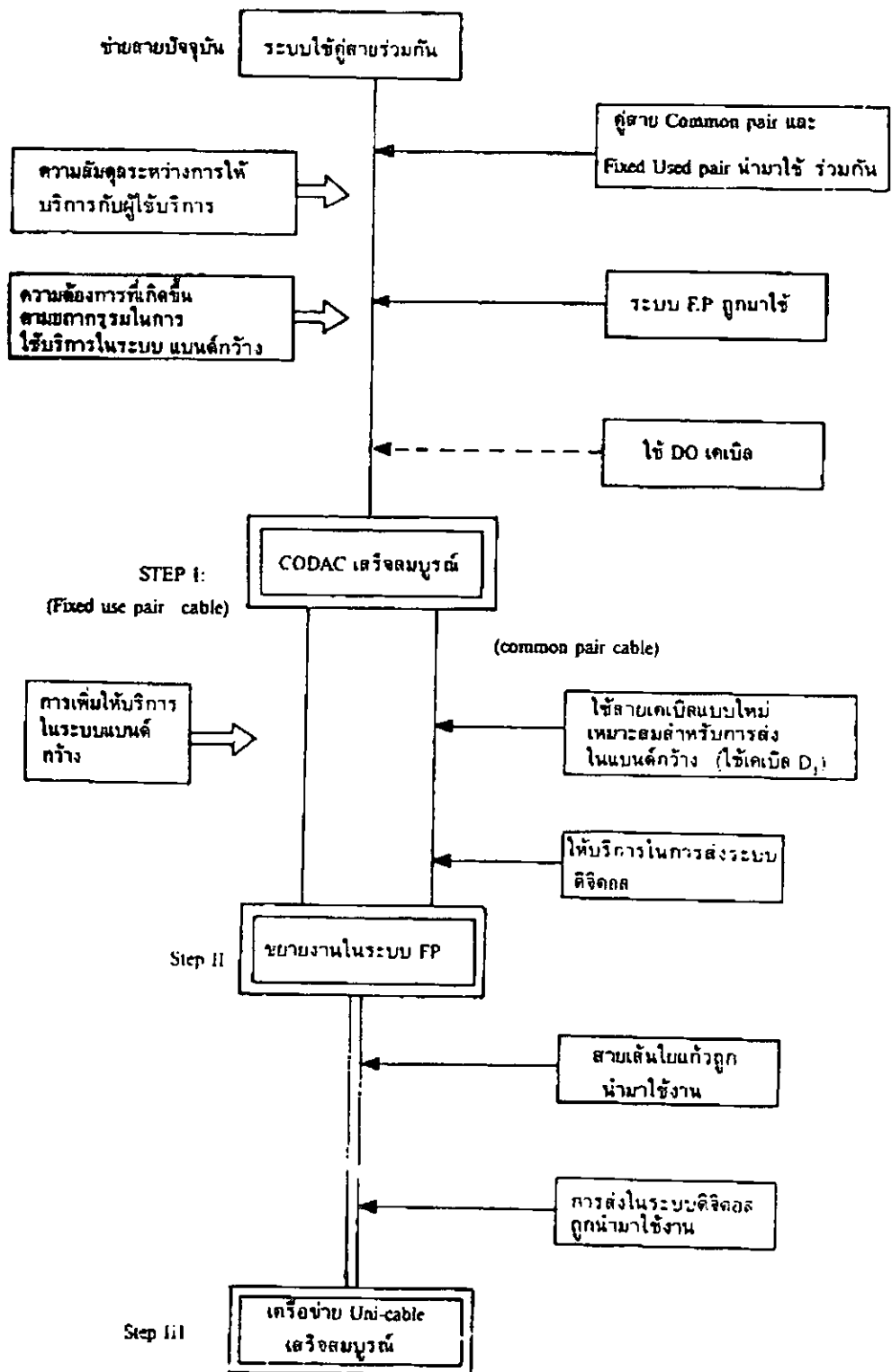
ชื่อสายเคเบิล	ความเร็วที่ส่ง	โครงสร้างของสายเคเบิล
DO	64 kbit/s	เคเบิลแบบนี้ฉนวนเป็นพลาสติก (PE หรือ PEF) แบบ Quad (ในการใช้สายเคเบิลแบบเก่าซึ่งฉนวนเป็นกระดาษใช้ส่งสัญญาณดิจิทัลจะเกิด Crosstalk)
D1	1.544 Mbit/s	ในสายเคเบิลแบบนี้ฉนวนเป็น PEF แต่ละ Unit จะมีสิ่งป้องกันการรบกวนหุ้ม Unit ลวดตัวนำจะเป็นแบบ Twisted pair, หรือ Quad (คุณสมบัติทางไฟฟ้าอยู่ในระดับปานกลางระหว่าง Toll-PEF และสายเคเบิลแบบ แบนด์กว้าง)
D2	6.3 Mbit/s	ฉนวนหุ้มเป็น PE มีสิ่งป้องกันการรบกวนหุ้ม Unit ลวดตัวนำเป็นแบบ Twisted pair (ส่ง 6.3 Mbit/s แบบดิจิทัลสายเคเบิลเป็นแบบแบนด์กว้างจะเหมาะสมที่สุด)
D3	32 Mbit/s	Balance เคเบิลที่ใช้ส่ง 32 Mbit/s สัญญาณดิจิทัล จะไม่เป็นผลดีและมีราคาแพง ดังนั้นสายเคเบิลใยแก้ว จึงถูกนำมาใช้แทน

1.3.4.2 FP ถูกนำมาใช้ขยายเครือข่าย - STEP II

การให้บริการในระบบแบนด์กว้าง มีจำนวนเพิ่มขึ้นก็จะเกิดปัญหาใหม่ ๆ ขึ้นมาอีกถ้าการใช้บริการนั้นยังเป็นสายเคเบิลแบบเก่าอยู่ ดังนั้นการที่จะแก้ปัญหาเหล่านี้ก็จะต้องเปลี่ยนสายแบบเก่ามาเป็นแบบใหม่ ๆ เช่น สายเคเบิลชนิดแบนด์กว้าง และสายเคเบิลแบบ D1 มาใช้เป็นสายส่ง ดังแสดงในตารางที่ 3.1 โดยจัดทำเป็นแบบการใช้คู่สายร่วมกัน (Common pair) ความต้องการในพื้นที่ดังกล่าวนั้นค่อนข้างแน่นอน อย่างไรก็ตามความเปลี่ยนแปลงในขั้นตอนนี้สายเคเบิลทั้งหมดที่ป้อนไปให้ผู้ให้บริการจะค่อย ๆ เปลี่ยนไปที่ละขั้นตอนระยะแรกจะจัดทำเป็น FP ขึ้นต่อไปก็จะจัดทำที่จุด F/D และจากจุด F/D ถึงผู้ให้บริการ

1.3.4.3 เครือข่ายของ Umi-cable เสร็จเรียบร้อยแล้ว (Step-III)

เพื่อรองรับความก้าวหน้าของเทคโนโลยีใหม่ ๆ และแนวโน้มของผู้ให้บริการต้องการให้บริการในระบบแบนด์กว้างมีจำนวนเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นเครือข่ายของ Umi-cable (ให้บริการโทรศัพท์และในระบบแบนด์กว้างก็จะมารวมอยู่ในสายเคเบิลชนิดเดียวกัน) ก็จะต้องลงมือก่อสร้างวางสายเพื่อจะทำให้เครือข่ายสายของผู้เช่าทำได้ง่ายขึ้นและไม่ยุ่งยาก ดังนั้นสายเส้นใยแก้วจึงถูกนำมาใช้เป็น Uni-cable เพราะว่าสามารถที่จะส่งในระบบแบนด์กว้างโดยไม่จำเป็นต้องเลือกคู่สายและไม่ต้องมีสถานีทวนสัญญาณ ขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงไปสู่ระบบใหม่ในอนาคต ดังแสดงในภาพประกอบ 59



ภาพประกอบ 59 แสดงขั้นตอนสู่อนาคต

1.3.5 ระบบขายสายผู้เช่าแบบใหม่

ระบบขายสาย Subscriber แบบใหม่แสดงในภาพประกอบ 60 – 63

1.3.6 ระบบการจ่ายสายใต้ดิน (UG-System)

การจ่ายสายในระบบวางสายใต้ดินนั้นแบบแรกใช้สายแบบ Pb-cable และสาย cc-p-cable ค่าก่อสร้างในการวางสายในระยะแรกนั้นมีราคาแพง 5.10 เท่าเมื่อเทียบกับการวางสายเคเบิลอากาศ ปัญหาต่าง ๆ จะมีประมาณ 3 เท่าโดยประมาณ ดังนั้นการจ่ายสายในระบบใต้ดินจึงจะจัดทำเมื่อมีความจำเป็นเท่านั้น

อย่างไรก็ตามการวางสายใต้ดินเพื่อจ่ายไปให้เครื่องรับโทรศัพท์ กลายเป็นความจำเป็นขึ้นมาซึ่งจะต้องจัดทำ เนื่องจากผังเมืองและความเจริญก้าวหน้าได้ขยายตัวมากขึ้นมีตึกกรมบ้านช่องเกิดขึ้นมากมาย และในบางโอกาสก็ไม่สามารถรื้อติดตั้งวางสายแบบเคเบิลอากาศได้ เพราะเจ้าของสถานที่ต้องการความสวยงามของพื้นที่อีกอย่างก็คือ เครื่องจักรที่ใช้ในการติดตั้งสายเคเบิลอากาศนี้ทำให้เกิดเสียงรบกวน เครื่องจักรมีขนาดใหญ่และมีน้ำหนักมากซึ่งบางทีไปทำความเสียหายกับสิ่งแวดล้อม และผู้อาศัยที่อยู่ในสถานที่ดังกล่าวไม่เต็มใจหรือยินยอมให้ทำการก่อสร้าง

การวางสายเคเบิลใต้ดินมีข้อดีดังนี้คือ

1. อุปกรณ์ต่าง ๆ และเคเบิลจะไม่ค่อยได้รับความเสียหายที่เกิดขึ้น จากธรรมชาติ เช่น ใต้ฝุ่น ฟ้าผ่า ฯลฯ
2. จะไม่เกิดเสียหายจากอุบัติเหตุจราจร, ไฟไหม้
3. ช่วยให้คนงานที่ทำการก่อสร้างและการบำรุงรักษาได้รับความปลอดภัย
4. อุปกรณ์ที่ใช้ในระบบวางสายใต้ดินนั้นไม่เป็นอุปสรรคต่อสถานที่ ดูแล้วจะทำให้เกิดความงาม

ข้อดีดังกล่าวระบบการจ่ายสายแบบใต้ดินมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้น เมื่อคำนึงถึงความเจริญของบ้านเมืองโดยเฉพาะอย่างยิ่งในเมืองหลวง ซึ่งมีตึกกรมบ้านช่องสวยงาม

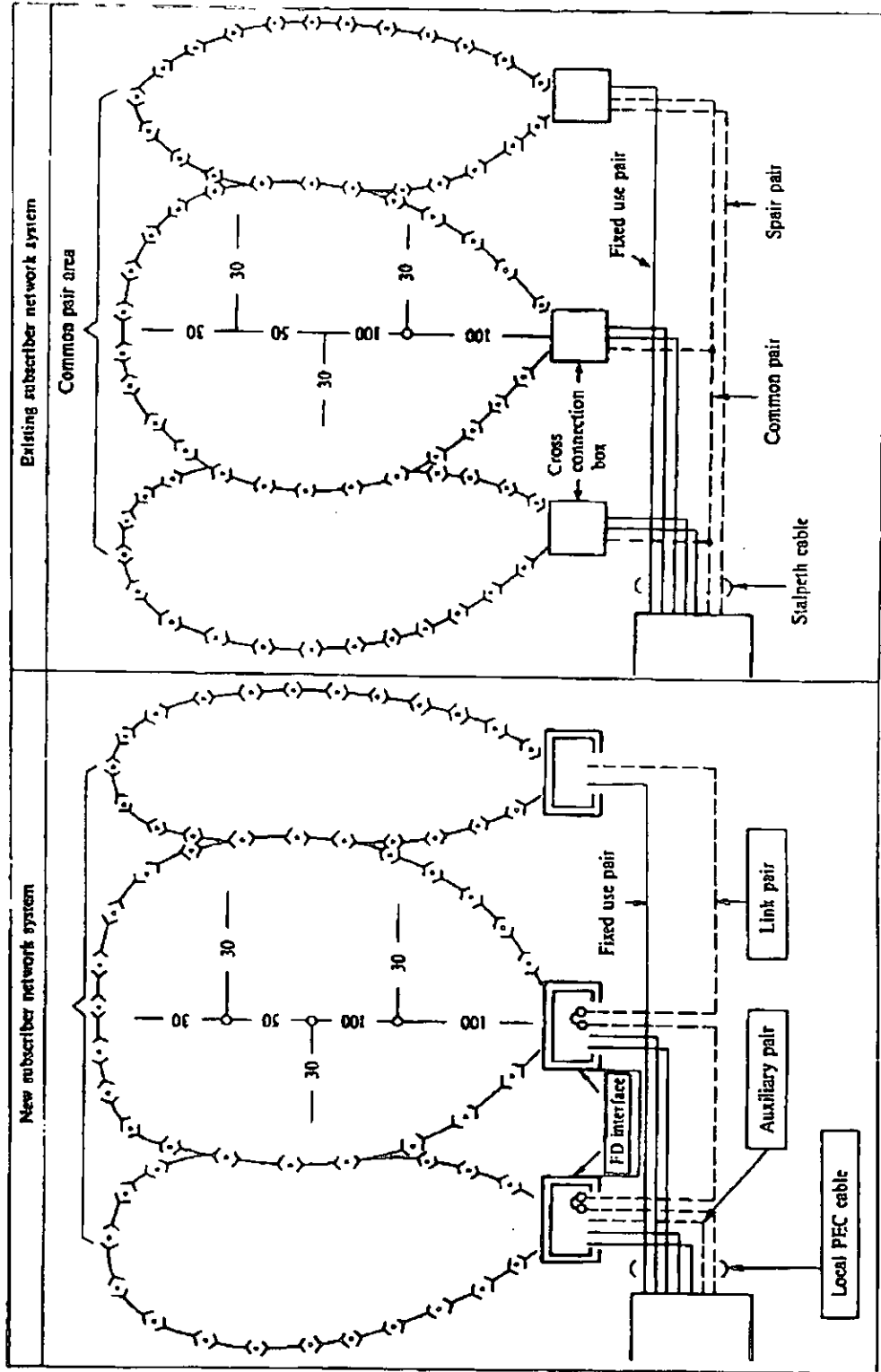
ระบบการจ่ายสายใต้ดินจะแบ่งออกเป็น 3 แบบคือ

1. แบบ UG-P (Under Ground-Pip System) ใช้จัดทำในพื้นที่ที่มีบาทวิถี
2. แบบ UG-H (Under Ground-Handhole System) ใช้จัดทำในบริเวณที่ไม่มีบาทวิถี
3. แบบ UG-B (Under Ground-Buried System) จัดทำในบริเวณที่เป็นอพาทเมนต์

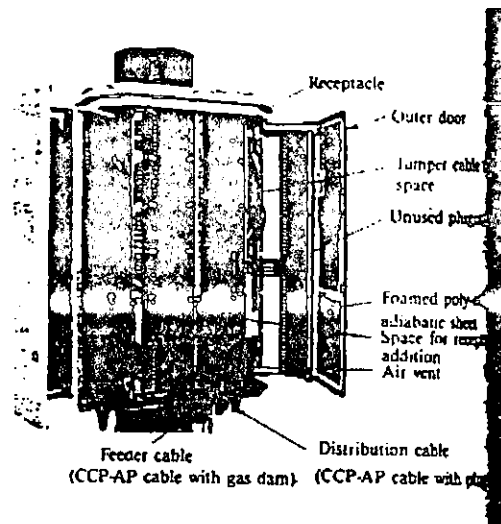
การจ่ายสายทั้ง 3 แบบ ดังได้กล่าวมาแล้วที่จุดต่อสายใช้สารประกอบประเภท Polyurethane ใสไว้เพื่อกันความชื้นและน้ำเข้า สายที่วางนั้นเป็นแบบ CCP-JF cable

1. ระบบ G-P ใช้จัดทำบริเวณที่มีบาทวิถีโดยวางท่อร้อยสายและผู้เช่าในบริเวณดังกล่าวไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก ระบบ UG-P แสดงในภาพประกอบ 64 และระบบการจ่ายสายที่อยู่ในพื้นที่เดียวกันขนาดหลอดตัวนำมีขนาดเหมือนกัน แสดงในภาพประกอบ 65

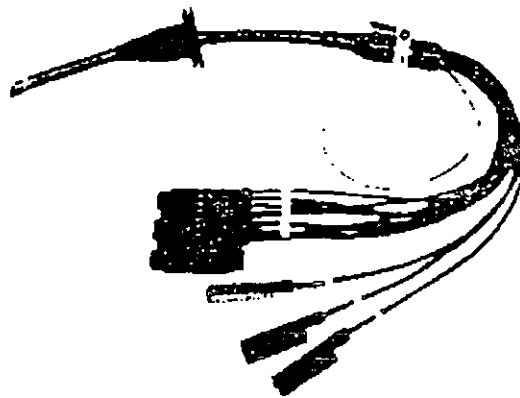
2. ระบบ UG-H ในบริเวณที่ไม่มีบาทวิถีระบบ UG-P ไม่สามารถจัดทำได้ เพราะว่ามีน้ำหนัก รถที่วิ่งไปมาและมีการขุดถนนหรือก่อสร้าง ดังนั้นในระบบ UG-H ที่จุดต่อสายเคเบิลจะถูกป้องกันโดย H.H เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวข้างต้น การจัดทำแสดงในภาพประกอบ 66



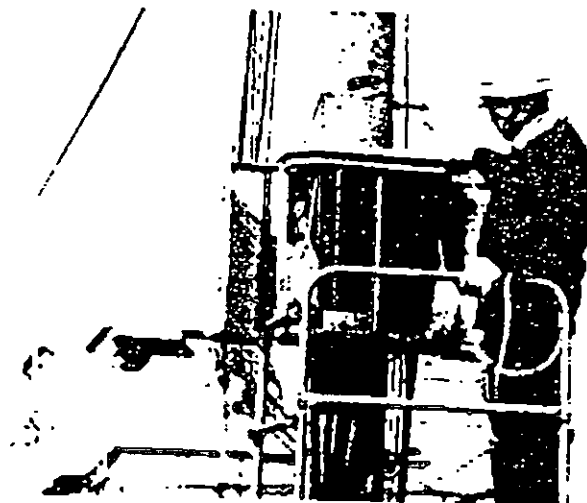
ภาพประกอบ 60 ข่ายผู้เช่าระบบใหม่



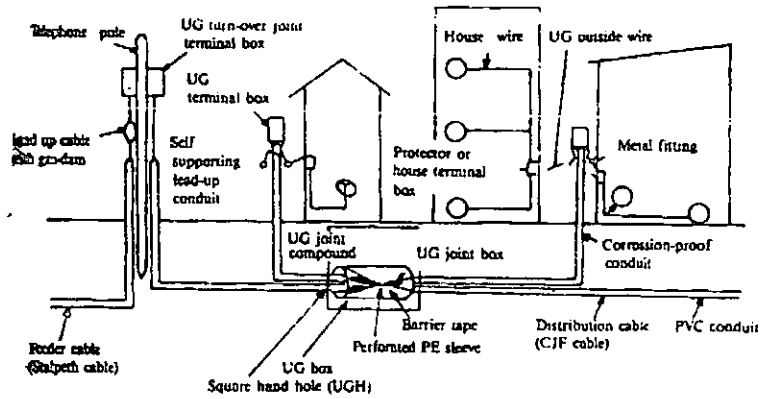
ภาพประกอบ 61 ตู้ต่อสาย F/D



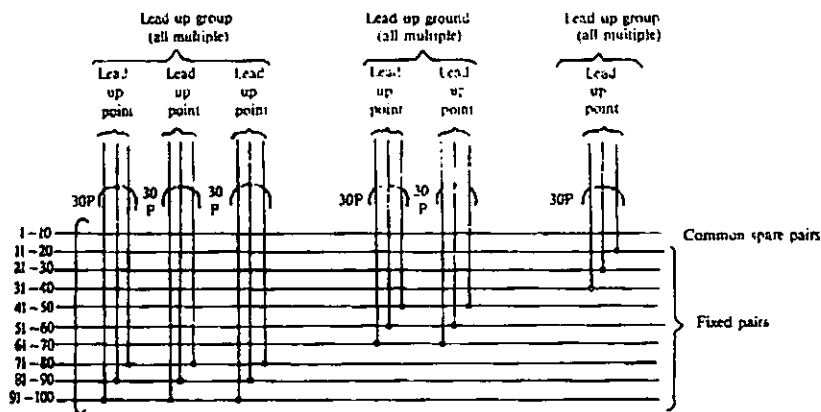
ภาพประกอบ 62 สาย CCP-AP พร้อมปลั๊กเสียบ



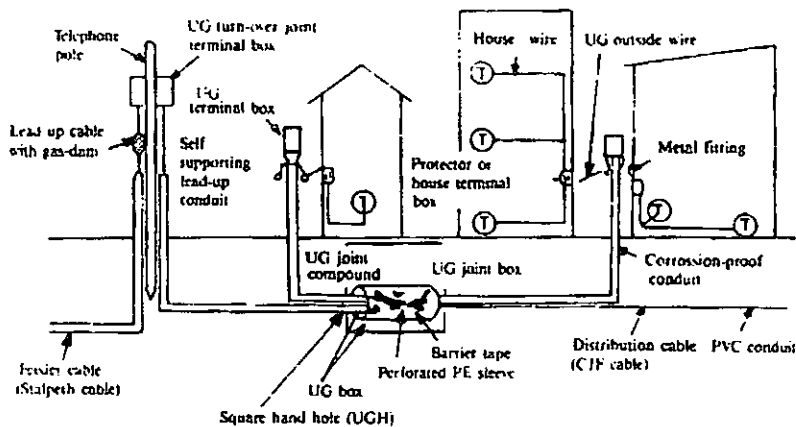
ภาพประกอบ 63 ตู้ F/D ติดตั้งที่เสา



ภาพประกอบ 64 ระบบการวางสาย UG-P

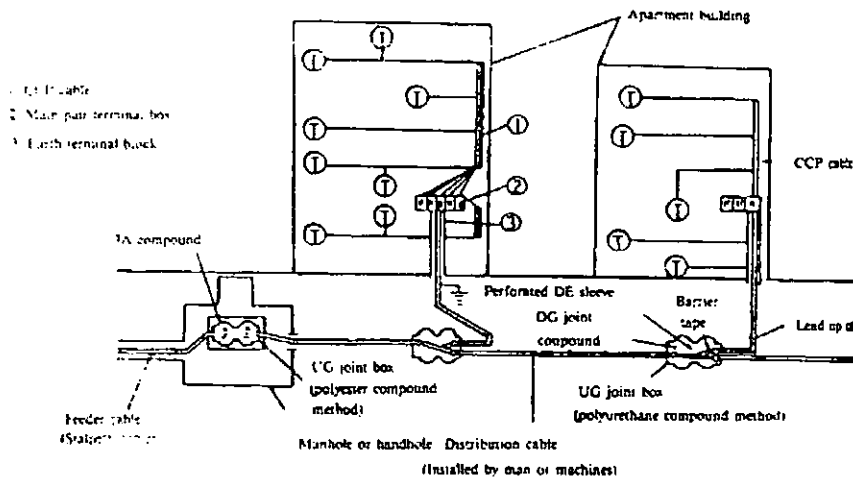


ภาพประกอบ 65 การต่อสายระบบ UG-P



ภาพประกอบ 66 ระบบการวางสาย UG-H

3. ระบบ UG-B สิ่งแวดล้อมและจำนวนผู้ต้องการใช้โทรศัพท์ในชุมชนที่อยู่อาศัยไม่เปลี่ยนแปลง ดังนั้นระบบ UG-B จึงถูกจัดทำในบริเวณดังกล่าวและวิธีการติดตั้งวางสายก็ได้มีการพัฒนามา การขุดดินวางสายใช้เครื่องจักรทำงานได้โดยอิสระ จึงเหมาะที่จะทำในการก่อสร้างชุมชนที่อยู่อาศัยใหม่ ๆ ดังแสดงในภาพประกอบ 67



ภาพประกอบ 67 ระบบการวางสาย UG-B

ระบบการจ่ายสายและการต่อสายเหมือนกันกับ UG-P

สายเคเบิลปลายทางต่อจากสาย Mai เคเบิลที่ตู้พักปลายทาง (Terminal box) ทุกจุดเพื่อแยกไปจ่ายให้ทุก ๆ อาคารที่ต้องการจำนวนคู่สายของเคเบิลปลายทางนั้นจะต้องมีจำนวนคู่สายเพียงพอสำหรับเครื่องรับที่จะมีขึ้นในระยะ 15 ปีของทุก ๆ อาคาร ส่วนสายเคเบิลต้นทางนั้นจะต้องมีคู่สายพอที่จะจ่ายให้กับจำนวนโทรศัพท์ในระยะ 15 ปีเช่นกัน

1.3.7 แนวโน้มในระบบการจ่ายสาย

สายเคเบิลปลายทาง ที่ใช้วางในการจ่ายไปยังผู้ใช้โทรศัพท์นั้นส่วนมากใช้ระบบ Ready access โดยใช้สาย CCP เคเบิลในระบบจ่ายสายเคเบิลต้นทางก็ต้องการให้เกิดสมดุลระหว่างการให้บริการกับผู้รับบริการ การให้บริการในระบบแบบดังกล่าวก็จะมีขึ้นในอนาคตอันใกล้ การให้บริการก็ต้องจัดทำให้อุปกรณ์หลักและเกิดการประหยัดในระบบการจ่ายสาย เพื่อไม่ให้เกิดการสิ้นเปลืองวัสดุและกำลังคน

คุณภาพและปริมาณในระบบการสื่อสารจะมีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากภายในอนาคต แนวโน้มดังกล่าวนี้ก็มีความต้องการดัดแปลงเทคโนโลยีใหม่ของระบบการส่ง, ระบบสวิตชิง, ระบบการจ่ายสาย, จุดต่อและเครือข่ายการสื่อสาร

เครือข่ายในการสื่อสารแบ่งออกเป็น เครือข่าย Toll Switching Local Switching และ เครือข่ายของ Subscriber loop

เครือข่าย Subscriber loop คือ ช่วงระหว่างชุมสายกับผู้ใช้บริการจะต้องนำมาจัดรูปแบบการจ่ายสายตามคุณภาพและปริมาณความต้องการ ซึ่งจะต้องคำนึงถึงสภาพแวดล้อมของพื้นที่นั้น ๆ ด้วย

ข่ายสายผู้เข้าก็จะต้องทำให้ตรงกับความต้องการให้บริการที่คุณภาพสูงและประหยัด สิ่งดังกล่าวนี้อาจต้องนำมาพิจารณาในการจัดทำ

เพื่อตอบสนองการให้บริการกับปริมาณที่เพิ่มขึ้นของเครื่องรับโทรศัพท์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการขยายเพื่อเพิ่มปริมาณและให้บริการด้านคุณภาพสำหรับการส่งข้อมูล, โทรสาร และโทรภาพ ก็จะต้องปรับปรุงข่ายสายของ subscriber loop เสียใหม่ให้เหมาะสมและมีประสิทธิภาพมากขึ้น

1.3.7.1 ปัจจัยในการจัดทำข่ายสายผู้เช่าและนำไปใช้งาน

1.3.7.1.1 ปัจจัยในการจัดทำเครือข่ายของผู้เช่า

ปัจจัยส่วนใหญ่ในการจัดทำเครือข่ายแบบใหม่ ๆ รูปลักษณะของเครือข่าย ระบบการใช้งาน (ระบบการจ่ายสายและระบบการส่ง) และระบบสายส่ง ดังแสดงในตาราง 10

ตาราง 10 ปัจจัยการทำเครือข่าย Subscriber Loop

ปัจจัยหลัก		การจำแนกประเภท
ลักษณะของเครือข่าย		1. Star 2. Branch 3. Loop 4. composite - Loop + Star - Branch + Star - Branch + Loop + Star - Loop + Branch + Star - Branch + Branch + Star - Loop + Loop + Star - other combination
ระบบการจัดทำ	ระบบการจ่ายสาย	1. Direct System 2. Concentration System
	ระบบการส่ง	1. Base band transmission system 2. Multiplex System
สายเคเบิลที่ใช้		1. สายเคเบิลชนิดธรรมดา 2. เคเบิลแกนร่วม 3. เคเบิลใยแก้ว

การจัดทำเครือข่ายแบบเก่าประกอบ(Star + direct system + baseband transmission + syumetrical cable) หลายรูปแบบด้วยกัน โดยพิจารณาถึงหัวข้อเหล่านี้

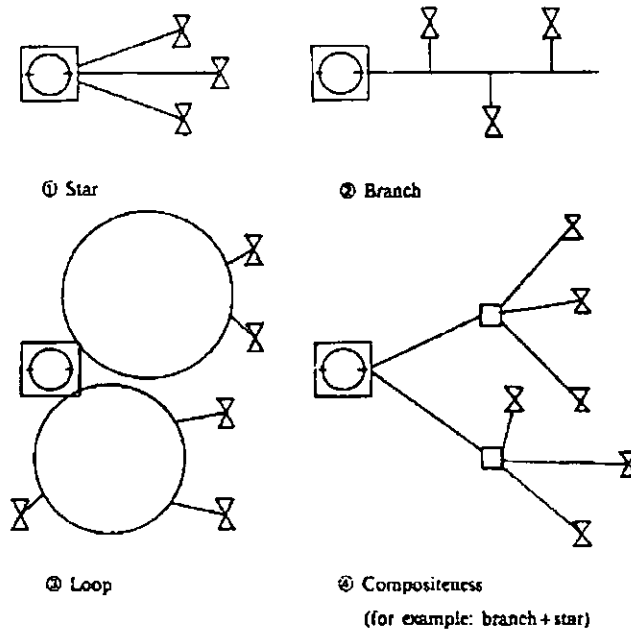
(a) รูปร่างของเครือข่ายมี 4 รูปแบบด้วยกัน

1. Star
2. Branch
3. Loop
4. Composite

รูปแบบต่าง ๆ ดังแสดงในภาพประกอบ 68

(b) ระบบการนำไปใช้งาน (Application system)

ในระบบการนำไปใช้งานแบ่งออกเป็นระบบการจ่ายสายและระบบสายส่ง ระบบการจ่ายสายแบ่งออกเป็น Direct system และ concentration system และระบบสายส่งแบ่งออกเป็น Baseband system กับ Multiplex system



ภาพประกอบ 68 การทำ Subscriber loop แบบต่าง ๆ

1. Direct system

ในระบบนี้สายเคเบิลจะวางจากชุมสายตรงไปยังผู้ใช้บริการ

2. concentration system

อุปกรณ์ concentrator จะติดตั้งอยู่ระหว่างชุมสายกับผู้ใช้บริการในระบบนี้ 1 คู่สายสามารถใช้ได้กับผู้ใช้บริการได้หลายคน ดังนั้นจึงเหมาะสมจัดทำพื้นที่ซึ่งการติดต่อสื่อสารผันแปรไปตามเวลา ซึ่งหมายความว่าผู้ใช้บริการน้อย

3. Baseband transmission system

ใช้ส่งสัญญาณเสียงและสัญญาณภาพ

4. Multiplex transmission system

Multiplexer (FDM หรือ TDM) ติดตั้งอยู่ระหว่างชุมสายกับผู้ใช้บริการ ระบบนี้ใช้จัดทำ เมื่อการติดต่อสื่อสารนั้นผันแปรไปตามเวลา

(c) สายส่ง (Transmission Media)

สายส่งที่ใช้ในเครือข่ายของ Subscriber loop ดังแสดงในตาราง 11

ตาราง 11 ประเภทของสายส่ง

ประเภทของสายส่ง		สัญญาณสูญเสีย ในสาย	จำนวนคู่ที่ทำ	หมายเหตุ
สายเคเบิล ธรรมดา	สาย Local แบบเก่า (0.5 mm)	58 db/Km at 4 MHz	1,800 คู่	ทำคู่สายได้มากจะมีผลต่อการส่งที่ ความถี่สูง ทำให้คุณภาพไม่ได้
	สายเคเบิล wide band (0.65 mm)	2.0 db/Km at 4 MHz	320 คู่	ออกแบบเป็นสายส่งสำหรับ wide band ไม่มีผลต่อการส่งที่ความถี่ สูง
สายเคเบิล แกนร่วม	4.4 m.m cable	54 db/Km at 100 MHz	80 หลอด	เหมาะสำหรับส่งความถี่สูงใช้เป็น สายส่งในระบบ Multiplex
	9.5 m.m cable	23 db/Km at 288 MHz	18 หลอด	
	Local cox. cable	27.5 db/Km at 288 MHz	๑ หลอด	ใช้สำหรับการส่ง CATV มีการ สูญเสียน้อย
สายเคเบิลใยแก้ว (GI)		สัญญาณสูญเสียใน สายน้อย Few db/Km at 0.8 μ m	มีเป็นร้อย ๆ หลอด	Graded Type

1.3.7.1.2 ปัจจัยนำไปใช้งาน (Application factor)

การจัดทำเครือข่าย Subscriber loop ก็แตกต่างกันออกไปก็อยู่กับปัจจัยในหลายอย่างเช่น ปริมาณความต้องการของผู้ใช้, ความหนาแน่นของผู้ใช้, สถานที่ในการจัด, แบบของการให้บริการและประเภทของการให้บริการ

สำหรับปริมาณการแจกจ่าย (demand distribution) ก็มีระยะเวลาการแจกจ่าย (time distribution) และเนื้อที่การแจกจ่าย (space distribution) เนื้อที่การแจกจ่ายของความถี่จะแบ่งออกเป็น การแผ่กระจายออกไป (Spread out) และอยู่ในวงจำกัด (Localized) ลักษณะของเครือข่ายก็แตกต่างกันออกไป อยู่กับความหนาแน่นของผู้ใช้บริการในพื้นที่นั้น ๆ เช่นในบางพื้นที่ต้องการบริการในรูปแบบกว้าง เช่น เดต้า, โทรสาร, โทรศัพท์ แต่บางพื้นที่ที่ต้องการบริการโทรศัพท์ซึ่งส่วนใหญ่ การทำรูปแบบข่ายสายผู้เช่าของทั้งสองอย่างดังกล่าวเพื่อความสะดวกควรจะทำให้เหมือนกัน การจัดทำเครือข่ายที่เหมาะสมก็ขึ้นอยู่กับพื้นที่แต่ละแห่งซึ่งจะต้องคำนึงถึงปัจจัยดังกล่าวข้างต้นมาช่วยในการพิจารณาด้วย

1.3.7.2 เครือข่าย Subscriber loop แบบใหม่

หลักใหญ่ ๆ ของการนำเอารูปแบบมาประกอบกัน เช่น ลักษณะของเครือข่ายระบบการเอาไปใช้

งานประเภทของสายส่ง หลาย ๆ เครือข่ายสามารถที่จะนำมาจัดทำได้ในหลายลักษณะต่างๆ กัน แต่จำนวนของเครือข่ายที่จะให้จัดทำก็จะถูกจำกัดโดยลักษณะเด่นของเครือข่าย, ระบบการนำเอาไปใช้งาน, โครงสร้าง, และคุณสมบัติของสายส่ง

1.3.7.2.1 รูปร่างของเครือข่าย

(a) Star

ในเครือข่ายแบบ Star สัญญาณที่ส่งก็ต้องสัมพันธ์กับข่ายสายผู้เข้าเครือข่ายของ Star เป็นระบบ Direct ระบบการส่งสัญญาณกับสายที่ใช้ส่งนั้นแตกต่างกัน โดยตามธรรมดาแล้วสายเคเบิลทั่วไป (balance cable) จะส่งเป็นสัญญาณเสียงหรือภาพที่ไม่ใช้ระบบ Multiplex ส่วนสายเคเบิลแกนร่วมและสายเคเบิลใยแก้วใช้สำหรับส่งในระบบ Multiplex แต่อย่างไรก็ตามการส่งในระบบ Multiplex นั้นสามารถใช้ส่งในสายเคเบิลธรรมดาที่ใช้บริการทางโทรศัพท์ได้เช่นกัน

(b) Branch

เครือข่ายแบบ Branch สามารถที่จะใช้ในระบบการจ่ายโดยตรงก็ได้ (Direct) โดยการใช้อุปกรณ์ ต่อแยก รูปสัญญาณในระบบ Branch นั้นการส่งจะเป็นระบบ Multiplex และใช้สายส่งเป็นเคเบิลชนิดแกนร่วมและสายเคเบิลใยแก้ว

(c) Loop

เครือข่ายระบบ Loop จะทำเป็นแบบ Direct หรือระบบ Multiplex ก็ได้และสายส่ง ใช้เคเบิลแกนร่วมหรือเคเบิลใยแก้ว

(d) Composite

พื้นฐานการประกอบรวมกันมีอยู่ 6 ลักษณะคือ

(Branch + Star), (Loop+Star), (Branch+Loop+Star)

(Loop+Branch+Star), (Branch+Branch+Star)

(Loop+Loop+Star)

สายเคเบิลต้นทางสามารถใช้ให้มีประสิทธิภาพขึ้นได้ โดยการทำการติดตั้งอุปกรณ์ concentrators ที่เส้นแบ่งเขตระหว่างสายเคเบิลต้นทาง (branch or loop) และสายเคเบิลปลายทาง (star) ดังนั้นในส่วนของสายเคเบิลปลายทางใช้ระบบ concentration ในส่วนของเคเบิลต้นทางใช้ระบบ multiplex และสายที่ใช้เป็นเคเบิลแกนร่วม หรือสายเคเบิลใยแก้ว สำหรับในส่วนของสายเคเบิลปลายทางใช้ระบบ base band หรือ Multiplex สายที่ใช้คือสายเคเบิลธรรมดา, เคเบิลแกนร่วม, เคเบิลใยแก้วก็ได้แล้วแต่ความเหมาะสม ในเครือข่ายโทรศัพท์ที่ส่งในระบบ base band ควรจะใช้สายเคเบิลธรรมดาเป็นสายเคเบิลต้นทางจะเหมาะสมกว่า ตาราง 12 เป็นการผสมผสานเครือข่ายในลักษณะต่าง ๆ

ตาราง12 รูปแบบเครือข่ายของ Subscriber Loop

ลักษณะของเครือข่าย	ระบบการจ่ายสาย	ระบบการส่ง		ประเภทของสายที่ใช้	แบบ
		ช่วงของสาย Feeder	ระบบการจ่าย		
Star	Direct System	ระบบ Base band		เคเบิลธรรมดา	S SI S2 S3
		ระบบ Multiplex		เคเบิลธรรมดา	
				เคเบิลแกนร่วม	
				เคเบิลใยแก้ว	
Branch	Direct System	ระบบ Multiplex		เคเบิลแกนร่วม เคเบิลใยแก้ว	B
Loop	Direct System	ระบบ Multiplex		เคเบิลใยแก้ว	L
เครือข่ายแบบผสม Branch + Star Loop + Star Branch + Loop + Star Loop + Branch + Star Branch + Branch + Star Loop + Loop + Star	Concentration System	ระบบ Multiplex	ระบบ Multiplex	เคเบิลแกนร่วม เคเบิลใยแก้ว	C1
			ระบบ base band	เคเบิลธรรมดา [เคเบิลแกนร่วม เคเบิลใยแก้ว ใช้ในส่วนของ Feeder]	C2
		ระบบ base band		เคเบิลธรรมดา	C3

1.3.7.2.2 การจัดทำเครือข่ายในพื้นที่ใช้งาน

การจัดทำเครือข่ายเพื่อประโยชน์ในการใช้งาน ดังในตาราง 12 ซึ่งก็จะถูกกำหนดโดยปัจจัยต่าง ๆ หรือประโยชน์การใช้งาน ดังแสดงในตาราง 13

ตาราง 13 ปัจจัยการจัดทำข่ายสายผู้เช่า

	การจำแนก	
การแจกจ่าย	• การแจกจ่ายตามลักษณะของพื้นที่ • การแจกจ่ายตามระยะเวลาที่ต้องการ	
ความหนาแน่น	ขนาดของเมือง, การแบ่งระดับความต้องการ โดยธุรกิจ และลักษณะของเมือง	
พื้นที่การจัดทำ	เมืองใหญ่	ถนนธุรกิจ, ร้านค้า
	เมืองขนาดกว้างหรือขนาดเล็ก	บริเวณที่อยู่อาศัย โรงงาน
ลักษณะการให้บริการ	ให้บริการแบบเดียว	ผู้ใช้แบบเดียว ผู้ใช้แบบหลายรูปแบบ
	ให้บริการหลายรูปแบบ	ผู้ใช้แบบเดียว ผู้ใช้หลายรูปแบบ
จำแนกชนิดของการให้บริการ	โทรศัพท์, เดต้า, โทรสาร, โทรทัศน์	

(a) รูปแบบ S

แบบ S คือการให้บริการแบบเดียวหรือหลายแบบแก่ผู้ใช้บริการ รูปแบบ S_1 จะจัดให้กับเครื่องรับโทรศัพท์ และให้บริการแบบแบนด์กว้าง สำหรับผู้ใช้บริการที่กระจายอยู่รอบ ๆ บริเวณชุมสายสำหรับเครือข่ายแบบเดิมใช้แบบ S_1 แต่สายที่ใช้เป็นสายเคเบิลธรรมดา ถ้าจำนวนผู้ใช้เพิ่มขึ้นรูปแบบ S_1 ก็ควรจะปรับปรุงดัดแปลงสำหรับให้บริการที่จะมีขึ้นในอนาคต

แบบ S_2 ส่วนใหญ่จะให้บริการเฉพาะด้านโทรศัพท์ที่อยู่ในพื้นที่ที่กำหนด

แบบ S_3 จะให้บริการด้านแบนด์กว้าง ซึ่งจะจ่ายได้อย่างกว้างขวางในพื้นที่ที่มีผู้ใช้บริการหนาแน่นจะใช้จัดทำในพื้นที่ที่เป็นที่ตั้งของสำนักงานและร้านค้า

(b) รูปแบบ B

รูปแบบ B ส่วนใหญ่จะให้บริการในแบนด์กว้าง เป็นแบบเดียว หรือแบบผสมที่มีผู้ใช้บริการเป็นจำนวนมากในรูปแบบนี้จัดบริการให้เฉพาะแห่ง เช่น ชุมชนที่อยู่อาศัยในเมืองใหญ่ ๆ พื้นที่ที่มีโรงงานและเมืองขนาดกลางขนาดเล็กมีผู้ใช้บริการอยู่หนาแน่นและแผ่กระจายอยู่กว้างขวาง เช่น สถานที่ทำงานและถนนที่ร้านค้าเรียงรายอยู่ทั่วไป

(c) รูปแบบ L

ให้บริการเหมือนกันกับรูปแบบ B สำหรับพื้นที่ซึ่งผู้ใช้บริการแผ่กระจายทั่วไป เช่น ถนนที่ผู้อยู่อาศัยตั้งบ้านเรือนอยู่ในเมืองใหญ่ ๆ พื้นที่ที่มีโรงงานตั้งอยู่ และในเมือขนาดกลางถึงขนาดเล็ก

(d) รูปแบบ C

แบบ C เป็นรูปแบบผสมของแบบต่าง ๆ ซึ่งให้บริการอย่างเดียว หรือหลายอย่างไปยังผู้ใช้บริการที่มีจำนวนมาก แบบ C₁ ส่วนใหญ่แล้วจะเหมาะสำหรับให้บริการแบบแบนด์กว้าง สามารถที่จะจัดทำในพื้นที่ที่มีผู้ใช้บริการอยู่เฉพาะแห่ง เช่น ถนนที่บ้านเรือนผู้อยู่อาศัย พื้นที่ที่มีโรงงานตั้งอยู่แบบ C2 ให้บริการเหมือนแบบ S2 ส่วน C3 สำหรับให้บริการที่มีผู้ใช้บริการในวงจำกัด และแผ่กระจายอยู่ในขอบเขต ในรูปแบบนี้โดยทั่วไปแล้วจะให้บริการกับเครื่องโทรศัพท์ทั่ว ๆ ไป

ตาราง 14 พื้นที่จัดทำสำหรับแต่ละรูปแบบ

รูปแบบ		การจ่ายสาย	ความหนาแน่นของผู้ใช้บริการ	สถานที่จัดทำ	รูปแบบการให้บริการ	ประเภทของบริการ
S	S ₁	กระจายออก	สูง, ต่ำ	เมืองใหญ่, ขนาดกลาง เมืองขนาดเล็ก	แบบเดี่ยวหรือหลายแบบไปยังผู้ใช้บริการหนึ่งคน	โทรศัพท์และ wideband
	S ₂	เฉพาะที่	ต่ำ	เมืองขนาดกลางหรือขนาดเล็ก, หมู่บ้านประมง, หมู่บ้านเกษตรกรรม		โทรศัพท์
	S ₃	กระจายออก	สูง	เมืองใหญ่		wideband
		กระจายออก	สูง	เมืองใหญ่, (ถนนที่คั่ง สำหรับงาน, ย่านธุรกิจ)		
B		เฉพาะที่	สูง	เมืองใหญ่ (พื้นที่อยู่อาศัย, ที่ตั้งโรงงาน)	แบบเดี่ยวหรือหลายแบบไปยังผู้เช่าหนึ่งคนหรือหลายคน	wideband
		กระจายออก	สูง	เมืองใหญ่ (ถนนที่คั่ง สำหรับงาน, ย่านธุรกิจ)		
L		กระจายออก	ต่ำ	เมืองใหญ่ (พื้นที่อยู่อาศัย, ที่ตั้งโรงงาน)		
C	C ₁	เฉพาะที่	สูง	เมืองใหญ่ (พื้นที่อยู่อาศัย, ที่ตั้งโรงงาน)	แบบเดี่ยวหรือหลายแบบไปยังผู้ใช้หลายคน	โทรศัพท์
	C ₂	เฉพาะที่	ต่ำ	เมืองขนาดกลางหรือขนาดเล็ก, หมู่บ้านเกษตรกรรม		
		กระจายออก	สูง	เมืองใหญ่		โทรศัพท์
	C ₃	เฉพาะที่	ต่ำ	เมืองขนาดกลางหรือขนาดเล็ก, หมู่บ้านเกษตรกรรม, หมู่บ้านชาวประมง		
		กระจายออก	สูง	เมืองใหญ่		

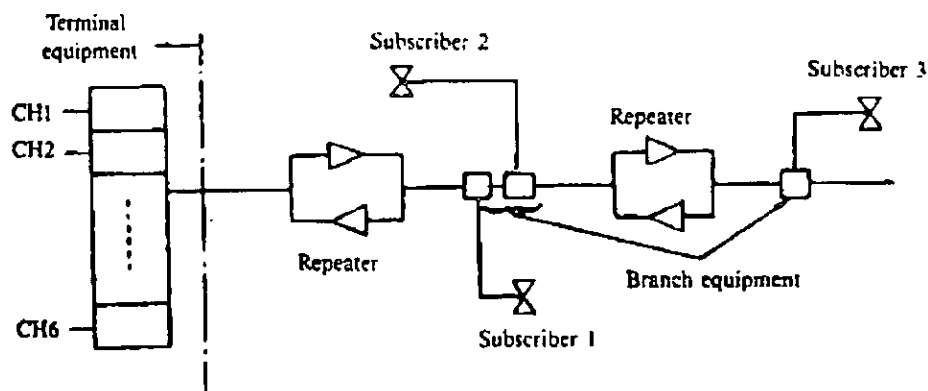
1.3.7.3 ตัวอย่างของข่ายสายผู้เช่าแบบใหม่

ในตอนนี้จะได้อธิบายการจัดทำในแต่ละรูปแบบที่ปรับปรุงขึ้นมา

1.3.7.3.1 ระบบ Subscriber carrier

ในระบบนี้จะอยู่ในระบบ S2 ดังแสดงในภาพประกอบ 69 ในระบบนี้จะประกอบด้วย

อุปกรณ์ต่อสาย(Terminal Equipment) ติดตั้งอยู่ที่ชุมสาย, อุปกรณ์ต่อกับผู้ใช้ (subscriber terminal Equipment) สถานีทวนสัญญาณ (Repeater) และอุปกรณ์ต่อแยก (Branch Equipment) 1 ระบบต่อคู่สาย 1 คู่สามารถเพิ่มช่องสัญญาณและแยกที่จุดใดก็ได้ในสายเคเบิลที่ใช้ ยกตัวอย่างเช่นใน 1 ระบบสามารถจะป้อนให้กับผู้ใช้ได้ถึง 6 เครื่อง ระยะทางที่ป้อนไปให้ผู้ให้บริการนั้นได้ไกลประมาณ 30 กม.



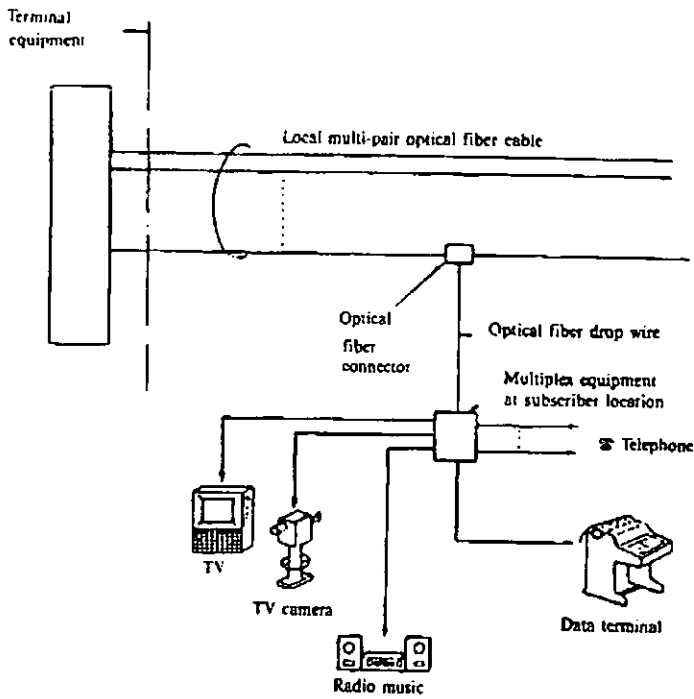
ภาพประกอบ 69 ระบบ Subscriber carrier

ตาราง 15 ตัวอย่างสำหรับจัดทำในแต่ละรูปแบบ

รูปแบบ		ตัวอย่าง
S	S ₁	ข่ายสายผู้เช่าแบบที่มีอยู่
	S ₂	1. ระบบ Subscriber carrier
	S ₃	2. ระบบจ่ายตรงโดยใช้สายเคเบิลใยแก้ว
B		3. ใช้ในระบบ CATV
L		4. ระบบ Loop
C	C ₁	5. ระบบ concentration และ Multiplex ใช้สายเคเบิลแบบใหม่
		6. ระบบ concentration ใช้สายเคเบิลแกนร่วม
	C ₂	7. ระบบ Digital Multiplex
	C ₃	8. ระบบ Concentration

1.3.7.3.2 ระบบจ่ายตรงโดยใช้สายเคเบิลใยแก้ว

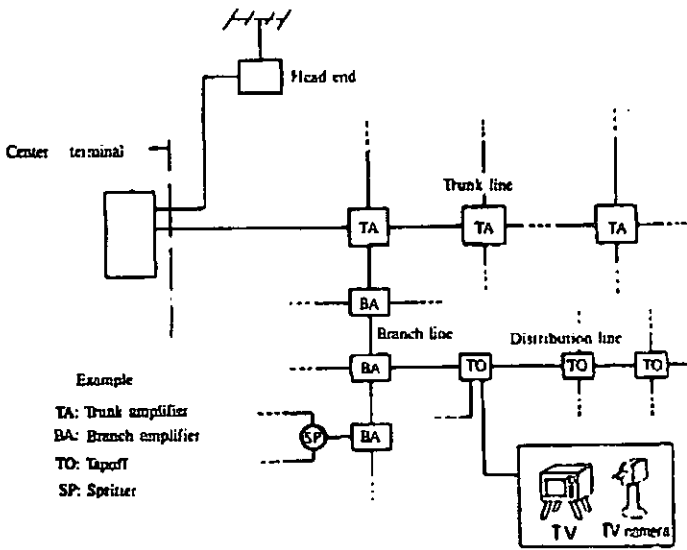
ในระบบนี้จะจัดทำในรูปแบบ C₃ ดังแสดงในภาพประกอบ 70 ในระบบนี้สายเคเบิลใยแก้วจะออกจากชุมสายและจ่ายตรงไปยังผู้ใช้ อุปกรณ์ Multiplex ติดตั้งไว้ที่ชุมสายและที่ผู้ใช้ ระบบนี้เหมาะสำหรับบริการหลายรูปแบบ



ภาพประกอบ 70 ระบบถ่ายทอดโดยใช้สายเคเบิลใยแก้ว

1.3.7.3.3 ระบบถ่ายทอดโดยใช้สายเคเบิลแกนร่วม (ระบบ CATV)

ระบบ CATV ใช้สายเคเบิลแกนร่วมที่มีเส้นผ่าศูนย์กลางของลวดตัวนำชั้นนอก 17 มม., 10 มม., 5 มม. สายส่งจะแบ่งเป็นสาย Trunk, branch, Distribution, drop wire และ House wire ดังแสดงในภาพประกอบ 71 และมาตรฐานการจัดทำในทางปฏิบัติของการใช้สายเคเบิลดังแสดงในตาราง 16



ภาพประกอบ 71 ระบบถ่ายทอดโดยใช้สายเคเบิลแกนร่วม

ตาราง 16 ชนิดของสายที่ใช้งาน

สายเคเบิลแกนร่วม	ใช้วางเป็น	พลังงานสูญเสียในสายที่ (228 MHz)
17 mm Local	Trunk	27.5 db/Km
10 mm Local	Trunk, Branch and distribution	52.0 db/Km
5 mm Local	Drop wire and house wire	135.0 db/Km

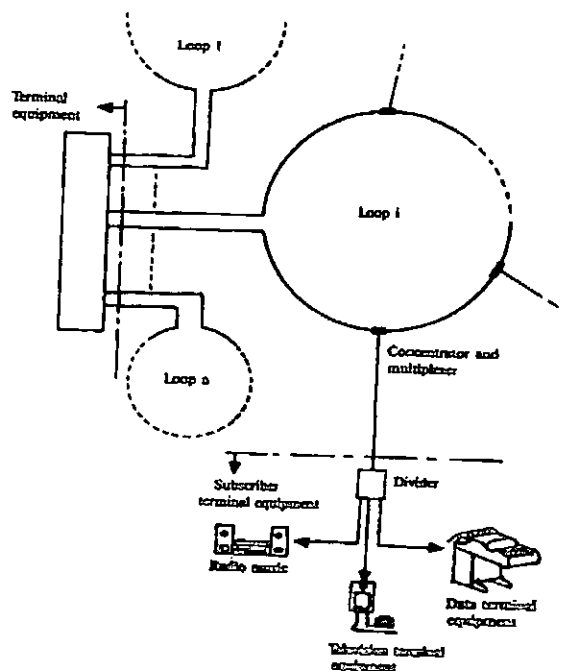
แบบความถี่สามารถใช้ได้ในช่วง 0 ~ 300 MHz สัญญาณโทรทัศน์ที่ส่งออกไปได้ 27 out-channel และ 4 ~ 5 back channel ระยะห่างของอุปกรณ์ทวนสัญญาณในสาย Trunk ประมาณ 800 เมตร ใช้สายแบบ 17 มม. และประมาณ 400 เมตรสำหรับสาย 10 มม.

สายเคเบิลแกนร่วมขนาด 17 มม. ใช้ระหว่าง Center terminal กับ Head End และระหว่าง Center terminal กับในพื้นที่ที่มีผู้เช่าเป็นจำนวนมาก

สายเคเบิลแกนร่วมขนาด 10 มม. ใช้เป็น Trunk line ในพื้นที่ที่มีผู้เช่าอยู่หนาแน่น, สำหรับ branch line จาก Trunk amplifier และสำหรับ distribution line จาก branch amplifier ระยะห่างของอุปกรณ์ทวนสัญญาณใน branch line ประมาณ 40 ~ 320 เมตร ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นของผู้ใช้ในสาย distribution line, Splitter และ tap-off ใช้แทนอุปกรณ์ทวนสัญญาณใน Branch amplifier สามารถใช้กับเครื่องรับโทรทัศน์ได้ 80 เครื่องโดยใช้ splitter และ tap-off

1.3.7.3.4 Loop Distribution line

ระบบนี้จัดทำในรูป L ดังแสดงในภาพประกอบ 72 ในระบบนี้จะใช้สายเคเบิลแกนร่วมหรือสายเคเบิลใยแก้ววางเป็น Trunk line, Subscriber line ซึ่งต่อตรงจาก Divider



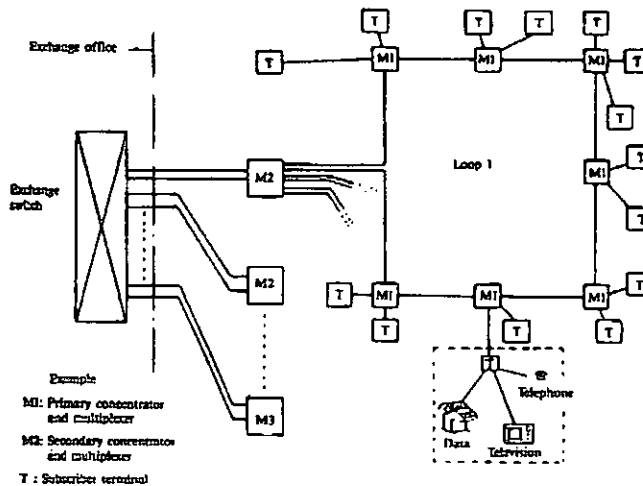
ภาพประกอบ 72 ระบบ Loop Distribution

1.3.7.3.5 ระบบ concentrated และ Multiplex

โดยใช้สายส่งแบบใหม่ในระบบนี้จัดอยู่ในรูปแบบ C1 (branch + Loop + Star) รูปแบบการจัดแสดงในภาพประกอบ 73

กรรมวิธีและอุปกรณ์ควบคุมจะติดตั้งไว้ที่ชุมสาย สายเคเบิลแกนร่วมหรือสายเคเบิลใยแก้ว จะจ่ายออกจากชุมสายไปยังจุด concentrator และ Multiplexers ซึ่งติดตั้งไว้ระหว่างทางไปยังพื้นที่ให้บริการ การส่งเป็นระบบทางเดียวคือ ส่งออกไป 1 เส้นและรับเข้ามา 1 เส้น แยกออกจากกัน สายเคเบิลแกนร่วมหรือสายเคเบิลใยแก้วจะจ่ายไปในรูปแบบของ Loop จาก concentrator/ Multiplexer สามารถที่จะควบคุมพื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

concentrator / multiplexer ติดตั้งไว้ที่ Loop ซึ่งควรจะทำให้เป็นแบบ Loop เท่าที่จะทำได้เพื่อให้ drop wire สั้นลง concentrator/multiplexer แต่ละตัวจะคุมเครื่องรับได้ 10 – 30



ภาพประกอบ 73 ระบบ Concentration และ Multiplex โดยใช้สายเคเบิลแบบใหม่

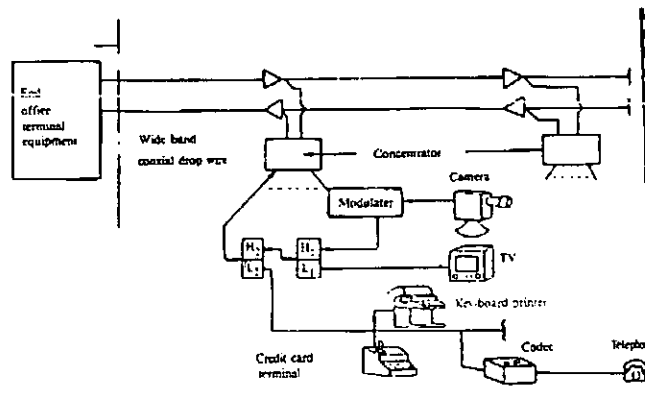
1.3.7.3.6 ระบบ concentration โดยใช้สายเคเบิลแกนร่วม

ในระบบนี้จัดอยู่ในรูปของ C₁ (branch+Star) ดังแสดงในภาพประกอบ 74 ในระบบนี้สายเคเบิลแกนร่วม 2 หลอดใช้เป็น Trunk ในแบนด์กว้าง ซึ่งสามารถจัดได้ 27 ช่องสัญญาณ สายเคเบิล 1 หลอดอาจจะใช้ในหน้าที่ต้องการใช้จำนวนช่องสัญญาณ โทรภาพที่ใช้ส่งนั้นมีจำนวนน้อย

สัญญาณส่งผ่านไปที่อุปกรณ์แยก (band division filter) ซึ่งอยู่ใน concentrator ระหว่างชุมสายกับเครื่องรับ สายเคเบิลแกนร่วมชนิดแบนด์กว้างใช้เป็นเสมือน Drop wire ซึ่งให้สัญญาณโทรภาพ และสัญญาณดิจิทัล 1.5 Mb/S ส่งผ่าน

1.3.7.3.7 ระบบ Digital Subscriber Multiplex

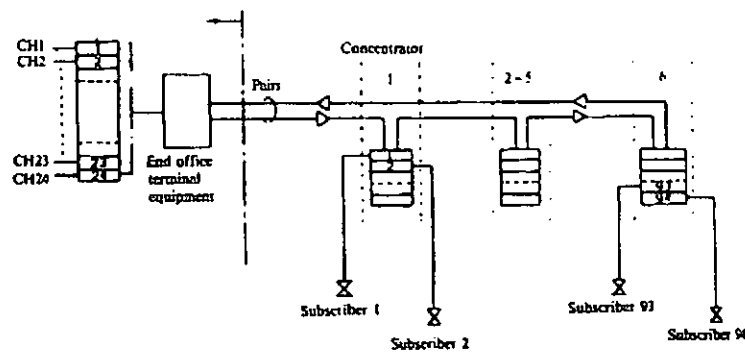
ระบบนี้จัดอยู่ในรูปแบบ C₂ (branch + Star) ดังแสดงในภาพประกอบ 74



ภาพประกอบ 74 ระบบ Concentration ใช้สายเคเบิลแกนร่วม

ในระบบนี้ที่ชุมสายประกอบด้วยอุปกรณ์สำหรับต่อสาย(end office terminal) concentrator ติดตั้งใกล้กับเครื่องรับ สายส่งสามารถรับสัญญาณดิจิทัลได้

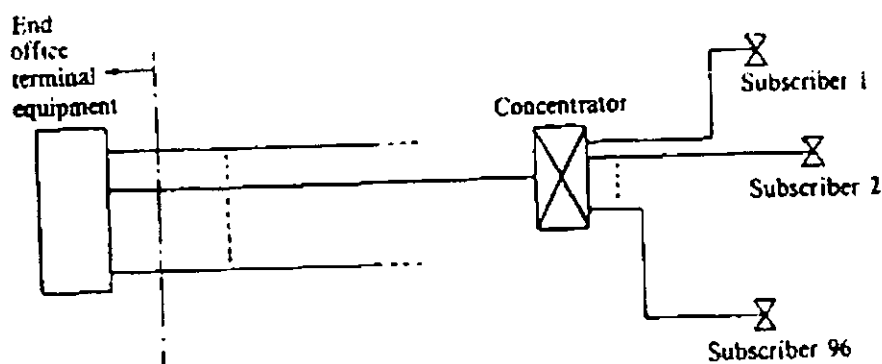
ระบบ PCM-24 ใช้ 2 คู่สายส่งสัญญาณดิจิทัล จุดต่อของเครื่องรับต่อรวมอยู่กับจุดต่อที่ชุมสายโดยผ่านช่องสัญญาณที่เผื่อไว้ ดังแสดงในภาพประกอบ 75



ภาพประกอบ 75 ระบบ Digital Subscriber Multiplex

1.3.7.3.8 ระบบ Subscriber concentration

ในระบบนี้จัดทำในรูปแบบ C_3 (branch + Star) ดังแสดงในภาพประกอบ 76 แบบนี้ในหนึ่ง system สามารถใช้ได้ถึง 96 เครื่อง



ภาพประกอบ 76 ระบบ Subscriber Concentration

1.3.8 แนวความคิดสำหรับข่ายสายผู้เช่าแบบใหม่

ข่ายสายผู้เช่ามีหลายรูปแบบด้วยกันขึ้นอยู่กับคุณภาพและปริมาณของการให้บริการ ความต้องการในการจ่ายสาย สภาพสิ่งแวดล้อม ซึ่งมีความจำเป็นที่จะต้องทำทำเครื่องข่ายนั้น ๆ อย่างมีเหตุผล โดยจะต้องนำสิ่งเหล่านั้นพิจารณาด้วย คือคุณภาพในการบริการและต้องประหยัด

ข่ายสายผู้เช่าแบบเก่าจะมีปัญหาหลายอย่างและบางครั้งไม่สามารถที่จะให้บริการได้ในเมื่อความต้องการใช้โทรศัพท์เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก และยังไม่สามารถที่จะให้บริการในระบบแบบดัดกว้างได้ ทั้งในด้านความต้องการที่เพิ่มขึ้นและด้านคุณภาพ

1.3.8.1 ปัญหาการให้บริการด้านโทรศัพท์

1. ไม่สามารถทำให้ตรงกับความต้องการได้เมื่อความต้องการในการจ่ายสายนั้นผันแปรไปอย่างมาก

2. จำเป็นต้องประหยัดวัสดุที่ใช้และแรงงาน

3. ถูกจำกัดในด้านการลงทุนในโครงการก่อสร้างงานวางสายตอนนอกถูกเข้มงวด

1.3.8.2 ปัญหาการให้บริการในระบบแบบดัดกว้าง

1. จำนวนตัวทวนสัญญาณ (Repeater) จะเพิ่มมากขึ้นเพราะว่าสายเคเบิลที่ใช้นั้น จะทำให้สัญญาณสูญเสียไปในสายมากขึ้น เมื่อส่งที่ความถี่สูง

2. จำนวนคู่สายในเคเบิลและพลังงานที่สูญเสียในสายถูกจำกัดเพราะว่า Cross-talk จะมีมากที่ความถี่สูง

3. การต่อสายพ่วง (Multiple) และการต่อสายด้วยมือ จะไม่เหมาะสมในส่งระบบแบบดัดกว้าง

1.3.8.3 ปัจจัยหลักในระบบใหม่ของข่ายสายผู้เช่า คือ ระบุลักษณะของเครือข่าย, ระบบการจัดทำ (ระบบจ่ายสาย, ระบบส่ง) และชนิดของสายส่งการจัดทำเครือข่ายแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับ ความต้องการในการแจกจ่าย (พื้นที่, เวลา) ความหนาแน่นของผู้ใช้ การจัดทำในพื้นที่ ระบุลักษณะการให้บริการและชั้นของการให้บริการ (class) ข้อสำคัญก็คือจะจัดทำเครือข่ายอย่างไรจึงจะดีที่สุด เพื่อที่จะจัดทำในข่ายของผู้เช่าแบบใหม่นั้นก็ต้องพิจารณาแนวโน้มการพัฒนาสายส่งแบบใหม่, การออกแบบ, การก่อสร้าง, และการบำรุงรักษา (เข็มทอง นิมศิริ . 2536 : 82)

2. ความรู้เบื้องต้น เกี่ยวกับระบบลงดิน

ระบบการต่อลงดินของการต่อกำลังไฟฟ้า เป็นระบบสำคัญที่สร้างความสมบูรณ์แบบ ให้กับ ระบบ ป้องกันไฟฟ้า สายดินจะเป็นทางเดินของกระแสไฟฟ้า ในขณะที่เกิดการลัดวงจรลงดิน ของกระแสไฟฟ้า หรือ เกิดการลัดวงจรลงดินของระบบส่งกำลังไฟฟ้า ซึ่งเราต้องการให้กระแสที่ไหลนี้มีขนาดสูงมากพอที่จะให้อุปกรณ์ ตัดตอนไฟฟ้าทำงานได้ (เกียรติ อัครพงศ์ 2534 : 80) กราวด์ มีหน้าที่สำคัญในการป้องกันความเสียหายจาก สาเหตุหลายประการ ไม่ว่าจะเป็นภัยธรรมชาติ เช่น พายุ ฟ้าผ่า กราวด์จะทำหน้าที่ ถ่ายเทกระแสไฟฟ้า ให้หมด ก่อนทำอันตราย แก่คน และอุปกรณ์ต่างๆ

ไฟฟ้าให้ประโยชน์แก่เรามากมาย แต่ขณะเดียวกัน หากเราไม่ระมัดระวังการใช้ไฟฟ้าแล้วจะ เกิด อันตรายร้ายแรงขึ้นได้ พื้นดินบนโลกได้ถูกนำมาใช้ประโยชน์ ในการป้องกันอันตรายจากไฟฟ้า โดยเรา ใช้พื้นดินเป็นเส้นทางให้กระแสลัดวงจร หรือกระแสผิดปกติได้ไหลย้อนกลับเข้าสู่ แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า เมื่อกระแสผิดปกติ สามารถไหลครบวงจรอุปกรณ์ต่างๆ ความผิดปกติหรืออุปกรณ์ตัดตอนไฟฟ้า จะสามารถตรวจ จับความผิดปกติ และทำการตัดการจ่ายกำลังไฟฟ้าได้ ส่วนประกอบของพื้นดินนอกจากดินแล้ว ยังมีเม็ด หินทราย และสิ่งแปลกปลอมอื่นๆ ซึ่งในภาวะที่แห้งจะมีคุณสมบัติ เป็นฉนวนไฟฟ้า หรือเป็นตัวนำไฟฟ้าที่เลว แต่หากมีความชื้นและเกลืออยู่ด้วย คุณสมบัติของดินจะเป็นตัวนำที่ดี ดังนั้นความต้านทานของดิน ใน สถานะที่หรือในสภาพที่ต่างกันย่อมแตกต่างกันออกไป ในการออกแบบระบบสายดินของไฟฟ้า เราจะพยายามทุก วิถีทางที่จะให้ความต้านทานของระบบสายดินมีค่าต่ำที่สุด และอยู่ในค่าที่กำหนดไว้ ซึ่งในบางครั้งการออกแบบอาจมีความยุ่งยาก เมื่อสถานที่อยู่ในสภาพดินแฉะ เช่น บึง หนอง บริเวณที่แห้งแล้งและมีความชื้นในดินต่ำ (เกียรติ อัครพงศ์ 2534 : 78)

2.1 สายดิน

สายดิน คือ สายตัวนำที่นำกระแสไฟฟ้าไหลลงดินโดยผ่านแท่งสายดิน ดังนั้นสายดินจึงควรทำด้วย โลหะที่นำกระแสไฟฟ้าได้ดี เช่น ทองแดง แต่เนื่องจากสายทองแดงมีราคาแพงขึ้นทำให้ต้องลงทุนสูง จึงอาจ เปลี่ยนไปใช้สายเหล็กอาบสังกะสี ซึ่งมีทั้งชนิดแผ่นเหล็กแบนและแบบลวดเหล็กตีเกลียวอาบสังกะสีแทนก็ได้ แต่ ในบางจุดที่สำคัญ เช่น การต่อลงดินของอัลเตอร์เนเตอร์ (Alternator) ก็ควรจะใช้สายระหว่างก่อสร้างอาคารก็ได้ โครงเหล็กของตัวอาคารก็สามารถใช้เป็นส่วนหนึ่งของสายดินได้ อย่างไรก็ตามสายดินที่ฝังไว้จะต้องมีจุดต่อที่สามารถตรวจสอบได้โดยง่าย และควรมีการป้องกันผู้ที่ไม่มีความรู้ที่เกี่ยวข้องไปยุ่งเกี่ยวกับจุดต่อนั้น และถ้าจาก จุดตรวจสอบนี้ไปจะต้องไม่มีการต่อสายใด ๆ นอกจากต่อตรงไปยังแท่งสายดิน

2.1.1 ขนาดของสายดิน

สายดินที่ทำด้วยทองแดงควรมีขนาดอย่างน้อยที่สุดตามตารางที่ 17 ค่าที่แสดงไว้วัดที่อุณหภูมิที่เพิ่ม 450 องศา เซนเซียส และกระแสลัดวงจรซึ่งให้ไหลได้นานประมาณ 3 วินาที

ขนาดของสายดินที่เป็นสายเหล็กอาบสังกะสี ที่ใช้กันส่วนใหญ่มีขนาดดังนี้

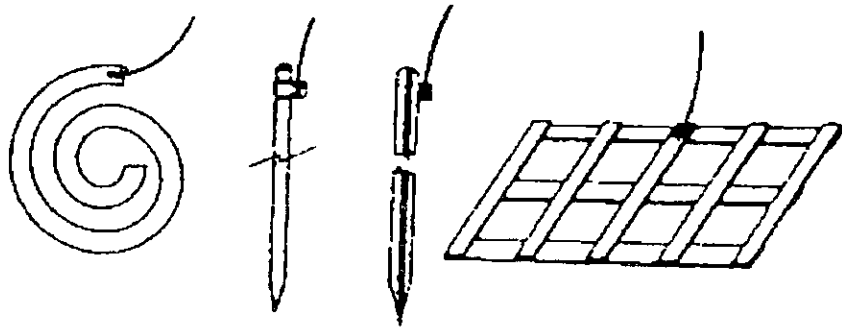
1. เหล็กแบนอาบสังกะสี ขนาด $30 \times 3.5 \text{ mm}^2$
2. ลวดเหล็กตีเกลียวอาบสังกะสี ขนาด 25 mm^2 ใช้เป็นสาย overhead ground wire
3. ลวดเหล็กตีเกลียวอาบสังกะสี ขนาด 50 mm^2 ใช้เป็นสายต่อลงดินทั่ว ๆ ไป

ตาราง 17 ขนาดของสายดินทองแดง

กระแสตัวจรสูงสุด (KA.)	ขนาดของแผ่นทองแดง(mm.)	หมายเหตุ
14	25 x 3	ขนาดเล็กสุด ที่แข็งแรงเพียงพอ
22	25 x 4	
30	36 x 4	
44	50 x 6	

2.1.2 แท่งสายดิน

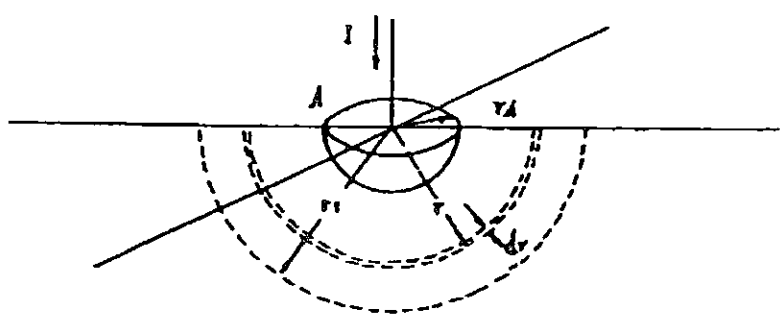
แท่งสายดิน (Ground rod or Earth electrode) มีหลายแบบ เช่น แบบแท่งกลมยาว, แบบแผ่นบางยาว, แบบท่อยาวหรือเป็นแท่ง 4 แฉก ดังภาพประกอบ 77 ซึ่งนิยมใช้กันมาในปัจจุบัน แท่งสายดินนี้จะใช้ต่อจากสาย ground lead ผังลงไปในดิน เพื่อวัตถุประสงค์ในการนำกระแสไฟฟ้าจากสาย ground lead ให้กระจายลงไปในดินให้ดีที่สุด ดังนั้น แท่งสายดินจึงควรทำด้วยโลหะที่เป็นตัวนำไฟฟ้าได้ดี เช่น ทำด้วยแท่งทองแดง สายทองแดงหรือแผ่นทองแดง แต่เนื่องจากทองแดงมีราคาแพงในระยะหลังนี้จึงนิยมใช้เหล็กท่อน้ำหรือเหล็กแผ่นชุบสังกะสีแทน โดยออกแบบให้แท่งสายดินมีพื้นที่สัมผัสดินให้มากขึ้น



ภาพประกอบ 77 รูปร่างของแท่งสายดินแบบขดเป็นก้นหอย แท่งกลมยาวและต่อเป็นตารางตาข่าย

2.1.3 ความต้านทานดิน

หลักการของการต่อลงดิน อาจอธิบายได้ง่ายที่สุดเมื่อแท่งหลักสายดิน (บางที่เรียกว่าอิเล็กโทรด) เป็นแบบรูปครึ่งทรงกลม (hemispheric metal electrode) ที่ฝังลงดินให้เสมอกับผิวครึ่งทรงกลมพอดี ดังภาพประกอบ 78



ภาพประกอบ 78 แท่งหลักสายดินรูปครึ่งวงกลมมีรัศมี rA ถูกฝังอยู่ให้เสมอกับผิวครึ่งทรงกลมพอดี

สมมติว่ามีกระแส I ไหลลงดินและกระจายออกไปเป็นแนวรัศมีกับผิวทรงกลมทุกทิศทางถึงระยะอนันต์ (infinite extent) และสมมติว่าความต้านทานจำเพาะของดินมีสม่ำเสมอ (uniform resistivity) ซึ่งจะได้ความต้านทานของจุดต่อลงดิน (ต่อไปจะเรียกว่าความต้านทานของดิน เพราะถือว่าความต้านทานของแท่งหลักสายดินและผิวสัมผัสระหว่างแท่งหลักสายดินกับดินมีค่าน้อยมาก) ดังสมการต่อไปนี้

$$R = \frac{\rho}{A} \tag{1}$$

เมื่อ R = ความต้านทานของดิน (โอห์ม)
 ρ = ความต้านทานจำเพาะของดิน (โอห์ม – เมตร)
 l = ความยาวของดินในทิศทางที่กระแสไฟฟ้าไหล (เมตร) (ตาม (1) เป็นระยะใด ๆ)
 A = พื้นที่หน้าตัดที่ตั้งฉากกับทิศทางการไหลของกระแสไฟฟ้า (ตร.ม.)
ซึ่งพื้นที่ A ตามรูปที่ (1) จะไม่สม่ำเสมอ คือ พื้นที่จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ เมื่อรัศมีของดินยาวออกไปเรื่อย ๆ

$$A = 2\pi r^2 \tag{2}$$

ดังนั้น ถ้าต้องการหาค่าความต้านทานของดินของแถบครึ่งวงกลม dr ก็จะได้ค่า

$$dR = \frac{\rho \, dr}{2\pi r^2} \tag{3}$$

ซึ่งหากต้องการค่าความต้านทานจากผิวแท่งสายดินรัศมี r_A จนถึงระยะ r_1 ก็คือ หาค่าผลรวมของความต้านทานดินของสมการที่ (3) จากรัศมี $r_A - r_1$ นั้นเอง

$$R = \int dR = \int_{r_A}^{r_1} \rho \frac{dr}{2\pi r^2} \tag{4}$$

จะได้

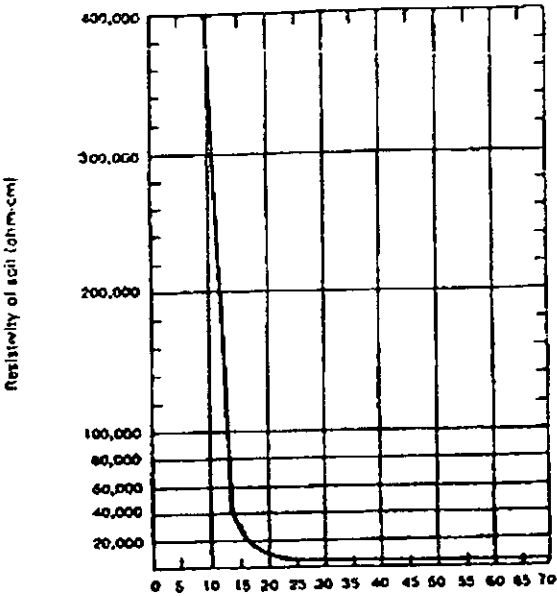
$$R = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_1} \right) \tag{5}$$

เมื่อ r_1 ยาวมากถึงระยะอนันต์ เพราะฉะนั้นสมการที่ (5) จะได้

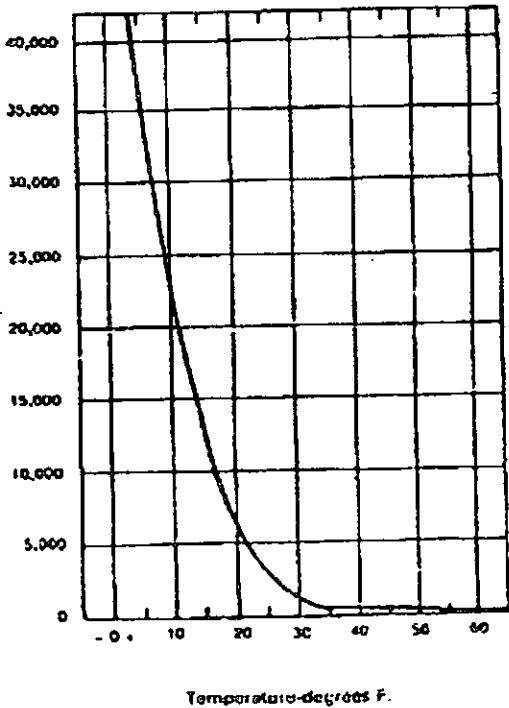
$$R = \frac{\rho}{2\pi r_A} \tag{6}$$

ตาราง 18 สูตรสำหรับคำนวณค่าความต้านทานของการต่อลงดิน (มีติเป็น ซม. เมื่อค่าความต้านทาน
จำเพาะของดินเป็น โอห์ม - เซนติเมตร)

	Hemisphere radius a	$R = \frac{\rho}{4\pi a}$
•	One ground rod Length L , radius a	$R = \frac{\rho}{4\pi L} (\log_e \frac{4L}{a} - 1)$
• •	Two ground rods $s > L$; spacing s	$R = \frac{\rho}{4\pi L} (\log_e \frac{4L}{a} - 1) + \frac{\rho}{4\pi s} (1 - \frac{L^2}{s^2} + \frac{1}{3} \frac{L^4}{s^4} \dots)$
• •	Two ground rods $s < L$; spacing s	$R = \frac{\rho}{4\pi L} (\log_e \frac{4L}{a} + \log_e \frac{4L}{s} - 2 + \frac{L}{s} - \frac{s^2}{16L^2} + \frac{s^4}{512L^4} \dots)$
—	Buried horizontal wire Length $2L$, depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{4\pi L} (\log_e \frac{4L}{a} + \log_e \frac{4L}{s} - 2 + \frac{L}{s} - \frac{s^2}{16L^2} + \frac{s^4}{512L^4} \dots)$
L	Right-angle turn of wire Length of arm L , depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{4\pi L} (\log_e \frac{2L}{a} + \log_e \frac{2L}{s} - 0.2373 + 0.2146 \frac{L}{s} + 0.1035 \frac{L^2}{L^2} - 0.0424 \frac{L^4}{L^4} \dots)$
Y	Three-point star Length of arm L , depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{8\pi L} (\log_e \frac{2L}{a} + \log_e \frac{2L}{s} + 1.071 - 0.209 \frac{L}{s} + 0.238 \frac{L^2}{L^2} - 0.054 \frac{L^4}{L^4} \dots)$
+	Four-point star Length of arm L , depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{8\pi L} (\log_e \frac{2L}{a} + \log_e \frac{2L}{s} + 2.912 - 1.071 \frac{L}{s} + 0.645 \frac{L^2}{L^2} - 0.145 \frac{L^4}{L^4} \dots)$
*	Six-point star Length of arm L , depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{12\pi L} (\log_e \frac{2L}{a} + \log_e \frac{2L}{s} + 6.851 - 3.128 \frac{L}{s} + 1.758 \frac{L^2}{L^2} - 0.490 \frac{L^4}{L^4} \dots)$
* ₈	Eight-point star Length of arm L , depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{16\pi L} (\log_e \frac{2L}{a} + \log_e \frac{2L}{s} + 10.98 - 5.51 \frac{L}{s} + 3.26 \frac{L^2}{L^2} - 1.17 \frac{L^4}{L^4} \dots)$
○	Ring of wire Diameter of ring D , diameter of wire d , depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} (\log_e \frac{2D}{d} + \log_e \frac{4D}{s})$
—	Buried horizontal strip Length $2L$, section a by b , depth $s/2$, $b < s/8$	$R = \frac{\rho}{4\pi L} (\log_e \frac{4L}{a} + \frac{a^2 - 3ab}{2(a+b)^2} + \log_e \frac{4L}{s} - 1 + \frac{L}{s} - \frac{s^2}{16L^2} + \frac{s^4}{512L^4} \dots)$
●	Buried horizontal round plate Radius a , depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{4\pi a} + \frac{\rho}{4\pi s} (1 - \frac{7}{12} \frac{a^2}{s^2} + \frac{11}{40} \frac{a^4}{s^4} \dots)$
	Buried vertical round plate Radius a , depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{4\pi a} + \frac{\rho}{4\pi s} (1 + \frac{7}{24} \frac{a^2}{s^2} + \frac{71}{320} \frac{a^4}{s^4} \dots)$



ภาพประกอบ 79 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานจำเพาะของดินเมื่อมีความชื้น (จากรูปเป็นดินเหนียว)



ภาพประกอบ 80 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงของค่าความต้านทานจำเพาะของดิน(ดินเหนียว) กับอุณหภูมิเมื่อมีความชื้นในดิน 18.6%

ซึ่งก็คือ ความต้านทานของดินทั้งหมดจากจุดแห่งหลักสายดินถึงระยะอนันต์นั่นเอง ในทางปฏิบัติ ไม่จำเป็นจะต้องให้ r_1 ถึงค่าอนันต์ก็ได้ เช่น $r_1 = 10$ เท่าของ r_A ก็จะได้ค่า $R = 90\%$ ของค่า R ตามสมการที่ (6) ดังนั้น จึงอาจกล่าวได้ว่าค่าความต้านทานดินขึ้นอยู่กับลักษณะและขนาดของแท่งหลักสายดินนั่นเอง

ในทางปฏิบัติจริง มักไม่ใช้แท่งหลักสายดินเป็นรูปครึ่งวงกลม ดังนั้น จึงได้มีการทดลองใช้แท่งหลักสายดินรูปร่างต่าง ๆ และเขียนเป็นสูตรสำหรับหาค่าความต้านทานดินที่ได้ค่าใกล้เคียงกับผลการทดลองมากที่สุด ดังตาราง 18

ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน นอกจากจะมีค่าเปลี่ยนไปตามลักษณะส่วนประกอบของดินที่บริเวณและความลึกต่าง ๆ กันแล้ว ยังมีค่าขึ้นอยู่กับความชื้นและอุณหภูมิด้วยดังนี้

2.1.3.1 ความชื้น

ความชื้นในดินมีผลต่อความต้านทานจำเพาะของดินมากดังภาพประกอบ 79 จะเห็นว่าที่ค่าความชื้นน้อยกว่า 15% ความต้านทานจำเพาะของดินจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยที่ค่าความชื้นน้อยกว่า 2% มักเป็นทะเลทราย

2.1.3.2 อุณหภูมิ

ในสภาวะปกติ อุณหภูมิมีผลน้อยมากต่อค่าความต้านทานจำเพาะของดิน แต่เมื่ออุณหภูมิลดลงจากจุดเยือกแข็งที่ต่ำกว่า 32 องศาฟาเรนไฮต์ ความต้านทานจำเพาะของดินจะสูงขึ้นอย่างรวดเร็วดังภาพประกอบ 80

2.1.4 ความต้านทานของการต่อลงดิน

การต่อลงดินในทางจินตนาการ เราถือว่า ความต้านทานไฟฟ้าของการต่อลงดิน (ความต้านทานของแท่งสายดิน + ความต้านทานของพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างแท่งสายดินกับดิน + ความต้านทานของดิน) มีค่าเป็นศูนย์ ดังนั้น เมื่อกระแสไฟฟ้าไหลลงดินจึงไม่มีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่จุดต่อลงดินและดิน แต่ความเป็นจริงในทางปฏิบัติแล้วจะมีค่าความต้านทานของการต่อลงดินเสมอ ซึ่งหากจุดที่ต่อลงดินมีความต้านทานมาก ก็จะทำให้กระแสลัดวงจรไหลลงดินได้น้อย ซึ่งอาจจะทำให้อุปกรณ์ป้องกันระบบไฟฟ้าทำงานช้าเกินไปหรือไม่สามารถตรวจจับได้ อันจะเป็นผลเสียต่อระบบไฟฟ้า นั้น ๆ ส่วนในด้านความปลอดภัยของสิ่งมีชีวิต เมื่อจุดต่อลงดินมีความต้านทานมาก หากมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านจะมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสูง ซึ่งหากสิ่งมีชีวิตเข้าใกล้บริเวณนั้นก็จะมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมระหว่างก้าวขา ซึ่งเรียกว่า step voltage หรือเมื่อไปสัมผัสสายดินก็จะมีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมระหว่างส่วนที่สัมผัสกับสายดินและส่วนที่ยืนบนผิวดิน เรียกว่า touch voltage แรงดันไฟฟ้าดังกล่าวนี้จะทำให้สิ่งมีชีวิตเริ่มรู้สึกไม่สบาย และถ้ามีค่ามากพอก็อาจทำให้ช็อกจนถึงแก่ความตายได้ ซึ่งกรณีนี้ได้เกิดขึ้นมาแล้วหลายราย เช่น มีคนหรือสัตว์ถูกกระแสไฟฟ้าดูดตายใกล้โคนเสาไฟฟ้า เป็นต้น เหตุการณ์เช่นนี้เกิดขึ้นเพราะค่าความต้านทานของสายดินของเสาไฟฟ้าต้นนั้นสูงเกินกว่าค่าที่กำหนดไว้เป็นมาตรฐาน เมื่อความต้านทานของสายดินสูงค่า voltage gradient ก็จะมีค่ามากตามไปด้วย จนทำอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตได้ ดังนั้น การต่อลงดินจะต้องพยายามทำให้มีความต้านทานน้อยที่สุดเท่าที่จะสามารถทำได้

2.2 พิกัดความต้านทานไฟฟ้า (resistivity)

ด้วยเหตุที่ สภาพพื้นฐานของรูปทรงก้อนปริมาตรขนาดใหญ่ เกิดขึ้นได้จากก้อนปริมาตรขนาดเล็กมาต่อรวมกัน ดังนั้นเพื่อให้เกิดความสะดวกในการอ้างอิงทางวิชาการ และความพยายามให้เกิดความสอดคล้องอย่างเป็นจริง จึงกำหนดความหมายพิกัดการต้านทานไฟฟ้าของดินขึ้น ซึ่งความนำไฟฟ้าของดิน และ/หรือ ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะของดิน (SOIL RESISTIVITY) หรือในวัตถุต่างๆ เป็นคุณสมบัติของสารแต่ละชนิด กล่าวได้ว่า มุมมองของค่าทั้งสองมาจากจุดเริ่มต้นจากวัตถุเดียวกัน (เพียงแต่มองคนละมุม) (สัญลักษณ์ของความนำไฟฟ้ากับความต้านทานไฟฟ้า คือ $\frac{1}{\rho}$ เหมือนกัน) เพียงแต่ผู้ให้นำไปใช้งานจะนำ "ความนำไฟฟ้า" และ/หรือ "ความต้านทานไฟฟ้าจำเพาะ" ไปใช้ก็เป็นไปตามวัตถุประสงค์งานแต่ละงาน

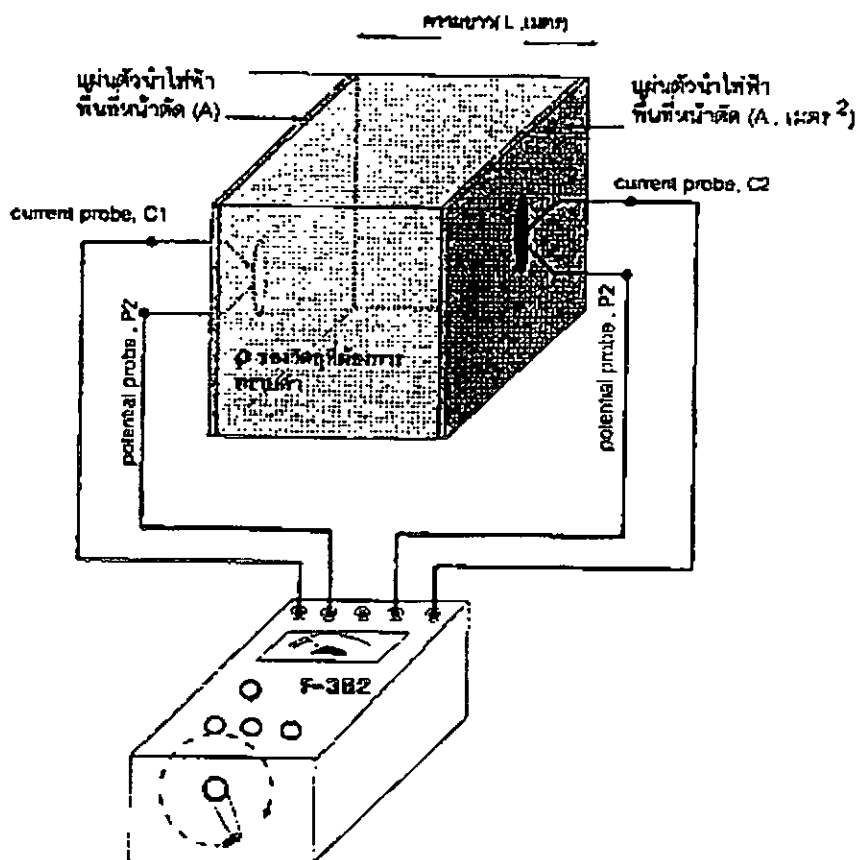
การนิยาม " ค่าความต้านทานไฟฟ้าของดิน และ/หรือ **SOIL RESISTIVITY**" โดยการเทียบเคียงใช้สภาพรูปทรงของปริมาตรดินลูกบาศก์ที่มีลักษณะเรขาคณิต ปริมาตรที่ใช้ในการสร้างนิยามระบุให้มีหน่วยใช้งานเป็นลักษณะลูกบาศก์ ซึ่งลูกบาศก์ดังกล่าวได้แก่ ลูกบาศก์เซนติเมตร, ลูกบาศก์ฟุต หรือลูกบาศก์เมตร ก็ได้

สาเหตุที่ต้องระบุใช้สภาพปริมาตรเป็นเกณฑ์เพื่อยุ่หวังให้เกิดความสอดคล้องและถูกต้องตรงกับความ เป็นจริงให้มากที่สุด เพราะปริมาตรรูปทรงใด ๆ ต่างเกิดขึ้นได้จากการนำปริมาตรรูปทรงเรขาคณิต (ลูกบาศก์) มา รวมเข้าด้วยกันทั้งสิ้น วิธีเพื่อกำหนดนิยามของ resistivity ดังภาพประกอบ 81

Cubical resistivity measurement

ใส่ดินลงในกล่องทดลองปริมาตรลูกบาศก์(cubical)

(mm³, cm³, m³, km³...etc)



ภาพประกอบ 81 หลักของการให้นิยาม RESISTIVITY (P) ด้วยการใช้ก้อนปริมาตรลูกบาศก์

ภาพประกอบ 81 เป็นการแสดง การใช้คำนิยามในห้องทดลอง ลักษณะเป็นชั้นทดลอง (Shipment) ซึ่งจะเป็นพื้นฐานของการสร้างความเข้าใจสำหรับวิธีปฏิบัติในพื้นที่จริงในการวัดค่า ความนำไฟฟ้า ของผิวดิน ส่วนใหญ่มักนิยมใช้หลักการวัดของ 1) Wenner method และ 2) Schumberger method เป็นหลักการทั้ง 2 ก็อาศัยพื้นฐานดังภาพที่แสดงก่อนนี้เช่นกัน

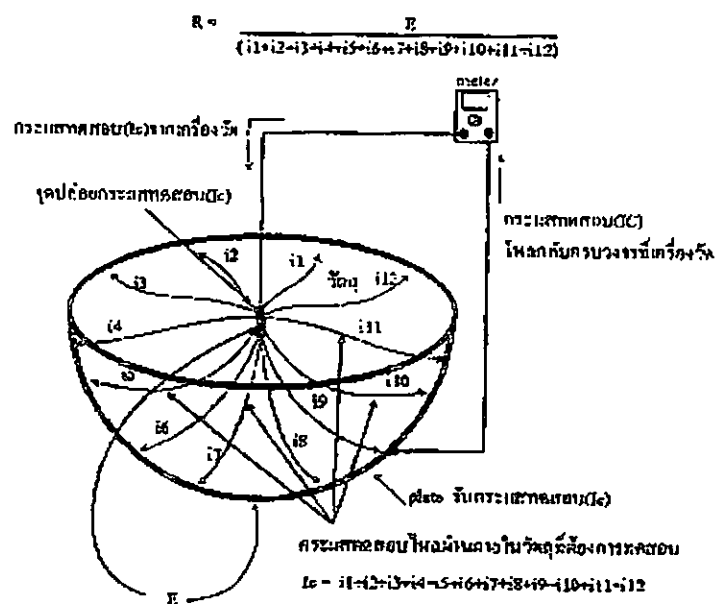
หลักการพื้นฐานของ สภาพความนำกระแสไฟฟ้า หรือ ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในปริมาตรวัตถุ รูปทรงลูกบาศก์ (cubical) หรือ รูปทรงอื่นใด ได้จาก

ความต้านทานไฟฟ้า = resistivity ของเนื้อสาร X ระยะทางที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน / พื้นที่หน้าตัดตั้งฉากที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน

$$R(\Omega) = \rho \times \frac{L}{A} : (\Omega - m) \times (m) / (m^2) = \Omega$$

$$\rho = R \times \frac{A}{L} : (\Omega) \times (m^2) / (m) = \Omega \cdot m$$

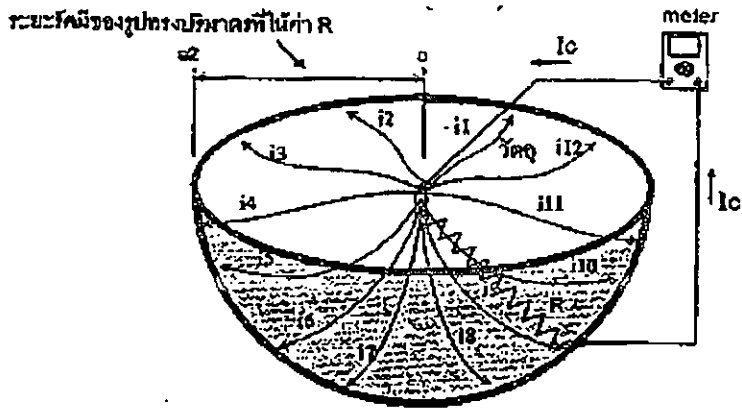
2.3 แนวความคิดในลักษณะการเกิดค่าความต้านทานบนวัตถุ เรียกว่า Hemispherical disperse
มีแนวคิดเชิงวิศวกรรมส่วนหนึ่ง กำหนดสร้างหลักเกณฑ์เป็นพื้นฐานเพื่อใช้อธิบายปรากฏการณ์ ค่าความต้านทานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนวัตถุลักษณะหนึ่ง เรียกแนวคิดนี้ว่า hemispherical disperse



ภาพประกอบ 82 การอธิบายค่า R จากกระจายกระแสไฟฟ้าแบบครึ่งทรงกลม

อธิบายค่า R ที่เกิดบนปริมาตรรูปทรง โดยแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่าง เทคโนโลยี การวัดและ การคำนวณทางคณิตศาสตร์

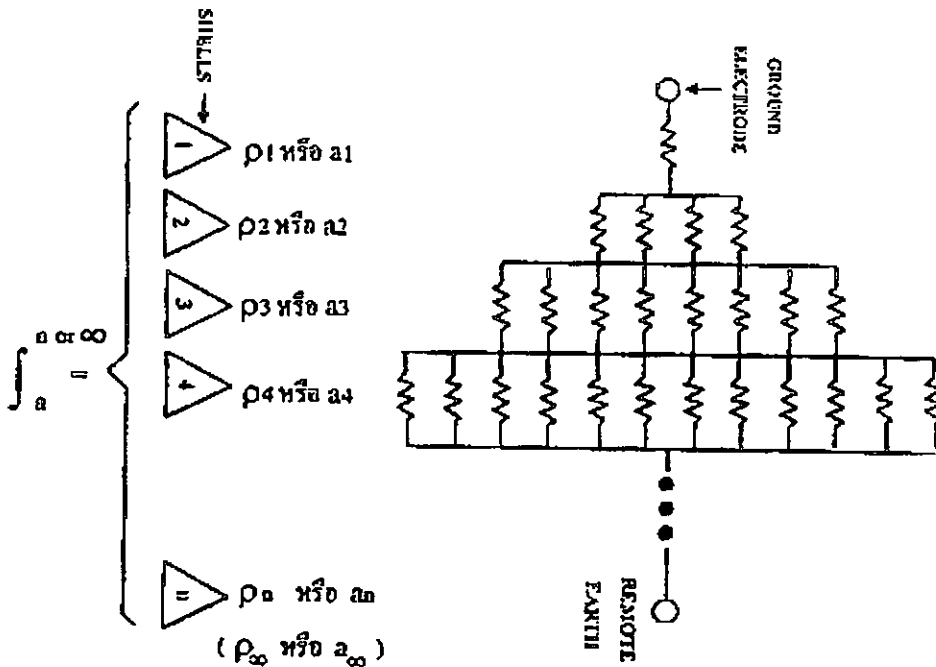
$$R(\Omega) = p \times \int_{-a}^a \frac{dx}{(2\sqrt{x^2})} \quad \text{und} \quad = p \times \int_a^{a^2} \frac{dx}{(2\sqrt{x^2})}$$



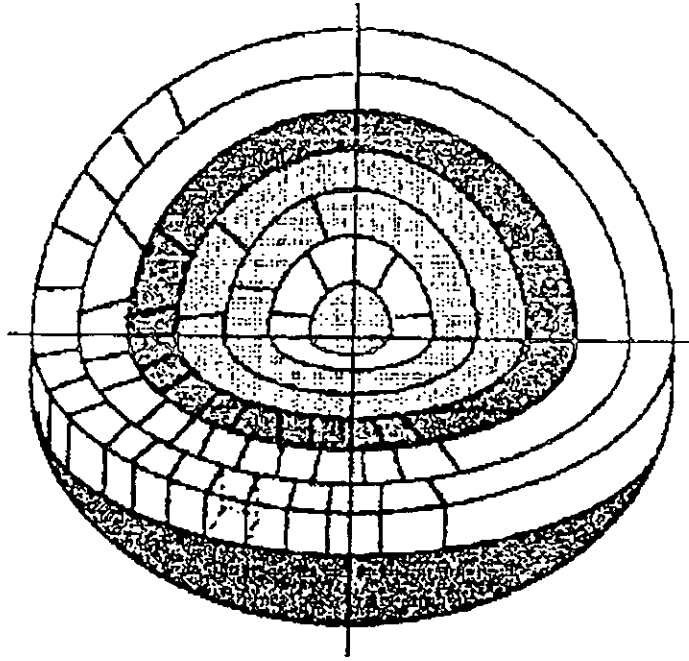
ภาพประกอบ 83 การอธิบายค่าต้านทาน R ด้วยทฤษฎีทางคณิตศาสตร์

2.4 Cubical of soil on Earth (Earth mode)

เมื่อก่อนปริมาตรลูกบาศก์ต่าง ๆ มาก่อตัวรวมกันจึงเกิดเป็นผืนดิน และ โลก ผืนแผ่นดินจึงเป็นสภาพการเกาะตัวอย่างต่อเนื่องไม่สามารถแบ่งดินขาดออกจากกันเป็นส่วน ๆ เนื่องจากดินทุกชนิดในผืนดินจากทุกส่วนของโลก จะต่อเนื่องถึงกันได้ทั้งหมด ซึ่งก็คือการก่อรวมตัวเชื่อมถึงกันอย่างต่อเนื่องด้วยหน่วยทางปริมาตร เช่น ลูกบาศก์เซนติเมตร ลูกบาศก์นิ้ว ลูกบาศก์ฟุต ลูกบาศก์เมตร หรือลูกบาศก์กิโลเมตร เป็นต้น



ภาพประกอบ 84 พิจารณาดัง cubical of soil ที่ประกอบขึ้นของผืนแผ่นดิน หรือ โลก หรือ เรียกว่า Earth model



ภาพประกอบ 85 การพิจารณาถึง ความนำไฟฟ้าและ/หรือ ความต้านทานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากปริมาตร (Cubical) ชั้นดินที่ต่อรวมถึงกัน หรือ เรียกว่า แบบจำลองชั้นดินโลก (Earth shell model) ซึ่งให้ผลรวมปริมาตรสุดท้าย เป็น Remote earth

พิจารณาจากรูปเมื่อปักแท่งหลักดิน (Ground electrode) ลงไปในระยะ a_1 , a_2 หรือ a_3 จะพบว่าแท่งหลักดินจะทะลุสัมผัสกับชั้นดินที่ใช้ค่า p_1 , p_2 , p_3 ด้วย สภาพ p ต่าง ๆ ที่สัมผัส แท่งหลักดินจึงเป็นสิ่งสำคัญของการสร้างระบบต่อลงดิน เพราะต้องนำค่า P ไปพิจารณาหาค่าความต้านทานต่อลงดินที่เหมาะสมกับระบบ เพื่อให้เกิดสภาพ Grounding ที่มีขีดความสามารถให้ความปลอดภัยและประสิทธิภาพสูงสุดต่อระบบดังที่ C.C.I.T.T. ได้แนะนำไว้

R = ความต้านทาน (ohm)

p = Earth resistivity ที่มีอยู่ภายใต้ขอบเขตปริมาตรที่กำหนดพิจารณา

a = จุดพิจารณาเริ่มต้น

$\int$ = ผลรวมจากความต่อเนื่องของ P ภายใต้ขอบเขตปริมาตรที่กำหนดพิจารณา

∞ = ขอบเขตระยะสิ้นสุดที่ต้องการ (ในการใช้งานจริงเราอาจใช้เพียง a_2 ซึ่งเป็นขอบเขตตามความต้องการเช่นขอบเขตของพื้นที่ 30 เมตร ขอบเขตของพื้น 1 กม. หรือ ขอบเขตของพื้นที่ 10 กม. ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับขอบเขตของพื้นที่ในความรับผิดชอบ ขนาดของโครงข่าย หรือ ความสำคัญของงานแต่ละงาน)

$\frac{dx}{2|x|^2}$

= ระยะทางที่กระแสไหล / พื้นที่ ที่กระแสไหลผ่าน (note : รูปแบบสมการแปรผันตามรูปทรง เช่น ทรงกระบอก ครึ่งทรงกลม ฯลฯ)

2.5 Single ground rod

ได้มีการออกแบบรูปลักษณะ หลักดินหลายลักษณะ ซึ่งแต่ละลักษณะของหลักดินถูกออกแบบ เพื่อให้สามารถเกิดค่าความนำไฟฟ้าได้มากที่สุด อย่างไรก็ตาม ความนำไฟฟ้า และความต้านทานไฟฟ้าของหลักดินต่างๆ

เช่น แท่งหลักดิน (rod) , แผ่นโลหะ (plate) เป็นต้นเราต้องแยกประเด็นและระลึกไว้เสมอ ระหว่าง ความนำไฟฟ้าของหลักดิน ก็เป็นเรื่องของหลักดิน ในส่วนของ Earth resistivity ก็เป็นอีกส่วนหนึ่ง ยานำมาปะปนกันโดยขาดเหตุผลรองรับ สภาพ Earth resistivity ของผิวน้ำดินจะเป็นส่วนหลักที่ ในการนำกระแสไฟฟ้าจาก Fault ต่าง ๆ ไหลครบวงจรยังแหล่งกำเนิดของ Fault แต่ละชนิด อย่างไรก็ตามเรามีความจำเป็นต้องใช้ความนำไฟฟ้าของหลักดิน ร่วมกับ ความนำไฟฟ้าจาก Earth resistivity มาใช้งานทันที เมื่อเราต้องสร้างระบบต่อลงดินเพื่อการใช้งาน Grounding รูปแบบหนึ่งของหลักดินซึ่งเป็นที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายคือ หลักดิน แบบแท่ง หรือ Rod เมื่อเราสร้างระบบต่อลงดินโดยใช้หลักดินแบบแท่ง rod เราพอที่จะประเมินค่าความต้านทานต่อลงดินจากการคำนวณเป็นดังนี้

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \ln \left[\left(\frac{4L}{a} \right) - 1 \right] \text{ ----- โอห์ม}$$

R = ความต้านทาน (โอห์ม)

L = ความยาวแท่ง Rod (เมตร)

a = ระยะเส้นผ่าศูนย์กลางแท่ง rod (เมตร)

ρ = ค่า Earth resistivity ที่แท่ง rod สัมผัส (โอห์ม-เมตร)

2.6 หน้าที่ยของหลักดิน

หลักดินที่เราปักฝังหลักดินลงในผิวน้ำดิน จะทำหน้าที่เป็น ตำแหน่งการต่อเชื่อมวงจรไฟฟ้าระหว่าง ระบบ และวงจรที่ใช้งานบนพื้นโลก ให้ต่อกับดิน โดยดินจะทำหน้าที่เป็นเส้นให้ทางกระแสไฟฟ้าไหลกลับครบวงจร (Return part current) ได้ต่อไป

ระบบและวงจรไฟฟ้าที่ใช้งานบนโลก ส่วนใหญ่มีสภาพการทำงาน แบบวงจร Normal mode(or Difference mode) ตัวอย่างอุปกรณ์ที่มีการทำงานแบบนี้ เช่น Generator ผลิตกระแสไฟฟ้า, หม้อแปลงไฟฟ้า, การส่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าแรงดันสูง 64kV, 22kV(L-L), 230 V(L-N) เหล่านี้เป็นต้น อุปกรณ์ในระบบวงจรแบบ Normal mode ที่กล่าว จะมีต่อลงดินด้วย เช่น การต่อลงดินที่จุดสะเทินหม้อแปลงไฟฟ้า, การต่อลงดินที่หม้อแปลงไฟฟ้าแรงสูงของสถานีไฟฟ้าย่อย หรือแม้แต่ สถานีวิทยุ โทรทัศน์ ชุมสายโทรศัพท์ ก็ต้องมีการต่อลงดินด้วย

สำหรับ หลักดินที่เราปักฝังหลักดินลงในผิวน้ำดิน จะทำหน้าที่เป็น ตำแหน่งการต่อเชื่อมวงจรไฟฟ้าระหว่าง ระบบ และวงจรที่ใช้งานบนพื้นโลกให้ต่อกับดิน โดยดินจะทำหน้าที่เป็นเส้นให้ทางกระแสไฟฟ้าไหลกลับครบวงจร (Return part current) ของแหล่งกำเนิดของกระแสไฟฟ้าแต่ละประเภทเหล่านั้น

ยกตัวอย่างเหตุการณ์ได้ดังนี้

1) เมื่อภาระไฟฟ้าแรงดันต่ำ เช่น เครื่องปรับอากาศเกิดไฟฟ้ารั่วลงดิน หากว่าเครื่องทำน้ำอุ่นมีการทำหลักดินอย่างถูกต้องแล้ว กระแสไฟฟ้าก็จะไหลผ่านหลักดิน กลับไปยัง หลักดินของหม้อ แปลงไฟฟ้าตัวที่จ่ายป้อนพลังงานกระแสให้กับเครื่องทำน้ำอุ่นเครื่องนั้น จากนั้นกระแสไฟฟ้า จะครบวงจร ณ จุดสะเทินของหม้อแปลงไฟฟ้าตัวนั้น

2) เมื่อสายส่งไฟฟ้าแรงดันสูงเกิด ลัดวงจร (Fault) ลงดิน กระแสไฟฟ้า ณ ตำแหน่งลัดวงจรลงดิน จะไหลผ่านดินกลับไปยัง หลักดินของหม้อแปลงแรงดันสูงตัวนั้น เพื่อครบวงจร ณ สถานีไฟฟ้าย่อยต่อไป

3) สำหรับการเกิดฟ้าผ่า ซึ่งเป็นการ Discharge ของ Capacitor ขนาดใหญ่ นั้น ขั้วไฟฟ้าขั้วหนึ่ง จะอยู่ที่ปริมาตรฐานฐานของก้อนเมฆ และอีกขั้วหนึ่ง จะอยู่ในกลุ่มปริมาตรดินของผิวน้ำดินใต้ฐานก้อนเมฆนั้น

กระแสฟ้าผ่าที่ลัดวงจรผ่านอากาศ ทำให้ประจุไฟฟ้าเกิดการถ่ายเทระหว่าง ขั้วไฟฟ้าทั้งสอง และสลายหมดไปได้ หลักดินที่ปักฝังและสัมผัส กับ กลุ่มปริมาตรดินดังกล่าว ได้อย่างสมบูรณ์ จะช่วยให้ประจุไฟฟ้าเกิดการสลายตัวได้รวดเร็ว และควบคุมศักดาไฟฟ้า ตก คร่อมดินต่าง ๆ เช่น Stepped potential หรือ Touch potential ให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัยได้

2.7 วัตถุประสงค์การต่อลงดิน (Purpose of earthing)

C.C.I.T.T. ได้แนะนำถึง จุดประสงค์การต่อลงดิน ที่ครบถ้วนสมบูรณ์ ซึ่งต้องมียอดประกอบ 5 ประการด้วยกัน การปฏิบัติได้อย่างครบถ้วนสมบูรณ์ คือ การได้มาซึ่งประสิทธิภาพสูงสุดของการต่อลงดิน

วัตถุประสงค์ของการติดตั้งระบบลงดินในงานสื่อสารโทรศัพท์ ในขณะที่เราติดตั้งระบบโทรศัพท์ลงบนพื้นดิน ต้องทำให้มันเอาจว่า

1. ระบบมีความปลอดภัยจากแรงดันไฟฟ้าให้กับผู้ปฏิบัติงาน พนักงานบำรุงรักษา และผู้ใช้งาน
2. มีการป้องกันอุปกรณ์จากแรงดันไฟฟ้า
3. การลดสัญญาณรบกวน ในวงจรระบบงานโทรศัพท์
4. ใช้พื้นดินเป็นตัวแทนของวงจรในระบบสื่อสาร
5. อนุโลมให้ใช้ตามความต้องการทางกฎหมาย

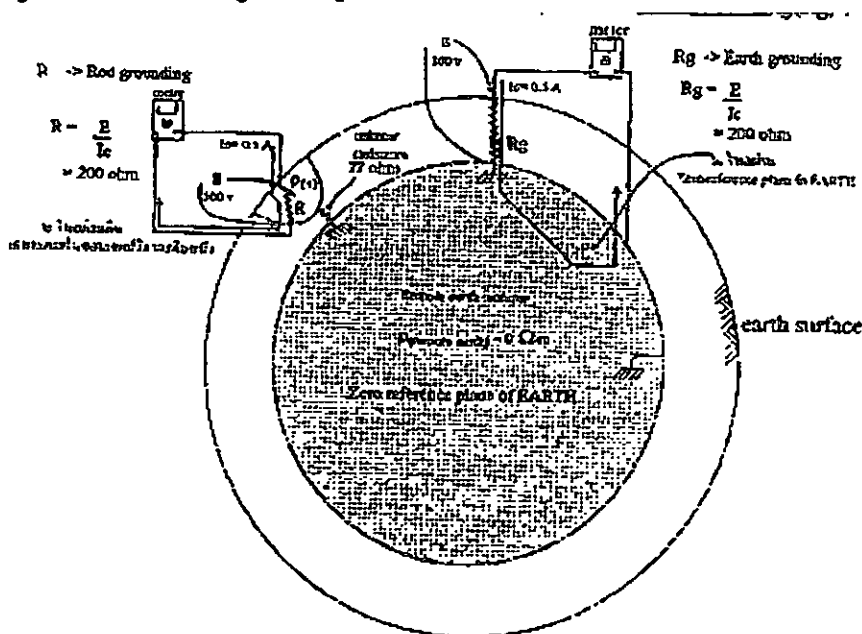
2.8 GROUND POTENTIAL ในระบบต่อลงดิน

การติดตั้งระบบต่อลงดิน ก็คือกระบวนการปฏิบัติเพื่อให้ได้มาซึ่งสภาพ Grounding โดยลักษณะและสภาพ Grounding ที่ดีมีประสิทธิภาพนั้น C.C.I.T.T. ได้แนะนำไว้ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2519 (ค.ศ. 1976) ในการประชุมที่กรุงเจนีวา ประเทศ สวิตเซอร์แลนด์ เมื่อพิจารณาหัวข้อทั้ง 5 ประการแล้ว ย่อมพบว่าจุดประสงค์หลักของการต่อลงดิน ก็เพื่อการลดค่าศักดาไฟฟ้ากราวด์ (Ground potential) ให้มีค่าต่ำสุด โดยมีองค์ประกอบ ที่สำคัญส่งผลต่อ ศักดาไฟฟ้ากราวด์คือ Ground resistance

ปัจจุบันได้มีวิธีการ สร้างระบบต่อลงดินเพื่อการทำให้ได้มาของสภาพ Grounding แบ่งประเภท คือ

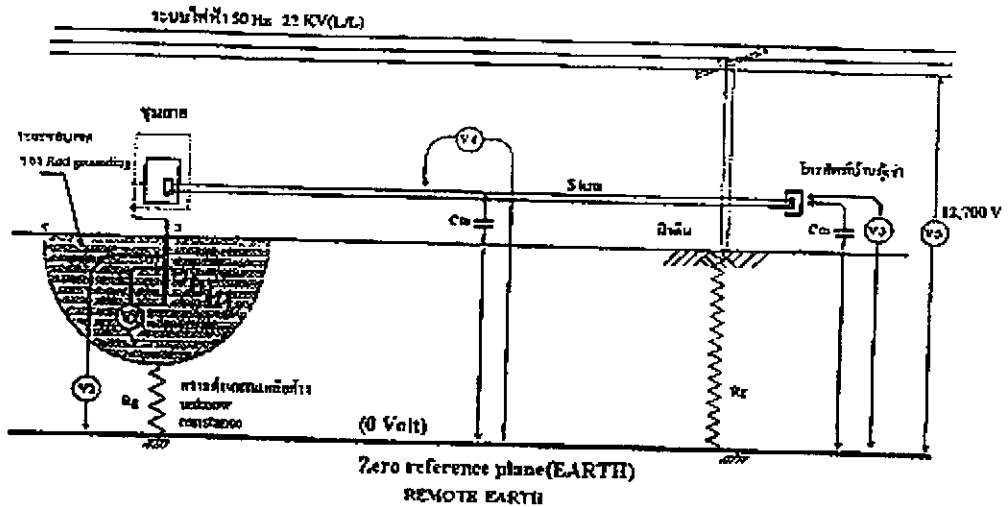
1. ระบบ Rod Grounding
2. ระบบ Earth grounding ดังภาพประกอบ 86 สภาพ Grounding ซึ่งแตกต่างกันระหว่าง ระบบ

Rod grounding และ ระบบ Earth grounding



ภาพประกอบ 86 สภาพ Grounding ซึ่งแตกต่างกันระหว่างระบบ Rod grounding และ Earth grounding

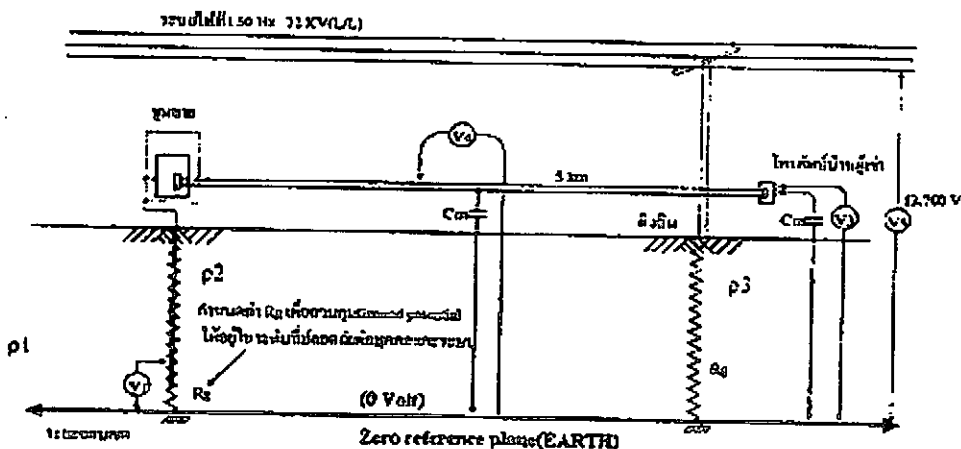
2.9 แท่งหลักดิน (Rod grounding) ค่า Ground resistance (R) เกิดจากแท่งหลักดินกระทำกับกลุ่มปริมาตรดิน ในระยะขอบเขตพื้นที่หนึ่งอุปกรณ์ หรือ โครงข่ายซึ่งติดตั้งและมีพื้นที่การใช้งานอยู่เฉพาะภายในขอบเขต ของปริมาตรดินส่วนนี้จะได้รับสภาพ Grounding ตามขอบเขตปริมาตรดิน



ภาพประกอบ 87 ตัวอย่างแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นในส่วนต่าง ๆ และส่งผลต่อ ช.ส. ที่ใช้งาน Rod grounding

ความเกี่ยวพันร่วมทางสนามไฟฟ้า (Mutual capacitance) ของระบบที่ใช้งานอยู่บนปริมาตรของ Rod grounding ซึ่งกระทำต่อ Zero reference plane of Earth ย่อมมีอยู่เสมอเป็นปกติของธรรมชาติ และมีความต้านทานเหลือค้าง ซึ่งเป็น Unknown resistance อยู่ในระบบต่อไป (ดังในภาพ) ส่งผลเป็นศักดาไฟฟ้า V_2 ระหว่างอุปกรณ์และระบบบนปริมาตรของ Rod grounding ไปยัง กลุ่มปริมาตรดินส่วนใหญ่ (Remote earth volume) ขึ้นได้ หากแรงดัน V_2 มีค่าสูงระดับหนึ่งก็อาจทำอันตรายต่อ บุคคลทั่วไปหรือรบกวนสร้างความเสียหายต่ออุปกรณ์และระบบได้

2.10 ความต้านทานจุดลงดิน (Earth grounding) ค่า Ground resistance (R_g) เกิดแท่งหลักดิน กระทำกับกลุ่มปริมาตรดินส่วนใหญ่ (Remote earth volume) ของโลกซึ่งเป็น Common resistivity of earth ผลรวมของปริมาตรดินที่กว้างใหญ่มิอาจกล่าว จะมีค่าความต้านทานไฟฟ้าโดยรวมของกลุ่มปริมาตรต่ำมาก ให้ผลเป็น Zero reference of EARTH จากปริมาตรดินส่วนใหญ่



ภาพประกอบ 88 กำหนดค่า R_g ที่เหมาะสม เพื่อควบคุม Ground potential ให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัย เพื่อง่ายและสะดวกในการจัดการบริหารระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ระบบ Earth grounding ซึ่งใช้ปริมาณดินส่วนใหญ่เป็น Grounding ทำให้สามารถรองรับ ระบบที่มีพื้นที่โครงข่ายกว้างใหญ่ได้ ทำให้ส่วนต่าง ๆ ทั้งทั้งโครงข่ายได้รับ reference voltage จากจุดอ้างอิงเดียวกันที่ Zero reference plane of EARTH ส่งผลให้การจัดการ บริหารโครงข่ายไม่ต้องกังวลต่อศักดาไฟฟ้าที่เกิดจากความต้านทานเหลือค้าง ที่เป็น Unknown resistance ดังเช่นระบบ Rod grounding การสร้างระบบต่อลงดิน ก็เพื่อสร้างความปลอดภัยต่อบุคคล และทำให้อุปกรณ์หรือระบบต่าง ๆ ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงที่สุดวิธีการที่ง่ายและสะดวกเพื่อลดศักดาไฟฟ้ากราวด์ คือ การลด Ground resistance และเมื่อค่า Ground resistance มีค่าต่ำย่อมทำให้ Ground potential มีค่าต่ำโดยอัตโนมัติ การสร้างระบบต่อลงดินแต่ละครั้งจะต้องมีอุปกรณ์ประกอบมากมาย เช่น Bar ground , แท่งหลักดิน , สายต่อลงดิน , หางปลาต่อสาย, น็อต ฯลฯ สิ่งสุดท้ายที่ต้องปฏิบัติคือ การวัดค่า Ground resistance ด้วยเครื่องวัดกราวด์ ซึ่งจะเป็นตัวบอกเราว่าระบบต่อลงดินที่เราสร้างขึ้นได้เป้าหมายและประสิทธิภาพสูงหรือต่ำ อย่างไรก็ตามผู้วัดค่า Ground resistance ก็ควรทราบว่า ค่าโอห์มที่ได้นั้นเป็นค่า R ของระบบ Rod grounding หรือเป็นค่า Rg ของระบบ Earth grounding ด้วย (ทศท. 2541 : 6)

3. มาตรฐานการตรวจสอบงานขั้วสายตอนนอก

3.1 การตรวจสอบค่าทางไฟฟ้า และ ความต้านทานดิน (Electrical & Ground Test)

1. การทดสอบค่าความต้านทานดินของตู้สลับสาย (Cabinet Ground)

ผลจาก Construction Test ไม่เกิน 10 โอห์ม สำหรับกราวด์รวม และ 30 โอห์มสำหรับกราวด์แยก

2. การทดสอบค่าความต้านทานดินของสายเคเบิล (Cable Ground)ค่ากราวด์ที่อ่านได้ต้องไม่เกิน 10 โอห์ม สำหรับกราวด์รวม และไม่เกิน 30 โอห์ม สำหรับกราวด์แยก

3. การทดสอบค่าความต้านทานดินบนแผง (MDF Ground)

- ค่าของกราวด์ ใน MDF ต้องไม่เกิน 0.1 โอห์ม
- ค่าของกราวด์รวมใน MDF ต้องไม่เกิน 1.0 โอห์ม
- ค่าของ Ground Frame ต้องไม่เกิน 0.3 โอห์ม

(เทเลคอม เอเชีย บมจ. : 2537)

3.2 ความต้านทานของการต่อลงดิน (RESISTANCE TO GROUND)

ควรมีค่าต่ำที่สุด เท่าที่จะทำได้ ความต้านทานนี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะของดิน และพื้นที่สัมผัสระหว่างดินกับหลักดินรวมทั้งความลึกขอลหลักดินด้วย มาตรฐาน ของ กฟน. กำหนดค่าความต้านทานของการต่อลงดินไว้ต้องไม่เกิน 25 โอห์ม (การไฟฟ้านครหลวง : 2540)

4. ทฤษฎีในงานอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการออกแบบเครื่องวัดจุดลงดิน

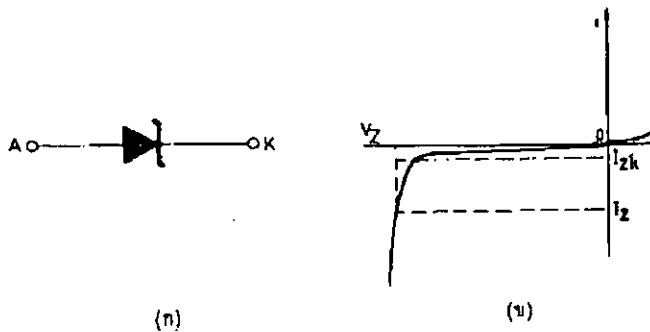
4.1 ทฤษฎีไดโอด

4.1.1 ทฤษฎีไดโอดรอยต่อพีเอ็นแบบต่าง ๆ

4.1.1.1 ไดโอดเรียงกระแส (rectifying diode) ไดโอดแบบนี้ตามปกติใช้ในการเปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นไฟฟ้ากระแสตรงหรือใช้บังคับทิศทางของกระแสที่ความถี่ต่ำ ๆ หรือความถี่ไม่สูงนัก เช่น ที่ความถี่ของไฟฟ้ากำลัง (50-60 เฮิรตซ์) เป็นต้นข้อกำหนดที่สำคัญของไดโอดแบบนี้ก็คือค่าสูงสุดของกระแสเดินหน้าเฉลี่ยและค่าแรงดันย้อนกลับทาง (peak inverse voltage หรือ PIV) ที่อุณหภูมิใช้งาน ยกตัวอย่างเช่น

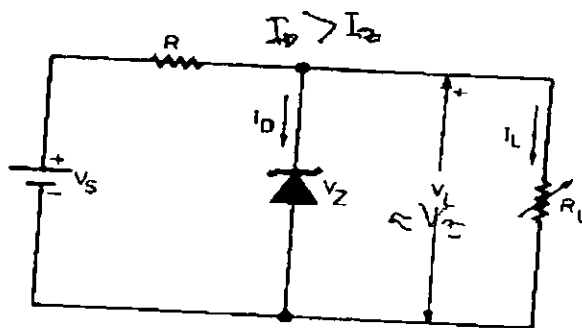
ไดโอดชนิดซิลิคอนเบอร์ IN4007 สามารถรับกระแสเกินหน้าเฉลี่ยได้ไม่เกิน 1.0 แอมแปร์และรับแรงดันย้อนกลับทางได้ไม่เกิน 1000 โวลต์ ที่อุณหภูมิแวดล้อม 75°C ไดโอดเรียงกระแสที่ใช้ในงานทางไฟฟ้ากำลังอาจจะรับกระแสเกินหน้าขนาดหลายร้อยแอมแปร์ที่อุณหภูมิสูงถึง 100°C หรือมากกว่านั้นก็ได้ (มงคล เดชนรินทร์ . มปป . หน้า 54)

4.1.2 ซีเนอร์ไดโอด (Zener diode) หรือเบรกดาวน์ไดโอด (breakdown diode) ไดโอดแบบนี้มุ่งที่จะใช้ประโยชน์จากปรากฏการณ์เบรกดาวน์โดยเฉพาะ (ชื่อ ซีเนอร์ไดโอด เป็นชื่อรวมของไดโอดทั้งแบบที่อาศัยปรากฏการณ์ซีเนอร์และแบบที่อาศัยปรากฏการณ์อะวาแลนซ์) เหตุผลในการนี้ก็เพื่อให้ได้แรงดันกลับทางคร่อมไดโอดมีค่าเกือบคงตัวในขณะที่กระแสนอนของไดโอดเปลี่ยนแปลงไป ผู้ผลิตจะออกแบบให้ไดโอดแบบนี้สามารถทนต่อความร้อนขณะที่เกิดเบรกดาวน์ได้ถึงค่ากำลังค่าหนึ่ง ซึ่งจะยังไม่ทำให้ไดโอดเสียหาย ยกตัวอย่างเช่น ซีเนอร์ไดโอดเบอร์ IN2816 มีแรงดันเบรกดาวน์ 18 โวลต์และสามารถทนกำลังสูญเสียที่กลายเป็นความร้อนได้ถึง 50 วัตต์ที่อุณหภูมิแวดล้อม 25°C



ภาพประกอบ 89 ซีเนอร์ไดโอด (ก) สัญลักษณ์ (ข) ลักษณะแรงดัน-กระแส

ภาพประกอบ 89 แสดงสัญลักษณ์และลักษณะแรงดัน-กระแสของซีเนอร์ไดโอดโดยทั่วไป ในภาพประกอบ 89 นี้ V_Z เป็นแรงดันเบรกดาวน์หรือแรงดันซีเนอร์ (Zener voltage) ของไดโอด I_Z เป็นกระแสนอนที่ไหลผ่านไดโอดเมื่อมีแรงดันกลับทางเป็น V_Z ส่วน I_{ZK} (knee current) เป็นกระแสตรงส่วน



ภาพประกอบ 90 การใช้งานซีเนอร์ไดโอดสำหรับควบคุม

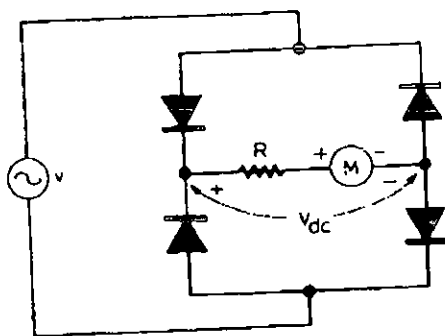
แรงดันคร่อมโหลดให้คงตัว โครงสร้างหัวเข้าของเส้นโค้งลักษณะแรงดัน-กระแสของซีเนอร์ไดโอด ถ้ากระแสนอนลดลงต่ำกว่า I_{ZK} ไดโอดจะไม่เบรกดาวน์ และจะทำหน้าที่เหมือนไดโอดเรียงกระแสธรรมดา ในกรณี

ของ ซีเนอร์ไดโอดอุดมคติ (ideal Zener diode) เราจะถือว่า $I_{zk} = 0$ และ V_Z มีค่า คงตัว ไม่ขึ้นกับค่า กระแสย้อน

ภาพประกอบ 90 แสดงวงจรที่ใช้ซีเนอร์ไดโอดเป็นตัวควบคุมแรงดันคร่อมโหลด V_L ให้คงตัว หรือเป็นตัวกำหนดแรงดันอ้างอิง (reference voltage) ในวงจรนี้ซีเนอร์ไดโอดจะถูกไบแอสกลับทางผ่านตัวต้านทาน R โดยแหล่งจ่ายแรงดันซึ่งมีแรงดัน V_S สูงกว่า V_Z ทำให้ซีเนอร์ไดโอดเกิดเบรกดาวนและมีแรงดันที่ตกคร่อมตัวของมันคงตัว หรือเกือบคงตัว เท่ากับ V_Z ตลอดเวลาที่กระแสที่ผ่านซีเนอร์ไดโอด คือ I_D ยังคงสูงกว่าค่า I_Z

4.2 วงจรเครื่องมือวัดต่าง ๆ ทางอิเล็กทรอนิกส์

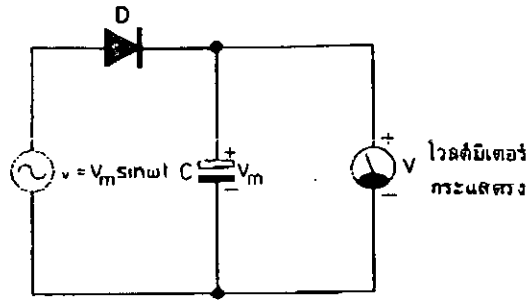
4.2.1 มิเตอร์ใช้ตัวเรียงกระแส (rectifier meter) ในการนำมิเตอร์กระแสตรงมาดัดแปลงเป็น มิเตอร์วัดแรงดันกระแสสลับนั้น เราอาจใช้วงจรเรียงกระแสเต็มคลื่นแบบบริดจ์ดังในภาพประกอบ 91 ถ้าแรงดัน กระแสสลับที่ต้องการวัด มีรูปคลื่นเป็นแบบไซน์ เช่น $V = V_m \cos \omega t$ เราจะได้แรงดันกระแสตรงคร่อมตัว ต้านทาน R และมิเตอร์กระแสตรง M ในภาพประกอบ 91 เป็น $V_{dc} = 2V_m / \pi = (2/\pi) V_{rms}$ ดังนั้น กระแสที่ผ่านตัวมิเตอร์กระแสตรงจะเป็น $I_{dc} = 2V_{rms} / R$ โดยที่ R_M เป็นความต้านทานของตัวมิเตอร์ และค่าที่ อ่านได้จากหน้าปัดของตัวมิเตอร์ซึ่งเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ I_{dc} ก็จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับ V_{rms} ของแรงดัน กระแสสลับด้วย โดยการเปรียบเทียบสเกลของมิเตอร์ให้พอเหมาะ เราจะสามารถอ่านค่า V_{rms} จากหน้าปัดของ มิเตอร์ได้โดยตรง



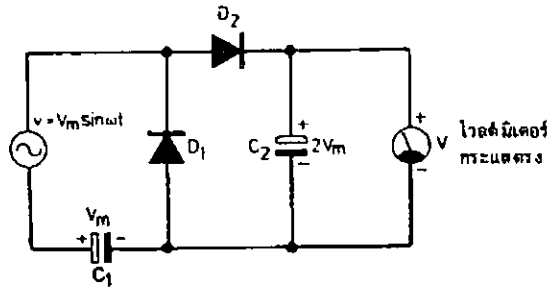
ภาพประกอบ 91 วงจรมิเตอร์วัดแรงดันกระแสสลับโดยใช้มิเตอร์กระแสตรง

4.2.2 โวลต์มิเตอร์อ่านค่ายอด (peak-reading voltmeter) โวลต์มิเตอร์แบบนี้ใช้วงจรซึ่ง ประกอบด้วยไดโอด D และตัวเก็บประจุ C ต่อกับโวลต์มิเตอร์กระแสตรงตามภาพประกอบ 92 ไดโอดยอดนี้จะ อยู่ในรูปของแรงดันกระแสตรงคร่อม C ซึ่งเราสามารถอ่านได้โดยใช้โวลต์มิเตอร์กระแสตรงดังในภาพประกอบ 92

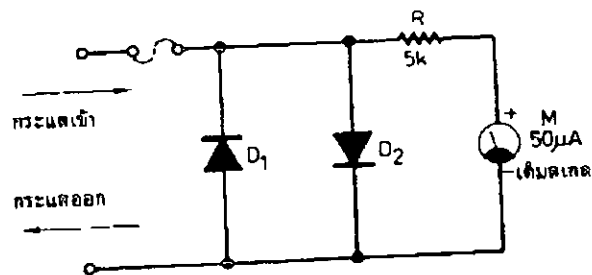
4.2.3 โวลต์มิเตอร์อ่านค่ายอดถึงยอด (peak-to-peak voltmeter) โวลต์มิเตอร์แบบนี้ใช้วงจร เพิ่มแรงดันเป็นสองเท่าซึ่งประกอบด้วยไดโอด D_1, D_2 และตัวเก็บประจุ C_1, C_2 ต่อกันดังในภาพประกอบ 93 แรงดันที่ปรากฏคร่อม C_2 จะเป็นแรงดันกระแสตรงซึ่งมีขนาดเป็น 2 เท่าของค่ายอดของแรงดันกระแสสลับที่ ป้อนเข้า และสามารถอ่านได้จากโวลต์มิเตอร์กระแสตรงซึ่งต่ออยู่คร่อม C_2



ภาพประกอบ 92 วงจรโวลต์มิเตอร์อ่านค่ายอด



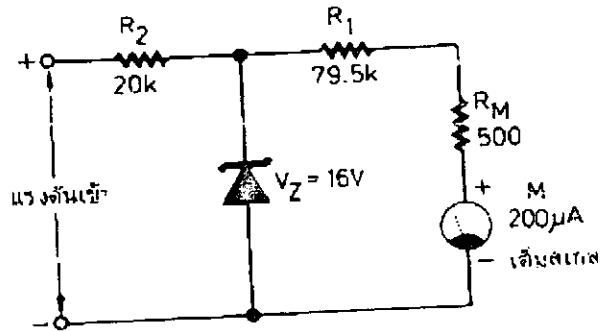
ภาพประกอบ 93 วงจรโวลต์มิเตอร์อ่านค่ายอดถึงยอด



ภาพประกอบ 94 วงจรป้องกันแอมมิเตอร์

4.2.4 วงจรป้องกันแอมมิเตอร์ ภาพประกอบ 94 แสดงตัวอย่างวงจรที่ใช้ป้องกันแอมมิเตอร์ซึ่งวัดกระแสตรงเต็มสเกลได้ $50 \mu\text{A}$ ในการใช้งานตามปกติซึ่งมีกระแสไหลผ่านตัวมิเตอร์ $> 50 \mu\text{A}$ นั้น แรงดันคร่อมไดโอดจะมีค่าไม่เกิน $(50 \mu\text{A}) \times (5 \text{ k}\Omega) = 250 \text{ mV}$ ซึ่งก็เพียงพอที่จะทำให้ไดโอด D_1 หรือ D_2 นำกระแส แต่ถ้กระแสที่ไหลผ่านมิเตอร์มีค่าเพิ่มขึ้นจนถึงประมาณ $(120 \mu\text{A}) \times (5 \text{ k}\Omega) = 0.6 \text{ โวลต์}$ ทำให้ไดโอดตัวใดตัวหนึ่งนำกระแสได้ ดังนั้นกระแสส่วนที่เกินจากประมาณ $120 \mu\text{A}$ จะไหลผ่านไดโอดทั้งหมด ตัวมิเตอร์จะเพียงแต่รับกระแสเกินสเกลซึ่งยังไม่ถึงกับทำให้เกิดความเสียหายขึ้นได้

4.2.5 วงจรป้องกันโวลต์มิเตอร์ ภาพประกอบ 95 แสดงตัวอย่างวงจรที่ใช้ป้องกันโวลต์มิเตอร์ซึ่งวัดแรงดันเต็มสเกลได้ 20 โวลต์ วงจรนี้ประกอบด้วยซีเนอร์ไดโอดซึ่งมีแรงดันเบรกดาวน์เท่ากับ 16 โวลต์ ตัวต้านทาน $R_1 = 79.5 \text{ k}\Omega$ และตัวต้านทาน $R_2 = 20 \text{ k}\Omega$ ต่อกันตามรูป ตัวมิเตอร์เองมีความต้านทาน $R_M = 500 \Omega$ และกระแสเต็มสเกล $200 \mu\text{A}$ ในขณะที่แรงดันเข้าที่ต้องการวัดมีค่าไม่เกิน 20 โวลต์ กระแสที่ผ่านตัวมิเตอร์จะไม่เกิน $(20 \text{ V}) / (20 + 79.5 + 0.5 \text{ k}\Omega) = 200 \mu\text{A}$ และแรงดันคร่อมซีเนอร์ไดโอดจะมีค่าไม่เกิน $(200 \mu\text{A}) \times (79.5 + 0.5 \text{ k}\Omega) = 16 \text{ โวลต์}$ ดังนั้นซีเนอร์ไดโอดจะยังไม่เบรกดาวน์ แต่ถ้าแรงดันเข้าสูงเกิน 20 โวลต์ ซีเนอร์ไดโอดจะเบรกดาวน์และคงค่าแรงดันคร่อมตัวมัน เอาไว้ที่ประมาณ 16 V ทำให้กระแสไหลผ่าน



ภาพประกอบ 95 วงจรป้องกันโวลต์มิเตอร์

ตัวมิเตอร์ยังคงเป็นประมาณ $200 \mu\text{A}$ แต่กระแสเข้าส่วนที่เกินจากนี้จะไหลลัดผ่านตัวซีเนอร์ไดโอดไป ตัวมิเตอร์จึงไม่ได้รับความเสียหายโดยผลจากการที่แรงดันเข้าสูงเกินพิกัดดังกล่าว

4.3 จุดทำงานของทรานซิสเตอร์

ทรานซิสเตอร์มีที่ใช้ทั้งในระบบดิจิตอลและระบบอะนาล็อก ในระบบดิจิตอลนั้นทรานซิสเตอร์จะทำงานอยู่ในเขตอิ่มตัวหรือไม่ก็เขตคัตออฟ แต่ในการใช้ทรานซิสเตอร์เป็นวงจรขยายสัญญาณอะนาล็อกทรานซิสเตอร์จะต้องอยู่ในเขตแอกทีฟ คืออยู่ในบริเวณที่ลักษณะสมบัติของทรานซิสเตอร์เกือบเป็นเส้นตรงที่ห่างเท่า ๆ กัน เพื่อว่าสัญญาณออกจะได้มีลักษณะเหมือนสัญญาณเข้าโดยไม่มีการเพี้ยน นอกจากนี้การที่จะให้ทรานซิสเตอร์เป็นวงจรขยายตามที่เรากำลังต้องการนั้นจำเป็นต้องมีการไบแอสที่ถูกต้อง กล่าวคือนอกจากจะมีแหล่งจ่ายกระแสตรงจ่ายกระแสคอลเลกเตอร์ผ่านโหลดที่เหมาะสมแล้ว ยังจะต้องมีการจ่ายกระแสเบสหรือการไบแอสรอบต่อเบส-อิมิตเตอร์ที่เหมาะสมอีกด้วย ขณะที่ไม่มีสัญญาณเข้ากระแสคอลเลกเตอร์ (I_C) และแรงดันระหว่างคอลเลกเตอร์กับอิมิตเตอร์ (V_{CE}) จะเป็นตัวกำหนดจุดทำงาน (operating point) หรือจุดทำงานสงบ (quiescent point) ของทรานซิสเตอร์

เมื่อได้จุดทำงานที่เหมาะสมแล้ว ทรานซิสเตอร์ก็จะพร้อมที่จะขยายสัญญาณได้ สมมติว่าวงจรขยายเป็นแบบอิมิตเตอร์ร่วมสัญญาณกระแสสลับขาเข้าจะเปลี่ยนแปลงระหว่างเบสกับอิมิตเตอร์ทำให้กระแสคอลเลกเตอร์เปลี่ยนแปลง กระแสคอลเลกเตอร์ที่เปลี่ยนแปลงนี้ทำให้แรงดันคร่อมโหลดเปลี่ยนแปลง จึงได้สัญญาณขาออกที่คอลเลกเตอร์มีขนาดใหญ่กว่าสัญญาณเข้าที่เบส นั่นคือมีการขยายสัญญาณเกิดขึ้น

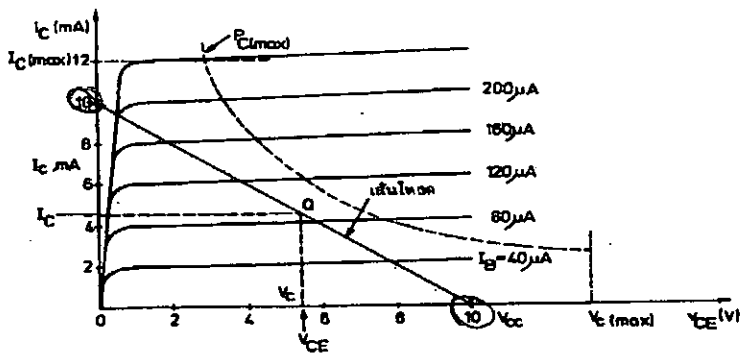
การกำหนดจุดทำงานของทรานซิสเตอร์ นอกจากจะให้ได้อัตราขยายขนาดสัญญาณออกสูงสุดและความเพี้ยนตามที่ต้องการแล้ว จุดทำงานนี้ยังจะต้องมีเสถียรภาพคือ ไม่ได้รับผลกระทบกระเทือนจากการเปลี่ยนแปลงทางอุณหภูมิอีกด้วย ทั้งนี้เพราะว่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของทรานซิสเตอร์ เช่น อัตราขยายกระแส (β) กระแสรั่วของคอลเลกเตอร์ (I_{CO}) และแรงดันระหว่างเบสกับอิมิตเตอร์ (V_{be}) ต่างก็เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิในลักษณะต่าง ๆ กัน ทำให้กระแสคอลเลกเตอร์ (I_C) และจุดทำงานเปลี่ยนแปลงวงจรไบแอสที่กำหนดจุดทำงานจำเป็นที่จะต้องมีการป้อนกลับแบบลบหรือการชดเชย เพื่อให้จุดทำงานมีเสถียรภาพตามต้องการ

4.3.1 การเลือกจุดทำงานของทรานซิสเตอร์

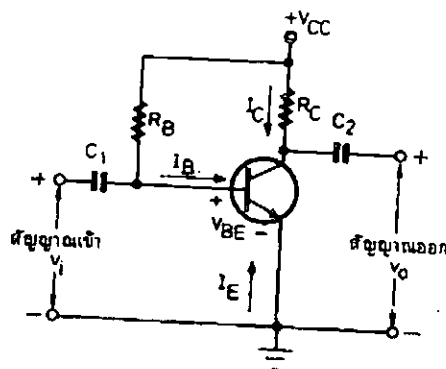
ดังได้กล่าวแล้วว่าในการที่ทรานซิสเตอร์จะเป็นตัวขยายสัญญาณที่ดีได้นั้น จำเป็นจะต้องมีจุดทำงานที่เหมาะสม เมื่อกำหนดจุดทำงานแล้ว สัญญาณกระแสสลับขาเข้าจะทำให้กระแสคอลเลกเตอร์เพิ่มขึ้นและลดลงโดยมีกระแสคอลเลกเตอร์ของจุดทำงานเป็นค่าเฉลี่ย ในเมื่อเราต้องการให้สัญญาณออกมีรูปร่างลักษณะเหมือนสัญญาณเข้า เราย่อมไม่ต้องการให้การแปรของสัญญาณออกถูกจำกัดโดยเขตอิ่มตัว หรือเขตคัตออฟของทรานซิสเตอร์ นอกจากนี้เราต้องคำนึงถึงค่าพิกัดสูงสุดต่าง ๆ ของตัวทรานซิสเตอร์ด้วยเช่นเขตคัตออฟของ

ทรานซิสเตอร์ นอกจากนี้เราต้องคำนึงถึงค่าพิกัดสูงสุดต่าง ๆ ของตัวทรานซิสเตอร์ด้วยเช่น $I_{C(max)}$, $V_{C(max)}$, $P_{C(max)}$ เป็นต้น เราจะต้องไม่ให้กระแสคอลเล็กเตอร์ไหลมากจนอัตราขยายกระแสมีค่าต่ำเกินไป ไม่ให้แรงดันคร่อมทรานซิสเตอร์สูงจนเกิดการเบรกดาวน์ (breakdown) ของรอยต่อพีเอ็น และไม่ให้เกิดการสูญเสียกำลังมากจนเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของรอยต่อคอลเล็กเตอร์ถึงขั้นที่กลับคืนไม่ได้ (irreversible) เพราะอุณหภูมิสูงเกินไป ($\approx 200^{\circ}\text{C}$) ภาพประกอบ 97 แสดงค่าพิกัดสูงสุดต่าง ๆ บนลักษณะทางด้านนอกของทรานซิสเตอร์

นอกเหนือจากการจ่ายกระแสเบสที่เหมาะสมให้ทรานซิสเตอร์ ค่าของโหลดของคอลเล็กเตอร์ก็มีความสำคัญมาก เพราะเป็นตัวกำหนดเส้นโหลด (load line) จุดทำงานของทรานซิสเตอร์จะแปรไปตามสัญญาณเข้าบนเส้นตรงนี้ จะออกจากเส้นตรงนี้ไม่ได้ถ้าโหลดเป็นความต้านทานล้วน



ภาพประกอบ 96 ลักษณะทางด้านนอกของทรานซิสเตอร์ npn



ภาพประกอบ 97 วงจรขยายอิมิตเตอร์แบบไบแอสคงตัว

ภาพประกอบ 97 เป็นวงจรขยายทรานซิสเตอร์แบบอิมิตเตอร์ร่วม ในวงจรนี้จุดทำงานของทรานซิสเตอร์ถูกกำหนดโดย V_{CC} , R_B และ R_C เมื่อกำหนด V_{CC} แล้วกระแสเบสจะขึ้นอยู่กับค่าของ R_B

$$I_B = \frac{V_{CC} - V_{BE}}{R_B}$$

และ R_C จะเป็นตัวกำหนดเส้นตรงของโหลด เราอาจเขียนสมการของแรงดันกระแสตรงทางด้านคอลเล็กเตอร์ได้ดังนี้

$$V_{CC} = I_C R_C + V_{CE}$$

สมการข้างต้น เป็นสมการที่กำหนดเส้นโหลด ส่วนสมการแรกกำหนดกระแสเบสเนื่องจากว่า V_{BE} มีค่าค่อนข้างคงตัว ($\approx 0.7\text{ V}$ สำหรับ Si และ $\approx 0.2\text{ V}$ สำหรับ Ge) และมีขนาดเล็กกว่า V_{CC} มาก กระแสเบสจึงถูกกำหนดโดย R_B เป็นส่วนใหญ่และมีค่าเกือบคงตัว วงจรในภาพประกอบ 98 จึงมีชื่อเรียกว่า วงจรไบแอสคงตัว (fixed bias)

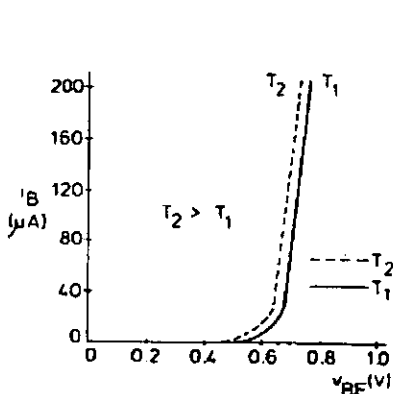
C_1 เป็นตัวเก็บประจุที่ทำหน้าที่ป้อนสัญญาณเข้า V_i มายังเบสของทรานซิสเตอร์ทำให้กระแสเบสแปรไปตาม V_i กระแสคอลเล็กเตอร์ก็แปรไปตามกระแสเบสจึงได้สัญญาณออกขนาดใหญ่กว่าที่คอลเล็กเตอร์ซึ่งถูกนำออกไปยังวงจรต่อไปโดยผ่านทาง C_2 C_1 และ C_2 จะต้องมีย่านใหญ่พอที่จะทำให้ค่ารีแอคแตนซ์มีขนาดเล็กมากเมื่อเทียบกับอิมพีแดนซ์ของวงจร ทำให้สัญญาณกระแสสลับสามารถผ่านได้โดยสะดวก แต่สัญญาณกระแสตรงไม่สามารถผ่านตัวเก็บประจุได้ ดังนั้นแหล่งกำเนิดสัญญาณ V_i และตัวรับกำลังจากสัญญาณ V_o จึงอาจมีระดับแรงดันกระแสตรงที่แตกต่างจากระดับแรงดันของเบสและแรงดันของคอลเล็กเตอร์ตามลำดับได้

4.4 ทรานซิสเตอร์ทำงานเป็นวงจรขยาย

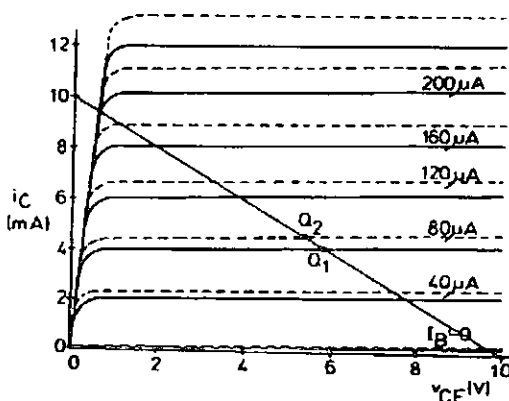
วงจรในภาพประกอบ 98 เมื่อใส่สัญญาณกระแสสลับ V_i เข้าระหว่างเบสกับอิมิตเตอร์จะได้สัญญาณขนาดใหญ่ออกระหว่างคอลเล็กเตอร์กับอิมิตเตอร์ เราจะสามารถทำความเข้าใจกลไกการทำงานของวงจรได้

4.4.1 เสถียรภาพของการไบแอส

เมื่อเราเลือกจุดทำงานที่เหมาะสมได้แล้ว เราก็หวังให้ทรานซิสเตอร์ทำงานที่จุดทำงานนี้ตลอดไป แต่วงจรทรานซิสเตอร์มักจะต้องทำงานในช่วงอุณหภูมิที่ค่อนข้างกว้าง (ประมาณ 0 ถึง $+50^\circ\text{C}$ ในอาคารและ -20 ถึง $+70^\circ\text{C}$ นอกอาคาร) การเปลี่ยนแปลงทางอุณหภูมิจะทำให้พารามิเตอร์ของทรานซิสเตอร์เปลี่ยนไป ยังผลให้จุดทำงานเปลี่ยนไปได้ พารามิเตอร์ดังกล่าว ได้แก่



ภาพประกอบ 98 ลักษณะทางด้านเข้า



ภาพประกอบ 99 ลักษณะทางด้านออก

1. β ซึ่งจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่ม แต่ไม่เป็นไปตามกฎง่าย ๆ
2. I_{CO} ซึ่งจะเพิ่มขึ้นเป็น 2 เท่าทุกครั้งที่อุณหภูมิเพิ่มขึ้น 10°C
3. V_{BE} ซึ่งจะลดลงด้วยอัตรา $2 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$

การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวจะทำให้ลักษณะจะทำให้ลักษณะของทรานซิสเตอร์เปลี่ยนไปดังภาพประกอบ 98 และ ภาพประกอบ 99

การเพิ่มอุณหภูมิทำให้ V_{BE} ที่ค่า I_B คงตัวลดลง เนื่องจากว่า $I_C = \beta I_B + (1 + \beta) I_{CO}$ และทั้ง β และ I_{CO} เพิ่มขึ้น เส้นโลดกซ์ $I_B =$ ค่าคงตัว ของลักษณะทางด้านออกจะเลื่อนสูงขึ้นและมีระยะระหว่างเส้นมากขึ้น ในรูปที่ 7.8 ถ้าหากว่า I_B คงตัว $= 80 \mu\text{A}$ ทรานซิสเตอร์ที่มีเส้นโหลดและจุดทำงาน Q_1 ที่อุณหภูมิ T_1 จะเปลี่ยนจุดทำงานไปอยู่ที่ Q_2 เมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนเป็น T_2 ทำให้ I_C เพิ่มขึ้นและ V_{CE} ลดลง จะเห็นได้ว่าการรักษา I_B ให้คงตัวมิได้ทำให้จุดทำงานมีเสถียรภาพดี ตรงกันข้าม เราควรจะเปลี่ยน I_B เพื่อรักษาให้ I_C และ V_{CE} มีค่าคงตัว ขณะที่ β , I_{CO} และ V_{BE} เปลี่ยนแปลง

ความไม่เสถียรอีกประการหนึ่งเกิดจากการที่ทรานซิสเตอร์เบอร์เดียวกัน อาจมีพารามิเตอร์ต่างกัน ได้มาก ยกตัวอย่างเช่น ทรานซิสเตอร์เบอร์ 2N5671 มี $h_{FE} (= I_C/I_B)$ ต่ำสุดเท่ากับ 20 และสูงสุดเท่ากับ 100 ในการออกแบบเรามักใช้ค่าแบบอย่างคือประมาณ 50 แต่ทรานซิสเตอร์ที่นำมาใช้ในวงจรอาจมี $h_{FE} = 20$ หรือ 100 ก็ได้ ซึ่งจะทำให้จุดทำงานผิดแผกแตกต่างกันได้มาก

วิธีรักษาจุดทำงานให้มีเสถียรภาพดีมี 2 วิธีคือออกแบบให้วงจรมีการป้อนกลับแบบลบทางกระแสตรงมาก ๆ หรือใส่องค์ประกอบที่มีความไวต่ออุณหภูมิ เช่น เทอร์มิสเตอร์ หรือไดโอด ไว้ในวงจรไบแอสเพื่อชดเชยการเปลี่ยนแปลงทางอุณหภูมิ (มงคล เชนครินทร์ มปป : 196)

4.5 ออปแอมป์

โอเพอเรชันแนลแอมพลิฟายเออร์ (operational amplifier) หรือที่นิยมเรียกกันสั้น ๆ ว่า ออปแอมป์ (op-amp) นั้นแต่เดิมเป็นชื่อเรียกวงจรขยายที่ทำหน้าที่คำนวณภายในเครื่องอะนาลอกคอมพิวเตอร์ (analog computer) วงจรนี้มีอัตราขยายสูงมากและอาศัยการป้อนกลับแบบลบผ่านองค์ประกอบพาสซีฟ (passive) ภายนอกในการควบคุมลักษณะการทำงานและกำหนดหน้าที่ของวงจรให้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่ใช้ป้อนกลับเป็นตัวกำหนดให้วงจรออปแอมป์ทำหน้าที่ต่าง ๆ กัน เช่น เป็นวงจรรวมสัญญาณ อินทิเกรเตอร์ ดิฟเฟอเรนเชียลแอมพลิฟายเออร์ เป็นต้น เราพบว่าเราต้องการออปแอมป์ที่มีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1. อัตราขยายสูงมาก (กว่าหมื่นเท่า)
2. วงจรขยายภาคต่าง ๆ ต่อกันโดยตรง (direct coupled) นั่นคือวงจรนี้จะขยายได้ทั้ง สัญญาณกระแสตรงและสัญญาณกระแสสลับ
3. สามารถป้อนกลับแบบลบได้ โดยการต่อความต้านทานเพียงตัวเดียวจากขั้วสัญญาณออกมายังขั้วสัญญาณเข้า

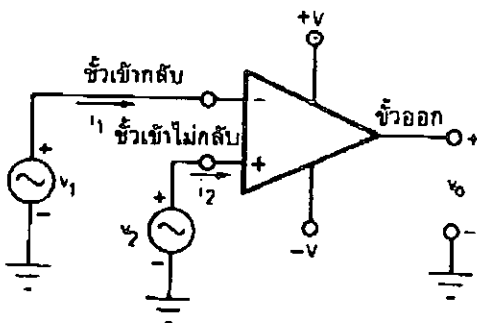
ออปแอมป์รุ่นแรกนั้นใช้หลอดสุญญากาศ เนื่องจากราคาแพงมาก จึงมีที่ใช้จำกัดเฉพาะในเครื่องอะนาลอกคอมพิวเตอร์เท่านั้น ต่อมาราวปี พ.ศ. 2505 ได้มีการผลิตออปแอมป์ออกจำหน่ายเป็นหน่วยโดยการบรรจุวงจรทรานซิสเตอร์ลงในกล่องเดียวกัน หรือโดยการนำรีซินผลึก (chip) ต่าง ๆ ที่มีทรานซิสเตอร์ไดโอด ตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุที่ยังไม่ได้บรรจุกล่องมาต่อเป็นวงจรออปแอมป์ก่อนที่จะบรรจุลงในกล่องเดียวกัน วิธีหลังนี้เรียกว่า วิธีผสม (hybrid) การบรรจุวงจรออปแอมป์ลงในกล่องแล้วจำหน่ายเป็นหน่วยทำให้การใช้สะดวกขึ้นมาก และทำ

ทำให้เล็กเห็นคุณค่าของออปแอมป์ชัดเจนขึ้น หลังจากนั้นก็มีการผลิตออปแอมป์ แบบโมโนลิทิก (monolithic) บรรจุองค์ประกอบต่าง ๆ ของวงจรออปแอมป์ลงบนชิ้นผลึกเดียวกัน การผลิตออปแอมป์แบบโมโนลิทิกนั้น สามารถลดต้นทุนการผลิตได้มากเพราะสามารถผลิตขึ้นมาเป็นจำนวนมาก เนื่องจากราคาได้ลดไปมาก การใช้ ออปแอมป์จึงได้เพิ่มขึ้นรวดเร็ว ออปแอมป์ได้เปลี่ยนฐานะจากหน่วยย่อยของอะนาล็อกคอมพิวเตอร์มาเป็นองค์ ประกอบอะนาล็อกที่ใช้ทั่วไปทุกหนทุกแห่ง เหตุที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าวงจรที่ประกอบสำเร็จนั้น มีขนาดเล็ก มีความเชื่อถือได้สูง ราคาถูก สามารถใช้งานได้ทั่วไป เป็นตัวให้อัตราขยาย เช่นเดียวกับทรานซิสเตอร์ตัวหนึ่ง ซ้ำยังใช้งานง่ายกว่าวงจรทรานซิสเตอร์เป็นอันมาก ภายในออปแอมป์นั้นประกอบด้วยทรานซิสเตอร์เป็นสิบ ๆ ตัวที่มีการไบแอสและกำหนดจุดทำงานไว้เรียบร้อยแล้ว ไม่ต้องมากออกแบบวงจรไบแอสและกำหนดจุดทำงานให้กับ ทรานซิสเตอร์แต่ละตัวอีก ลักษณะการทำงานของวงจรก็กำหนดโดยองค์ประกอบพาสซีฟที่ต่อระหว่างชั้นเข้า และชั้นออกเท่านั้น ดังนั้นผู้ออกแบบจะสามารถพัฒนางจรที่เที่ยงตรงได้ในเวลาอันสั้น (มงคล เดชนครินทร์ มปป : 270)

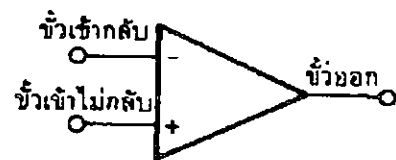
4.5.1 สัญลักษณ์ของออปแอมป์

ออปแอมป์ที่ผลิตออกจำหน่ายในรูปวงจรรวม (integrated circuit) ทั่ว ๆ ไป จะมีขาสำหรับ สัญญาณเข้า 2 ขั้ว สำหรับสัญญาณออก 1 ขั้ว และสำหรับต่อกับแหล่งจ่ายกระแสตรงด้านบวก 1 ขั้ว กับด้านลบอีก 1 ขั้ว ดังแสดงด้วยสัญลักษณ์ในภาพประกอบ 100

ขั้วสำหรับสัญญาณเข้าที่มีเครื่องหมายลบกำกับ เรียกว่า ขั้วเข้ากลับ (inverting input) สัญญาณที่เข้าทางขั้วนี้จะทำให้เกิดสัญญาณออกที่มีมุมวิกฤต (phase angle) ต่างจากสัญญาณเข้า 180 องศา นั่นคือ หากสัญญาณเข้าที่ขั้วนี้เป็นบวกหรือเพิ่มขึ้น จะได้สัญญาณออกเป็นลบหรือลดลง ส่วนขั้วสัญญาณเข้าอีก ขั้วหนึ่งที่มีเครื่องหมายบวกกำกับนั้น เรียกว่า ขั้วเข้าไม่กลับ (non-inverting input)



ภาพประกอบ 100 สัญลักษณ์ของออปแอมป์



ภาพประกอบ 101 สัญลักษณ์อย่างง่ายของออปแอมป์

สัญญาณที่เข้าทางขั้วนี้จะทำให้เกิดสัญญาณออกที่มีมุมวิกฤตตรงกัน ในการใช้สัญลักษณ์โดยทั่วไปนั้นเรามักจะละเลยขั้วที่ต่อแรงดันบวกและลบเข้าตัวออปแอมป์ในฐานที่เข้าใจว่าจะต้องมีอยู่เสมอทำให้สัญลักษณ์ง่ายขึ้นดังภาพประกอบ 101

4.5.2 ลักษณะอุดมคติของออปแอมป์

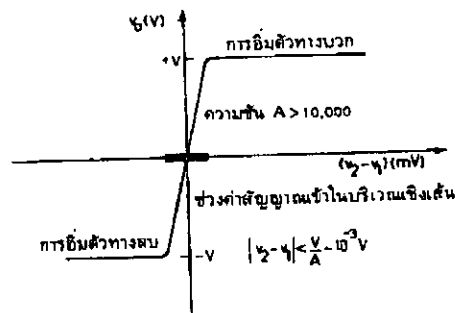
ในหัวข้อนี้จะพิจารณาการทำงานของออปแอมป์อุดมคติในวงจรต่าง ๆ เพื่อที่จะได้คุ้นเคยกับหลักการทำงานของออปแอมป์ได้เร็วขึ้น ในหัวข้อต่อไปเราจะพิจารณาถึงความไม่เป็นอุดมคติของออปแอมป์จริง ๆ อันจะเป็นข้อจำกัดในการใช้ออกแบบวงจร

ในที่นี้เราจะสมมติว่า ออปแอมป์อุดมคตินั้นมีความต้านทานทางด้านเข้าเป็นอนันต์ ($= \infty$) ความต้านทานเท่ากับศูนย์ ($= 0$) และมีลักษณะถ่ายโอนดังแสดงในภาพประกอบ 102

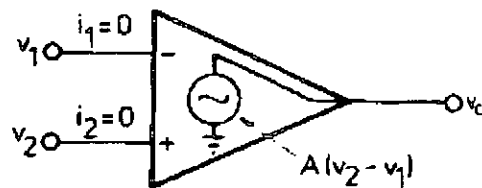
การมีความต้านทานทางด้านเข้าเป็นอนันต์นั้น หมายความว่ากระแสขาเข้า i_1 และ i_2 เท่ากับศูนย์ทั้งคู่ การมีความต้านทานทางด้านออกเท่ากับศูนย์หมายความว่าลักษณะถ่ายโอนของออปแอมป์สามารถแทนด้วยแหล่งกำเนิดแรงดันพึ่งพิง (dependent voltage source) (ดูภาพประกอบ 103) ลักษณะถ่ายโอนของภาพประกอบ 104 แสดงช่วงการทำงาน 3 ช่วงของออปแอมป์คือ ช่วงเชิงเส้น 1 เขต และช่วงอิ่มตัว 2 เขต

ในช่วงเชิงเส้นนั้นแรงดันออก V_o จะอยู่ระหว่างแรงดันของแหล่งจ่ายทั้งสอง ($+V$ และ $-V$) ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันออก V_o และความแตกต่างระหว่างแรงดันเข้า ($V_2 - V_1$) นั้น เป็นเชิงเส้นตามสมการ

$$V_o = A(V_2 - V_1)$$



ภาพประกอบ 102 ลักษณะถ่ายโอน ของออปแอมป์



ภาพประกอบ 103 วงจรสมมูล ของออปแอมป์อุดมคติ

โดยที่ A คือ อัตราขยายแรงดันซึ่งมักจะมีค่าเกิน 10,000 เนื่องจากอัตราขยายมีขนาดใหญ่มาก และช่วงของสัญญาณออกก็มีจำกัด $V_o < V$ ดังนั้นช่วงของสัญญาณเข้าในเขตเชิงเส้นจึงมีขนาดเล็กมาก

$$|v_2 - v_1| < \left| \frac{V}{A} \right|$$

ในออปแอมป์ทั่ว ๆ ไป อัตราขยายวงรอบเปิด (คือ A นั้นเอง) มักจะมีค่าระหว่าง 10,000 ถึงหลายล้าน ดังนั้นสำหรับแหล่งจ่ายกระแสตรงขนาด 10 ถึง 15 โวลต์ ความกว้างของเขตเชิงเส้นสำหรับสัญญาณเข้า จะมีประมาณ 1 mV หรือน้อยกว่านั้น นิยามของการทำงานในเขตเชิงเส้นก็คือ

1. กระแสเข้าเป็นศูนย์
2. แรงดันเข้า V_1 และ V_2 ต่างกันไม่เกิน 1 mV หรือน้อยกว่านั้น

ในเขตอิมิตัว ความแตกต่างระหว่างแรงดันเข้าทั้งสอง มีมากกว่าในเขตเชิงเส้น นั่นคือ $|v_2 - v_1| > \left| \frac{V}{A} \right|$ หรือเราอาจกล่าวได้ว่า ถ้า $|v_2 - v_1| > 1 \text{ mV}$ ออปแอมป์จะอยู่ในสภาพอิมิตัวโปรดสังเกตว่า ถ้า $V_2 > V_1$ ออปแอมป์จะอิมิตัวทางบวก และถ้า $V_1 > V_2$ ออปแอมป์จะอิมิตัวทางลบ

4.5.3 วงจรเชิงเส้นพื้นฐาน

4.5.3.1 วงจรขยายกลับขั้ว ภาพประกอบ 104(1) แสดงวงจรขยายกลับขั้วซึ่งมีตัวต้านทาน R_F ต่อแรงดันออก V_O ป้อนกลับมายังขั้วเข้ากลับ เป็นการป้อนกลับแบบลบ เนื่องจากกว่ากระแสขาเข้า $i_1 = 0$ ดังนั้น

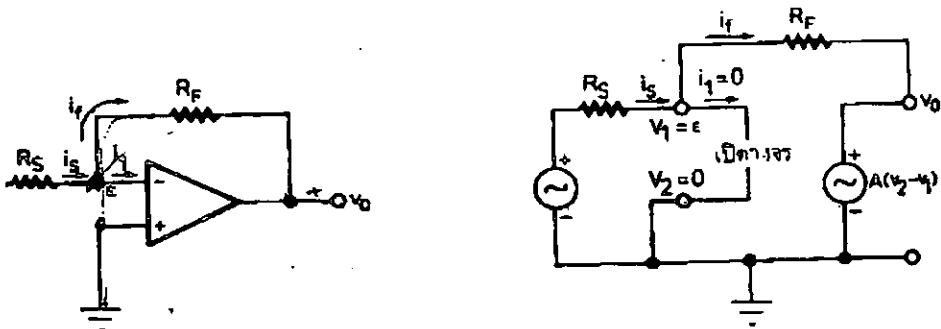
$$i_s = i_f$$

แทนค่า i_s และ i_f ด้วยแรงดันหารด้วยตัวต้านทาน จะได้

$$\frac{V_S - \epsilon}{R_S} = \frac{\epsilon - V_O}{R_F}$$

เนื่องจากอัตราขยายคือ A ดังนั้น $\epsilon = -V_O/A$ และสมการข้างต้น อาจเขียนได้

$$\frac{V_S}{R_S} + \frac{V_O}{AR_S} = -\frac{V_O}{AR_F} - \frac{V_O}{R_F}$$



ภาพประกอบ 104 (1) วงจรขยายกลับขั้ว (2) วงจรสมมูลของวงจรขยายกลับขั้วแก่สมการ ข้างต้น ได้

$$\frac{V_O}{V_S} = - \frac{(R_F/R_S)}{1 + (1/A)(1+R_F/R_S)}$$

เนื่องจาก A มีค่าใหญ่มาก ($= 10^5$) ดังนั้นเราจะได้ $A \gg (1+R_F/R_S)$ และจะสามารถเขียนสมการข้างต้น ให้ง่ายขึ้นโดยมีการผิดพลาดเพียงเล็กน้อยเท่านั้น ผลก็คือ

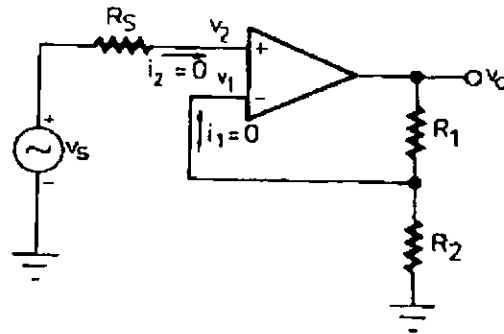
$$\frac{V_O}{V_S} = - \frac{R_F}{R_S}$$

นั่นคือ อัตราขยายวงรอบปิด $= -\frac{R_F}{R_S}$ คือ อัตราส่วนของความต้านทานที่ใช้ป้อนกลับ
หารด้วยความต้านทานด้านเข้า ความหมายของเครื่องหมายลบก็คือว่า สัญญาณออกจะต่างวัฏภาคกับสัญญาณ
เข้า 180 องศา สมการ (10.7) เป็นจริง ตราบเท่าที่ $A \gg \frac{R_F}{R_S}$ จากการวิเคราะห์นี้ เราสามารถสรุปได้ว่า

1. เมื่อ $E = -V_O/A$ มีขนาดเล็กเมื่อเทียบกับ V_O และ V_S กระแสเข้า $i_S = V_S/R_S$
และไม่ขึ้นกับ R_F นั่นคือ ขั้วสัญญาณเข้านั้นแยกเป็นอิสระจากขั้วสัญญาณออก

2. อัตราขยายของวงจร $(=R_F/R_S)$ ไม่ขึ้นอยู่กับอัตราขยายแรงดันของออปแอมป์ ดังนั้น
อัตราขยายจะไม่ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ พารามิเตอร์ของออปแอมป์ หรือความถี่

4.5.3.2 วงจรขยายไม่กลับขั้วและวงจรตามแรงดัน ภาพประกอบ 105 แสดงวงจรขยาย
ที่มีสัญญาณเข้าทางขั้วบวกหรือขั้วเข้าไม่กลับ แต่การป้อนกลับนั้นเป็นการป้อนกลับทางขั้วลบ หรือขั้วเข้ากลับ



ภาพประกอบ 105 วงจรขยายไม่กลับขั้ว

เนื่องจาก $i_2 = 0$ เราได้ว่า $v_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} v_O$
และเนื่องจาก $i_1 = 0$

โดยที่ A มีค่าใหญ่มาก ทำให้ $V_1 = V_2 = V_S$ สมการ ข้างต้น กลายเป็น

$$\frac{V_O}{V_S} = \frac{R_1 + R_2}{R_2}$$

จะเห็นได้ว่าวงจรขยายนี้ไม่กลับขั้วสัญญาณออกและมีอัตราขยายสูงกว่า 1 เสมอ ถ้าเราให้ R_2
มีค่าสูงขึ้นเรื่อย ๆ อัตราขยายจะเข้าหา 1 ถ้าเรา $R_2 = \infty$ และ $R_1 = 0$ ก็จะได้วงจรดังภาพประกอบ 106
ซึ่งจะให้ $V_O = V_S$ ดังนั้นจึงเรียกววงจรนี้ว่า วงจรตามแรงดัน (voltage follower) เพราะได้แรงดันออกซึ่งตาม
แรงดันเข้าอยู่ตลอดเวลา ถึงแม้ว่าขั้วเข้าไม่กลับจะไม่มีการแสไหลเข้าก็ตาม ขั้วออก V_O สามารถจ่ายกระแสให้
กับโหลดภายนอกได้

4.5.3.3 วงจรบวก ภาพประกอบ 106 แสดงวงจรอินเวอร์ตที่ใช้ในการบวกรูปคลื่นอะนาล็อกโดยที่ $V_2 = 0$ และวงจรทำงานในช่วงเชิงเส้น $V_1 = V_2 = 0$ และโดยที่ $i_1 = 0$ เราสามารถเขียนว่า

หรือ

$$\frac{v_{s1}}{R_1} + \frac{v_{s2}}{R_2} = -\frac{v_o}{R_3}$$

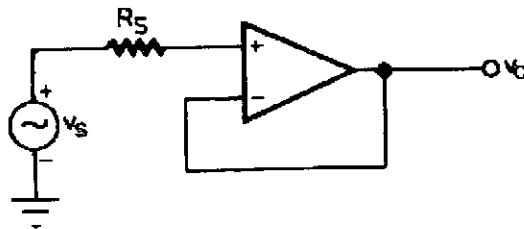
ถ้า

$$v_o = -\frac{R_3}{R_1} v_{s1} + \frac{R_3}{R_2} v_{s2}$$

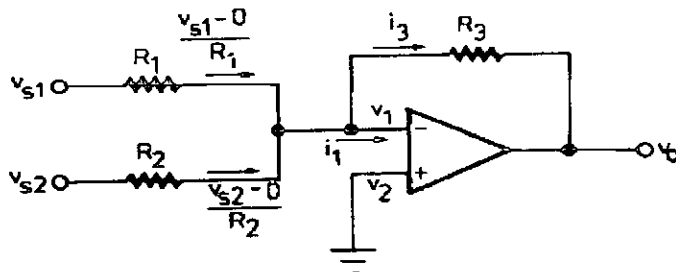
$$R_1 = R_2 = R$$

$$v_o = -\frac{R_3}{R} (v_{s1} + v_{s2})$$

ดังนั้นแรงดันออก V_o จะเท่ากับค่าคงตัว คูณกับผลบวกของแรงดันเข้าทั้งสอง ถ้า $R_1 = R_2 = R_3$ และ $V_o = -(V_{s1} + V_{s2})$



ภาพประกอบ 106 วงจรตามแรงดัน



ภาพประกอบ 107 วงจรบวก

4.5.3.4 วงจรลบ ในวงจรลบนี้เรากำหนดให้ $R_3 = R_1$ และ $R_4 = R_2$ เพื่อความง่าย ในกรณีนี้แรงดันที่ขั้วเข้าทั้งสอง $V_1 = V_2 \neq 0$ ดังนั้นสมการของกระแสใน R_1 และ R_2 คือ

$$\frac{v_s - v_1}{R_1} = \frac{v_1 - v_o}{R_2}$$

และสมการของกระแสใน R_3 และ R_4 คือ

$$\frac{v_{s2} - v_1}{R_3} = \frac{v_1}{R_4}$$

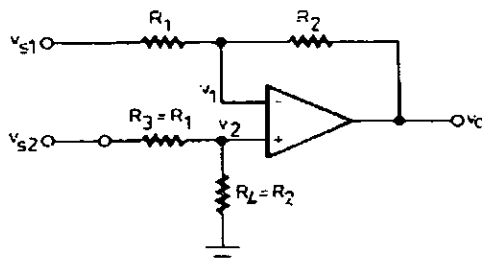
แต่ $R_3 = R_1$, $R_4 = R_2$ จากสมการ ข้างต้น เราได้

$$v_o = \frac{R_2}{R_1} (v_{s2} - v_{s1})$$

ถ้า $R_1 = R_2 = R$ จะได้

$$V_o = V_{s2} - V_{s1}$$

4.5.3.5 วงจรอินทิเกรเตอร์ วงจรอินทิเกรเตอร์ใช้ตัวเก็บประจุป้อนสัญญาณออกมายังขั้วเข้ากลับ วงจรนี้ จะสามารถอินทิเกรตแรงดันที่แปรค่าตามเวลาได้ สมการที่รู้จักกันดีของตัวเก็บประจุ คือ



ภาพประกอบ 108 วงจรลบ

$$v = \frac{Q}{C} = \frac{1}{C} \int i dt$$

เมื่อดิฟเฟอเรนเชียลทั้งสองข้างจะได้กระแสที่ได้ผ่าน C คือ

$$i = C \frac{dv}{dt}$$

ดังนั้นสมการของกระแสของวงจร คือ

$$\frac{v_s}{R} = -C \frac{dv_o}{dt}$$

เมื่อ $v_1 = 0$, $i_1 = 0$

เมื่ออินทิเกรตทั้งสองข้างแล้วค่าของ v_o จะได้

$$v_o = -\frac{1}{RC} \int v_s dt$$

นั่นคือ แรงดันออกเท่ากับค่าคงตัว $-1/RC$ คูณอินทิกรัลของแรงดันขาเข้าเทียบกับเวลา

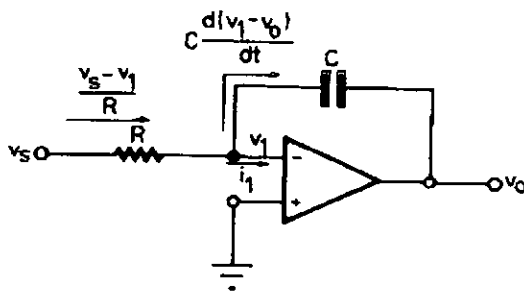
4.5.3.6 วงจรดิฟเฟอเรนเชียลอินทิเกรเตอร์ วงจรนี้ได้มาจากการสลับตัวเก็บประจุกับตัวต้านทานในวงจรอินทิเกรเตอร์ และจะทำหน้าที่ดิฟเฟอเรนเชียลแรงดันเข้ากับเวลา จากสมการข้างต้น เราสามารถเขียนสมการของกระแสของวงจรภาพประกอบ 108 ได้

$$C \frac{dv_s}{dt} = -\frac{v_o}{R}$$

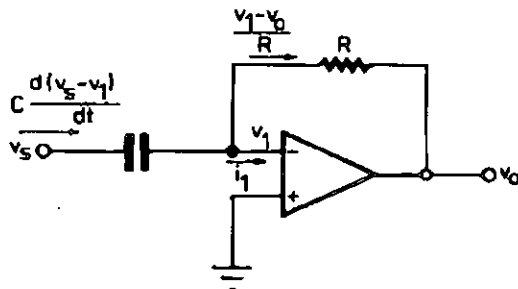
ในเมื่อ $v_1 = 0, i_1 = 0$

แก้สมการ (10.23) สำหรับ v_o จะได้ $v_o = -CR \frac{dv_s}{dt}$

นั่นคือ แรงดันออกเท่ากับ $-CR$ คูณกับดิฟเฟอเรนเชียลของแรงดันเข้าเทียบกับเวลา



ภาพประกอบ 109 วงจรอินทิเกรเตอร์



ภาพประกอบ 110 วงจรดิฟเฟอเรนเชียลอินทิเกรเตอร์

4.6 วงจรขยายกำลัง

ที่วงจรขยายกำลังให้สัญญาณออกขนาดใหญ่ที่มีกำลังสูงแก่โหลด การที่มีสัญญาณออกขนาดใหญ่ทำให้เราไม่สามารถใช้แบบจำลองเชิงเส้น ของทรานซิสเตอร์ที่พัฒนาสำหรับสัญญาณขนาดเล็กได้ เพราะพารามิเตอร์ของทรานซิสเตอร์ไม่สามารถมีค่าคงตัวขณะที่จุดทำงานของทรานซิสเตอร์บนลักษณะด้านออกถูกสัญญาณเข้าขับให้แปรจากจุดที่เก็บบีมตัว จนถึงจุดเก็บบัดตอฟ อีกประการหนึ่งความต้องการสัญญาณออกกำลังสูงทำให้มีจุดเน้นอยู่ที่ประสิทธิภาพของการแปลงกำลังงานกระแสตรงจากแหล่งจ่ายมาเป็นกำลังงานกระแสลับของสัญญาณ โดยมีความเพี้ยน (distortion) ในขอบเขตที่ยอมรับได้ วงจรขยายกำลังมักจะเป็นตัวขับตัวแปลงผันพลังงาน (transducer) เพื่อแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานรูปอื่น เช่น วงจรขยายเสียงจะขับลำโพงเพื่อแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานเสียง วงจรเครื่องส่งวิทยุจะขับสายอากาศเพื่อแปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานแม่เหล็กไฟฟ้า เป็นต้น

วงจรขยายกำลังมักจะแบ่งแยกเป็นคลาสต่าง ๆ ตามจุดไบแอสที่ทรานซิสเตอร์ทำงานอยู่ดังนี้

1. คลาสเอ (class A) คือ วงจรขยายที่มีกระแสไหลในทรานซิสเตอร์ตลอดคาบ (period) ของสัญญาณเข้า
2. คลาสเอบี (Class AB) คือ วงจรขยายที่มีกระแสไหลในทรานซิสเตอร์มากกว่าครึ่งคาบแต่น้อยกว่าเต็มคาบของสัญญาณเข้า
3. คลาสบี (Class B) คือ วงจรขยายที่มีกระแสไหลในทรานซิสเตอร์ครึ่งคาบ
4. คลาสซี (Class C) คือ วงจรขยายที่มีกระแสไหลในทรานซิสเตอร์น้อยกว่าครึ่งคาบ

ในบทนี้เราจะพิจารณาวงจรขยายกำลังความถี่ต่ำ ที่สามารถให้สัญญาณออกเป็นคลื่นรูปไซน์ได้ วงจรขยายประเภทนี้ได้แก่ วงจรในคลาสเอที่ใช้ทรานซิสเตอร์เดี่ยว และคลาสเอบีกับคลาสบีที่ใช้ทรานซิสเตอร์สองตัว ในวงจรหลักถึงเท่านั้น ในการพิจารณาวงจรขยายเราจะเน้นวงจรด้านออกเป็นหลักและจะใช้ทรานซิสเตอร์อุดมคติในการคำนวณหา กำลังออกสูงสุดและประสิทธิภาพของวงจร

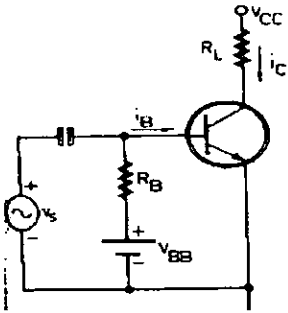
4.6.1 วงจรขยายคลาสเอ

4.6.1.1 ชนิดที่ใช้ตัวต้านทานเป็นโหลด วงจรขยายอย่างง่ายที่มีตัวต้านทานเป็นโหลดดังภาพประกอบ 111 เมื่อไม่มีสัญญาณเข้าทรานซิสเตอร์จะมีจุดทำงานอยู่ที่ Q (ภาพประกอบ 112) ซึ่งมีกระแส I_C แรงดัน V_C และกระแสเบส I_{B2} เมื่อได้รับสัญญาณเข้า V_s แรงดันนี้จะเพิ่มและลดกระแสเป็น I_{B1} และ I_{B3} ทำให้แรงดันที่คอลเลกเตอร์เปลี่ยนเป็น V_{min} และ V_{max} ตามลำดับ กำลังออกกระแสลับที่วงจรขยายจ่ายให้กับโหลด R_L คือ $P = V_C I_C$ โดยที่ V_C และ I_C เป็นค่าอาร์เอ็มเอส (rms) ของแรงดันออก V_C และกระแส i_C ตามลำดับ

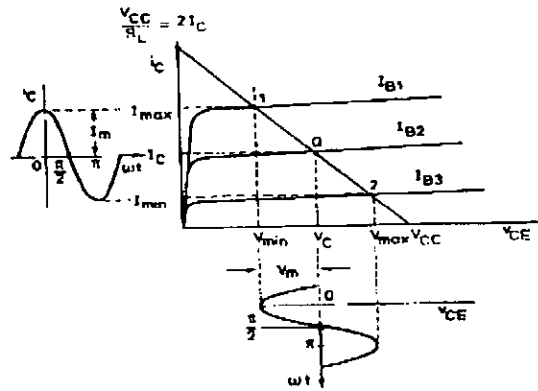
$$I_C = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{I_{max} - I_{min}}{2\sqrt{2}}$$

และ

$$V_C = \frac{V_m}{\sqrt{2}} = \frac{V_{max} - V_{min}}{2\sqrt{2}}$$



ภาพประกอบ 111 วงจรขยายอย่างง่าย

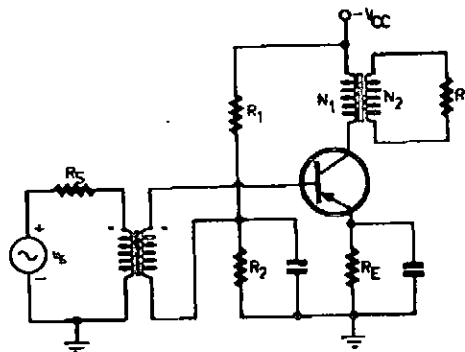


ภาพประกอบ 112 ลักษณะทางด้านออกแสดงรูปคลื่นของกระแสและแรงดันที่คอลเล็กเตอร์

$$\begin{aligned} \text{ดังนั้นกำลังก็คือ } P &= \frac{(V_{\max} - V_{\min})(I_{\max} - I_{\min})}{8} \\ &= \frac{(V_{\max} - V_{\min})^2}{8R_L} \end{aligned}$$

$$\text{โดยที่ } V_m = I_m R_L \text{ กำลังสูงสุดคือ } \frac{V_{CC}^2}{8R_L} = \frac{1}{4} V_{CC} I_C$$

4.6.1.2 ชนิดที่ใช้หม้อแปลง



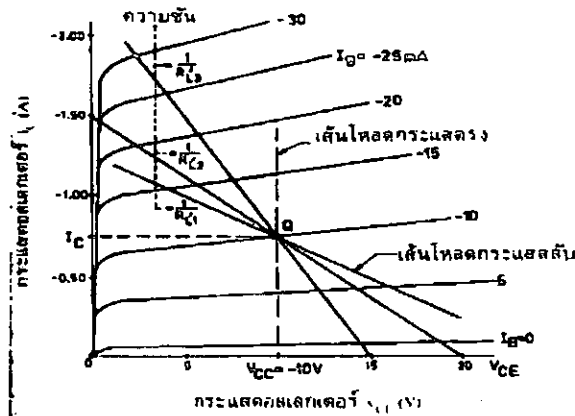
ภาพประกอบ 113 วงจรขยายคลาสเอชนิดที่ใช้หม้อแปลงส่งกำลังออก

วงจรในภาพประกอบ 113 มีโหลดทางคอลเล็กเตอร์ของทรานซิสเตอร์เป็นหม้อแปลง ซึ่งเราถือว่ามีความต้านทานกระแสตรงต่ำมาก ดังนั้นแรงดันกระแสตรงของคอลเล็กเตอร์คือ V_{CC} และเส้นโหลด กระแสตรงสำหรับหม้อแปลงอุดมคติจะเป็นเส้นตั้งฉากดังภาพประกอบ 115 จุดทำงาน Q ขึ้นอยู่กับกระแสเบสที่วงจรไบแอสจ่ายให้ เมื่อมีสัญญาณกระแสสลับมาขับที่เบส คอลเล็กเตอร์จะมองเห็นโหลด R_L ซึ่งถ่ายโอนอิมพีแดนซ์ที่ผ่านหม้อแปลงมาก หม้อแปลงมีจำนวนขดปฐมภูมิ N_1 รอบ และขดทุติยภูมิ N_2 รอบ ดังนั้นสำหรับหม้อแปลงอุดมคติ

$$\begin{aligned} v_1 &= \frac{N_1}{N_2} v_2, & i_1 &= \frac{N_2}{N_1} i_2 \\ \text{ให้} & & n &= \frac{N_2}{N_1}, & \frac{v_1}{i_1} &= \frac{1}{n^2} \cdot \frac{v_2}{i_2} \end{aligned}$$

ดังนั้นโหลดกระแสสลับของคอลเล็กเตอร์คือ

$$\frac{v_2}{i_2} = R_L' = \frac{1}{n^2} R_L$$



ภาพประกอบ 114 ลักษณะทางด้านออกแสดงเส้นโหลดกระแสตรงและเส้นโหลดกระแสสลับ

จะเห็นได้ว่าเนื่องจากโหลด R_L ที่คอลเล็กเตอร์มองเห็นนั้นขึ้นกับอัตราส่วน n และ R_L จึงสามารถปรับค่าของ R_L โดยการปรับ n หรือ R_L ก็ได้ ตารางที่ 18 เปรียบเทียบข้อดีและข้อเสียของวงจรแบบนี้

ตารางที่ 19 ข้อดีและข้อเสียของวงจรขยายที่ใช้หม้อแปลง

ข้อดี	ข้อเสีย
1. ไม่มีกระแสไหลผ่านโหลดเมื่อไม่มีสัญญาณ	1. หม้อแปลงแพง หนัก กินที่และมีประสิทธิภาพต่ำ
2. แยก (isolate) วงจรของโหลดออกจากวงจรทรานซิสเตอร์	2. หม้อแปลงเป็นตัวจำกัดและแถบความถี่และระดับกำลัง และทำให้เกิดความเพี้ยน
3. มีอัตราขยายกำลังสูง	
4. สามารถให้กำลังอย่างมีประสิทธิภาพแก่ - โหลดค่าต่ำ ๆ โดยอาศัยหม้อแปลงเป็นตัวแปลงอิมพีแดนซ์	
5. ประสิทธิภาพทางทฤษฎีได้ 50%	

ภาพประกอบ 114 แสดงเส้นโหลดกระแสสลับ 3 เส้น เส้นโหลดที่หนึ่งมีความชัน $-\frac{1}{R_{L1}}$ ตัดแกน V_{CE} ที่ -15 โวลต์ เมื่อรับสัญญาณกระแสสลับทางด้านเข้าแรงดันคอลลเลกเตอร์อาจสูงจนทรานซิสเตอร์เกือบอิ่มตัว ($\simeq OV$) โดยไม่มีความเพี้ยนแต่ไม่อาจมีค่าต่ำกว่า -15 โวลต์ได้เพราะจะถูกตัดออฟ $-\frac{1}{R_{L2}}$ เส้นโหลดที่สองมีความชัน ตัดแกน V_{CE} ที่ -20 โวลต์หรือเท่ากับสองเท่าของ V_{CC} ในกรณีนี้ช่วงแกว่งของแรงดันคอลลเลกเตอร์ ($V_{max} - V_{min}$) จะสามารถมีค่าเป็น $2V_{CC}$ ในกรณีทรานซิสเตอร์อุดมคติสำหรับเส้นโหลดที่ได้เพราะว่าช่วงที่แรงดันเพิ่มจะสามารถเพิ่มจาก -10 โวลต์ถึง 0 โวลต์หรือเท่ากับ V_{CC} เท่านั้น หากจะพิจารณาขนาดของโหลดกระแสสลับ R_L จะเห็นว่า R_{L1} , R_{L2} และ R_{L3} มีค่าอิมพีแดนซ์เพิ่มขึ้นตามลำดับกว่า R_{L2} กรณีที่หนึ่ง R_{L1} มีค่าต่ำกว่า R_{L2} แต่ขนาดของแรงดันด้านออกสูงสุดมีค่าต่ำกว่าทำให้มีกำลังออกต่ำกว่าเช่นเดิม ดังนั้นสำหรับ I_c ค่าหนึ่งเราจึงควรปรับค่าของ n และ R_L ให้ได้ค่าของ R_L ดังในกรณีที่สองซึ่งมีค่าเท่ากับ V_{CC}/I_c กำลังออกตามสมการ จะมีค่าสูงสุดคือ

$$P = \frac{(2V_{CC})^2}{8R_L} = \frac{V_{CC}^2}{2R_L} = \frac{1}{2} V_{CC}I_c$$

4.6.1.3 ประสิทธิภาพ

คำนิยามของประสิทธิภาพคือ $\eta \triangleq \frac{\text{กำลังของสัญญาณที่ส่งให้โหลด}}{\text{กำลังกระแสตรงจากแหล่งจ่าย}} \times 100\%$

วงจรขยายคลาสเอจะได้รับกำลังกระแสตรงจากแหล่งจ่ายเป็นค่าคงตัวเท่ากับ $V_{CC}I_c$ ขณะที่ไม่มีสัญญาณเข้ากำลังงานทั้งหมดนี้จะสูญเสียในตัวทรานซิสเตอร์ เมื่อมีสัญญาณเข้าทรานซิสเตอร์จะแปลงส่วนหนึ่งของกำลังงานนี้เป็นสัญญาณกระแสสลับจ่ายให้กับโหลด การสูญเสียในตัวทรานซิสเตอร์จะลดน้อยลง ดังนั้นสำหรับวงจรขยายคลาสเอประสิทธิภาพคือ

$$\eta = \frac{\frac{1}{2} V_m I_m}{V_{CC} I_C} \times 100\% = 50 \frac{I_m V_m}{V_{CC} I_C} \%$$

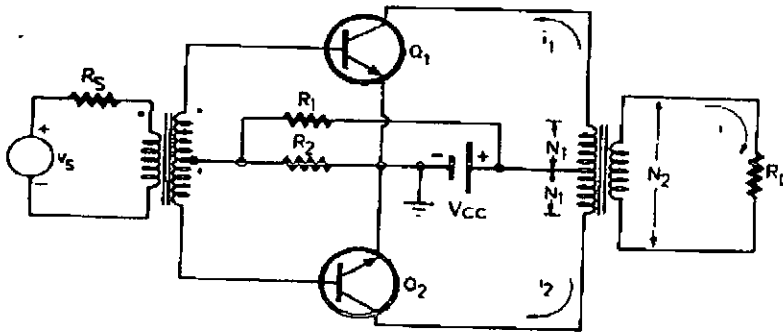
ในกรณีอุดมคติ $I_C = I_m$ และ $V_m = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{2}$

$$\eta = \frac{25(V_{\max} - V_{\min})}{V_{CC}} \%$$

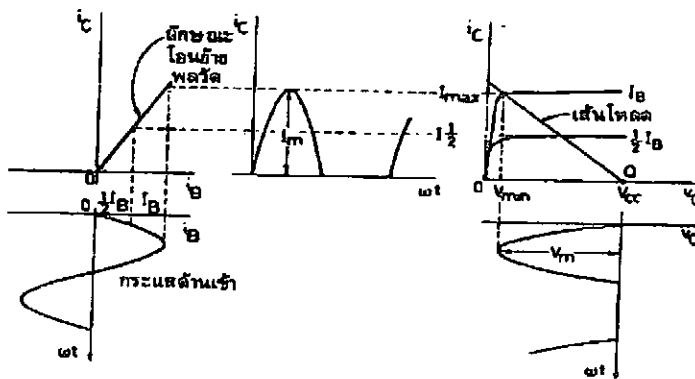
ดังนั้นจะเห็นได้ว่าวงจรขยายกำลังที่มีโหลดเป็นตัวต้านทานจะมีประสิทธิภาพสูงสุด 25% แต่ชนิดที่ใช้หม้อแปลงจะมีประสิทธิภาพสูงสุด 50%

4.6.1.4 วงจรขยายคลาสบี

ทรานซิสเตอร์ในวงจรขยายคลาสบีจะนำกระแสเพียงครึ่งคาบเท่านั้น ดังนั้นเพื่อให้สัญญาณออกไม่มีความเพี้ยน จึงจำเป็นต้องใช้ทรานซิสเตอร์ 2 ตัว ให้นำกระแสตัวละครึ่งคาบสลับกัน วงจรชนิดนี้เรียกว่า วงจรผลัดดึง (push – pull)



ภาพประกอบ 115 วงจรขยายแบบผลัดดึงที่ใช้ทรานซิสเตอร์ 2 ตัว และส่งกำลังออกทางหม้อแปลง



ภาพประกอบ 116 รูปคลื่นต่าง ๆ ของวงจรขยายคลาสบีที่มีทรานซิสเตอร์ตัวเดียว

วงจรขยายแบบผลัดดึงในภาพประกอบ 115 ใช้ทรานซิสเตอร์ชนิดเดียวกัน 2 ตัว แต่ละตัวจะส่งสัญญาณออกจากคอลเลกเตอร์ผ่านหม้อแปลงเข้าสู่โหลด หม้อแปลงทางด้านเข้าจะขับเคลื่อนทรานซิสเตอร์แต่ละตัวสลับกัน ทำให้ทรานซิสเตอร์ Q_1 และ Q_2 ผลัดกันนำกระแสตัวละ 180 องศาที่ไหลในโหลดซึ่งเป็นผลรวมของกระแสของทรานซิสเตอร์ทั้งสองจะไหลตลอดคาบได้

พิจารณาภาพประกอบ 116 จุดทำงานสงบของทรานซิสเตอร์คือที่ $V_{CE} = V_{CC}$ และ $I_C = 0$ เมื่อมีสัญญาณขาเข้าเป็นคลื่นรูปไซน์ จะมีกระแสคอลเลกเตอร์ไหลเพียงครึ่งคาบเท่านั้น จุดทำงานจะเคลื่อนไปบนเส้นโหลดกระแสสลับอันมีความชันเท่ากับ

$$\text{โดยที่ } R'_L = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 R_L \quad (\text{จากภาพประกอบ 115})$$

กำลังออกซึ่งเป็นผลรวมของกำลังจากทรานซิสเตอร์ทั้งสองคือ

$$P = \frac{I_m V_m}{2} = \frac{I_m}{2} (V_{CC} - V_{min})$$

ในเมื่อ $I_C = I_m$ ในกรณีครึ่งรูปคลื่น กำลังกระแสตรงทางดักเข้าสำหรับทรานซิสเตอร์

2 ตัวคือ

$$P_i = 2 \frac{I_m V_{CC}}{\pi}$$

$$\text{ดังนั้น } \eta = \frac{P}{P_i} \times 100\% = \frac{\pi}{4} \left(1 - \frac{V_{min}}{V_{CC}}\right) \times 100\%$$

เพราะฉะนั้นประสิทธิภาพสูงสุดคือ $25\pi = 78.5\%$ เมื่อ $V_{min} = 0$ ขณะที่สัญญาณออกมีขนาดเต็มที่ $V_m = V_{CC}$ นั่นเอง

การที่ประสิทธิภาพสูงเช่นนี้ก็เนื่องจากว่าไม่มีการสูญเสียกำลังเมื่อไม่มีสัญญาณเข้า ส่วนคลาสเอนั้น การสูญเสียในทรานซิสเตอร์จะมีมากที่สุดเมื่อไม่มีสัญญาณเข้า แต่กระแสตรงจากแหล่งจ่ายจะคงตัวตลอดเวลา เนื่องจากว่ากระแสตรงเพิ่มพร้อมกับสัญญาณในคลาสบี จึงจำเป็นต้องมีแหล่งจ่ายที่มีเรกูเลชัน (regulation) ดีกำลังที่สูญเสียในทรานซิสเตอร์ คือ

$$P_C = P_i - P = \frac{2}{\pi} \frac{V_{CC} V_m}{R'_L} - \frac{V_m^2}{2R'_L}$$

โดยที่ $I_m = V_m / R'_L$ จากสมการนี้จะเห็นได้ว่า $P_C = 0$ เมื่อ $V_m = 0$ และเพิ่มเมื่อ V_m เพิ่ม เราสามารถพิสูจน์จากสมการได้ว่า กำลังที่สูญเสียในทรานซิสเตอร์ จะมีค่าสูงสุดเมื่อ

$$P_{C(max)} = \frac{2V_{CC}^2}{\pi^2 R'_L} \quad \text{ได้} \quad V_m = \frac{2V_{CC}}{\pi}$$

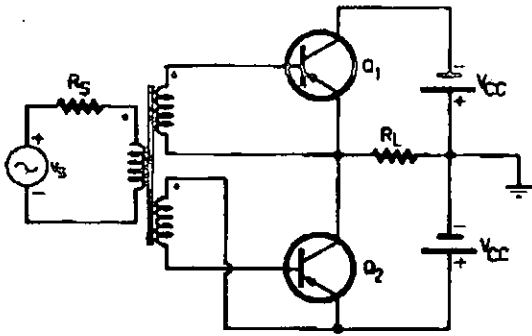
ส่วนกำลังออกนั้นมีค่าสูงสุดเมื่อ $V_{min} = 0$ หรือ $V_m = V_{CC}$ สามารถหาได้จากสมการ

$$P_{max} = \frac{V_{CC}^2}{2R'_L}$$

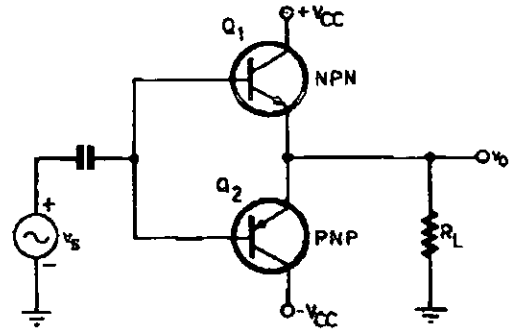
เมื่อเทียบอัตราส่วน จะได้

$$P_{C(max)} = \frac{4}{\pi^2} P_{max} \approx 0.4 P_{max}$$

ดังนั้นถ้าเราต้องการกำลังกระแสสลับ 10 W จากวงจรผลัดดึงคลาสบี ทรานซิสเตอร์จะเสียกำลัง $P_{C(max)} = 4 \text{ W}$ ซึ่งหมายความว่าเราใช้ทรานซิสเตอร์ 2 ตัว โดยที่แต่ละตัวสามารถรับกำลังได้ 2 W แต่ถ้าเราใช้ทรานซิสเตอร์ 2 ตัวต่อขนานกันทำงานในคลาสเอแล้ว จะให้ได้กำลังกระแสสลับทางต้านออก 10 W ทรานซิสเตอร์แต่ละตัวจะต้องเสียกำลังอย่างน้อย 10 W สมมติว่าประสิทธิภาพคือ 50%



(1) แบบสมมาตรเสมือนคู่ประกอบ
(quasi-complementary symmetry)



(2) แบบสมมาตรเชิงคู่ประกอบ (Complimentary symmetry)

ภาพประกอบ 117 ตัวอย่างวงจรรขยายคลาสบีแบบผลัดดึง

วงจรรขยายแบบผลัดดึงสามารถให้สัญญาณเป็นรูปคลื่นเต็มได้และมีหลายรูปแบบ ภาพประกอบ 117 แสดงตัวอย่างวงจรรขยายคลาสบีแบบผลัดดึงอีก 2 แบบ ที่ไม่ต้องใช้หม้อแปลง (output transformerless, OTL) แบบสมมาตรเสมือนคู่ประกอบ (quasi-complimentary symmetry) ในภาพประกอบ 117 (1) ใช้ทรานซิสเตอร์เหมือนกัน 2 ตัว แต่อาศัยหม้อแปลงด้านเข้าขับเคลื่อนทรานซิสเตอร์แต่ละตัวสลับกัน เมื่อแรงดันจากหม้อแปลงด้านเข้าทำให้ทรานซิสเตอร์ Q_1 นำกระแสและ Q_2 ไม่นำกระแส กระแสจะไหลจากแหล่งจ่ายกระแสตรงตัวบนผ่าน R_L เข้าอิมิตเตอร์ของ Q_1 ออกทางคอลเลกเตอร์เข้าสู่ขั้วลบของ V_{CC} ในช่วงเวลาต่อมาแรงดันจากหม้อแปลงด้านเข้าจะทำให้ Q_2 นำกระแสคอลเลกเตอร์เข้าสู่ R_L วงจรในภาพประกอบ 117 (2) ไม่ต้องใช้หม้อแปลงด้านเข้าแต่ใช้ทรานซิสเตอร์ตัวหนึ่งเป็นชนิดเอ็นพีเอ็นและอีกตัวหนึ่งเป็นชนิดพีเอ็นพีในช่วงเวลาที่ V_s เป็นบวก ทรานซิสเตอร์ Q_1 จะนำกระแสและ Q_2 จะไม่นำกระแส กระแสจะไหลจากคอลเลกเตอร์ของ Q_1 ออกทางอิมิตเตอร์เข้าสู่โหลด R_L ในช่วงเวลาที่ V_s เป็นลบ ทรานซิสเตอร์ Q_2 จะนำกระแสและ Q_1 จะไม่นำกระแส กระแสจะไหลจาก R_L เข้าอิมิตเตอร์ของ Q_2 ออกจากคอลเลกเตอร์สู่ $-V_{CC}$ เนื่องจากว่าวงจรทั้งสองใช้แหล่งจ่ายไฟตรง 2 ชุด สัญญาณออกสามารถมีค่าจากยอดถึงยอด (peak-to-peak) ได้เท่ากับ $2V_{CC}$ ซึ่งเท่ากับขนาดของสัญญาณออกทางด้านปฐมภูมิของวงจรรขยายภาพประกอบ 115 จึงสามารถใช้สมการ ดังกล่าว กับวงจรในภาพประกอบ 117 ได้ เพียงแต่ต้องเปลี่ยนค่า R_L เป็น R_L เท่านั้น อีกประการหนึ่งการมีแหล่งจ่ายกระแสตรง 2 ชุด ทำให้ขั้วออกมีระดับแรงดันที่ 0 โวลต์ จึงไม่ต้องใช้ตัวเก็บประจุในการนำสัญญาณสู่โหลด วงจรด้านออกจึงเป็นวงจรที่เรียกว่า output capacitorless (OCL) ด้วย

4.6.1.5 การจัดฮาร์มอนิกเลขคู่ของกระแสออก

วงจรรบายแบบผลัดจึงจะขับดันทรานซิสเตอร์ทั้งสองตัวกลับวัฏภาคกัน ทำให้ทรานซิสเตอร์ผลัดกันนำกระแสตัวละ 180 องศา เราจะพิสูจน์ว่าการใช้ทรานซิสเตอร์ในลักษณะเช่นนี้จะสามารถจัดฮาร์มอนิกเลขคู่ของกระแสออกได้

$$\text{ให้กระแสเบสของ } Q_1 \text{ เป็น } i_{b1} = I_{bm} \cos \omega t \quad \text{และ กระแสของ } Q_2 \text{ คือ } i_{b2} = -i_{b1} = I_{bm} \cos (\omega t + \pi)$$

ดังนั้นกระแสคอลเลกเตอร์ของ Q_1 จึงเป็น

$$i_1 = I_C + B_0 + B_1 \cos \omega t + B_2 \cos 2\omega t + B_3 \cos 3\omega t$$

โดยที่ B_0, B_1, B_2, B_3 คือ สัมประสิทธิ์ในอนุกรมฟูริเยร์ (Fourier Series) เมื่อเราคำนึงถึงความเพี้ยนอันเกิดจากลักษณะอันไม่เป็นอุดมคติของทรานซิสเตอร์ในกรณีที่สัญญาณขาเข้าเป็นคลื่นรูปไซน์

ส่วนกระแสคอลเลกเตอร์ของ Q_2 เป็น

$$i_2 = I_C + B_0 + B_1 \cos (\omega t + \pi) + B_2 \cos (2\omega t + \pi) + \dots$$

$$\text{ซึ่งเท่ากับ } i_2 = I_C + B_0 - B_1 \cos \omega t + B_2 \cos 2\omega t - B_3 \cos 3\omega t$$

กระแสออกนั้นเป็นสัดส่วนกับผลต่างของกระแสในคอลเลกเตอร์ของทรานซิสเตอร์ทั้งสอง นั่นคือ

$$i_o = k(i_1 - i_2) = 2k(B_1 \cos \omega t + B_3 \cos 3\omega t + \dots)$$

จะเห็นได้ว่าฮาร์มอนิกเลขคู่หายไปทำให้ความเพี้ยนน้อยลง แต่ทั้งนี้ทรานซิสเตอร์ทั้งสองตัวจะต้องมีลักษณะการทำงานที่เหมือนกันหรือสมมาตรกัน

นอกจากนี้ในภาพประกอบ 114 กระแสตรงใน Q_1 และ Q_2 ยังทำให้สนามแม่เหล็กในขดลวดปฐมภูมิของหม้อแปลงหักล้างกันทำให้สนามแม่เหล็กไม่อิ่มตัว และผลของแรงดันระลอกในแหล่งจ่ายก็ถูกหักล้างกันให้เทียบกับจุดทำงานจะเป็นอนุกรมกำลังดังนี้

4.6.1.6 การกำเนิดฮาร์มอนิกอันดับสูง

ลักษณะเชิงเส้นของทรานซิสเตอร์เป็นจริงเมื่อสัญญาณเข้ามีขนาดเล็กเท่านั้น แต่สำหรับวงจรขยายกำลังซึ่งมีสัญญาณเข้าขนาดใหญ่ ลักษณะถ่ายโอนพลวัต (dynamic transfer characteristic) เทียบกับจุดทำงานจะเป็นอนุกรมกำลังดังนี้

$$i_C = G_1 i_b + G_2 i_b^2 + G_3 i_b^3 + G_4 i_b^4 + \dots$$

ถ้าคลื่นทางด้านเข้าเป็นคลื่นรูปไซน์ กระแสออกจะเป็น

$$i_C = I_C + B_0 + B_1 \cos \omega t + B_2 \cos 2\omega t + B_3 \cos 3\omega t$$

ความเพี้ยนฮาร์มอนิกคือ

$$D_2 \equiv \frac{|B_2|}{|B_1|} , \quad D_3 \equiv \frac{|B_3|}{|B_1|} , \quad D_4 \equiv \frac{|B_4|}{|B_1|}$$

โดยที่ D_S ($S = 2, 3, 4, \dots$) คือความเพี้ยนฮาร์มอนิกอันดับ S กำลังออก

ถ้าความเพี้ยนนั้นละเอียดไม่ได้ เราต้องคิดกำลังผลรวมจากกำลังของความถี่พื้นฐานและกำลังของฮาร์มอนิกทั้งหมด กำลังของความถี่พื้นฐานก็คือ

$$P_1 = \frac{B_1^2 R_L}{2}$$

ดังนั้นกำลังออกทั้งหมดคือ

$$P = (B_1^2 + B_2^2 + B_3^2 + \dots) \frac{R_L}{2} = (1 + D_2^2 + D_3^2 + \dots) P_1$$

$$P = (1 + D^2) P_1$$

หรือโดยที่ความเพี้ยนฮาร์มอนิกทั้งหมด (THD) หรือตัวประกอบความเพี้ยนคือ

$$D = \sqrt{D_2^2 + D_3^2 + \dots}$$

ถ้าความเพี้ยนทั้งหมดเป็น 10% ของความถี่พื้นฐาน

$$P = (1 + 0.1^2) P_1 = 1.01 P_1$$

จะเห็นว่ากำลังผิดไปเพียง 1% ดังนั้นโดยทั่วไปจึงสามารถใช้กำลังของความถี่พื้นฐานแทนกำลังทั้งหมดได้ (มงคล เดชนครินทร์ . มปป : 308)

4.7 การกำเนิดรูปคลื่น

ในวงจรอิเล็กทรอนิกส์เรายังมีความจำเป็นที่จะกำเนิดรูปคลื่นต่าง ๆ อยู่เสมอ เช่น กำเนิดสัญญาณไซน์ในเครื่องรับวิทยุแบบซูเปอร์เฮเทอโรไดน์ หรือกำเนิดสัญญาณไซน์กำลังสูงในเครื่องส่งเพื่อใช้เป็นคลื่นพาหะ กำเนิดพัลส์เป็นสัญญาณนาฬิกาของวงจรเชิงเลข กำเนิดรูปคลื่นสี่เหลี่ยมเป็นสัญญาณไฟกะพริบ กำเนิดสัญญาณฟองเลื้อยเป็นฐานเวลาของออสซิลโลสโคป กำเนิดสัญญาณขั้นบันไดในการแสดงตัวอักษรบนจอโทรทัศน์ ฯลฯ นอกจากนี้เรายังต้องสร้างเครื่องมืออิเล็กทรอนิกส์ เพื่อใช้ในห้องปฏิบัติการซึ่งจะทำหน้าที่กำเนิดสัญญาณรูปต่าง ๆ เพื่อใช้ในการทดสอบการทำงานของวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วย

เราจะพิจารณาในทางตรงกันข้ามคือจะออกแบบวงจรเชิงเส้นให้สามารถแกว่งและกำเนิดสัญญาณรูปไซน์ วงจรเช่นนี้มักจะใช้องค์ประกอบไม่เชิงเส้นเพื่อการควบคุมช่วงสูงของสัญญาณที่กำหนดขึ้น จึงกล่าวได้ว่าวงจรกำเนิดสัญญาณรูปไซน์เป็นวงจรเชิงเส้นที่มีลักษณะไม่เชิงเส้นรวมอยู่บ้าง แต่ถ้าเราต้องการกำเนิดสัญญาณสามเหลี่ยม สี่เหลี่ยม หรือพัลส์ วงจรจะทำงานในสองสถานะโดยการเปลี่ยนสถานะเป็นไปได้โดยฉับพลัน ตัวอย่างของวงจรเช่นนี้คือ วงจรออสซิลเลเตอร์ซึ่งการทำงานจะเป็นแบบไม่เชิงเส้นโดยแท้ ในข้อนี้เรายังจะกล่าวถึงวงจรที่กำเนิดรูปคลื่น รูปฟันเลื่อย และขั้นบันไดไว้ด้วย (ยิน ภูววรรณ. 2532: 81)

4.7.1 วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์

วงจรกำเนิดสัญญาณไซน์มีแผนภาพบล็อกเหมือนวงจรขยายที่มีป้อนกลับ ซึ่งอาจเป็นชนิดสุ่มแรงดัน ผสมแรงดัน (ภาพประกอบ 119) หรือส่งกระแสผสมกระแส (ภาพประกอบ 120) หรือชนิดอื่นก็ได้ เรามักจะแทรกวงจรขั้วหรือวงจรจำกัดช่วงสูงของแรงดันหรือกระแสไว้ในวงจร ทั้งนี้เพื่อจะได้ช่วงสูงของการแกว่งที่มีเสถียรภาพ จากทฤษฎีของการป้อนกลับเรารู้ว่า เงื่อนไขของการแกว่งก็คืออัตราขยายวงรอบมีค่าเท่ากับ 1

$$-AB = 1$$

โดยทั่วไป A เป็นฟังก์ชันเชิงซ้อนของความถี่ เงื่อนไขสมการ ข้างต้น หมายความว่ามีความถี่ ω_0 ความถี่หนึ่งที่ทำให้ส่วนจินตภาพของ AB เท่ากับศูนย์ และส่วนจริงเท่ากับ -1 หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งเฟสของ $-AB = 0$ และขนาดของ $AB = 1$ อีกประการหนึ่งสมการ (13.50) มีความหมายว่าอัตราขยายเป็นอนันต์ นั่นคือดีเทอร์มิแนนต์ (det.) ของสมการของวงจรเป็นศูนย์หรือวงจรอยู่ในสภาพเสื่อมคลาย (degenerate) นั่นเอง เราจะเขียนเงื่อนไขเหล่านี้ใหม่เพื่อให้สะดวกในการวิเคราะห์วงจรดังนี้

4.7.1.1 เงื่อนไขกำหนดความถี่

วงจรกำเนิดรูปไซน์จะแกว่งที่ความถี่ ω_0 ซึ่งเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$\angle -A(\omega_0)B(\omega_0) = 0$$

หรือ

$$\text{Im}\{A(\omega_0)B(\omega_0)\} = 0$$

$$\text{หรือ } \text{Im}(\text{det. ของสมการวงจร}) = 0$$

เราจะเฉลยสมการหนึ่งใดข้างต้นนี้ เพื่อคำนวณหาความถี่ของการแกว่ง

4.7.1.2 เงื่อนไขกำหนดช่วงสูง

เพื่อให้วงจรแกว่งที่ความถี่ ω_0 อัตราขยายและอัตราป้อนกลับต้องมีค่าสูงเพียงพอ คือเป็นไปตามสมการต่อไปนี้

$$|A(\omega_0)| = \frac{1}{|B(\omega_0)|}$$

หรือ $\operatorname{Re}\{A(\omega_0)B(\omega_0)\} = -1$

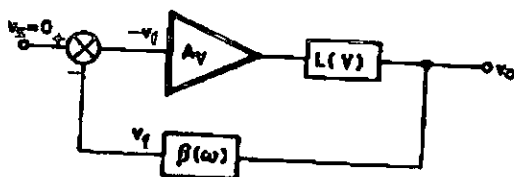
หรือ $\operatorname{Re}(\det. \text{ ของสมการวงจร}) = 0$

ในทางปฏิบัติเราจะให้ $|A|$ ใหญ่กว่า $|1/B|$ เล็กน้อย เมื่อเป็นเช่นนั้นการแกว่งจะเพิ่มช่วงสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนจะถูกจำกัดโดยการเริ่มไม่เชิงเส้นของวงจร แต่ถ้ามีวงจรจำกัดช่วงสูงของแรงดัน $L(V)$ ต่ออยู่ในวงรอบ (ดูภาพประกอบ 118) เราจะออกแบบให้ $|A| > |1/B|$ ที่ช่วงสูง V ค่าต่ำ ซึ่ง $L(V) = 1$ จะได้ $|A| > |1/B|$ ช่วงสูงของการแกว่งจะเพิ่มขึ้น แต่เมื่อช่วงสูงมีค่ามากวงจรจำกัดช่วงสูงจะให้ $L(V)$ ที่ลดลง ในที่สุดช่วงสูงจะมีค่าที่มีเสถียรภาพเท่ากับ V_0 ซึ่งเป็นไปตามสมการ

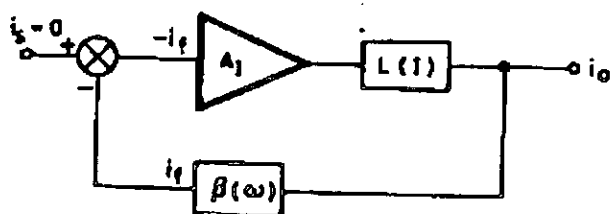
$$|A(V_0)| = \left| \frac{1}{B} \right|$$

อีกวิธีหนึ่งที่จะกำหนดช่วงสูงของการแกว่งก็คือใช้การควบคุมอัตราขยายโดยอัตโนมัติ (AGC) นั่นคือให้อัตราขยายมีค่าลดลงเมื่อช่วงสูงเพิ่มขึ้น หรือ A เป็นฟังก์ชันของช่วงสูง V ช่วงสูงที่มีเสถียรภาพ V_0 จะเป็นไปตามสมการ

$$|A(V_0)| = \frac{1}{B}$$



ภาพประกอบ 118 แผนภาพบล็อกของวงจรแกว่งที่ใช้การป้อนกลับชนิดลุ่มแรงดันผสมแรงดัน



ภาพประกอบ 119 แผนภาพบล็อกของวงจรแกว่งที่ใช้การป้อนกลับชนิดลุ่มกระแสผสมกระแส

4.7.1.3 ตัวประกอบเสถียรภาพ

สำหรับวงจรขยายที่มีป้อนกลับโดยทั่วไป เรามักสมมติว่าอัตราขยาย A เป็นฟังก์ชันของความถี่และ B เป็นเลขจริง คือวงจรป้อนกลับประกอบด้วยความต้านทานเท่านั้น แต่สำหรับวงจรแวกซ์โดยทั่วไป เรามักจะสมมติว่า A เป็นเลขจริง (ความถี่ไม่สูงนัก) และเราจะออกแบบวงจรป้อนกลับเพื่อให้เกิดการแกว่ง โดยที่ B เป็นฟังก์ชันของความถี่

เรามักนิยามตัวประกอบเสถียรภาพให้ผกผันกับนิยามของความไว คือให้เท่ากับร้อยละของการเปลี่ยนแปลงของเหตุหารด้วยร้อยละของการเปลี่ยนแปลงของผล ในกรณีของวงจรแวกซ์เรามีนิยามดังนี้

$$\text{ตัวประกอบเสถียรภาพความถี่ } S_\omega = \frac{\Delta/B(\omega)}{\frac{\Delta\omega}{\omega_0}}$$

(ในนิยามนี้เราให้สมมติว่า A เป็นเลขจริง)

ตัวประกอบเสถียรภาพช่วงสูง $S_V = \frac{\frac{\Delta\mu}{\mu}}{\frac{\Delta V}{V}}$

โดยที่ μ คือตัวแปรหนึ่งใดของวงจรที่มีผลสำคัญต่อช่วงสูง
 V คือช่วงสูงของแรงดันขาออก

เราอาจใช้ตัวประกอบเหล่านี้เพื่อการเปรียบเทียบคุณภาพของวงจรแวกซ์ โดยที่วงจรที่ตัวประกอบมีค่าสูงจะมีคุณภาพดีกว่า

4.7.1.4 ความเพี้ยน

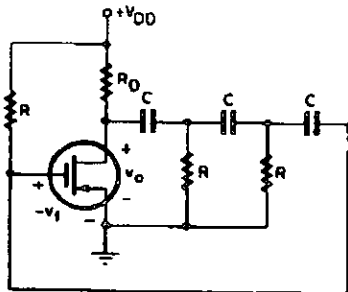
ถ้าเราออกแบบวงจรป้อนกลับได้ดี เราจะให้การป้อนกลับเป็นแบบบวกที่ความถี่ W_0 แต่จะให้เป็นแบบลบที่ความถี่ $2W_0, 3W_0 \dots$ เมื่อเป็นเช่นนั้นสัญญาณออกจะเป็นรูปไซน์ที่ดี กล่าวคือฮาร์มอนิกต่าง ๆ จะถูกลดทอนโดยการป้อนกลับแบบลบ การลดทอนฮาร์มอนิกจะมีมากหรือความเพี้ยนจะมีน้อย ถ้าอัตราลดความไวซึ่งคำนวณที่ความถี่ของฮาร์มอนิกมีค่าสูง นั่นคือ

$$D_n = 1 + AB(n\omega_0) \text{ มีค่าสูง}$$

ประมาณ D_n ก็อาจใช้ประกอบการเปรียบเทียบคุณภาพของวงจรแวกซ์ได้เช่นกัน

4.7.2 วงจรแวกซ์เลื่อนเฟส

ภาพประกอบ 120 แสดงการต่อวงจรแวกซ์โดยใช้ MOSFET ตัวเดียว กับวงจรป้อนกลับ B ซึ่งประกอบด้วย R และ C อย่างละสามตัว หน้าที่ของวงจร B คือทำให้เกิดการเลื่อนเฟสเท่ากับ 180 องศา เพื่อให้การป้อนกลับเป็นแบบบวก (ถ้าใช้ R และ C อย่างละสองตัว ก็จะเลื่อนเฟสได้ไม่พอ) วงจรนี้มีชื่อว่า วงจรแวกซ์เลื่อนเฟส (phase-shift oscillator)



ภาพประกอบ 120 วงจรแวกซ์เลื่อนเฟส

อัตราการป้อนกลับจะคำนวณได้จากวงจรป้อนกลับ RC ดังนี้

$$A = \frac{V_f}{V_o} = -\frac{1}{1 - 5\alpha^2 - j(6\alpha - \alpha^3)}$$

โดยที่ $\alpha = 1/RC\omega$

สมมติว่าเราสามารถละเลยผลการไหลของวงจรป้อนกลับได้ ($R \gg R_D$) ดังนั้นอัตราขยายแรงดันเป็นเลขจริงและมีค่าเท่ากับ

$$A_V \approx -g_m R_D$$

จากสมการ เนื่องจาก A_V เป็นเลขจริง

$$\text{Im}(AB) = 0 \quad \text{จะให้} \quad \text{Im}(B) = 0$$

จากสมการ $\text{Im}(B) = 0$

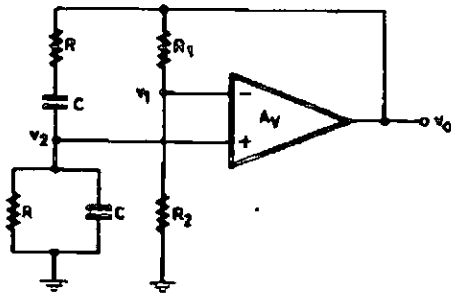
$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{6} RC}$$

ที่ความถี่นี้ $B(\omega_o) = 1/29$ ดังนั้นจากสมการ(13.54) จะได้ $A_V = -g_m R_D = -29$

ในทางปฏิบัติ $|A_V|$ จะต้องใหญ่กว่า 29 บ้างเล็กน้อย

วงจรแกว่งเลื้อนเฟสสามารถวิเคราะห์ได้โดยง่าย แต่ก็มีข้อเสียคือถ้าต้องการแปรความถี่ จะต้องเปลี่ยนค่าองค์ประกอบวงจร R หรือ C สามตัวพร้อมกัน เสถียรภาพความถี่มีค่าปานกลางและการเพี้ยนจะมีมากพอสมควร ($ID_2 = 2.7$)

4.7.3 วงจรแกว่งแบบบริดจ์ของวิน (Wien Ridge)



ภาพประกอบ 121 วงจรแกว่งแบบบริดจ์ของวิน

เมื่อพิจารณาวงจรในภาพประกอบ 121 เราคำนวณอัตราการป้อนกลับแบบบวกได้เท่ากับ

$$B_+ = \frac{V_2}{V_o} = \frac{1}{3 + j\left(\frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega}\right)}$$

โดยที่ $\omega_o = 1/RC$

เราสังเกตได้ว่าอัตราการป้อนกลับเป็นเลขจริงเท่ากับ 1/3 ที่ความถี่ $\omega = \omega_o$ ถ้าให้อัตราการป้อนกลับแบบลบ $B_- = V_1/V_o = R_2/(R_1 + R_2)$ เท่ากับ 1/3 พอดี ก็จะเป็นกรณีที่บริดจ์สมดุล หมายความว่า

ว่า $V_1 = V_2$ และในกรณีอุดมคติที่ $AV \rightarrow \infty$ เมื่อ $V_i = V_1 - V_2$ เป็นศูนย์ ก็จะทำให้ V_o ค่าจำกัดค่าหนึ่ง ในกรณีที่ไม่เป็นอุดมคติอัตราป้อนกลับมีค่าเท่ากับ

$$\beta = \frac{V_2 - V_1}{V_o} = \beta_+ - \beta_- = \frac{1}{3 + j\left(\frac{\omega}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega}\right)} - \frac{1}{3} + \frac{1}{\delta}$$

ในที่นี้เราให้อัตราการป้อนกลับแบบลบมีค่าน้อยกว่า $1/3$ อยู่เล็กน้อย นั่นคือ

$$\frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{1}{3} - \frac{1}{\delta}$$

6 ซึ่งมีนิยามข้างต้นนี้จะเป็นเลขจริงค่าบวกและมีค่าสูง จากสมการ จะได้ ความถี่ของการแกว่ง

$$= \omega_o = \frac{1}{RC}$$

จากสมการ จะได้อัตราขยาย $A_V = -6$

วงจรแอมป์แบบบริดจ์ของวิน มีตัวประกอบเสถียรภาพเท่ากับ $S_{\omega_o} = -\frac{2\delta}{9} = \frac{2A_V}{9}$

โดยปกติ $|A_V|$ จะมีค่าสูง และวงจรแอมป์นี้จะมีเสถียรภาพเชิงความถี่ที่ดี

ในด้านความเพี้ยน เราคำนวณได้ว่าขนาดของอัตราลดความไวที่ความถี่ $2\omega_o$ มีค่าเท่ากับ

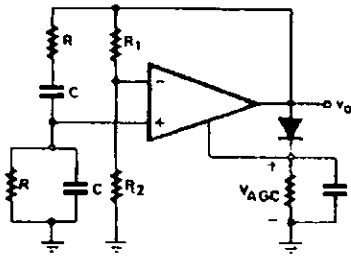
$$|D_2| = \frac{6.72}{\delta}$$

ในที่นี้อีกเช่นกัน ถ้า $|A_V| = 6$ มีค่าสูง วงจรแอมป์นี้จะกำเนิดสัญญาณรูปไซน์ที่มีความเพี้ยนน้อย

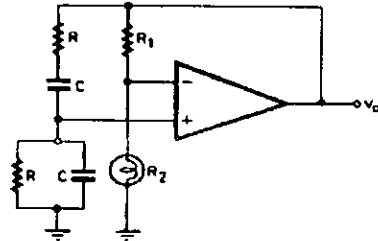
ในด้านการควบคุมช่วงสูง เราอาจใช้การควบคุมอัตราขยายโดยอัตโนมัติ (AGC) เช่น เลือกใช้ออปแอมป์ที่มีขั้วไวสำหรับควบคุมอัตราขยาย และเอาแรงดัน V_o มาเรียงกระแสได้เป็นค่าไฟตรงสำหรับใช้ควบคุมอัตราขยาย (ดูภาพประกอบ 122 (1))

อีกวิธีหนึ่งคือใช้วิธีควบคุมค่าความต้านทานป้อนกลับ โดยใช้ความต้านทานไวอุณหภูมิ เช่น หลอดทังสเตนทำหน้าที่เป็นเซนซิเตอร์ (R เพิ่มขึ้นเมื่อ T เพิ่มขึ้น) เพื่อต่อเป็น R_2 หรือใช้เทอร์มิสเตอร์ (R เพิ่มขึ้นเมื่อ T ลด) เพื่อต่อเป็น R_1 ในขณะที่สัญญาณมีขนาดเล็ก B- จะมีค่าต่ำกว่า $1/3$ อยู่พอสมควร การแกว่งก็จะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ ตัวต้านทานจะเริ่มร้อน และความต้านทานจะเปลี่ยนไปทำให้ป้อนกลับแบบลบมากขึ้น จนเกิดเสถียรภาพของช่วงสูงเมื่อการป้อนกลับเป็นไปตามสมการ ข้างต้น วิธีนี้แสดงอยู่ในภาพประกอบ 122 (2) เราอาจใช้ FET ในย่านก่อนตีบสนิท (pinch off) เพื่อเป็นความต้านทานไวแรงดัน (VVR) เมื่อต่อ FET แทน R_2 และควบคุมค่า R_2 โดยใช้การเรียงกระแส V_o แล้วต่อมาที่เกต ก็จะควบคุมช่วงสูงของการแกว่งได้ (ดูภาพประกอบ

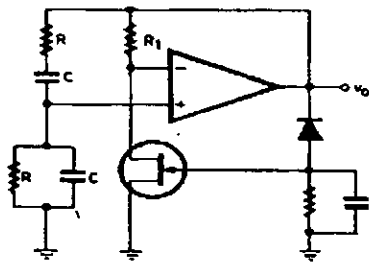
อีกวิธีหนึ่งที่จะกำหนดช่วงสูงคือใช้วงจรจำกัดช่วงสูงที่ใช้ไดโอดซีเนอร์ เป็นต้น ตัวอย่างวงจรแสดงอยู่ในภาพประกอบ 122 (4) ถ้าช่วงสูงมีค่าต่ำไดโอดซีเนอร์ยังไม่ทำงาน การป้อนกลับแบบลบมีน้อยเกินไป วงจรจะแกว่งขึ้นจนไดโอดซีเนอร์ทำงาน ซึ่งจะมีผลเป็นการเพิ่มอัตราการป้อนกลับแบบลบจนเกิดเสถียรภาพช่วงสูงขึ้น



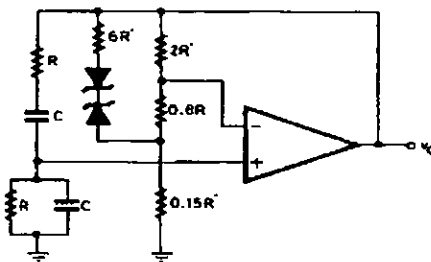
(1) ให้การควบคุมอัตราขยายโดยอัตโนมัติ



(2) ใช้เซนซิเตอร์เป็น R_2



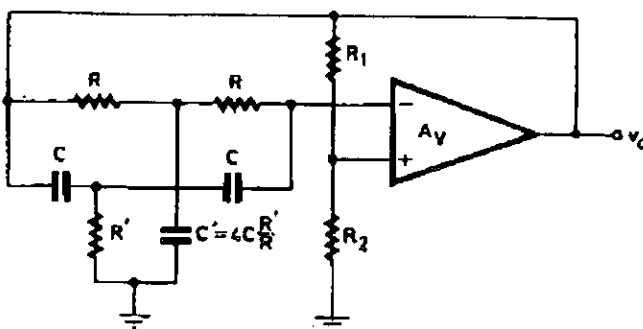
(3) ใช้ FET เป็นความต้านทานไวแรงดัน (VVR)



(4) ใช้ไดโอดซีเนอร์เป็นวงจรจำกัดช่วงสูง แทน R_2

ภาพประกอบ 122 ตัวอย่างการควบคุมช่วงสูงของการแกว่ง

วงจรแกว่งแบบบริดจ์ของวินมีคุณสมบัติที่ดีหลายประการ เราสามารถปรับความถี่ได้โดยแปรค่า R ซึ่งเป็นโพเทนชิโอมิเตอร์ 2 ตัว ที่มีแกนร่วมกัน เรานิยมใช้วงจรแกว่งชนิดนี้ในช่วงความถี่ 10 เฮิรตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิรตซ์



ภาพประกอบ 123 วงจรแกว่งที่ใช้วงจร T - แผลด

วงจรแกว่งที่ใช้วงจร T- แผลดมีการป้อนกลับแบบบวกผ่านตัวแบ่งแรงดันที่เป็นความต้านทานที่ความถี่ทั่วไปจะมีการป้อนกลับแบบลบผ่านวงจร T-แผลด แต่ที่ความถี่ ω_0 ซึ่งเป็นความถี่ไม่ผ่าน (null) ของวงจร T-แผลด จะไม่มีการป้อนกลับแบบลบ วงจรจะแกว่งที่ความถี่นี้ เงื่อนไขการแกว่ง $-AB = 1$

4.8 หลักการของระบบดิจิทัล

4.8.1 เปรียบเทียบระบบแอนะล็อกกับระบบดิจิทัล

ระบบแอนะล็อกกับระบบดิจิทัลมีความแตกต่างกันพื้นฐานอยู่ที่ความต่อเนื่องของสัญญาณ กล่าวคือ สัญญาณแอนะล็อกเป็นสัญญาณที่มีความต่อเนื่องในเรื่องขนาดของสัญญาณ และมีความต่อเนื่องในเรื่องของเวลา ยกตัวอย่างเช่น สัญญาณแอนะล็อกที่เป็นศักย์ไฟฟ้า (Voltage) อาจมีค่าเป็น 0.2 โวลต์, 1.7 โวลต์, 3.5 โวลต์ หรือค่าใด ๆ ในระหว่างช่วงดังกล่าวก็ได้ และหากนำค่าโวลต์มาเขียนเป็นกราฟให้สัมพันธ์กับเวลาก็จะได้เส้นกราฟที่ต่อเนื่อง ซึ่งแสดงว่าค่าโวลต์เป็นฟังก์ชันที่ต่อเนื่องของเวลา ส่วนสัญญาณดิจิทัลนั้นเป็นสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องในเรื่องขนาดของสัญญาณ และไม่จำเป็นต้องมีความต่อเนื่องในเรื่องของเวลา ยกตัวอย่างเช่น สัญญาณพัลส์นาฬิกาซึ่งมีค่าขนาดเพียง 2 ระดับ คือ 0 โวลต์กับ 5 โวลต์ และมีลักษณะเป็นพัลส์แคบ ๆ เกิดขึ้นทุก ๆ 1 ไมโครวินาที เป็นต้น

ระบบแอนะล็อก เป็นระบบที่มีกระบวนการสัญญาณที่ค่อนข้างสลับซับซ้อนประกอบด้วยกระบวนการต่าง ๆ คือ

- การขยายสัญญาณ (Amplification)
- การกำเนิดความถี่ (Frequency Generation)
- การเปลี่ยนความถี่ (Frequency Changing)
- การกรองความถี่ (Filtering)
- การเลื่อนเฟส (Phase Shifting)
- การผสมคลื่น (Modulation)
- การมัลติเพล็กซ์ (Multiplexing)

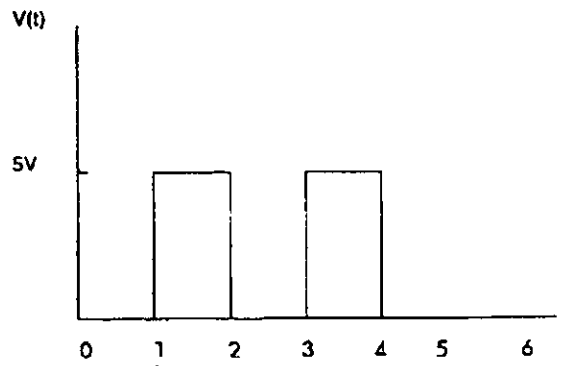
ตัวอย่างของระบบแอนะล็อกที่ใช้กระบวนการต่าง ๆ เหล่านี้เกือบครบทุกกระบวนการได้แก่ ระบบการรับส่งสัญญาณโทรทัศน์ แม้ว่าระบบแอนะล็อกจะมีกระบวนการที่ยุ่งยากและซับซ้อนก็ตาม แต่ระบบแอนะล็อกใช้วงจรที่เปลี่ยนชิ้นส่วนน้อยกว่าระบบดิจิทัลมาก ด้วยเหตุนี้ระบบแอนะล็อกจึงได้รับการพัฒนามาก่อน แต่ในปัจจุบันนี้เทคโนโลยีด้านไมโครอิเล็กทรอนิกส์ ทำให้เราสามารถสร้างชิ้นอุปกรณ์ที่มีชิ้นส่วนจำนวนมาก ๆ ให้มีขนาดเล็กกะทัดรัดได้ เช่น ไอซีระดับวีแอลเอสไอประกอบด้วยทรานซิสเตอร์มากกว่า 20,000 ตัว บนชิ้นซิลิคอนขนาดประมาณ $5 \times 5 \times 0.2$ มม. ด้วยเทคโนโลยีใหม่ ๆ นี้ ระบบดิจิทัลจึงได้รับการพัฒนาขึ้นอย่างรวดเร็ว และมีแนวโน้มว่าจะเข้ามาแทนที่ระบบแอนะล็อกทั้งหมดในอนาคต (ถวัลย์ วงศ์ ไกรโรจนานนท์ .2542 : 17)

4.8.2 ลักษณะของสัญญาณดิจิทัล

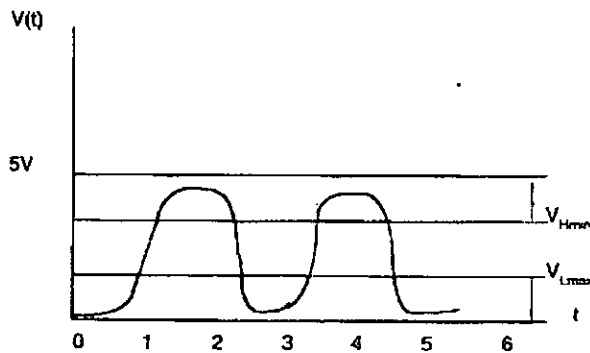
สัญญาณดิจิทัลมีลักษณะพิเศษที่แตกต่างจากสัญญาณแอนะล็อกเป็นอย่างมาก กล่าวคือสัญญาณดิจิทัลเป็นสัญญาณที่ไม่ต่อเนื่องแต่มีลักษณะเป็นขั้น ๆ หรือเป็นท่อน ๆ ซึ่งเรามีศัพท์เรียกลักษณะดังกล่าวว่า ดิสครีต (Discrete) และสัญญาณจะมีค่าได้เฉพาะค่าที่กำหนดไว้ตายตัวเท่านั้น เช่น ในระบบดิจิทัลที่ใช้กันทั่วไปนั้นใช้สัญญาณระบบเลขฐานสอง (Binary) ซึ่งมีค่าเพียงสองระดับเท่านั้น

ภาพประกอบ 124 แสดงลักษณะของสัญญาณดิจิทัลในกรณีนี้สัญญาณสามารถมีค่าที่กำหนดไว้สองระดับคือ 0 กับ 5 โวลต์ ในทางทฤษฎีสัญญาณจะมีค่าระหว่างกลาง เช่น 3.5 หรือ 2.7 โวลต์ไม่ได้ และจะมีค่าเกิน 5 โวลต์ไม่ได้ ตามรูปนี้สัญญาณมีค่า 5 โวลต์ ในช่วงเวลา $1 = 1$ ถึง 2 กับในช่วงเวลาระหว่าง $1 = 3$ ถึง 4 นอกจากช่วงเวลาที่ทั้งสองดังกล่าวสัญญาณมีค่า 0 โวลต์ ถ้าส่งสัญญาณนี้ไปตามสายหรือไปกับคลื่นวิทยุ เมื่อไปถึงปลายทางขนาดและรูปร่างของสัญญาณอาจผิดเพี้ยนไปบ้างดังแสดงในภาพประกอบ 124 ในทางปฏิบัติเรากำหนดค่าขั้นต่ำของสัญญาณระดับสูง ($V_{H \min}$) และค่าขั้นสูงของสัญญาณระดับต่ำ ($V_{L \max}$) ไว้

เพื่อให้สามารถแยกแยะระดับแรงดันไฟฟ้าทั้งสองจากสัญญาณดิจิทัลที่ผิดเพี้ยนไปได้ โดยวิธีนี้ระบบที่รับสัญญาณดิจิทัลก็ยังสามารถทำงานได้อย่างถูกต้อง แม้ว่าสัญญาณที่รับเข้ามา จะมีความผิดเพี้ยนค่อนข้างมาก ซึ่งเป็นจุดเด่นของระบบดิจิทัลที่เหนือกว่าระบบแอนะล็อก



ภาพประกอบ 124 ลักษณะของสัญญาณดิจิทัล



ภาพประกอบ 125 สัญญาณดิจิทัลที่ผิดเพี้ยน

4.8.3 กระบวนการขั้นพื้นฐานที่ใช้ในระบบดิจิทัล

กระบวนการที่ใช้ในระบบดิจิทัลนั้น เป็นกระบวนการที่ง่ายกว่าที่ใช้ในระบบแอนะล็อกมากเพราะประกอบด้วยกระบวนการพื้นฐานง่าย ๆ เพียงไม่กี่อย่าง นำมาใช้ผสมผสานกันให้เป็นไปตามวัตถุประสงค์ได้ กระบวนการพื้นฐานทางดิจิทัลได้แก่

4.8.3.1 ปฏิบัติการตรรกะ (Logic Operation)

4.8.3.2 การเก็บความจำ (Memory Stroage)

4.8.3.4 การนับ (Counting)

รายละเอียดของกระบวนการพื้นฐานต่าง ๆ เหล่านี้จะได้กล่าวถึงในหัวข้อต่อไป เราสามารถนำกระบวนการพื้นฐานเหล่านี้มาใช้ร่วมกันทำให้เกิดกระบวนการที่มีความซับซ้อนสูงขึ้นเช่น

กระบวนการเลขฐานสอง (Binary Addition)

การถอดรหัสและการแจกจ่ายสัญญาณ (Decoding and Demultiplexing)

การแปลงสัญญาณแอนะล็อกเป็นดิจิทัล (Analog to Digital Conversion)

การแปลงสัญญาณดิจิทัลเป็นแอนะล็อก (Digital to Analog Conversion)

ระบบดิจิทัลสมัยใหม่ อาศัยวงจรพื้นฐานง่าย ๆ เพียงไม่กี่แบบ แต่มีจำนวนมาก และเป็นวงจรที่สามารถทำงานได้ด้วยความเร็วสูงมาก เป็นองค์ประกอบในการทำให้เกิดกระบวนการอัตโนมัติต่าง ๆ ขึ้น ภายใต้ชื่อที่รู้จักกันทั่วไปว่า "ระบบคอมพิวเตอร์" นั่นเอง

4.8.4 การจัดประเภทของระบบดิจิทัล

ระบบดิจิทัล อาจแบ่งออกได้เป็นประเภทใหญ่ ๆ ได้ดังนี้

4.8.4.1 ระบบดิจิทัลแบบคอมบิเนชัน (Combinational Digital System)

เป็นระบบที่สถานะของเอาต์พุตขึ้นอยู่กับองค์ประกอบ หรือคอมบิเนชัน (Combination) ของสถานะอินพุต ลำดับเหตุการณ์ในอดีตของอินพุตและเอาต์พุต ไม่มีผลต่อการทำงานของวงจร วงจรในระบบนี้ได้แก่ วงจรตรรกะ (Logic Gates) แบบต่าง ๆ และวงจรที่พัฒนามาจากวงจรตรรกะ

4.8.4.2 ระบบดิจิทัลแบบซีควเอนเชียล (Sequential Digital System)

เป็นระบบที่สถานะของเอาต์พุตขึ้นอยู่กับสถานะปัจจุบัน และสถานะก่อนหน้านั้นของทั้งอินพุตและเอาต์พุต ลำดับเหตุการณ์ในอดีตมีผลโดยตรงตามสถานะของเอาต์พุต และเวลาเป็นตัวแปรตัวหนึ่งที่ควบคุมสถานะของเอาต์พุต วงจรในระบบนี้ได้แก่ วงจรฟลิปฟล็อป (Flip-flop) แบบต่าง ๆ และวงจรที่พัฒนามาจากวงจรฟลิปฟล็อป

4.8.4.3 ระบบดิจิทัลแบบควบคุมด้วยโปรแกรม (Program Controlled Digital System)

เป็นระบบที่นำวงจรแบบคอมบิเนชันและซีควเอนเชียลมาทำงานร่วมกัน โดยเพิ่มหน่วยความจำ (Memory) ที่มีขนาดใหญ่พอเข้าไปสำหรับจัดจำคำสั่งต่าง ๆ ที่จะสั่งงานให้ระบบทำงานตามลำดับและจัดจำสถานะอินพุตเอาต์พุตก่อนหน้า คำสั่งที่เรียงลำดับไว้นี้เรียกว่า โปรแกรม (Program) ระบบนี้จึงเป็นระบบที่ทำงานภายใต้ความควบคุมของโปรแกรม ซึ่งมีชื่อเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า ซอฟต์แวร์ (Software) สิ่งโดยตรงกันข้ามกับซอฟต์แวร์คือ ฮาร์ดแวร์ (Hardware) ซึ่งได้แก่ ชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่นำมาประกอบกันเป็นตัวเครื่องของระบบ ระบบดิจิทัลแบบควบคุมด้วยโปรแกรม จึงเป็นระบบที่มีทั้งฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ ในขณะที่ระบบดิจิทัลอีกสองแบบที่กล่าวถึงก่อนหน้านี้มีแต่ฮาร์ดแวร์เพียงอย่างเดียว ตัวอย่างของระบบดิจิทัลแบบควบคุมด้วยโปรแกรมได้แก่ ระบบที่ใช้ไมโครโพรเซสเซอร์ (Microprocessor-based System)

4.8.5 อุปกรณ์และวงจรที่ใช้ในระบบดิจิทัล

อุปกรณ์และวงจรที่ใช้ในระบบดิจิทัลอาจแบ่งออกเป็นประเภทใหญ่ ๆ ได้ ดังนี้

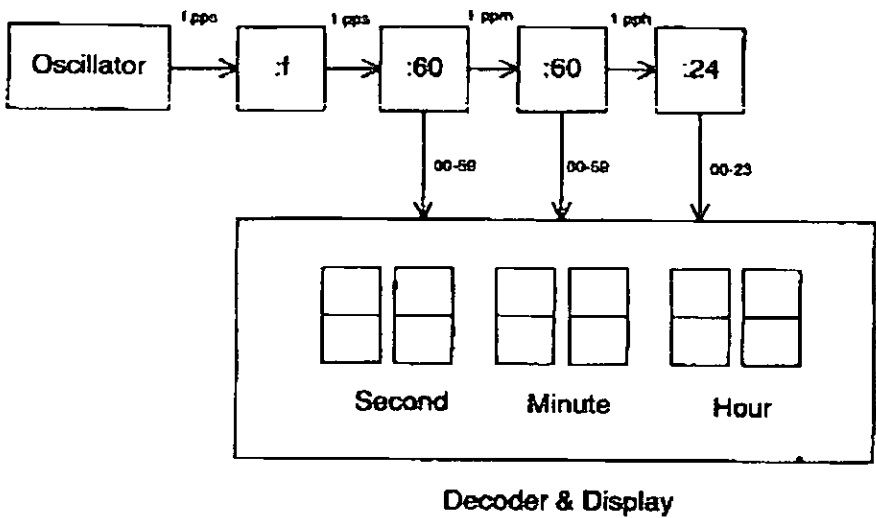
4.8.5.1 วงจรตรรกะ (Logic Gate)

4.8.5.2 ฟลิปฟล็อป (Flip – flop)

4.8.5.3 อุปกรณ์ความจำ (Memory Device)

4.8.5.4 วงจรสำเร็จระดับความซับซ้อนปานกลางและสูง (MSI/LSI Device)

4.8.5.5 ไมโครโพรเซสเซอร์ (Microprocessor)



ภาพประกอบ 126 แสดงอุปกรณ์และวงจรที่ใช้ในระบบดิจิทัล

4.8.6 ทฤษฎีพื้นฐานของระบบดิจิทัล

4.8.6.1 ระบบเลขฐานต่าง ๆ (Number System)

4.8.6.1.1 ระบบเลขฐานสิบ (Decimal System)

การนับเลขที่เราใช้กันอยู่ในชีวิตประจำวันเป็นระบบเลขฐานสิบ ในระบบนี้เราเรียกเลขหลักต่าง ๆ ว่าหลักหน่วย หลักสิบ หลักร้อย หลักพัน ฯลฯ ซึ่งโดยหลักการแล้วก็คือ เลขแต่ละหลักมีค่าประจำหลัก เช่น 10^0 , 10^2 , 10^3 ฯลฯ ยกตัวอย่างเช่น จำนวน 5738 หมายความว่า

	หลักพัน	หลักร้อย	หลักสิบ	หลักหน่วย
ค่าประจำหลัก	10^3	10^2	10^1	10^0
ตัวคูณ	5	7	3	8
ค่า	(5x1000)	(7x100)	(3x10)	(8x1)

การนับเลขในระบบฐานสิบนั้น แต่ละหลักมีตัวเลขที่ใช้ได้คือ 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 รวม 10 ตัว ตัวเลขเหล่านี้ใช้เป็นตัวคูณของหลักนั้น ๆ เพื่อให้ได้ค่าเป็นจำนวนเท่าของค่าประจำหลักนั่นเอง
ค่ารวมของจำนวนเลข 5738 ตามตัวอย่างจึงได้มาจากผลรวมของค่าทั้งหมดคือ $(5 \times 1000) + (7 \times 100) + (3 \times 10) + (8 \times 1)$ นั่นเอง

4.8.6.1.2 ระบบเลขฐานสอง (Binary System)

การนับเลขในระบบฐาน 2 ใช้เลขแต่ละหลัก ซึ่งมีค่าประจำหลักเป็น 2^n กล่าวคือ 2^0 , 2^1 , 2^2 , 2^3 ซึ่งเทียบได้กับหลักหน่วย หลักสิบ หลักร้อยและหลักพันของเลขฐานสิบ

ถ้าเราพิจารณาการนับเลขด้วยหลักเดียว ในระบบเลขฐานสอง โดยเริ่มนับจาก 0 จะเห็นว่าเราจะนับได้เพียง 0,1 เท่านั้น เพราะหากเราจะนับต่อเป็น 2 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 21 จะต้องเขียนอยู่ในหลักถัดไป ดังนั้นระบบเลขฐานสองจึงมีตัวเลขให้ได้เพียง 2 ตัวคือ 0 กับ 1

ตาราง 20 แสดงการนับเลขในระบบเลขฐานสองเปรียบเทียบกับระบบเลขฐานสิบ

เลขทศนิยม (ฐานสิบ)	เลขทวินิยม (ฐานสอง)
0	0000
1	0001
2	0010
3	0011
4	0100
5	0101
6	0110
7	0111
8	1000
9	1001
10	1010
11	1011
12	1100
13	1101
14	1110
15	1111

	พิจารณาจำนวนเลข 1001 ในระบบเลขฐานสอง เราจะแปลความหมายได้ดังนี้			
	หลัก 23	หลัก22	หลัก23	หลัก24
ค่าประจำหลัก	$2^3 = (8)$	$2^2 = (4)$	$2^1 = (2)$	$2^0 = (1)$
ตัวคูณ	1	0	0	1

ค่า	2×2^3	0×2^2	0×2^1	1×2^0
	= 8	= 0	= 0	= 1

ค่ารวมของจำนวนเลข 1001_2 คือ $8+0+0+1 = 910$
ให้สังเกตวิธีเขียน 1001_2 แทน 1001 ในระบบเลขฐาน 2
และ 9_{10} แทน 9 ในระบบเลขฐาน 10

จากตัวอย่างดังกล่าวข้างต้นจะเห็นว่า ในระบบเลขฐาน 2 เราต้องใช้จำนวนหลักหลายหลักเพื่อที่จะแทนค่า ๆ หนึ่งที่อาจใช้เพียง 1-2 หลัก ในระบบเลขฐานสิบ แม้ว่าข้อนี้จะเป็นข้อเสียเปรียบของระบบเลขฐานสอง แต่ระบบนี้ก็มิขอดีคือ การที่เลขแต่ละหลักมีได้เพียงสองสถานะคือ 0 กับ 1 เท่านั้นทำให้เราสามารถใช้อุปกรณ์ทางไฟฟ้า หรืออิเล็กทรอนิกส์ที่ง่าย ๆ ไม่ซับซ้อนมาแทนได้ เช่น สวิตช์ ซึ่งมีสองสถานะคือ วงจรเปิด กับ วงจรปิด เป็นต้น ระบบเลขฐานสองจึงกลายเป็นพื้นฐานของระบบดิจิทัลในปัจจุบัน และเป็นระบบเลขที่ใช้ในการทำงานภายในเครื่องคอมพิวเตอร์

จำนวนหลักของเลขฐานสองเรียกว่า บิต (Bit) ซึ่งย่อมาจาก Binary Digit เช่น เลขฐานสอง 8 หลัก เรียกว่าเลข 8 บิต เป็นต้น

4.8.6.1.3 ระบบเลขฐานแปดและระบบเลขฐานสิบหก (Octal & Hexadecimal Systems)

ระบบเลขฐานแปดคือ ระบบเลขที่ใช้เลขแต่ละหลักซึ่งมีค่าประจำหลักเป็น 8^n และในแต่ละหลักมีเลขให้ใช้ได้ 8 ตัวคือ 0 ถึง 7

ตัวอย่างเช่น 235_8 มีความหมายดังนี้

	หลัก 8^2	หลัก 8^1	หลัก 8^0
ค่าประจำหลัก	64	8	1
ตัวคูณ	2	3	5
ค่า	2×64	3×8	5×1
ดังนั้น	235_8	$= (2 \times 64) + (3 \times 8) + (5 \times 1)$	
		$= 15710$	

ระบบเลขฐานสิบหกคือ ระบบเลขที่ใช้เลขแต่ละหลักซึ่งมีค่าประจำเป็น 16^n และในแต่ละหลักมีเลขให้ใช้ได้ 16 ตัว ในกรณีนี้เราใช้ตัวเลข 0 ถึง 9 ซึ่งมีอยู่แล้วในระบบฐานสิบ และสร้างเครื่องหมายแทนตัวเลขที่ขาดไปอีก 6 ตัวคือ A, B, C, D, E, F ตัวแปรในตาราง 21

ตาราง 21 แสดงตัวเลขที่ใช้ในระบบฐานสิบหกเทียบกับค่าฐานสิบ

ตัวเลขในระบบฐานสิบหก	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	A	B	C	D	E	F
ค่าฐานสิบของตัวเลข	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

ตัวอย่างเช่น 183_{16} หมายความว่า

	หลัก 16^2	หลัก 16^1	หลัก 16^0
ค่าประจำหลัก	256	16	1
ตัวคูณ	1	8	3
ค่า	1×256	8×16	3×1

ดังนั้น 183_{16}

=

$(1 \times 256) + (8 \times 16) + (3 \times 1)$

=

$256 + 128 + 3$

=

387_{10}

เลขฐานแปดและเลขฐานสิบหก มีประโยชน์คือ ใช้เป็นรหัสย่อของเลขฐานสอง โดยการจับกลุ่มเลขฐานสองกลุ่มละ 3 หรือ 4 ตัว แล้วแทนแต่ละกลุ่มด้วยเลขฐานแปด หรือเลขฐานสิบหกตามลำดับ ซึ่งทำให้การอ่านเขียนง่ายขึ้นสำหรับคน แต่ขอให้เข้าใจว่าการทำงานภายในเครื่องคอมพิวเตอร์ นั้นยังใช้ระบบเลขฐานสองอยู่ ยกตัวอย่างเช่น เราเขียนตัวเลขที่แทนตำแหน่ง (Address) ของหน่วยความจำในเครื่องคอมพิวเตอร์ว่า B8 (ฐาน 16) เราหมายถึงตำแหน่งที่แทนด้วยเลขฐานสอง 10111000 ทั้งนี้โดยการแบ่งเลขฐานสอง 8 บิต ออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มละ 4 บิต กลุ่มแรกคือ 1011 ตรงกับเลขฐานสิบคือ 11 แทนตำแหน่งหน่วยความจำนี้ว่า B8 จะสะดวกและมีโอกาสผิดพลาดน้อยกว่าการเขียนแทนด้วย 10111000 แต่การทำงานภายในเครื่องคอมพิวเตอร์ใช้ตัวเลข 10111000 เหมือนเดิม (กล้วยบัวดี ไกรโรจนานันท์ . 2542 : 29)

วิธีการเขียนเพื่อแสดงให้ทราบว่าตัวเลขชุดหนึ่งอยู่ในระบบเลขฐานใดนั้น นอกจากจะเขียนด้วยตัวเลขห้อยต่ำกว่าบรรทัดแล้ว ยังมีอีกวิธีหนึ่งคือ ใช้อักษรภาษาอังกฤษต่อท้ายดังแสดงในตาราง 22

ตาราง 22 วิธีเขียนตัวเลขในระบบฐานต่าง ๆ

ฐาน	วิธีเขียนเลขโดยใช้ตัวอักษรติดท้าย	วิธีเขียนเลขด้วยตัวเลขห้อย
2	NnnB	Nnn ₂
8	nnnO หรือ nnnQ	nnn ₈
10	nnnD หรือ nnnT	nnn ₁₀
16	NnnH	nnn ₁₆

4.8.1 รหัส (Code) และการรหัส (Coding)

ดังได้กล่าวมาแล้วในหัวข้อก่อนว่า การทำงานภายในเครื่องคอมพิวเตอร์ใช้ระบบเลขฐานสอง ดังนั้นคำสั่งและข้อมูลต่าง ๆ จึงต้องเข้ารหัสเป็นเลขฐานสองโดยสิ้นเชิง แต่ในการเขียนรหัสของคำสั่งหรือข้อมูลเหล่านี้ สำหรับให้คนอ่าน ปัจจุบันนิยมเขียนเป็นเลขฐานสิบหก ซึ่งถือว่าเป็นรหัสย่อยของเลขฐานสอง ยกตัวอย่างเช่น 7A เป็นรหัสของคำสั่งสำหรับไมโครโปรเซสเซอร์เบอร์ Z80 เมื่อสั่งให้ทำการย้ายข้อมูลจากเรจิสเตอร์ (Register) D มาไว้ที่เรจิสเตอร์ A รหัส 7A เป็นรหัสย่อเพื่อความสะดวกของคนเท่านั้น แต่รหัสที่ไมโครโปรเซสเซอร์จะสามารถเข้าใจและทำตามได้ต้องอยู่ในรูปของเลขฐานสองคือ 01111010 รหัส 7A หรือ 01111010 นี้เรียกว่า รหัสคำสั่ง (Instruction Code)

นอกจากรหัสคำสั่งแล้วยังมีรหัสอีกประเภทหนึ่งคือ รหัสเพื่อการสื่อสาร เนื่องจากเราต้องการสื่อสารกับคอมพิวเตอร์ด้วยข้อความที่เป็นภาษามนุษย์ จึงต้องมีการเข้ารหัสตัวอักษร ตัวเลขเครื่องหมายคณิตศาสตร์ ตลอดจนเครื่องหมายวรรคตอนต่าง ๆ ให้เป็นตัวเลขฐานสองด้วย ในปัจจุบันมีรหัสมาตรฐานที่ใช้กันอยู่ 2 ระบบ คือ EBCDIC CODE ของบริษัท IBM กับ ASCII CODE (American Standard Code for Information Interchange) สำหรับรหัสภาษาไทยที่ใช้กับเครื่องคอมพิวเตอร์ก็ตั้งขึ้นโดยอาศัยหลักการอย่างเดียวกัน ปัจจุบันได้มีการกำหนดรหัสมาตรฐานภาษาไทยขึ้นแล้วคือ รหัส สมอ.

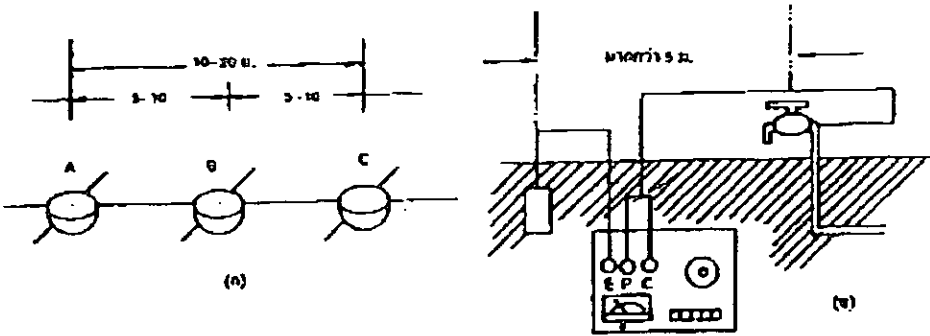
รหัสอีกประเภทหนึ่ง ซึ่งใช้ในการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์เชื่อมโยงต่าง ๆ เรียกว่า รหัสควบคุม (Control Code) รหัสควบคุมนี้ความจริงเป็นส่วนหนึ่งของรหัสสื่อสาร แต่เป็น部分ที่ไม่ได้แทนตัวอักษรตัวเลขหรือเครื่องหมาย เช่น ^P (อ่านว่า Control - p) ซึ่งตรงกับ OF₁₆ เป็นรหัสที่ใช้สั่งเครื่องพิมพ์ เป็นต้น

5. การวัดประสิทธิภาพ

5.1 วิธีวัดค่าความต้านทานของการต่อลงดิน

วิธีที่ใช้วัดค่าความต้านทานของการต่อลงดินมีอยู่หลายวิธี แต่ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายมีอยู่ 5 วิธี คือ

5.1.1 Three-Electrode Method ก่อนจะทำการวัด จะต้องต่อวงจรดังภาพประกอบ 127 ให้เสร็จเรียบร้อยเสียก่อน โดย A เป็นแท่งหลักสายดินที่ตอกลงไปในดินและต้องการวัดค่ามี B และ C เป็นแท่งหลักสายดินช่วย (ใช้ชั่วคราว) โดยทั่วไปจะปักระยะระหว่าง A และ B ประมาณ 5 – 10 เมตร และระยะระหว่าง A กับ C จะเป็น 2 เท่า ของระยะห่างระหว่าง A กับ B (ประมาณ 10 – 20 เมตร) และควรปักให้อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกัน



ภาพประกอบ 127 วงจรการต่อเพื่อวัดค่าความรอนของการต่อลงดินแบบ Three-Electrode Method

(1) การต่อแบบใช้แท่งหลักสายดินช่วย วิธีนี้จะได้อ่านค่าความต้านทานที่ถูกต้องใกล้เคียงกับค่าจริงมากที่สุด ก็ต่อเมื่อความต้านทานของแท่งหลักสายดินทั้งสามตัวมีค่าใกล้เคียงกัน

(2) การต่อแบบใช้ท่อประปาที่ฝังอยู่ในดิน (ท่อน้ำต้องเป็นโลหะเท่านั้น ท่อน้ำที่เป็นไวโนลใช้ไม่ได้) โดยให้ระยะห่างระหว่างแท่งหลักสายดินกับท่อประปาไม่ควรน้อยกว่า 5 เมตร วิธีนี้จะใช้ได้ผลก็ต่อเมื่อค่าความต้านทานของการต่อลงดินของท่อประปาจะต้องมีค่าน้อยมาก เมื่อเทียบกับความต้านทานของสายดิน

ภาพประกอบ 127 เมื่อใช้บริดจ์มอเตอร์วัดค่าความต้านทานของแท่งหลักสายดินแต่ละคู่โดยให้

$$R_x = R_A + R_B$$

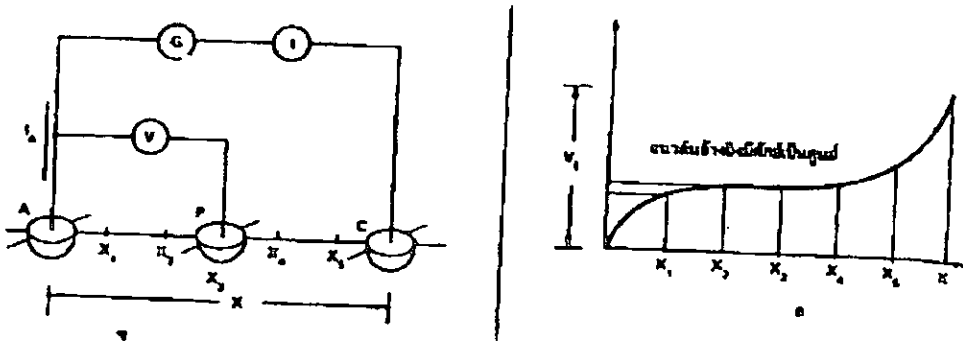
$$R_y = R_B + R_C$$

$$R_z = R_C + R_A$$

แก้สมการข้างบนจะได้

$$R_A = \frac{R_x + R_z + R_y}{2}$$

5.1.2 Fall-of-potential method วิธีการวัด ให้ต่อวงจรดังภาพประกอบ 128



ภาพประกอบ 128 คือ แท่งหลักสายดินที่ต้องการทราบค่าความต้านทานเมื่อต่อลงไปในดิน

P คือ แท่งหลักสายดินช่วย (Auxiliary electrode) เพื่อวัดกระแสไฟฟ้าไหลผ่านดิน

C คือ แท่งหลักสายดินช่วยเพื่อวัดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อม

เมื่อต่อวงจรตามรูปเรียบร้อยแล้ว (จัดระยะห่างระหว่างแท่งหลักสายดินทั้งสามแท่งเช่นเดียวกับการวัดวิธีแรก) ให้ป้อนแรงดันไฟฟ้าให้แก่วงจร จนกระทั่งแอมมิเตอร์อ่านค่าได้ประมาณ 3 แอมป์ บันทึกค่าที่อ่านได้จากโวลท์มิเตอร์

ขยับ P เข้าหา A และ C ครึ่งละ 3 เมตร (ระวังแรงดันที่ป้อนให้กับวงจรด้วย ควรปลดแหล่งจ่ายออกเสียก่อนหากทำได้) บันทึกค่าที่อ่านได้จากโวลท์มิเตอร์ หากค่าที่อ่านได้จากการวัดทั้งสามครั้งเท่ากัน แสดงว่าแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมดินอิ่มตัวแล้ว (saturated) ก็จะได้ค่าความต้านทานของการทดลองดินดังสมการ

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

หากค่าที่อ่านได้ไม่เท่ากัน ให้ขยับ C ออกไปอีก แล้วทำการวัดใหม่ตามวิธีการข้างต้นอีกครั้ง ข้อควรระวัง อย่าวัดขณะที่ฝนตกหรือร่างกายเปียกชื้น

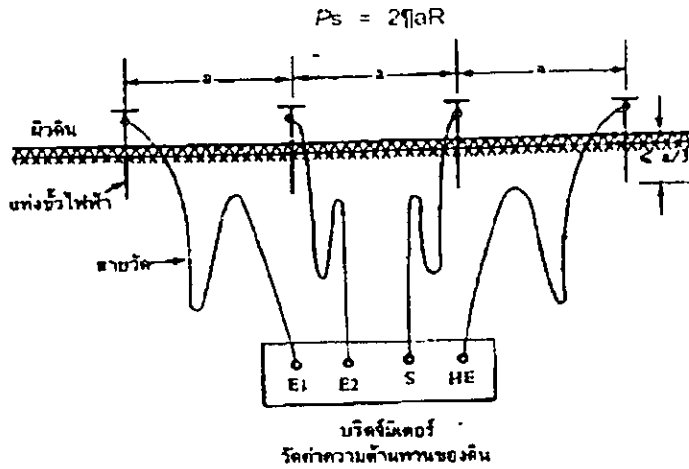
เส้นกราฟภาพประกอบ 128 อธิบายได้ว่า แรงดันไฟฟ้าต่อลงดิน V_E ซึ่งเป็นแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่แท่งหลักสายดินเทียบกับแนวดินอ้างอิง (ตำแหน่งผิวดินที่มีศักย์เป็นศูนย์) จะเพิ่มขึ้นโดยแปรผันตามระยะห่างออกจากแท่งหลักสายดิน A ส่วนช่วงกลาง ระหว่างแท่งหลักสายดิน A กับแท่งหลักสายดินช่วย C จะไม่มีความแตกต่างของศักย์ไฟฟ้าและแรงดันไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นอีกครั้งหนึ่ง เมื่อขยับแท่งหลักสายดินช่วย P เข้าใกล้แท่งหลักสายดินช่วย C จากผลลัพธ์ที่ได้ดังกราฟนี้แสดงว่าค่าความต้านทานของดินจะมีอยู่เฉพาะที่แท่งสายดิน A และ C และบริเวณใกล้เคียงโดยรอบแท่งหลักสายดินเท่านั้น เรียกค่าความต้านทานนี้ว่า “ค่าความต้านทานแผ่กระจาย” ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสัดส่วนของแรงดันไฟฟ้าต่อดินกับกระแสไฟฟ้าลงดิน

กระแสไฟฟ้าที่ไหลระหว่างแท่งหลักสายดิน A และ C จะมีความหนาแน่นมากที่ผิวของแท่งหลักสายดินทั้งสอง สามารถแผ่กระจายออกเป็นบริเวณกว้างและลึกลงสู่ใต้พื้นดิน ทำให้มีความหนาแน่นของกระแสไฟฟ้าต่ำลงไปเรื่อย ๆ การแผ่กระจายของกระแสไฟฟ้าสลับจะลึกลงสู่ดินได้มากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

ได้มีการทดลองต่อ แท่งหลักสายดินรูปทรงกระบอกลงไปในดินที่มีค่าความต้านทานจำเพาะสม่ำเสมอ (Uniform soil resistivity) แล้ววัดแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมที่ระยะห่างจากแท่งหลักสายดิน 1 เมตรปรากฏว่าวัดได้ถึง 75 – 80% ของแรงดันไฟฟ้าต่อดินทั้งหมด V_B เลย์ทีเดียว

5.1.3 วิธีการของ Wenner วิธีการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินของ Wenner นั้นเป็นวิธีการวัดที่ใช้แท่งขั้วไฟฟ้าจำนวน 4 ขั้ว ไปปักไว้บนพื้นดินที่ต้องการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดิน โดยปักให้อยู่ในแนวเดียวกัน มีระยะห่าง a ระหว่างแท่งขั้วไฟฟ้าทั้ง 4 เท่ากันและปักลงที่ความลึกไม่เกิน $a/3$ แท่งขั้วไฟฟ้าทั้ง 4 จะต่อเข้ากับบริดจ์มิเตอร์วัดค่าความต้านทานของดิน ซึ่งมีขั้วต่อสาย 4 ขั้วเช่นกันระหว่างแท่งขั้วไฟฟ้ากับขั้วต่อของบริดจ์มิเตอร์ปกติจะถูกม้วนเก็บเป็นขดไว้ เพราะฉะนั้น เวลาใช้จะต้องคายออกให้เป็นเส้นทั้งหมดเพื่อไม่ให้เกิดการเหนี่ยวนำใด ๆ ขึ้นที่สายวัดได้ ดังแสดงในภาพประกอบ 129

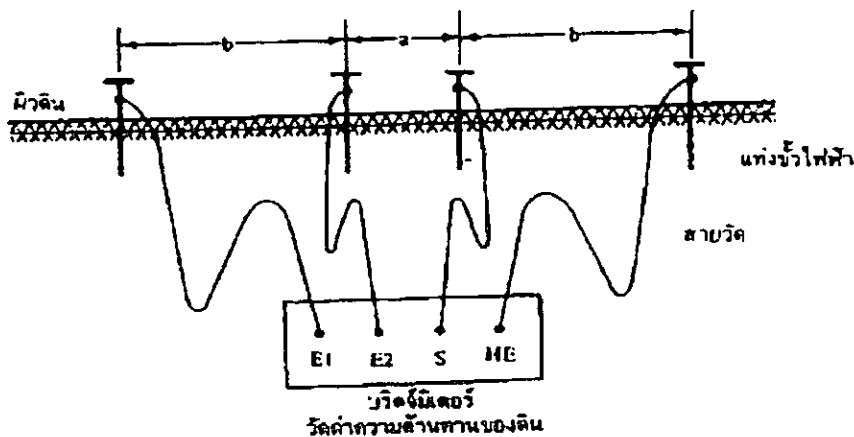
แท่งขั้วไฟฟ้าที่อยู่ด้านนอกสุดทั้งสองจะถูกจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ I จากบริดจ์มิเตอร์ให้ลงสู่ใต้ดิน และทำให้แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมระหว่างแท่งขั้วไฟฟ้าด้านในทั้งสอง U ซึ่งภายในตัวบริดจ์มิเตอร์จะแสดงผลจากสัดส่วนของ U/I ซึ่งเท่ากับค่าความต้านทาน R และค่าความต้านทานจำเพาะของดินที่ปรากฏจากการวัด ρ_s ขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานของดินที่วัดได้ R จาก



ภาพประกอบ 129 ลักษณะของการปักแท่งขั้วไฟฟ้าในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินของ Wenner

วิธีการของ Wenner นี้จะวัดค่าความต้านทานของดิน จากผิวดินลงไปถึงความลึกเท่ากับระยะห่างของแท่งขั้วไฟฟ้า a และค่าความต้านทานจำเพาะที่หาได้ P_s ก็ไม่ใช่ผลลัพธ์จากค่าความต้านทานจำเพาะของดินในชั้นต่าง ๆ เฉลี่ย ถ้าลักษณะของดินมีลักษณะเอกพันธ์ (ดินชนิดเดียวกันหมด) ค่าความต้านทานจำเพาะที่ได้จากสมการด้านบน $P_s = P_E$

5.1.4 วิธีการของ Schlumberger จะแตกต่างไปจากของ Wenner คือ ระยะห่างของแท่งขั้วไฟฟ้าที่ปักอยู่ด้านในทั้งสอง ให้มีระยะห่าง a เช่น $a = 1$ เมตร และแท่งขั้วไฟฟ้าที่ปักอยู่ด้านนอกทั้งสอง ให้ห่างจากแท่งขั้วไฟฟ้าที่ปักอยู่ด้านในทั้งสองเท่ากับ b ดังแสดงในภาพประกอบ 130 ซึ่งตลอดของการวัดซ้ำหลาย ๆ ครั้ง ให้ระยะห่าง a คงที่ไว้เสมอ และเปลี่ยนแปลงเฉพาะระยะห่าง b เท่านั้น ค่าความต้านทานของดินที่วัดได้นำเข้าสมการข้างล่างเพื่อคำนวณหาค่าความต้านทานจำเพาะของดินจาก



ภาพประกอบ 130 ลักษณะของการปักแท่งขั้วไฟฟ้าในการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินของ Schlumberger

วิธีการของ Schlumberger เหมาะสมกับการวัดค่าความต้านทานจำเพาะของดินในที่พื้นดินมีบริเวณน้อยโดยเฉพาะอย่างยิ่งพื้นที่ที่ต้องการปักแท่งขั้วไฟฟ้าที่อยู่ด้านในทั้งสองมีจำกัด (ระยะห่าง a) ผลลัพธ์ของการวัดด้วยวิธีของ Schlumberger จะได้ค่าความต้านทานจำเพาะของดินถึงที่ระดับความลึกเท่ากับระยะ b เมื่อ $b > a$ แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมระหว่างแท่งขั้วไฟฟ้าด้านในทั้งสองจะมีค่าต่ำ ดังนั้น การวัดค่าความต้านทานของดินนี้ถ้าระยะห่าง b มีค่ามากบริดจ์มิเตอร์จะต้องมีย่านวัด R ต่ำ ๆ ถึงจะวัดได้

5.1.5 การวัดค่าความต้านทานการต่อลงดินโดยใช้ earth tester เครื่องมือวัดชนิดนี้ใช้แบตเตอรี่เป็นแหล่งจ่ายไฟ ใช้ระบบทรานซิสเตอร์ ทำให้สามารถอ่านค่าความต้านทานได้โดยตรงจึงเป็นที่นิยมใช้กันทั่วไป

ข้อควรระวังในขณะที่ทำการทดสอบ

1. ในการทดสอบ จะใช้จุดที่ฝังขั้วดิน E เป็นหลัก (ไม่ใช่ใช้อุปกรณ์ที่ถูกป้องกันเป็นหลัก) ฝังขั้วไฟฟ้าที่ใช้ในการวัด P และ C ให้อยู่ในแนวเส้นตรงเดียวกับขั้วดิน E ในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง โดยมีระยะห่าง 10 เมตร และ 20 เมตร ตามลำดับ
2. ในการทดสอบ ถ้าหากว่าเครื่องวัดมีความไวสูงเกินไปให้ดึงขั้ว P ออก แต่ถ้าเครื่องวัดมีความไวต่ำให้ใช้สารละลายที่นำไฟฟ้าได้ดี เช่น น้ำเกลือเทราดบริเวณขั้ว P และ C

6. การออกแบบและสร้างวงจรเครื่องมือวัดจุดลงดินแบบดิจิตอล

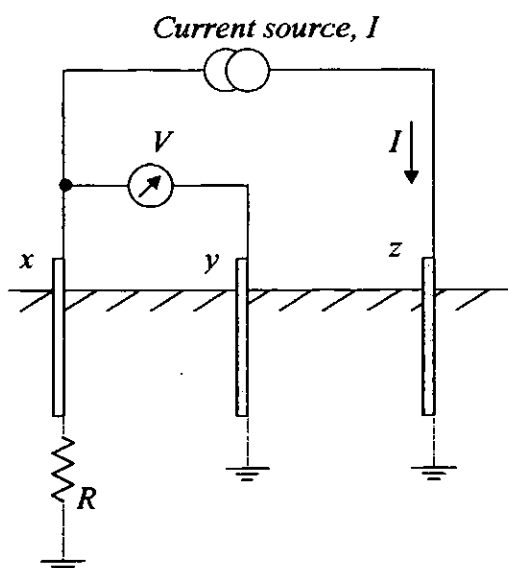
จากการศึกษาการใช้งานของเครื่องมือวัดที่มีใช้งานในบริษัท และจากการค้นคว้าหาข้อมูลเพิ่มเติม ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบเครื่องมือวัดความต้านทานจุดลงดินโดยใช้หลักการพื้นฐานกฎของโอห์ม ซึ่งมีหลักการทำงานดังนี้

6.1 หลักการของการออกแบบชุดเครื่องมือวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอล

จากกฎพื้นฐานทางอิเล็กทรอนิกส์ที่แสดงถึงความสัมพันธ์ของ แรงดัน กระแส และ ความต้านทาน ที่เป็นที่รู้จักกันดีในกฎที่ชื่อว่า กฎของโอห์ม (Ohm's Law) ดังสามารถแสดงความสัมพันธ์เป็นสมการได้ดังนี้

$$R = V/I \quad (6.1)$$

ซึ่งจากกฎพื้นฐานนี้ ทำให้ผู้ออกแบบสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการออกแบบชุดเครื่องมือวัดความต้านทานจุดลงดินได้ ดังแสดงได้ดังนี้



ภาพประกอบ 131 หลักการในการวัดหาความต้านทานในดิน

จากภาพประกอบ 131 เป็นหลักการในการวัดหาความต้านทานในดิน โดยมีแท่งอิเล็กโทรด 3 แท่ง คือแท่งอิเล็กโทรด X แท่งอิเล็กโทรด Y และแท่งอิเล็กโทรด Z ปักเรียงกันเป็นแนวเดียวกัน โดยที่แต่ละแท่งอิเล็กโทรดจะต้องปักให้ห่างกันอย่างน้อย 5 เมตร นอกจากนี้ยังต้องประกอบไปด้วยวงจรจ่ายกระแส และวงจรวัดแรงดันซึ่งจะอธิบายถึงรายละเอียดต่อไป

แหล่งจ่ายกระแสสลับ (AC current source, I) จะผลิตกระแสจ่ายให้ไหลผ่านแท่งอิเล็กโทรด Z ด้วยปริมาณกระแส i_o และจะไหลกลับเข้าที่แท่งอิเล็กโทรด X และเนื่องด้วยการปักแท่งอิเล็กโทรดทั้งสามในแนวเดียวกัน ทำให้เราสามารถประมาณได้ว่า กระแสที่ไหลออกจากอิเล็กโทรด Z จะไหลผ่านอิเล็กโทรด Y และอิเล็กโทรด X ตามลำดับ และระหว่างแท่งอิเล็กโทรด Z และ อิเล็กโทรด X จะมีค่าความต้านทานในดิน R ที่เราต้องการวัด ดังนั้นถ้าเรานำโวลต์มิเตอร์มาวัดระหว่างอิเล็กโทรด X และ อิเล็กโทรด Y แล้วนำแรงดันที่วัดได้หารด้วยกระแสที่จ่ายลงไป จะได้ค่าความต้านทาน R นั้นเอง

จากหลักการในการทำงานของเครื่องมือวัด สามารถแบ่งออกเป็นส่วนประกอบต่างๆ ที่สำคัญได้ดังนี้คือ

6.1.1 แหล่งจ่ายกระแส (Current Source)

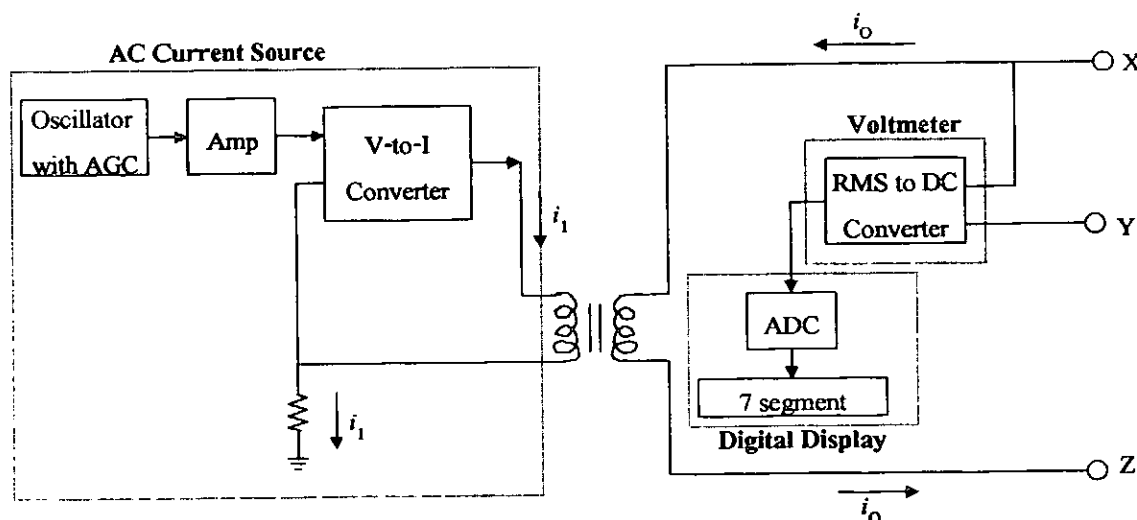
6.1.2 เครื่องวัดแรงดัน (Volt Meter)

6.1.3 ส่วนแสดงผล (Display)

โดยทั้งสามส่วนที่สำคัญนี้ยังประกอบไปด้วยวงจรต่างๆ ภายในอีกมาก ซึ่งจะขออธิบายอย่างละเอียดในหัวข้อต่อไป

6.2 ส่วนประกอบต่างๆ ของชุดเครื่องมือวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอล

จากหลักการเบื้องต้นดังกล่าว ผู้ออกแบบสามารถนำมาเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรม ดังแสดงในภาพประกอบ 132

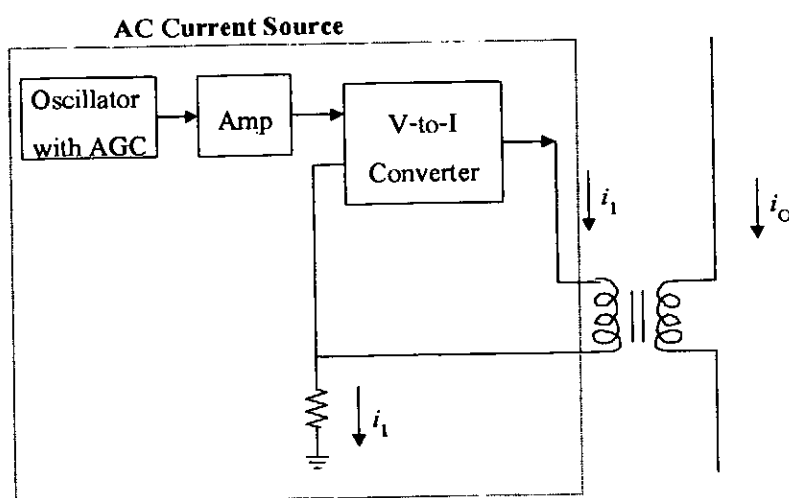


ภาพประกอบ 132 บล็อกไดอะแกรมของเครื่องมือวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอล

การทำงานของบล็อกไดอะแกรมในภาพประกอบ 132 นี้จะสอดคล้องกับการทำงานของหลักการในการทำงานดังที่กล่าวในหัวข้อที่ 6.1 ซึ่งสามารถอธิบายการทำงานแยกเป็นส่วนๆ ได้ดังนี้

6.2.1 แหล่งจ่ายกระแสสลับ

วงจรแหล่งจ่ายกระแสสลับที่ผู้ออกแบบได้นำมาเสนอในงานวิจัยนี้ ประกอบไปด้วย วงจรแหล่งกำเนิดสัญญาณแรงดันที่มีชุดควบคุมขนาดอัตโนมัติ (Oscillator with Automatic Gain Control) วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier) และ วงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส (Voltage to Current Converter หรือ Transconductor) ซึ่งวงจรต่างๆ มีการต่อเชื่อมกันดังสามารถแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังภาพประกอบ 133



ภาพประกอบ 133 บล็อกไดอะแกรมของแหล่งจ่ายกระแส

หลักการในการทำงานของแหล่งจ่ายกระแสตามภาพประกอบ 133 คือ วงจรแหล่งกำเนิดสัญญาณแรงดันแบบที่สามารถควบคุมระดับแรงดันให้คงที่ จะให้กำเนิดแรงดันสลับที่มีขนาดคงที่ แต่สัญญาณที่ได้จะมีขนาดไม่สูงพอที่จะนำไปใช้งานได้ ดังนั้นแรงดันสลับนั้นจึงถูกนำไปขยายด้วยวงจรขยายแรงดัน ซึ่งในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ใช้วงจรขยายแบบกลับเฟส ซึ่งเป็นวงจรที่สามารถควบคุมอัตราขยายได้ง่าย และสามารถสร้างได้ในราคาที่เหมาะสม และเฟสที่เปลี่ยนแปลงก็ไม่มีผลต่อการทำงานของวงจร เมื่อขยายขนาดของแรงดันสลับได้ตามที่ต้องการแล้ว จากนั้นแรงดันดังกล่าวจึงจะถูกเปลี่ยนเป็นกระแส ด้วยวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส ซึ่งจะนำไปจ่ายให้กับอิเล็กทรอนิกส์ที่ปักลงไปบนดินขณะต้องการวัดความต้านทานที่จุดนั้น

ในการออกแบบแหล่งจ่ายกระแสขึ้น เพื่อความแม่นยำ ผู้วิจัยจะตั้งค่ากระแสไว้สามระดับ คือ 10 มิลลิแอม 1 มิลลิแอม และ 0.1 มิลลิแอม ซึ่งการทำงานในวงจรย่อยต่างๆ ในแหล่งจ่ายกระแสนี้จะได้อธิบายในรายละเอียดต่อไปดังนี้

6.2.1.1 แหล่งกำเนิดสัญญาณแรงดันที่มีชุดควบคุมขนาดอัตโนมัติ

6.2.1.2 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier)

6.2.1.3 วงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส (Voltage to Current Converter หรือ Transconductor)

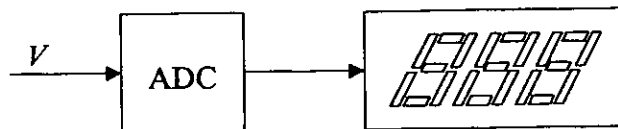
6.2.2 เครื่องวัดแรงดัน

6.2.2.1 RMS to DC Converter

เนื่องจากแรงดันที่จะวัดเป็นแรงดันสลับซึ่งขนาดของสัญญาณจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ดังนั้น ในการหาขนาด ณ ช่วงเวลาหนึ่ง จึงต้องหาเป็นค่ารากของค่าเฉลี่ยกำลังสอง (root mean square) ของสัญญาณหนึ่งคาบซึ่งจะได้เป็นค่าคงที่ ซึ่งในที่นี้จะใช้แปลงค่า RMS เป็นแรงดันไปตรง (DC voltage) และถ้าค่าความต้านทานในดินเปลี่ยนไป ค่ารากของค่าเฉลี่ยกำลังสองของแต่ละคาบจะมีค่าเปลี่ยนไปด้วย (เนื่องจากกระแสคงที่) ดังนั้น ค่าแรงดันตรงจะมีค่าขึ้นอยู่กับความต้านทานในดินที่ต้องการวัด

6.2.3 ส่วนแสดงผล

ส่วนแสดงผลนี้ ประกอบไปด้วย วงจรเปลี่ยนสัญญาณอนาลอก เป็นสัญญาณดิจิทัล (Analog to Digital Converter : ADC) และ เจ็ดเซกเมนต์ (7 segments) แบบ 3 หลัก ซึ่งสามารถแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังนี้



ภาพประกอบ 134 ส่วนแสดงผล

7. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เบญจวรรณ บุณยะดิลก (2537 : 25) ได้ศึกษาโครงการติดตั้งโทรศัพท์ โดยภาคเอกชน ได้กล่าวถึงปัญหาและอุปสรรค ที่ทำให้ องค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย ไม่สามารถขยายเลขหมายคู่สายสนองความต้องการของประชาชน ได้ทันเวลา ซึ่งมีปัญหาการขาดแคลนวัสดุอุปกรณ์ ในการดำเนินการ วางคู่สายโทรศัพท์ ซึ่งประชาชนได้ยื่นคำขอจองไว้แล้วนั้น เมื่อองค์การโทรศัพท์ฯ จะดำเนินการต้องใช้ อุปกรณ์ ต่างๆ สำหรับขยายสายตอนนอก แต่ประเทศไทยมีบริษัทที่มีโรงงานผลิตอุปกรณ์ขยายสายตอนนอกอยู่ 8 บริษัท ซึ่งเมื่อมีการเร่งดำเนินการขยายบริการ บริษัทไม่มีกำลังผลิตอุปกรณ์ได้ทันและเพียงพอแก่ความต้องการที่องค์การโทรศัพท์ฯ ต้องการได้ และรัฐบาลไม่มีนโยบายให้ซื้ออุปกรณ์ดังกล่าวจากต่างประเทศ เพราะมีราคาสูงมาก ดังนั้นวัสดุอุปกรณ์จึงเป็นปัญหาที่สำคัญอีกปัญหาหนึ่งขององค์การโทรศัพท์ฯ

บงยุทธ วิษุธริตานต์ (2541 : 3-4) ได้ออกแบบและสร้างชุดเครื่องมือวัดทรานซิสเตอร์ ซึ่งการใช้เครื่องเขียนกราฟลักษณะสมบัติของทรานซิสเตอร์ สามารถเขียนได้หลายวิธีเช่นการใช้เครื่องเขียนกราฟลักษณะสมบัติของสารกึ่งตัวนำ (Curve tracer) ซึ่งจะแสดงผลเป็นภาพบนจอภาพ การใช้คอมพิวเตอร์ และการใช้เครื่องมือวัดแรงดันไฟฟ้า (Voltmeter) เครื่องมือวัดกระแสไฟฟ้า (Ammeter) แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงชนิดปรับค่าแรงดันขาออกได้ร่วมกันวัดค่าต่างๆ แล้วนำมาทำการเขียนกราฟในตารางกราฟ การใช้เครื่องเขียนกราฟลักษณะสมบัติของสารกึ่งตัวนำ และใช้คอมพิวเตอร์ เขียนกราฟลักษณะสมบัติของทรานซิสเตอร์ขึ้นต้นมาแล้ว เครื่องมือมีราคาแพง และมีใช้ในห้องปฏิบัติการของบริษัทหรือสถาบันการศึกษาขนาดใหญ่ เช่น มหาวิทยาลัย

วิทยา ภูสันติสัมพันธ์ (2526 : 57-62) ได้นำเสนอเครื่องตรวจสอบทรานซิสเตอร์ ซึ่งสามารถวัดอัตราขยายกระแสของทรานซิสเตอร์ทั้งชนิด NPN และ PNP มีช่วงการวัดแบ่งออกเป็น 3 ช่วงคือ 0-100, 0-500, 0-1000 สามารถหากระแสรั่วไหลของทรานซิสเตอร์ และไดโอดได้

สมชาย สุขพันธ์ (2531 : 156 - 162) ได้ออกแบบสร้างเครื่องวัดคุณสมบัติ ทรานซิสเตอร์ สามารถวัดกระแสรั่วไหล อัตราขยายกระแส แรงดันเบรกดาวน์ วัดได้ทั้งทรานซิสเตอร์ เฟท ไดโอด และ เอสซีอาร์

เพชรดา จินชัย และ สุวรรณ เทคนาคติธรรม (2536) ได้สร้างเครื่องตรวจสอบ คุณสมบัติ ไดโอด และ ทรานซิสเตอร์ โดยดูจากกราฟ I-V characteristic ซึ่งแสดงผลออกทางจอภาพของเครื่องคอมพิวเตอร์ โดยจำกัดค่าสูงสุดไว้ระหว่าง +10 ถึง -10 โวลต์

สรุป

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จะเห็นความสำคัญของระบบลงดินที่มีต่อเครือข่ายสายสัญญาณโทรศัพท์ และระบบไฟฟ้า ซึ่งในการวางระบบเครือข่ายขนาดใหญ่ที่มีความจำเป็นต้องเดินสายสัญญาณเป็นระยะทางไกลๆ มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการป้องกันความเสียหายของระบบจากภัยธรรมชาติ เช่น พายุผ่า ด้วยระบบกราวด์ อีกทั้งระบบกราวด์ยังได้มีส่วนลดค่าใช้จ่ายของสายนำสัญญาณในการเดินสายระบบไฟฟ้าไปในระยะทางไกลๆ โดยการอ้างอิงระดับสัญญาณที่ตำแหน่งต้นทางและปลายทางเทียบกับพื้นผิวโลกหรือระบบกราวด์นั่นเอง

ดังนั้นในการวางระบบเครือข่ายจึงมีความจำเป็นที่จะต้องวางระบบกราวด์ หรือระบบดินที่จุดต่างๆ กันหลายๆ จุด ซึ่งแต่ละจุดบนพื้นผิวโลกอาจจะมีความต้านทานต่อการนำสัญญาณของดินไม่เท่ากัน หากว่าจุดที่ใช้ต่อระบบลงดิน มีความต้านทานมากเกินไป ก็จะทำให้ระบบกราวด์นั้นไม่มีประสิทธิภาพ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการวัดค่าความต้านทานของระบบกราวด์ก่อนที่จะเลือกจุดนั้นเป็นระบบลงดิน แต่ค่าใช้จ่ายสำหรับเครื่องมือที่ใช้วัดระบบกราวด์มีค่าค่อนข้างสูงมาก และยังต้องสั่งซื้อหรือนำเข้าจากต่างประเทศ ทำให้เป็นอุปสรรคในการวางระบบกราวด์ และอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ไฟฟ้าในประเทศประสบปัญหาขัดข้องบ่อยครั้ง

งานวิจัยนี้จะมีส่วนช่วยในการวางระบบกราวด์ให้ดีขึ้น เพิ่มความปลอดภัยได้ยิ่งขึ้น อีกทั้งทำให้การตรวจวัดสะดวกขึ้น และราคาถูกลง โดยใช้อุปกรณ์ที่มีราคาไม่แพง และสามารถหาซื้อได้ง่ายภายในประเทศ มาประกอบกันเป็นวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีขนาดกระทัดรัด ใช้กำลังไฟต่ำ มีความทนทานสูง มีความแม่นยำ และราคาประหยัด โดยการนำเอาวงจรกำเนิดสัญญาณ Wein Bridge ที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน กล่าวคือ สร้างจากออปแอมป์เพียง 1 ตัว ตัวต้านทานและตัวเก็บประจุอีกจำนวนหนึ่ง สัญญาณที่กำเนิดได้จะถูกปรับให้มีขนาดคงที่โดยอัตโนมัติด้วยวงจรควบคุมขนาดสัญญาณอัตโนมัติ (AGC) และปรับขนาดของสัญญาณที่จะใช้เป็นแหล่งจ่ายกระแสโดยวงจรขยายสัญญาณแบบไม่กลับเฟส สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จะถูกแปลงเป็นกระแสสลับ โดยวงจรเปลี่ยนแรงดันเป็นกระแส (V-to-I Converter) ที่ใช้ออปแอมป์ และหม้อแปลง เพื่อใช้ในการทดสอบค่าความต้านทานของระบบดิน โดยวัดค่าความต้านทานของระบบดินจากค่าศักดาที่ตกคร่อมขั้วอิเล็กโตรดที่ปักอยู่บนพื้นดิน ค่าความต้านทานของระบบกราวด์ที่วัดได้แสดงผลเป็นตัวเลขที่สามารถอ่านได้สะดวกกว่าเครื่องมือวัดแบบเข็ม

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการทดลองการออกแบบและการสร้างเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิทัลในระบบงานข่ายสายโทรศัพท์ตอนนอกในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยจะดำเนินการวิจัยตามหัวข้อต่อไปนี้

1. เกณฑ์ข้อกำหนดของการออกแบบและสร้างเครื่องในการวิจัย
2. ลำดับขั้นตอนในการวิจัย

1. เกณฑ์ข้อกำหนดของการออกแบบและสร้างเครื่องในการวิจัย

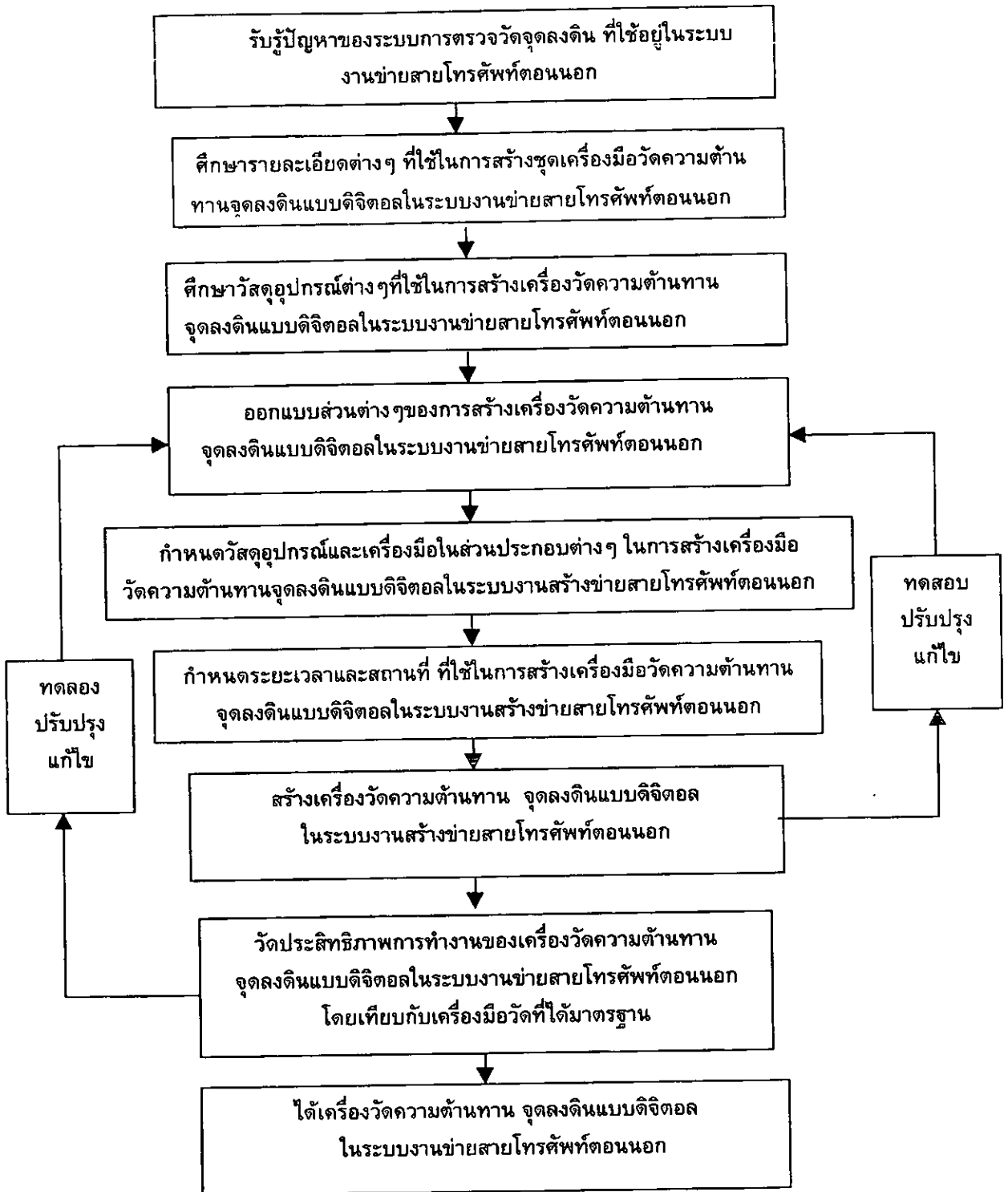
1.1 การออกแบบและการสร้างเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิทัล ในระบบงานข่ายสายโทรศัพท์ตอนนอก ซึ่งมีคุณสมบัติและประสิทธิภาพตามมาตรฐานองค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทยมีส่วนประกอบดังนี้

- 1.1.1 สามารถวัดความต้านทานจุดลงดินได้ตั้งแต่ 0 – 2000 โอห์ม
- 1.1.2 แสดงผลเป็นตัวเลข 3 หลัก
- 1.1.3 ความผิดพลาดในการวัดไม่เกินร้อยละ 5

ซึ่งเกณฑ์และข้อกำหนดต่างๆ เหล่านี้จะนำไปสู่การออกแบบเครื่องวัดความต้านทานลงดินได้ต่อไป

2. ลำดับขั้นตอนในการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยจะดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้



ภาพประกอบ 135 แสดงขั้นตอนในการดำเนินการวิจัย

2.1 รับรู้ปัญหาของระบบการตรวจวัดความต้านทานจุดลงดิน ที่ใช้อยู่ในระบบงานข่ายสาย ตอนนอกตามมาตรฐานองค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย เนื่องจากผู้วิจัยทำงานเกี่ยวข้องกับระบบการสร้างข่ายสาย ซึ่งต้องมีการตรวจสอบความต้านทานจุดลงดินโดยการ ตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินทุกจุดเพื่อให้ได้มาซึ่งระบบที่ดีและปลอดภัยทั้งชีวิตและทรัพย์สิน จากปัญหาที่พบโดยทั้งหมดของเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินที่ใช้ปฏิบัติงานนั้นจะนำเข้ามาจากต่างประเทศและมีราคาแพงซึ่งมีย่านในการวัดเกินความความจำเป็นมาก และการแสดงผลของการวัดเป็นระบบตัวเลขจะทำให้สามารถเพิ่มความถูกต้องและชัดเจนขึ้น

2.2 ศึกษารายละเอียดต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างชุด เครื่องวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอล ตามมาตรฐานองค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย การศึกษารายละเอียดต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างชุดเครื่องมือประกอบด้วย

2.2.1 ศึกษาค้นคว้าจากเอกสารตำราและงานวิจัยเชิงทดลอง ที่เกี่ยวข้องกับการวัดความต้านทานในดิน ตลอดจนการสร้างชุดเครื่องวัดความต้านทานจุดลงดิน

2.2.2 ศึกษาคุณสมบัติของส่วนประกอบต่างๆ ของชุดเครื่องวัดอิเล็กทรอนิกส์ที่มีใช้งานอยู่แล้วในบริษัท เพื่อจัดหาวัสดุ และอุปกรณ์ที่เหมาะสมในราคาต่ำ ประกอบเป็นชุดเครื่องวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอล

2.3 ศึกษาวัสดุอุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการออกแบบและการสร้างเครื่องวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอลตามมาตรฐานองค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทยซึ่งประกอบไปด้วยส่วนต่างๆ ที่สำคัญคือ

2.3.1 แหล่งจ่ายกระแส (Current Source)

2.3.2 เครื่องวัดแรงดัน (Volt Meter)

2.2.3 ส่วนแสดงผล (Display)

2.4 การออกแบบวงจรและส่วนประกอบต่างๆ ของชุดเครื่องวัด และเครื่องมือที่ใช้ในการสร้างเครื่องวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอลตามมาตรฐานองค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย จากการศึกษาการใช้งานของเครื่องวัดที่ใช้งานและจากการค้นคว้าหาข้อมูลเพิ่มเติม ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบเครื่องมือวัดความต้านทานจุดลงดินโดยใช้หลักการพื้นฐานของกฎของโอห์ม ซึ่งมีหลักการทำงานดังนี้

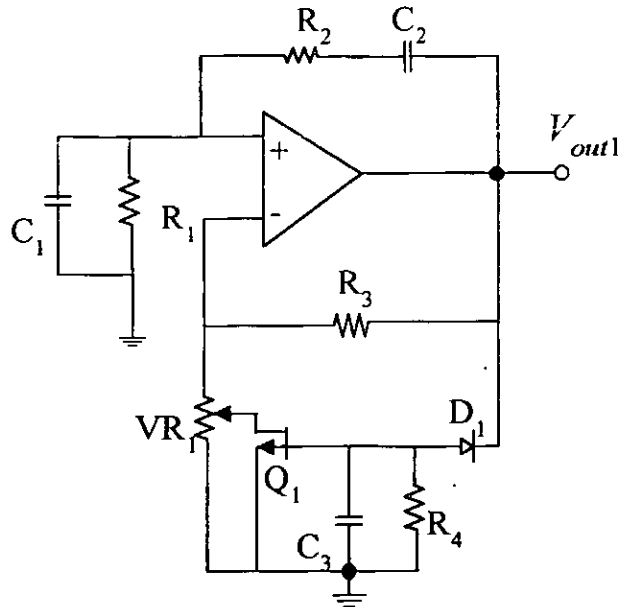
2.4.1 แหล่งจ่ายกระแส (Current Source)

วงจรแหล่งจ่ายกระแสสลับที่ผู้วิจัยได้นำมาเสนอในงานวิจัยนี้ ประกอบไปด้วย วงจรแหล่งกำเนิดสัญญาณแรงดันที่มีชุดควบคุมขนาดอัตโนมัติ (Oscillator with Automatic Gain Control) วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier) และ วงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส (Voltage to Current Converter หรือ Transconductor) ซึ่งวงจรต่างๆ มีการต่อเชื่อมกันดังสามารถแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังภาพประกอบ 140 ซึ่งได้กล่าวไว้ในบทที่ 2 แล้วนั้น

ในการออกแบบแหล่งจ่ายกระแสนั้น เพื่อความแม่นยำ ผู้วิจัยจะตั้งค่ากระแสไว้สามระดับ คือ 10 มิลลิแอม 1 มิลลิแอม และ 0.1 มิลลิแอม ซึ่งการทำงานในวงจรย่อยต่างๆ ในแหล่งจ่ายกระแสนี้จะได้อธิบายในรายละเอียดต่อไปนี้

2.4.1.1 แหล่งกำเนิดสัญญาณแรงดันที่มีชุดควบคุมขนาดอัตโนมัติ

สำหรับวงจรแหล่งกำเนิดสัญญาณแรงดันนี้ ผู้ออกแบบได้เลือกวงจร Wein Bridge [] ซึ่งเป็นวงจรที่สามารถสร้างได้ง่าย ประกอบไปด้วยออปแอมป์ ตัวต้านทาน 4 ตัว คือ R_1 , R_2 , R_3 และ VR_1 และตัวเก็บประจุ 2 ตัว คือ C_1 และ C_2 และสำหรับวงจรที่ใช้ควบคุมขนาดนั้น ประกอบไปด้วย ทรานซิสเตอร์ Q_1 ตัวต้านทาน R_4 ตัวเก็บประจุ C_3 และไดโอด D_1 ดังแสดงในภาพประกอบ 135



ภาพประกอบ 136 แหล่งกำเนิดสัญญาณแรงดันที่มีชุดควบคุมขนาดอัตโนมัติ

วงจรกำเนิดสัญญาณแรงดันนี้สามารถกำหนดความถี่ได้จากตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุ โดยมีเงื่อนไขคือ กำหนดให้

$$\frac{R_3}{VR_1} = \frac{R_2}{R_1} + \frac{C_2}{C_1}$$

(7)

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{R_1 R_2 C_1 C_2}} \quad (8)$$

จากมาตรฐานของเครื่องวัดนี้ กำหนดความถี่ไว้ที่ 500 เฮิรตซ์ ดังนั้น จากสมการที่ (7) และ (8) สามารถหาค่าความต้านทานและตัวเก็บประจุได้ดังนี้ คือ

$$R_1 = 10k\Omega$$

$$R_2 = 100k\Omega$$

$$R_3 = 220k\Omega$$

$$VR_1 = 50k\Omega$$

$$C_1, C_2 = 10k\Omega$$

และผู้ออกแบบได้เลือกอปแอมป์เบอร์ LF356 เนื่องจากเป็นอปแอมป์ที่หาซื้อได้ง่าย และราคาถูกนอกจากนี้ ยังมีส่วนควบคุมขนาดของสัญญาณเอาต์พุตอัตโนมัติ ประกอบไปด้วย ตัวต้านทาน R4 ตัวเก็บประจุ C3 และไดโอด D1 ซึ่งทำงานเป็นวงจรตรวจจับยอดแรงดัน (peak detector) และ เฟตทรานซิสเตอร์ Q1 สำหรับการทำงานของส่วนควบคุมอัตโนมัติสามารถอธิบายได้ดังนี้ คือ เมื่อสัญญาณเอาต์พุต Vout1 มีขนาดเล็กลง จะทำให้แรงดันยอด (peak voltage) ที่ได้จากวงจรตรวจจับยอดแรงดันมีขนาดลดลงด้วย และมีผลให้แรงดันไบอัสที่ขาเบสของเฟตทรานซิสเตอร์มีขนาดลดลง และทรานซิสเตอร์ที่ทำงานใน

ย่านไตรโอด (เสมือนเป็นตัวต้านทาน RDS) ทำตัวเป็นความต้านทานขนาดเล็กลง ขนาดขึ้นอยู่กับตัวต้าน-ทาน VR1 ดังนั้นวงจรกำเนิดสัญญาณแรงดันจะมีอัตราขยายเพิ่มขึ้นดังแสดงได้ในสมการที่ (9)

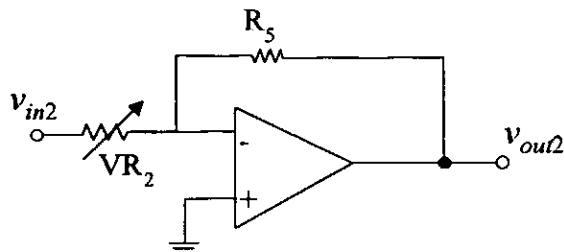
$$gain = \frac{R_3}{VR_1 \parallel R_{DS}} \quad (9)$$

และในทางกลับกัน ถ้าสัญญาณเอาต์พุต V_{out1} มีขนาดเพิ่มขึ้น อัตราขยายของวงจรก็จะมีขนาดลดลง เพื่อรักษาระดับสัญญาณเอาต์พุตให้คงที่นั่นเอง

ซึ่งจากการทดลองวัดสัญญาณที่ได้ จะได้ความถี่ประมาณ 500 เฮิรตซ์ และมีขนาดประมาณ 120 มิลลิโวลต์

2.4.1.2 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส (Inverting Amplifier)

วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟสประกอบด้วยออปแอมป์ และตัวต้านทาน 2 ตัว ซึ่งเป็นวงจรขยายอย่างง่าย แสดงได้ดังภาพประกอบ 137 และมีการกำหนดอัตราขยาย (gain) ได้ด้วยความต้านทาน RV2 และ R5 ซึ่งแสดงได้ดังสมการที่ (10)



ภาพประกอบ 137 วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส

$$gain = -\frac{VR_2}{R_5} \quad (10)$$

ในการกำหนดอัตราขยายนั้นกำหนดได้จาก แรงดันที่วัดได้จากวงจรกำเนิดสัญญาณในหัวข้อที่ 2.4.1.1 และแรงดันอินพุตที่ต้องการป้อนให้กับวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแสซึ่งจะได้กล่าวถึงการกำหนดแรงดันอินพุตนี้ในหัวข้อต่อไป

อัตราขยายที่ต้องการสำหรับวงจรขยายแรงดันนี้ คือ 2 เท่า ดังนั้น จากสมการที่ (10) ทำให้ผู้ออกแบบสามารถกำหนดค่าความต้านทาน RV2 และ R5 ได้ดังนี้

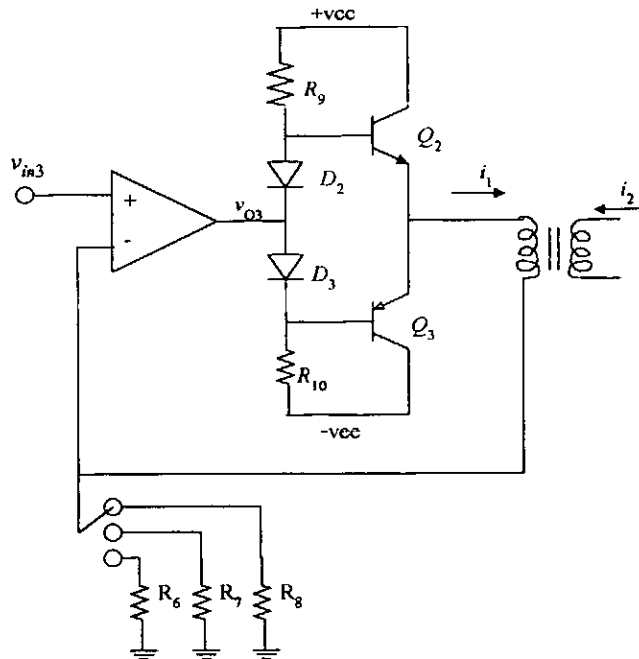
$VR_2 = 50k\Omega$ ซึ่งเป็นตัวต้านทานที่ปรับค่าได้ และปรับไว้ที่ 4 กิโลโอห์ม

$R_5 = 2k\Omega$

และผู้ออกแบบได้เลือกออปแอมป์เบอร์ LF356 เนื่องจากเป็นออปแอมป์ที่หาซื้อได้ง่าย และราคาถูก

2.4.1.3 วงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส (Voltage to Current Converter หรือ Transconductor)

วงจรแปลงแรงดันเป็นกระแสประกอบไปด้วย ออปแอมป์ ตัวต้านทาน R_6 หรือ R_7 หรือ R_8 และเพื่อให้กระแสที่ไหลมีขนาดมากพอ ผู้ออกแบบจึงเลือกใช้วงจรแปลงแรงดันเป็นกระแสที่มีส่วนของวงจรขับกระแสภาคเอาต์พุต ที่ประกอบไปด้วย ไดโอด D2 และ D3 ตัวต้านทาน R9 และ R10 และทรานซิสเตอร์ Q2 และ Q3 ดังแสดงในภาพประกอบ 138



ภาพประกอบ 138 วงจรแปลงแรงดันเป็นกระแสแบบมีวงจรขับกระแส

การทำงานของวงจรนี้สามารถอธิบายได้ดังนี้ คือคุณสมบัติของออปแอมป์ที่ถูกใช้งานในลักษณะป้อนกลับแบบลบ จะทำให้

- แรงดันอินพุตที่ขาบวก $V+$ ของออปแอมป์ มีค่าเท่ากับแรงดันอินพุตที่ขาลบ $V-$ ของออปแอมป์ ($V+ = V-$)

- ไม่มีกระแสไหลเข้าอินพุต

- ความต้านทานอินพุตของออปแอมป์มีค่ามากๆ

- ดังนั้น แรงดันอินพุตของออปแอมป์ ตัวต้านทาน R_6 หรือ R_7 หรือ R_8 และกระแสที่ไหลผ่านจะสามารถหาได้ด้วยความสัมพันธ์กันในกฎของโอห์ม อย่างไรก็ตามสำหรับงานวิจัยนี้ กระแส i_1 ที่ไหลผ่าน ตัวต้านทาน R_6 หรือ R_7 หรือ R_8 นี้ ถูกกำหนดด้วย กระแส i_O และ อัตราส่วนของหม้อแปลงไฟฟ้า (n) ดังนี้

$$i_1 = n \cdot i_O \quad (11)$$

กระแส i_O ถูกกำหนดด้วยมาตรฐานของเครื่องมือวัด [] ชนิดนี้ คือ 10 มิลลิแอมป์ 1 มิลลิแอมป์ และ 0.1 มิลลิแอมป์ และผู้ออกแบบเลือกใช้หม้อแปลงที่มีอยู่คือหม้อแปลงที่มีอัตราขยาย n เท่ากับ 24.4 เท่า ดังนั้น กระแส i_1 ที่กำหนดในวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแส จึงมีค่าเท่ากับ

- 244 มิลลิแอมป์

- 24.4 มิลลิแอมป์ และ

- 2.4 มิลลิแอมป์ ตามลำดับ

นอกจากนี้ผู้ออกแบบยังเลือกความต้านทานไว้ 3 ค่า สำหรับกระแส i_1 ทั้ง 3 ค่า เพื่อให้ได้ค่าแรงดันที่คร่อมตัวต้านทานทุกตัวเท่ากัน โดยที่ความต้านทานทั้งสามที่กำหนดคือ

- 1 โอห์ม
- 10 โอห์ม และ
- 100 โอห์ม ตามลำดับ

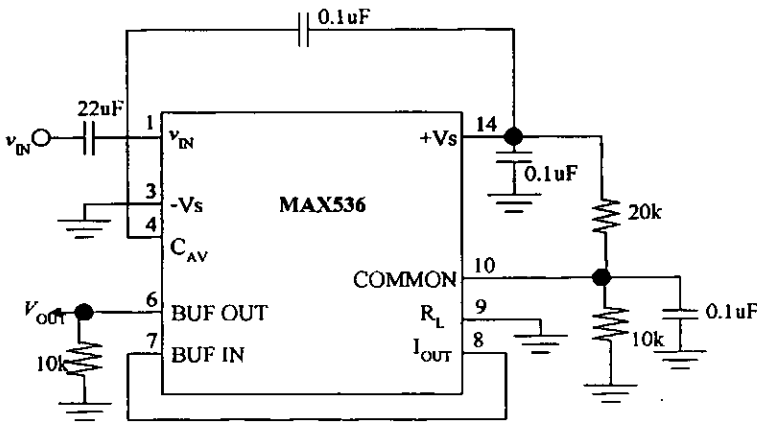
ซึ่งความต้านทานทั้งสามค่านี้ กับกระแส i_1 ทั้งสาม จะให้แรงดันที่คร่อมตัวต้านทานคงที่เท่ากับ 244 มิลลิโวลต์ ซึ่งเป็นแรงดันที่อินพุตของวงจรแปลงแรงดันเป็นกระแสแน่นอน

วงจรขับกระแสภาคเอาต์พุตมีไว้เพื่อขับกระแสให้ได้ปริมาณที่มากขึ้น การทำงานของวงจรขับกระแสภาคเอาต์พุตสามารถอธิบายได้ดังนี้ คือ เมื่อสัญญาณอินพุตที่ขาบวก + ของออปแอมป์ มีแรงดันเป็นบวก + ทำให้เกิดแรงดันเอาต์พุตของออปแอมป์ v_{O3} เป็นบวก และทำให้แรงดันที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์ Q2 มีค่าเท่ากับ $v_{O3}+0.7$ ซึ่งทำให้ทรานซิสเตอร์ Q2 ทำงานและมีกระแสไหลด้วยปริมาณบวก+ ที่มากขึ้น และในทางกลับกัน ถ้าอินพุตที่ขาบวกของออปแอมป์เป็นแรงดันลบ - จะทำให้แรงดันเอาต์พุตของออปแอมป์เป็นลบค่าหนึ่ง ซึ่งทำให้ แรงดันที่ขาเบสของทรานซิสเตอร์ Q3 มีค่า $v_{O3}-0.7$ ซึ่งจะทำให้ทรานซิสเตอร์ Q3 ทำงานและมีกระแสไหลด้วยปริมาณที่เป็นลบ - น้อยลงนั่นเอง

2.4.2 เครื่องวัดแรงดัน

2.4.2.1 RMS to DC Converter

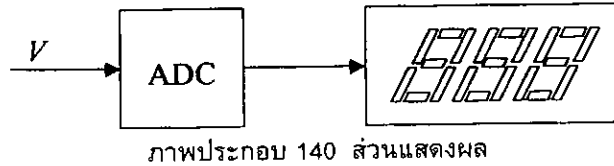
เนื่องจากแรงดันที่จะวัดเป็นแรงดันสลับซึ่งขนาดของสัญญาณจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ดังนั้น ในการหาขนาด ณ ช่วงเวลาหนึ่ง จึงต้องหาค่ารากของค่าเฉลี่ยกำลังสอง (root mean square) ของสัญญาณหนึ่งคาบซึ่งจะได้เป็นค่าคงที่ ซึ่งในที่นี้จะใช้แปลงค่า RMS เป็นแรงดันไปตรง (DC voltage) และถ้าค่าความต้านทานในดินเปลี่ยนไป ค่ารากของค่าเฉลี่ยกำลังสองของแต่ละคาบจะมีค่าเปลี่ยนไปด้วย (เนื่องจากกระแสตก) ดังนั้น ค่าแรงดันตรงจะมีค่าขึ้นอยู่กับความต้านทานในดินที่ต้องการวัดจากหลักการข้างต้น เราสามารถสร้างเป็นวงจรโดยใช้ IC เบอร์ MAX536 ซึ่งเป็น IC สำเร็จภาพประกอบทำหน้าที่เปลี่ยนค่ารากของค่าเฉลี่ยกำลังสองของสัญญาณให้เป็นแรงดันตรง ซึ่งเป็น IC ที่ให้ความสะดวกในการสร้างวงจร และยังให้ความแม่นยำสูงอีกด้วย ดังสามารถแสดงรูปวงจรได้ดังนี้



ภาพประกอบ139 วงจรแปลงค่า RMS เป็นแรงดันไฟตรง

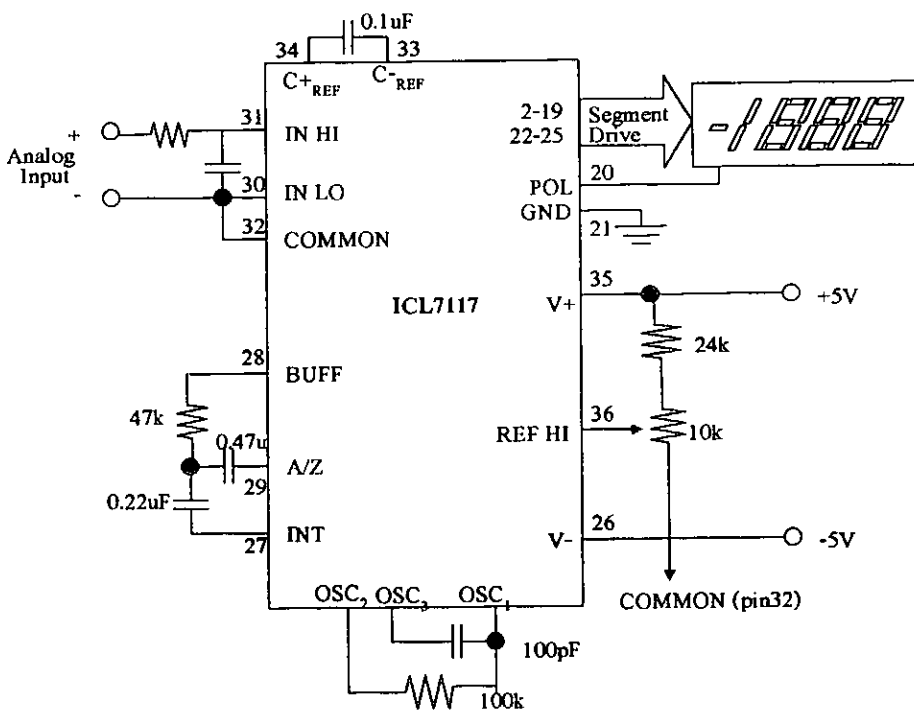
2.4.3 ส่วนแสดงผล

ส่วนแสดงผลนี้ประกอบไปด้วย วงจรเปลี่ยนสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล (Analog to Digital Converter : ADC) และ เจ็ดเซกเมนต์ (7 segments) แบบ 3 หลัก ซึ่งสามารถแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังนี้



2.4.3.1 วงจรเปลี่ยนสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล (Analog to Digital

Converter : ADC) วงจรเปลี่ยนสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัลประกอบไปด้วย IC สำเร็จรูปเบอร์ ICL7117 ซึ่งเป็น IC ที่สามารถแปลงเป็นสัญญาณดิจิทัลและแสดงเป็นเลขหลักสิบได้ 3.5 หลักคือ สามารถแสดงได้ ตั้งแต่ -1999 ถึง 1999 โดยในวงจรจะมีตัวต้านทานและตัวเก็บประจุต่อภายนอกเพียงเล็กน้อย ดังแสดงในภาพประกอบ 141



ภาพประกอบ 141 วงจรเปลี่ยนสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิทัล

หลักในการทำงานของวงจรนี้ คือ แรงดันไฟฟ้าที่ได้จากวงจรแปลงระดับ RMS เป็นระดับแรงดัน DC ซึ่งจะมีค่าแตกต่างกันตามความต้านทานของดินที่กัลลิ่งวัด ซึ่ง IC เบอร์ ICL7117 นี้จะแปลงระดับแรงดันตรงให้เป็นสัญญาณทางดิจิทัล และให้เอาต์พุตที่พร้อมที่จะนำมาป้อนสู่ส่วนแสดงผลแบบ 7 เซกเมนต์ แสดงออกเป็นค่าความต้านทานที่อยู่ในดิน

2.4.3.2 เจ็ดเซกเมนต์ (7 segments) แบบ 3.5 หลักอุปกรณ์เจ็ดเซกเมนต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ใช้จำนวน 4 ตัว

2.5 วัสดุอุปกรณ์ เครื่องมือที่ใช้ในการสร้างเครื่องมือวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอล
การสร้างชุดเครื่องมือวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอล เพื่อการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ใช้วัสดุ
อุปกรณ์ และเครื่องมือต่างๆ โดยมีรายละเอียดดังนี้

2.5.1 วัสดุ อุปกรณ์

2.5.1.1 ตัวต้านทาน ขนาด 0.25 วัตต์ ค่าความผิดพลาด ร้อยละ 5

ค่าความต้านทาน (โอห์ม)	จำนวนที่ใช้
1	1
10	1
100	1
1k	2
2k	1
10k	5
20k	1
47k	1
1M	1

2.5.1.2 ตัวต้านทานชนิดปรับค่าได้

ค่าความต้านทาน	จำนวนที่ใช้
50k	3

2.5.1.3 ตัวเก็บประจุ

ค่าตัวเก็บประจุ (ฟารัด)	จำนวนที่ใช้
0.01u	2
0.1u	3
0.47u	1
22u	1

2.5.1.4 ไอซี

เบอร์	จำนวนที่ใช้
LF356	2
MAX536	1
ICL7117	2
7 segment	4

- 2.5.1.5 กล้อง ขนาด $10 \times 10 \times 8$ นิ้ว
- 2.5.1.6 แผ่นอิพอกซี ขนาด 6×6 นิ้ว
- 2.5.1.7 กรดกัดปรินซ์
- 2.5.1.8 ฟิล์มฉายแสง
- 2.5.1.9 ตะกั่ว
- 2.5.1.10 คีมตัด จำนวน 1 ตัว

2.5.2 เครื่องมือ

- 2.5.2.1 หัวแร้งไฟฟ้า ขนาด 100 วัตต์ จำนวน 1 ตัว
- 2.5.2.2 ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ จำนวน 1 เครื่อง
- 2.5.2.3 เพาเวอร์ซัพพลาย จำนวน 1 เครื่อง
- 2.5.2.4 ออสซิลอสโคป จำนวน 1 เครื่อง

2.6 กำหนดระยะเวลาและสถานที่ ที่ใช้ในการสร้างเครื่องวัดความต้านทานจุดลงดิน แบบดิจิตอลตาม มาตรฐานองค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย ระยะเวลาที่ใช้ในการสร้าง และทดสอบเครื่อง เริ่มตั้งแต่เดือนพฤศจิกายน พ.ศ.2544 ถึง เดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2545 โดยใช้สถานที่ในการทดลอง คือ ห้องทดลองของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

2.7 สร้างเครื่องวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอล ตามมาตรฐานองค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย ตามขั้นตอนและรายละเอียดที่ได้ระบุไว้ในการออกแบบ

2.8 ทดลองใช้เครื่องวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอลตามมาตรฐานองค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย ซึ่งการทดลองใช้เครื่องมือวัดจุดความต้านทานลงดินแบบดิจิตอล มีรายละเอียดดังนี้

2.8.1 ทำการทดสอบหาประสิทธิภาพ โดยการนำเครื่องวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอลที่สร้างขึ้นม่วัดค่าความต้านทานจุดลงดินเทียบกับเครื่องวัดที่ผ่านมาตรฐานองค์การโทรศัพท์ในแต่ละพื้นที่ และนำผลที่ได้มาทำการหาประสิทธิภาพ โดยวัดเป็นสถิติร้อยละ

2.8.2 การวัดด้วยสถิติร้อยละ

$$P = \frac{F}{N} 100$$

P = ร้อยละ

F = ความถี่ที่ต้องการเปลี่ยนแปลงให้เป็นร้อยละ

N = จำนวนความถี่ทั้งหมด

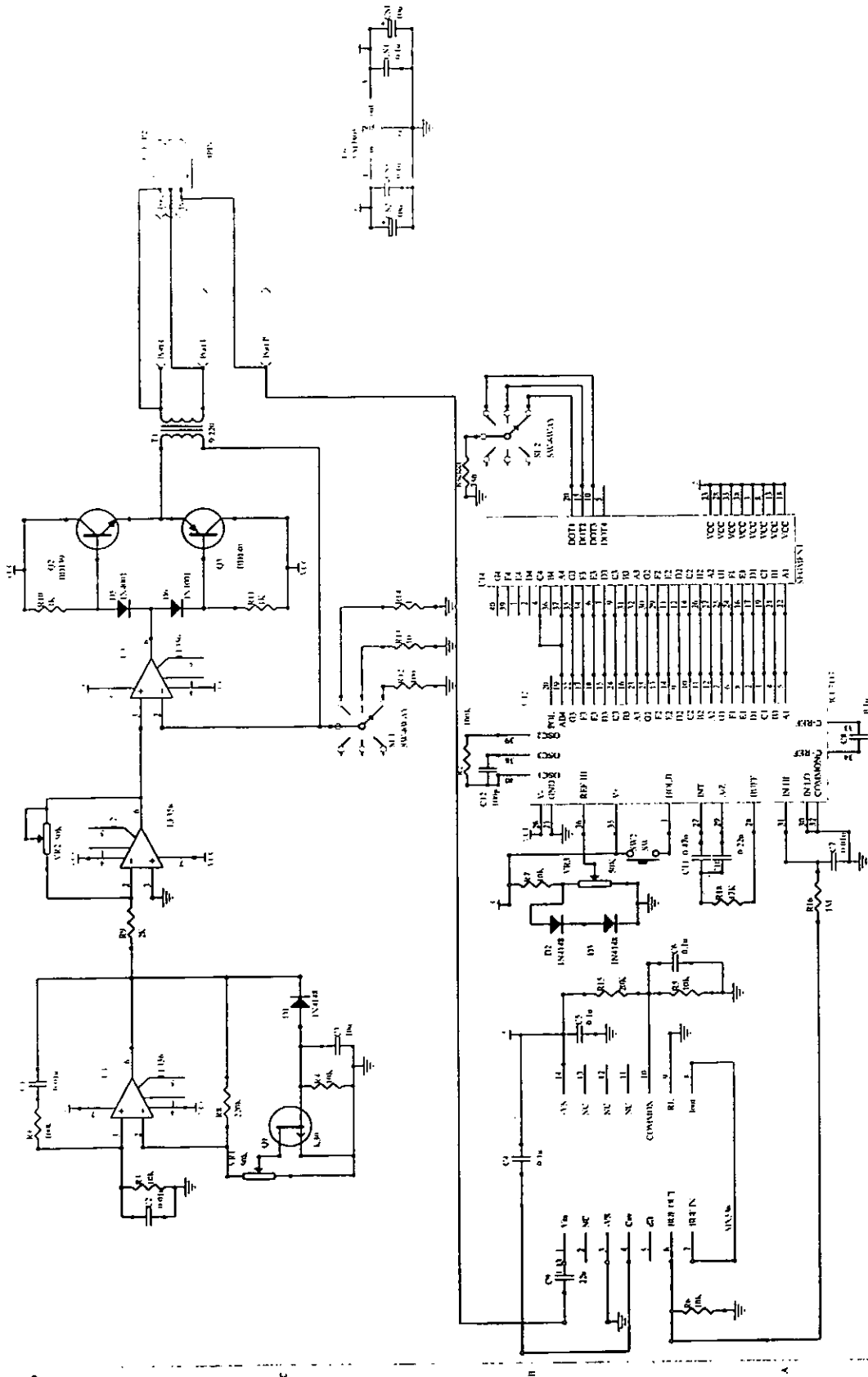
2.8.3 การวัดแนวโน้มเข้าสู่ส่วนกลาง

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{N}$$

$\bar{x}$ = ค่าเฉลี่ย

$\sum x$ = ผลรวมของค่าทั้งหมด

N = จำนวนความถี่ทั้งหมด



ภาพประกอบ 142 วงจรเครื่องวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิทัลในระบบงานโทรศัพท์ตอนนอก

ตาราง 23 การตรวจวัดประสิทธิภาพความต้านทานจุดลงดิน (วัดรวม)

ตำแหน่งที่	ตำแหน่งที่ตรวจสอบ	ลักษณะดิน	ค่าที่วัดได้ (Ω)	
			เครื่องมือมาตรฐานฯ	เครื่องทดสอบ
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				

ตาราง 24 การตรวจวัดประสิทธิภาพความต้านทานจุดลงดิน (วัดแยก)

ตำแหน่งที่	ตำแหน่งที่ตรวจสอบ	ลักษณะดิน	ค่าที่วัดได้ (Ω)	
			เครื่องมือมาตรฐานฯ	เครื่องทดสอบ
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				
9				
10				
11				
12				
13				
14				
15				
16				
17				
18				
19				
20				

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

ผู้วิจัยได้ดำเนินการศึกษาค้นคว้าตามขั้นตอนที่กำหนดไว้ ซึ่งมีรายละเอียดต่าง ๆ โดยออกแบบวงจร และกำหนดวัสดุอุปกรณ์เครื่องมือ ที่ใช้ในการสร้างตามรายละเอียดที่ได้ศึกษาค้นคว้าไว้ และกำหนดระยะเวลาในการสร้างทดสอบปรับปรุงและแก้ไขการทำงานของเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอลในระบบงานสร้างข่ายสายโทรศัพท์ตอนนอก ซึ่งผลการสร้างเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอลในระบบงานสร้างข่ายสายโทรศัพท์ตอนนอก มีดังต่อไปนี้

1. ออกแบบและสร้างแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่ ซึ่งสามารถจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับได้คงที่ 3 ขนาด คือ 10 มิลลิแอมป์ และ 1 มิลลิแอมป์ และ 0.1 มิลลิแอมป์ โดยวงจรจะประกอบไปด้วย วงจรแหล่งกำเนิดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่มีชุดควบคุมขนาดให้มีค่าคงที่อัตโนมัติ วงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส และวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้าเป็นกระแสไฟฟ้า

1.1 ออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่มีชุดควบคุมขนาดของสัญญาณให้คงที่โดยอัตโนมัติ (AGC) ซึ่งจะสร้างสัญญาณความถี่ 500 เฮิรตซ์ มีขนาด 120 มิลลิโวลต์ โดยการใช้ ออปแอมป์ LF356 ร่วมกับทรานซิสเตอร์แบบเฟตในการควบคุมสัญญาณเอาต์พุตให้มีค่าคงที่โดยอัตโนมัติ โดยที่ตัวต้านทาน R4 ตัวเก็บประจุ C₃ และไดโอด D₁ ร่วมกันทำงานเป็นส่วนตรวจจับยอดแรงดันไฟฟ้าเพื่อเป็นแรงดันไฟลบให้การไบอัสวงจร ซึ่งจะส่งผลให้อัตราขยายของ LF356 ที่ใช้ในการกำเนิดสัญญาณมีค่าเปลี่ยนไปผกผันกับขนาดของแรงดันไฟฟ้าเอาต์พุต การทำงานในส่วนควบคุมขนาดสัญญาณให้มีค่าคงที่อัตโนมัติเป็นไปตามความมุ่งหมายของงานวิจัย

1.2 ออกแบบและสร้างวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟสซึ่งเป็นวงจรขยายสัญญาณให้มีขนาดแรงดันไฟฟ้าเพิ่มขึ้นประมาณ 2 เท่า ซึ่งประกอบไปด้วย ออปแอมป์ LF356 และตัวความต้านทานคงที่ขนาด 2 กิโลโอห์ม และความต้านทานปรับค่าได้ ขนาด 50 กิโลโอห์ม ซึ่งเป็นไปตามความมุ่งหมายของงานวิจัย

1.3 ออกแบบและสร้างวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้าเป็นกระแสไฟฟ้า ซึ่งเป็นวงจรที่แปลงแรงดันไฟฟ้าที่ตกคร่อมความต้านทานขนาด 1 โอห์ม 10 โอห์ม และ 100 โอห์ม เป็นกระแสไฟฟ้าขนาด 10 มิลลิแอมป์ 1 มิลลิแอมป์ และ 0.1 มิลลิแอมป์ ตามลำดับ ซึ่งเป็นไปตามความมุ่งหมายของงานวิจัย โดยใช้ออปแอมป์ LF356 กับ ไดโอดเบอร์ IN4001 ทรานซิสเตอร์ เบอร์ BD139 , BD140 และหม้อแปลงที่มีอัตราส่วน $n = 12.222$ เท่า

2. ออกแบบและสร้างวงจรวัดแรงดันไฟฟ้า โดยการใช้ไอซีเบอร์ MX536 ซึ่งเป็นไอซีที่ทำหน้าที่เปลี่ยนค่ารากของค่าเฉลี่ยกำลังสองของสัญญาณให้เป็นแรงดันไฟตรง เพื่อให้วงจรเปลี่ยนอนาลอกเป็นดิจิตอลที่อยู่ในส่วนแสดงผลทำการวัดค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของแรงดันไฟฟ้า (V_{rms}) ของแรงดันไฟฟ้าสลับที่วัดได้

3. ออกแบบ และสร้างชุดแสดงผล ซึ่งจะแสดงผลออกมาเป็นชนิดเจ็ดเซกเมนต์แบบ 3(1/2) หลัก โดยจะประกอบไปด้วยวงจรเปลี่ยนสัญญาณอนาลอกเป็นสัญญาณดิจิตอล ตัวต้านทาน และตัวเก็บประจุ ซึ่งจะใช้อิซีเบอร์ ICL 7117 ในการแปลงระดับแรงดันไฟฟ้าตรงอนาลอกให้เป็นสัญญาณทางดิจิตอล และให้ค่าเอาต์พุตป้อนเข้าสู่ส่วนแสดงผลแบบ 7 เซกเมนต์

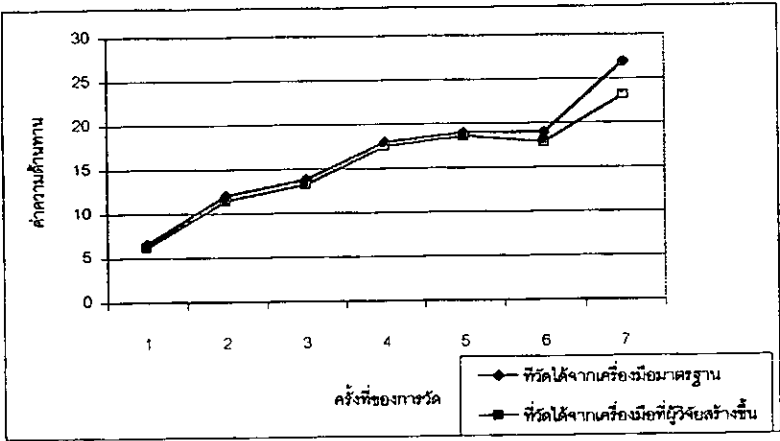
ผลการทดลอง

1. เพื่อเป็นการประเมินประสิทธิภาพของเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอลที่ผู้วิจัยได้สร้างขึ้น ผู้วิจัยได้ทำการทดลองเปรียบเทียบกับเครื่องตรวจวัดที่มีประสิทธิภาพตามมาตรฐานขององค์การ

โทรศัพท์แห่งประเทศไทย ซึ่งผู้วิจัยใช้เครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอล ดังกล่าวยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น 3235 และมีรหัสประจำเครื่อง (serial number) คือ 68RP0273 โดยนำไปวัดความต้านทาน ณ สถานที่ต่าง ๆ ซึ่งแบ่งเป็นความต้านทานใน 3 ย่าน ตามย่านการวัดของเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอล ที่ผู้วิจัยได้ออกแบบไว้ คือ ย่านการวัดที่ 1 2 และ 3 สามารถวัดค่าความต้านทานในช่วง 1 – 19.99 โอห์ม 20 – 199.9 โอห์ม ตามลำดับ ดังแสดงค่าที่วัดเปรียบเทียบได้ดังตารางที่ 25 และแสดงเปรียบเทียบในเชิงกราฟได้ดังแสดงในภาพประกอบ 143

ตาราง 25 แสดงการเปรียบเทียบค่าความต้านทานที่วัดได้จากเครื่องตรวจวัดความต้านทานจากเครื่องมาตรฐาน กับ เครื่องตรวจวัดที่ผู้วิจัยสร้างขึ้นโดยค่าความต้านทานอยู่ในช่วง 1-199.9 โอห์ม ซึ่งอยู่ในย่านวัดที่ 1 และ 2

จุดที่	ค่าความต้านทานที่วัดด้วยเครื่องตรวจวัดมาตรฐาน(โอห์ม)	ค่าความต้านทานที่วัดได้จากเครื่องตรวจวัดที่ผู้วิจัยสร้างขึ้น(โอห์ม)	ค่าความแตกต่างจากการวัด(โอห์ม)	ค่าความแตกต่างจากการวัด(ร้อยละ)
1	6.6	6.20	-0.4	6.06
2	12	11.45	-0.55	4.58
3	13.8	13.32	-0.48	3.48
4	18	17.52	-0.48	2.67
5	19	18.64	-0.36	1.89
6	19	17.93	-1.07	5.63
7	27	26.7	-0.3	1.11



ภาพประกอบ 143 แสดงค่าความต้านทานเปรียบเทียบระหว่างการวัดที่วัดได้จากเครื่องตรวจวัดมาตรฐาน และที่วัดได้จากเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอลที่ผู้วิจัยได้จัดสร้างขึ้น

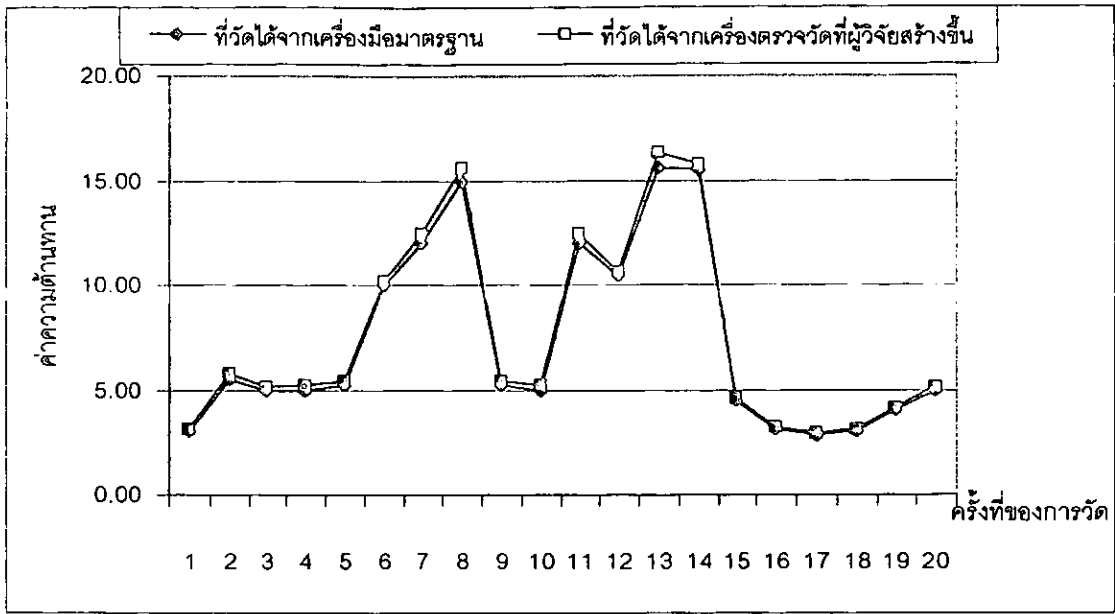
จากตาราง 25 สามารถวิเคราะห์ข้อมูลของการทดสอบเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอลในระบบงานข่ายสายโทรศัพท์ตอนนอก พิจารณาจากข้อมูลที่ได้จากการใช้งานย่านวัดที่ 1 ได้ดังนี้ คือ ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นที่สูงสุดคิดเป็นร้อยละ 6.06 ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นที่น้อยที่สุดคิดเป็นร้อยละ 1.11 และความผิดพลาดที่เกิดขึ้นคิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 3.63 และมีค่า SD = 0.26

2. เป็นการประเมินประสิทธิภาพของเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิทัลที่ผู้วิจัยได้สร้างขึ้น ผู้วิจัยได้ทำการทดลองเปรียบเทียบกับเครื่องตรวจวัดที่มีประสิทธิภาพตามมาตรฐานขององค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย ยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น 3235 หมายเลขเครื่อง 68RP0273 โดยนำไปตรวจวัดค่าความต้านทานจุดลงดินที่เสาไฟฟ้าตามสถานที่ต่างๆ ใช้การวัดแบบแยกค่าความต้านทานจุดลงดินของแต่ละหลักดิน (Ground rod) ออกจากความต้านทานจุดลงดินรวมทั้งระบบดังแสดงค่าที่วัดได้เปรียบเทียบได้ดัง

ตาราง 25

ตาราง 26 แสดงการเปรียบเทียบค่าความต้านทานจุดลงดิน แบบวัดแยก ที่วัดได้จากเครื่องตรวจวัดมาตรฐาน เทียบกับเครื่องตรวจวัดที่ผู้วิจัยสร้างขึ้น

ตำแหน่ง ที่	ตำแหน่งที่ตรวจสอบ	ลักษณะดิน	ค่าความต้านทานที่วัดได้ (โอห์ม)			
			เครื่องมือมาตรฐาน(โอห์ม)	เครื่องทดสอบ(โอห์ม)	ผลต่าง(โอห์ม)	ผลต่าง(ร้อยละ)
1	TA 8 MC	ร่วนปนทราย	3.00	3.14	0.14	4.67
2	TA 8 MC	ร่วนปนทราย	5.50	5.77	0.27	4.91
3	TA 8 MC	ร่วนปนทราย	5.00	5.16	0.16	3.20
4	TA 8 MC	ร่วนปนทราย	5.00	5.25	0.25	5.00
5	TA 8 MC	ร่วนปนทราย	5.20	5.41	0.21	4.04
6	TA 8 MC	ร่วนปนทราย	10.00	10.21	0.21	2.10
7	TA 8 MC	ร่วนปนทราย	12.00	12.50	0.50	4.17
8	TA 8 MC	ร่วนปนทราย	15.00	15.64	0.64	4.27
9	TA 8 MC	ร่วนปนทราย	5.20	5.42	0.22	4.23
10	TA 8 MC	ร่วนปนทราย	5.00	5.21	0.21	4.20
11	TA 8 MC	ร่วนปนทราย	12.00	12.48	0.48	4.00
12	TA 8 MC	ร่วนปนทราย	10.50	10.64	0.14	1.33
13	TA 12 MC	ร่วนปนทราย	15.60	16.32	0.72	4.62
14	TA 12 MC	ร่วนปนทราย	15.50	15.76	0.26	1.68
15	TA 12 MC	ร่วนปนทราย	4.50	4.63	0.13	2.89
16	TA 12 MC	ร่วนปนทราย	3.10	3.24	0.14	4.52
17	TA 12 MC	ร่วนปนทราย	2.80	2.91	0.11	3.93
18	TA 12 MC	ร่วนปนทราย	3.00	3.08	0.08	2.67
19	TA 12 MC	ร่วนปนทราย	4.00	4.16	0.16	4.00
20	TA 12 MC	ร่วนปนทราย	5.00	5.16	0.16	3.20



ภาพประกอบ 144 แสดงค่าความต้านทานจุดลงดิน (วัดแยก) เปรียบเทียบระหว่างค่าที่วัดได้จากเครื่องตรวจวัดมาตรฐาน กับ เครื่องตรวจวัดที่สร้างขึ้น

จากตาราง 26 สามารถวิเคราะห์ข้อมูลของการทดสอบเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอลในระบบงานข่ายสายโทรศัพท์ตอนนอก โดยการวัดค่าความต้านทานจุดลงดินของแท่งหลักดินที่เสาไฟฟ้า ซึ่งมีสายเคเบิลโทรศัพท์ทำการพาดสายอยู่ แบบวัดแยกแท่งหลักดิน (Ground rod) ออกจากจุดลงดินทั้งระบบ โดยใช้เครื่องตรวจวัดที่ผ่านมาตรฐานเทียบกับเครื่องที่ผู้วิจัยสร้างขึ้นได้ทำการทดสอบจำนวน 20 ตำแหน่ง ผลการตรวจวัดค่าความต้านทานจุดลงดิน ค่าที่มีความผิดพลาดมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 5.00 คือลำดับที่ 4 ตำแหน่งเสาไฟฟ้าขนาด 8 เมตร มีค่าผลต่าง 0.25 โอห์ม ส่วนผลการวัดที่มีความผิดพลาดน้อยที่สุดคิดเป็นร้อยละ 1.33 โอห์ม มีค่าผลต่าง 0.14 โอห์ม คือลำดับที่ 12 เสาไฟฟ้าขนาด 8 เมตร ส่วนค่าผลต่างเฉลี่ยของทั้งหมดนั้นมีค่า 0.26 โอห์ม ซึ่งคิดเป็นร้อยละได้ 3.68 และมีค่า SD = 0.18

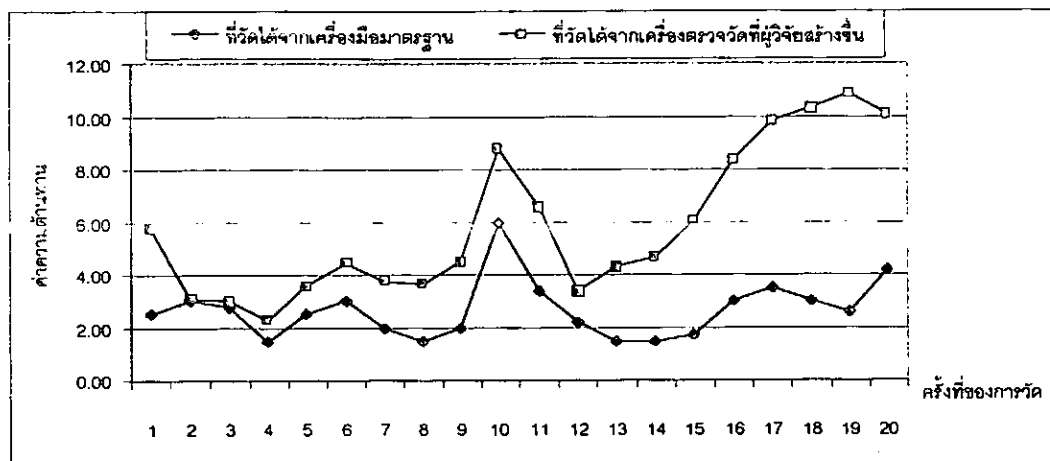
3. นำไปตรวจวัดค่าความต้านทานจุดลงดินที่เสาไฟฟ้าตามสถานที่ต่างๆ ใช้การวัดแบบรวมค่าจุดลงดินของแท่งลงดินรวมกับค่าความต้านทานจุดลงดินรวมทั้งระบบดังแสดงค่าที่วัดได้ เปรียบเทียบได้ดังตาราง 27

ตาราง 27 แสดงการเปรียบเทียบค่าความต้านทานจุดลงดิน แบบวัดรวม ที่วัดได้จากเครื่องตรวจวัดมาตรฐาน เทียบกับเครื่องตรวจวัดที่ผู้วิจัยสร้างขึ้น

ตำแหน่ง ที่	ตำแหน่งที่ ตรวจสอบ	ลักษณะดิน	ค่าความต้านทานที่วัดได้ (โอห์ม)			
			เครื่องมาตรฐาน (โอห์ม)	เครื่องทดสอบ (โอห์ม)	ผลต่าง (โอห์ม)	ผลต่าง (ร้อยละ)
1	TA 8 MC	ร่วนปนทราย	2.50	5.70	3.20	128.00
2	TA 8 MC	ร่วนปนทราย	3.00	4.80	1.80	60.00
3	TA 8 MC	ร่วนปนทราย	2.80	3.54	0.74	26.43
4	TA 8 MC	ร่วนปนทราย	1.50	2.30	0.80	53.33
5	TA 8 MC	ร่วนปนทราย	2.50	3.57	1.07	42.80
6	TA 8 MC	ร่วนปนทราย	3.00	4.42	1.42	47.33
7	TA 8 MC	ร่วนปนทราย	2.00	3.77	1.77	88.50
8	TA 8 MC	ร่วนปนทราย	1.50	2.78	1.28	85.33
9	TA 8 MC	ร่วนปนทราย	2.00	4.47	2.47	123.50
10	TA 8 MC	ร่วนปนทราย	6.00	8.82	2.82	47.00
11	TA 8 MC	ร่วนปนทราย	3.40	6.57	3.17	93.24
12	TA 8 MC	ร่วนปนทราย	2.20	3.40	1.20	54.55
13	TA 12 MC	ร่วนปนทราย	1.50	4.32	2.82	188.00
14	TA 12 MC	ร่วนปนทราย	1.50	4.67	3.17	211.33
15	TA 12 MC	ร่วนปนทราย	1.70	6.06	4.36	256.47
16	TA 12 MC	ร่วนปนทราย	3.00	8.34	5.34	178.00
17	TA 12 MC	ร่วนปนทราย	3.50	9.83	6.33	180.86
18	TA 12 MC	ร่วนปนทราย	3.00	10.31	7.31	243.67
19	TA 12 MC	ร่วนปนทราย	2.60	5.86	3.26	125.38
20	TA 12 MC	ร่วนปนทราย	5.00	10.10	5.10	102.00

จากตาราง 27 สามารถวิเคราะห์ข้อมูลของการทดสอบเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอลในระบบงานข่ายสายโทรศัพท์ตอนนอก โดยการวัดค่าความต้านทานจุดลงดินของแท่งหลักดินที่เสาไฟฟ้าแบบวัดค่าจุดลงดินรวมทั้งระบบ โดยใช้เครื่องตรวจวัดที่ผ่านมาตรฐาน ซึ่งได้ทำการทดสอบ จำนวน 20 ตำแหน่ง ผลการตรวจวัดค่าความต้านทานจุดลงดินพบว่าค่าที่มีความผิดพลาดมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 256.47 คือลำดับที่ 15 ตำแหน่งเสาไฟฟ้าขนาด 12 เมตร ซึ่งมีค่าผลต่าง 4.36 โอห์ม ส่วนผลการวัดที่มีความผิดพลาดน้อยที่สุดนั้น

คิดเป็นร้อยละ 26.43 มีค่าผลต่าง 0.74 โอห์ม คือลำดับที่ 3 ตำแหน่งเสาไฟฟ้าขนาด 8 เมตร ส่วนค่าผลต่างเฉลี่ยของการวัดแบบรวมนั้น มีค่า 2.97 คิดเป็นร้อยละได้ 116.79 และมีค่า SD = 1.88



ภาพประกอบ 145 แสดงค่าความต้านทานจุดลงดิน (วัดรวม) เปรียบเทียบระหว่างค่าที่วัดได้จากเครื่องมือวัดมาตรฐาน กับ เครื่องตรวจวัดที่สร้างขึ้น

4. เพื่อเป็นการประเมินประสิทธิภาพของการวัดในย่านการวัดอื่นๆ ของเครื่องมือวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอลที่ผู้วิจัยได้สร้างขึ้น และเนื่องจาก โดยปกติแล้วค่าความต้านทานในดินนั้นจะมีค่าอยู่ในช่วงไม่เกิน 20 โอห์ม ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการทดลอง โดยวัดตัวต้านทานจำนวน 30 ค่า ในห้องทดลอง โดยที่ความต้านทานที่เลือกจะมีค่าอยู่ในช่วง 1 – 2000 โอห์ม และทำการบันทึกผลของตัวต้านทานแต่ละตัวในทั้งสามย่านการวัด และใช้เครื่องมือวัดดิจิตอลมัลติมิเตอร์ ที่มีการปรับย่านการวัดภายในอัตโนมัติ ยี่ห้อ FLUK รุ่น 73 series II และมีรหัสประจำเครื่องคือ 60170753 เพื่อเป็นการเปรียบเทียบ ดังสามารถแสดงผลการทดลองดังตาราง 28 – 30

ตาราง 28 แสดงการเปรียบเทียบค่าความต้านทานที่วัดได้จากเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์กับเครื่องตรวจวัดที่ผู้วิจัยสร้างขึ้น โดยค่าความต้านทานอยู่ในช่วง 1 - 19.99 โอห์ม

ค่าความต้านทานที่วัดด้วยดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (DMM) (โอห์ม)	ค่าความต้านทานที่วัดได้จากเครื่องตรวจวัดขั้วที่ผู้วิจัยสร้างขึ้น โดยใช้ย่านวัดที่1: (0-19.99) (โอห์ม)	ค่าความต้านทานที่วัดได้จากเครื่องตรวจวัดขั้วที่ผู้วิจัยสร้างขึ้น โดยใช้ย่านวัดที่2: (20-199.9) (โอห์ม)	ค่าความต้านทานที่วัดได้จากเครื่องตรวจวัดขั้วที่ผู้วิจัยสร้างขึ้น โดยใช้ย่านวัดที่3: (200-1999) (โอห์ม)	ค่าความแตกต่างจากการวัดโดยใช้ย่านวัดที่1: (โอห์ม)	ค่าความแตกต่างจากการวัดโดยใช้ย่านวัดที่2: (20-199.9) (โอห์ม)	ค่าความแตกต่างจากการวัดโดยใช้ย่านวัดที่3: (200-1999) (โอห์ม)	ค่าความแตกต่างจากการวัดโดยใช้ย่านวัดที่1: (1-19.99) (ร้อยละ)	ค่าความแตกต่างจากการวัดโดยใช้ย่านวัดที่2: (20-199.9) (ร้อยละ)	ค่าความแตกต่างจากการวัดโดยใช้ย่านวัดที่3: (200-1999) (ร้อยละ)
5	5.2	-	-	0.20	-	-	4.00	-	-
8	7.7	-	-	-0.30	-	-	3.75	-	-
10	10.1	-	-	0.10	-	-	1.00	-	-
13	12.71	-	-	-0.29	-	-	2.23	-	-
15	14.59	-	-	-0.41	-	-	2.73	-	-
18	17.91	-	-	-0.09	-	-	0.50	-	-
19	19.2	-	-	0.20	-	-	1.05	-	-

ตาราง 29 แสดงการเปรียบเทียบค่าความต้านทานที่วัดได้จากเครื่องดีดอลมดิมิตอร์กับเครื่องตรวจวัดที่ผู้วิจัยสร้างขึ้น โดยค่าความต้านทานอยู่ในช่วง 20 - 199.9 โอห์ม

ค่าความ ต้านทานที่ วัดด้วย ดีดอล มัลติ มิเตอร์ (DMM) (โอห์ม)	ค่าความต้าน ทานที่วัดได้จาก เครื่องตรวจวัดฯ ที่ผู้วิจัยสร้างขึ้น โดยใช้ย่านวัดที่ 1: (0-19.99) (โอห์ม)	ค่าความต้านทาน ที่วัดได้จากเครื่อง ตรวจวัดฯ ที่ผู้ วิจัยสร้างขึ้น โดย ใช้ย่านวัดที่2: (20-199.9) (โอห์ม)	ค่าความต้านทาน ที่วัดได้จากเครื่อง ตรวจวัดฯ ที่ผู้ วิจัยสร้างขึ้น โดย ใช้ย่านวัดที่3: (200-1999) (โอห์ม)	ค่าความแตกต่าง จากการใช้ ย่านวัดที่1: (1-19.99) (โอห์ม)	ค่าความแตกต่าง จากการใช้ ย่านวัดที่2: (20-199.9) (โอห์ม)	ค่าความแตกต่าง จากการใช้ ย่านวัดที่3: (200-1999) (โอห์ม)	ค่าความแตกต่าง จากการวัดโดยใช้ ย่านวัดที่2: (20-199.9) (ร้อยละ)	ค่าความแตกต่าง จากการวัดโดยใช้ ย่านวัดที่3: (200-1999) (ร้อยละ)
23	-	23.3	-	-	0.30	-	1.30	-
25	-	25.5	-	-	0.50	-	2.00	-
40	-	40.7	-	-	0.70	-	1.75	-
50	-	50.6	-	-	0.60	-	1.20	-
56	-	56.2	-	-	0.20	-	0.36	-
70	-	70.2	-	-	0.20	-	0.29	-
100	-	100.1	-	-	0.10	-	0.10	-
130	-	129.9	-	-	-0.10	-	0.08	-
150	-	148.9	-	-	-1.10	-	0.73	-
180	-	177	-	-	-3.00	-	1.67	-

ตาราง 30 แสดงการเปรียบเทียบค่าความต้านทานที่วัดได้จากเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์กับเครื่องตรวจวัดที่ผู้วิจัยสร้างขึ้น โดยค่าความต้านทานอยู่ในช่วง 200 - 1999 โอห์ม

ค่าความต้าน ทานที่วัดด้วย ดิจิตอล มัลติมิเตอร์ (DMM) (โอห์ม)	ค่าความต้านทาน ที่วัดได้จากเครื่อง ตรวจวัดฯ ที่ผู้วิจัย สร้างขึ้น โดยใช้ ย่านวัดที่1: (0-19.99) (โอห์ม)	ค่าความต้านทาน ที่วัดได้จากเครื่อง ตรวจวัดฯ ที่ผู้วิจัย สร้างขึ้น โดยใช้ ย่านวัดที่2: (20-199.9) (โอห์ม)	ค่าความต้านทาน ที่วัดได้จากเครื่อง ตรวจวัดฯ ที่ ผู้วิจัยสร้างขึ้น โดยใช้ย่านวัดที่3: (200-1999) (โอห์ม)	ค่าความแตกต่าง จากการใช้ ย่านวัดที่1: (1-19.99) (โอห์ม)	ค่าความแตกต่าง จากการใช้ ย่านวัดที่2: (20-199.9) (โอห์ม)	ค่าความแตกต่าง จากการใช้ ย่านวัดที่3: (200-1999) (โอห์ม)	ค่าความแตกต่าง จากการใช้ ย่านวัดที่2: (20-199.9) (ร้อยละ)	ค่าความแตกต่าง จากการใช้ ย่านวัดที่3: (200-1999) (ร้อยละ)
200	-	-	203	-	-	-3.00	-	1.50
300	-	-	301	-	-	1.00	-	0.33
398	-	-	396	-	-	-2.00	-	0.50
498	-	-	491	-	-	-7.00	-	1.41
598	-	-	585	-	-	-13.00	-	2.17
630	-	-	632	-	-	2.00	-	0.32
695	-	-	676	-	-	-19.00	-	2.73
795	-	-	767	-	-	-28.00	-	3.52
895	-	-	868	-	-	-27.00	-	3.02
995	-	-	958	-	-	-37.00	-	3.72
1500	-	-	1415	-	-	-85.00	-	5.67
1700	-	-	1568	-	-	-132.00	-	7.76
2000	-	-	1890	-	-	-110.00	-	5.50

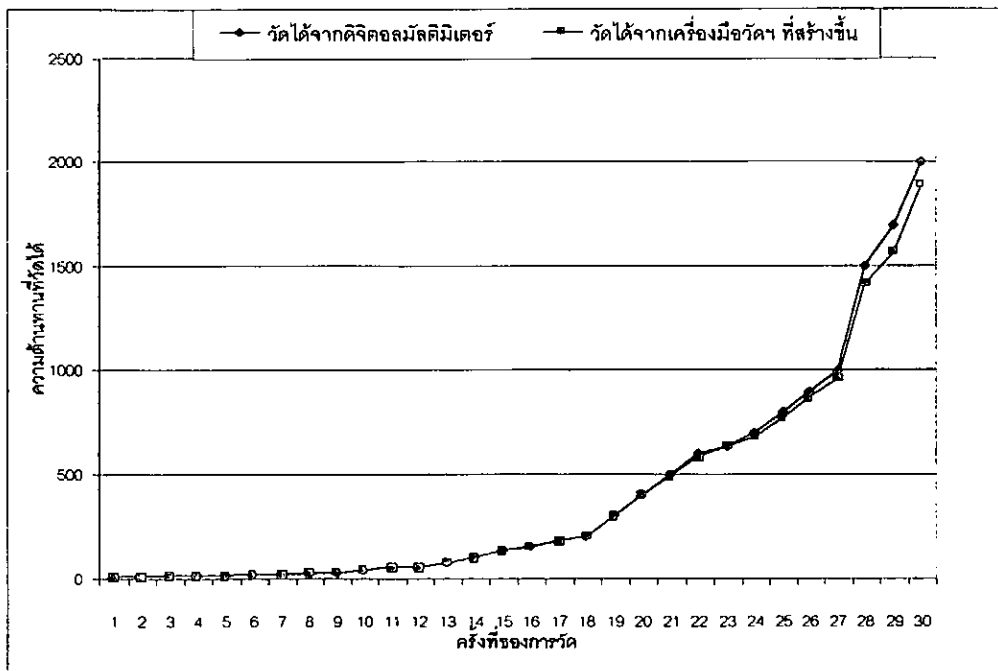
จากตาราง 28 – 30 แสดงให้เห็นว่าค่าความแม่นยำของการวัดของเครื่องมือตรวจวัดฯ ที่ผู้วิจัยจัดสร้างขึ้นจะสอดคล้องกับการเลือกย่านการวัด คือ ถ้าค่าความต้านทานที่ต้องการวัดมีค่าอยู่ในช่วง (1–19.99) โอห์ม (20–199.9) โอห์ม และ (200–1999) โอห์ม ควรเลือกย่านการวัดที่ 1, 2 และ 3 ตามลำดับ

จากตาราง 28 สามารถวิเคราะห์ข้อมูลของการทดสอบเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอลในระบบงานข่ายสายโทรศัพท์ตอนนอก พิจารณาจากข้อมูลที่วัดได้จากการใช้งานย่านวัดที่ 1 ได้ดังนี้ คือ ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นที่สูงสุดคิดเป็นร้อยละ 4 ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นที่น้อยที่สุดคิดเป็นร้อยละ 0.5 และความผิดพลาดที่เกิดขึ้นคิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 2.18

จากตาราง 29 สามารถวิเคราะห์ข้อมูลของการทดสอบเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอลในระบบงานข่ายสายโทรศัพท์ตอนนอก พิจารณาจากข้อมูลที่วัดได้จากการใช้งานย่านวัดที่ 2 ได้ดังนี้ คือ ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นที่สูงสุดคิดเป็นร้อยละ 2 ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นที่น้อยที่สุดคิดเป็นร้อยละ 0.1 และความผิดพลาดที่เกิดขึ้นคิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 0.95

จากตาราง 30 สามารถวิเคราะห์ข้อมูลของการทดสอบเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอลในระบบงานข่ายสายโทรศัพท์ตอนนอก พิจารณาจากข้อมูลที่วัดได้จากการใช้งานย่านวัดที่ 3 ได้ดังนี้ คือ ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นที่สูงสุดคิดเป็นร้อยละ 7.76 ความผิดพลาดที่เกิดขึ้นที่น้อยที่สุดคิดเป็นร้อยละ 0.32 และความผิดพลาดที่เกิดขึ้นคิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 2.94

เพื่อเป็นการเปรียบเทียบในเชิงรูปภาพ จากตาราง 28 –30 จึงสามารถนำมาพล็อตกราฟเปรียบเทียบได้ดังภาพประกอบ 146 โดย เลือกย่านการวัดที่ 1, 2 และ 3 สำหรับตารางที่ 28, 29 และ 30 ตามลำดับ



ภาพประกอบ 146 แสดงค่าความต้านทานเปรียบเทียบระหว่างการวัดที่วัดได้จากดิจิตอลมัลติมิเตอร์ และที่วัดได้จากเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดิน แบบดิจิตอล ที่ผู้วิจัยได้จัดสร้างขึ้น

บทที่ 5

สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

การออกแบบและสร้างเครื่องตรวจวัดความต้านทาน จุลลงดินแบบดิจิตอล ในระบบงานข่ายสายตอนนอก
ได้ดำเนินการดังต่อไปนี้

ความมุ่งหมายของการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ความมุ่งหมายไว้ดังนี้

1. ออกแบบและสร้างเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุลลงดินแบบดิจิตอล ในระบบงานข่ายสาย
โทรศัพท์ตอนนอก
2. เพื่อหาประสิทธิภาพของการใช้งานของเครื่องตรวจวัดค่าความต้านทานจุลลงดินแบบดิจิตอลใน
ระบบงานข่ายสายโทรศัพท์ตอนนอก

ความสำคัญของการวิจัย

ได้เครื่องตรวจวัดค่าความต้านทานของจุลลงดินแบบดิจิตอลในระบบงานข่ายสายโทรศัพท์ตอนนอกที่
สามารถวัดค่าได้ถึง 2000 โอห์ม ทั้งนี้เป็นการทดแทนการนำเข้า และสามารถประหยัดเงินตราต่างประเทศได้

สมมุติฐานในการวิจัย

เครื่องตรวจวัดความต้านทานจุลลงดินที่ใช้ในระบบงานข่ายสายโทรศัพท์ตอนนอกมีประสิทธิภาพ โดย
เปรียบเทียบกับเครื่องที่ใช้กับองค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย

การดำเนินการวิจัย

ในการวิจัยออกแบบและสร้างเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุลลงดินแบบดิจิตอลในระบบข่ายสายโทรศัพท์
ตอนนอกครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ดำเนินการดังต่อไปนี้

1. รับรู้ปัญหาของระบบการตรวจวัดจุลลงดินที่ใช้ในระบบงานข่ายสายโทรศัพท์ตอนนอก เพราะระบบ
การลงดินเป็นระบบที่สำคัญยิ่งต่อการติดตั้งระบบงานข่ายสายโทรศัพท์ ซึ่งผู้ใช้จำเป็นต้องมีเครื่องมือวัดทางไฟฟ้า
ที่ใช้วัดค่าความต้านทานจุลลงดิน ซึ่งเครื่องมือที่ใช้วัดดังกล่าวถูกผลิต และนำเข้ามาจากต่างประเทศ ซึ่งเป็นเครื่อง
มือที่มีราคาแพงมาก ทั้งยังเป็นตัวกำหนดต้นทุนในการการก่อสร้างงานระบบโทรศัพท์ให้สูงขึ้น
2. ศึกษารายละเอียดต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างชุดเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุลลงดินแบบดิจิตอลในระบบ
งานข่ายสายโทรศัพท์ตอนนอก โดยการศึกษาค้นคว้าจากเอกสาร ตำรา และงานวิจัยเชิงทดลอง ทางด้านไฟฟ้า-
อิเล็กทรอนิกส์ และทางด้านโทรคมที่เกี่ยวข้อง
3. ศึกษาวัสดุ อุปกรณ์ต่างๆ ที่ใช้ในการสร้างชุดเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุลลงดินแบบดิจิตอลใน
ระบบงานข่ายสายโทรศัพท์ตอนนอก โดยการศึกษาวัสดุให้เป็นไปตามมาตรฐานองค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย
4. ทำการออกแบบส่วนต่างๆ ของการสร้างเครื่องวัดความต้านทานจุลลงดินแบบดิจิตอลในระบบงาน
สร้างข่ายสายโทรศัพท์ตอนนอก

4.1. ออกแบบวงจรแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ ได้ขนาด 10 มิลลิแอมป์ 1 มิลลิแอมป์ และ 0.1

มิลลิแอมป์

4.1.1. ออกแบบและสร้างวงจรขยายสัญญาณแบบกลับเฟส ซึ่งสามารถขยายขนาดแรงดันไฟฟ้า

ได้เพิ่ม 2 เท่า

4.1.2. ออกแบบและสร้างแหล่งกำเนิดสัญญาณแรงดันไฟฟ้าที่ 500 เฮิรตซ์ มีขนาด 120 มิลลิ

โวลต์

4.1.3. ออกแบบและสร้างวงจรแปลงแรงดันไฟฟ้าเป็นกระแสไฟฟ้า ซึ่งสามารถแปลงแรงดันไฟ

ฟ้าที่ตกคร่อมความต้านทานขนาด 1 โอห์ม 10 โอห์ม และ 100 โอห์ม ให้เป็นกระแสไฟฟ้าขนาด 10 มิลลิแอมป์ 1

มิลลิแอมป์ และ 0.5 มิลลิแอมป์ ตามลำดับ

4.2. ออกแบบและสร้างวงจรวัดแรงดันไฟฟ้า โดยได้เปลี่ยนค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของ

สัญญาณ ให้เป็นแรงดันไฟตรง

4.3. ออกแบบและสร้างชุดแสดงผล ซึ่งสามารถแสดงผลออกเป็นเจ็ดเซกเมนต์ แบบ 3(1/2) หลัก

5. กำหนดวัสดุอุปกรณ์ และเครื่องมือในส่วนต่างๆ ที่ใช้ในการออกแบบ และสร้างเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอล ผู้วิจัยได้เลือกใช้วัสดุอุปกรณ์ที่มีคุณภาพดีและราคาถูกที่มีขายในท้องตลาด

6. กำหนดระยะเวลา และสถานที่ ที่ใช้ในการออกแบบ และ สร้างเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอลในระบบงานข่ายสายโทรศัพท์ตอนนอก

6.1. ระยะเวลาที่ใช้ในการออกแบบ และสร้างเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอลในระบบงานข่ายสายโทรศัพท์ตอนนอก เริ่มตั้งแต่วันที่ 20 พฤศจิกายน 2544 ถึงวันที่ 28 กุมภาพันธ์ 2545

6.2. สถานที่ที่ใช้ในการออกแบบและสร้างเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอลในระบบงานข่ายสายโทรศัพท์ตอนนอก

7. สร้างเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอลในระบบงานข่ายสายโทรศัพท์ตอนนอก เพื่อการวิจัยครั้งนี้ได้ดำเนินการสร้างส่วนประกอบต่างๆ ตามแบบที่กำหนด

8. ทดสอบ ปรับปรุง และแก้ไขการทำงานของเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอลในระบบงานข่ายสายโทรศัพท์ตอนนอกที่ห้องทดลองภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหา-นคร

9. วัดประสิทธิภาพการทำงานของสร้างเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอลในระบบงานข่ายสายโทรศัพท์ตอนนอก โดยการนำไปตรวจสอบวัดค่าความต้านทานจุดลงดินเทียบกับเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพตามมาตรฐานองค์การโทรศัพท์ยี่ห้อ YOKOGAWA รุ่น 3235 และมีรหัสประจำเครื่อง (Serial Number) คือ 68RP0273 การทดสอบได้กระทำที่แผนก Implement ฝ่ายงานวิศวกรรม บริษัทไทยฟลูควา ยูนิคอม เอ็นจิเนียริง จำกัด

สรุปผลการวิจัย

การวิเคราะห์ผลการทดสอบเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดิน แบบดิจิตอลในระบบงานข่ายสายโทรศัพท์ตอนนอก ที่ได้สร้างขึ้นเปรียบเทียบกับเครื่องตรวจวัดตามมาตรฐานองค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย เป็นไปตามขอบเขตของการวิจัย ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. โดยการออกแบบและสร้างเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอลในระบบงานข่ายสายโทรศัพท์ตอนนอก ซึ่งมีคุณสมบัติและประสิทธิภาพตามมาตรฐานขององค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย มีส่วนประกอบดังนี้

1.1 วงจรแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสสลับ ใต้ขนาด 10 มิลลิแอมป์ 1 มิลลิแอมป์ และ 0.1 มิลลิแอมป์

1.2 วงจรวัดแรงดันไฟฟ้าโดยได้เปลี่ยนค่ารากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสองของสัญญาณ ให้เป็นแรงดันไฟฟ้าตรง

1.3 ชุดแสดงผล ซึ่งสามารถแสดงผลออกเป็นเข็มเชกเมนท์ แบบ 3(1/2) หลัก

2. เครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอลในระบบงานข่ายสายโทรศัพท์ตอนนอกสามารถวัดความต้านทานจุดลงดินได้ตั้งแต่ 0 – 2,000 โอห์ม สามารถแบ่งการตรวจวัดค่าได้สามย่านคือ

ย่านการวัดที่ 1 วัดค่าได้ (0-19.99) โอห์ม

ย่านการวัดที่ 2 วัดค่าได้ (20-199.9) โอห์ม

ย่านการวัดที่ 3 วัดค่าได้ (199.9-1999) โอห์ม

3. การตรวจวัดประสิทธิภาพของเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอลในระบบงานข่ายสายโทรศัพท์ตอนนอก

3.1 ประสิทธิภาพในการตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินจากเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินที่สร้างขึ้นเมื่อนำไปตรวจวัดความต้านทานดิน ณ สถานที่ต่างๆซึ่งพบว่าค่าความต้านทานดินที่วัดได้นั้นมีค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นคิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 3.63 ย่าน

3.2 ประสิทธิภาพในการตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินจากเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินที่สร้างขึ้นเมื่อนำไปตรวจวัดความต้านทานคงที่ซึ่งค่าความต้านทานจุดลงดินที่วัดได้

ย่านการวัดที่ 1 วัดค่าได้ (0-19.99) โอห์ม มีค่าความผิดพลาดสูงสุดคิดเป็นร้อยละ 4 ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดคิดเป็นร้อยละ 0.5 และค่าความผิดพลาดเฉลี่ยคิดเป็นร้อยละ 2.18

ย่านการวัดที่ 2 วัดค่าได้ (20.0-199.9) โอห์ม มีค่าความผิดพลาดสูงสุดคิดเป็นร้อยละ 2 ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดคิดเป็นร้อยละ 0.1 และค่าความผิดพลาดเฉลี่ยคิดเป็นร้อยละ 0.95

ย่านการวัดที่ 3 วัดค่าได้ (200-1999) โอห์ม มีค่าความผิดพลาดสูงสุด คิดเป็นร้อยละ 7.76 ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดคิดเป็นร้อยละ 0.32 และค่าความผิดพลาดเฉลี่ยคิดเป็นร้อยละ 2.94

3.3 ประสิทธิภาพในการตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินที่วัดได้จากเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินเทียบกับการตรวจวัดด้วยเครื่องดิจิตอลมัลติมิเตอร์ โดยทำการตรวจวัดค่าความต้านทานที่รู้ค่า 30 ค่าที่ครอบคลุมทุกย่านวัด ได้ผลสรุปว่า ค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นคิดเป็นค่าเฉลี่ยร้อยละ 2.94 ย่าน และยังได้ข้อสรุปอีกว่า ที่ย่านการวัด 200 – 1999 โอห์ม ให้ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยสูงสุด 3.05

3.4 ประสิทธิภาพในการตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินจากเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินที่สร้างขึ้นเมื่อนำไปตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินตามสถานที่ต่างๆแบบวัดแยกค่าความต้านทานจุดลงดินออกจากระบบข่ายสายโทรศัพท์ตอนนอก ซึ่งค่าความต้านทานจุดลงดินที่วัดได้มีค่าความผิดพลาดสูงสุดคิดเป็นร้อยละ 5.0 ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดคิดเป็นร้อยละ 1.33 และค่าความผิดพลาดเฉลี่ยคิดเป็นร้อยละ 3.68

3.5 ประสิทธิภาพในการตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินจากเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินที่สร้างขึ้นเมื่อนำไปตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินตามสถานที่ต่างๆแบบวัดรวมค่าความต้านทานจุดลงดินออกจากระบบข่ายสายตอนนอก ซึ่งค่าความต้านทานจุดลงดินที่วัดได้มีค่าความผิดพลาดสูงสุดคิดเป็นร้อยละ 256.47 ค่าความผิดพลาดน้อยที่สุดคิดเป็นร้อยละ 26.43 และค่าความผิดพลาดเฉลี่ยคิดเป็นร้อยละ 116.79 ซึ่งไม่สมควรนำมาใช้วัดค่าความต้านทานจุดลงดินชนิดแบบวัดรวมเนื่องจากมีความต่างศักย์ของศักดาไฟฟ้าในดินมาก

อภิปรายผล

การออกแบบและสร้างเครื่องตรวจวัดความต้านทาน จุลลงดินแบบดิจิตอล ในระบบงานข่ายสายโทรศัพท์
ตอนนอก มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. ขีดความสามารถในการวัดได้ 0-2,000 โอห์ม ซึ่งแบ่งเป็นย่านการวัดได้ 3 ย่าน
 ย่าน 0.00 – 19.99 โอห์ม ซึ่งมีความละเอียด 0.01 ใช้กระแสทดสอบ 10 มิลลิแอมป์
 ย่าน 20.0 – 199.9 โอห์ม ซึ่งมีความละเอียด 0.1 ใช้กระแสทดสอบ 1 มิลลิแอมป์
 ย่าน 200 – 1999 โอห์ม ซึ่งมีความละเอียด 1.0 ใช้กระแสทดสอบ 0.1 มิลลิแอมป์

ส่วนแสดงผลสามารถแสดงผลเป็นตัวเลขทศนิยม 2 ตำแหน่งโดยจอแสดงผลชนิดเจ็ดเซกเมนต์จะสามารถ
แสดงเป็นตัวเลขได้ 3 (1/2) หลัก ซึ่งใช้ไอซี ICL7117 เป็นตัวควบคุมหลักโดยจะแปลงระดับแรงดันไฟตรงให้เป็น
สัญญาณดิจิตอล และให้เอาพุตที่พร้อมจะนำมาป้อนสู่ส่วนแสดงผลแบบเจ็ดเซกเมนต์ แสดงออกเป็นค่าความต้าน
ทานภายใน

2. ประสิทธิภาพของเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุลลงดิน แบบดิจิตอลที่ใช้ในระบบงานสร้างข่ายสาย
โทรศัพท์ตอนนอก

2.1 โดยการวัดเปรียบเทียบกับความต้านทานค่าต่างๆ ใช้เครื่องมือมิเตอร์ทำการทดสอบทุกย่านการ
วัดคือ (0 – 19.9) โอห์ม, (20.00 – 199.9) โอห์ม และ (200 – 1999) โอห์ม มีความผิดพลาดเฉลี่ยร้อยละ 2.18,
0.95 และ 2.94 ตามลำดับ ซึ่งค่าความผิดพลาดที่แสดงออกมานั้นสอดคล้องกับมาตรฐานองค์การโทรศัพท์แห่ง
ประเทศไทยซึ่งความต้องการทางด้านเทคนิคนั้นได้ยอมรับค่าความผิดพลาดไว้ไม่เกินร้อยละ 5 ซึ่งเมื่อทำการตรวจ
วัดได้ทำการรูป P และ C เข้าด้วยกัน เครื่องตรวจวัดที่สร้างขึ้นทำงานสอดคล้องกับกฎของโอห์ม คือค่าความต้าน
ทานที่วัดได้นั้น มาจากค่าความต่างศักย์หารกับค่าของกระแสไฟฟ้าที่ได้สร้างขึ้นจากวงจรสร้างกระแส(Current
Source)

2.2 โดยการวัดความต้านทานดิน ซึ่งใช้เครื่องตรวจวัดมาตรฐานองค์การโทรศัพท์ทำการวัดเปรียบ
เทียบกับเครื่องมือที่ผู้วิจัยสร้างขึ้น ค่าความผิดพลาดเฉลี่ยคิดเป็นร้อยละ 3.63 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับมาตรฐานองค์การ
โทรศัพท์แห่งประเทศไทยคือ 5.0 เพราะใช้การปรับเครื่องที่ผู้วิจัยสร้างขึ้นนั้นทำโดยใช้วิธีการปรับค่าความต้านทาน
คงที่ในการปรับจูนแหล่งจ่ายกระแสของเครื่องตรวจ และใช้ความต้านทานคงที่ต่อระหว่างขั้ว P,C (P และ C ซ้อน
เข้าด้วยกัน) โดยการใช้ความต้านทานระหว่างขั้ว P และขั้ว C แทน ความต้านทานของดิน ลักษณะการวัดทำให้
ค่าที่วัดออกมาได้ค่าผิดพลาดที่แตกต่างกันเล็กน้อยใช้วิธีการวัดแบบThree Electrode Method ซึ่งจะใช้ได้เฉพาะกับ
ระบบแท่งหลักดินที่มีแท่งเดียว วิธีการตรวจวัดค่าความต้านทานของแท่งหลักดินวิธีนี้เป็นวิธีที่แม่นยำที่สุด มาร์ติน
ดี คอนรอยด์ และ พอล จี ริชาร์ด ได้นำเสนอค่าความต้านทานของแท่งหลักดินซึ่งมีความจำเป็นในด้านความปลอดภัย
ภัยและป้องกันอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งความลึกของแท่งหลักดินที่ปักไว้ในดินนั้นควรลึกไม่น้อยกว่า 10 ฟุต

2.3 โดยการวัดค่าความต้านทานจุลลงดิน แบบวัดแยก ทำการเปรียบเทียบวัดค่าความต้านทานจุล
ลงดิน ที่วัดได้จากเครื่องมาตรฐานองค์การโทรศัพท์ กับเครื่องตรวจวัดที่ผู้วิจัยสร้างขึ้น เพื่อวัดประสิทธิภาพในการ
ทำงานเมื่อนำไปตรวจวัดความต้านทานจุลลงดินตามสถานที่ต่างๆ แบบวัดแยกค่าความต้านทานจุลลงดินออกจาก
ระบบลงดินรวมพบว่ามีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยคิดเป็นร้อยละ 3.68 แสดงให้เห็นว่าค่าความต้านทานที่วัดได้นั้นมีความ
ผิดพลาดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้คือมีความผิดพลาดไม่เกินร้อยละ ± 5

2.4 โดยการวัดค่าความต้านทานจุลลงดิน แบบวัดรวมทำการเปรียบเทียบวัดค่าความต้านทานจุลลง
ดินที่วัดได้จากเครื่องมาตรฐานองค์การโทรศัพท์ กับเครื่องตรวจวัดที่ผู้วิจัยสร้างขึ้นเพื่อวัดประสิทธิภาพในการ
ทำงานเมื่อนำไปตรวจวัดความต้านทานจุลลงดินตามสถานที่ต่างๆ แบบวัดรวมค่าความต้านทานจุลลงดินทั้งระบบ
ลงดินรวมพบว่ามีค่าความผิดพลาดเฉลี่ยคิดเป็นร้อยละ 116.79 แสดงให้เห็นว่าค่าความต้านทานที่วัดได้นั้นมีความผิด
พลาดสูงมากไม่สามารถยอมรับได้เพราะการวัดค่าความต้านทานจุลลงดินรวมของทั้งระบบที่ทดสอบเป็นเสาไฟฟ้า

ทำให้มีศักดาไฟฟ้าสูง ซึ่งวิธีการแก้ไขโดยการปรับเพิ่มขนาดแหล่งจ่ายกระแสให้มีขนาดมากขึ้นจะทำให้ลดปัญหาศักดาไฟฟ้าที่มีอยู่ในดินได้มาก

ข้อเสนอแนะ

จากผลและประสบการณ์ที่ได้รับในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้เสนอแนะเพื่อให้เกิดแนวคิดใหม่ๆ ในการศึกษาคันควาในอนาคต ดังนี้

1. วงจรแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าควรออกแบบให้จ่ายกระแสได้มากขึ้น
2. การเลือกใช้อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองนั้นควรเลือกอุปกรณ์ที่มีความผิดพลาดน้อยที่สุด
3. ควรมีสัญญาณไฟบอกเมื่อแบตเตอรี่ใกล้หมด

4. การเนื่องจากความต้านทานที่ใช้สำหรับปรับกระแสไฟฟ้าในวงจรจ่ายกระแสไฟฟ้านี้ เป็นความต้านทานคงที่ และเป็นความต้านทานที่มีความผิดพลาด 5 เปอร์เซ็นต์ เพื่อความแม่นยำในการจ่ายกระแสไฟฟ้า สามารถใช้ความต้านทานที่ปรับค่าได้ในการปรับจูนขนาดของกระแสไฟฟ้าให้ละเอียดขึ้นได้

5. ควรเลือกจอแสดงผลแบบแอล ซี ดี (LCD) แทนจอแสดงผลแบบเจ็ดเซกเมนต์ ซึ่งจะใช้กระแสไฟฟ้าน้อยลง แต่อาจจะทำให้ต้นทุนการผลิตของเครื่องมือวัดสูงขึ้น

ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยต่อไป

1. ควรพิจารณาเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินแบบที่สร้างให้สามารถวัดค่าความต้านทานได้ทุกประเภท

2. หม้อแปลงไฟฟ้าควรเลือกชนิดที่เป็นทอลอยด์

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- การไฟฟ้านครหลวง. (2540). *วิธีการติดตั้ง และความปลอดภัยในการปฏิบัติงานในระบบสายอากาศและสายใต้ดิน*. กรุงเทพฯ : แผนกโรงพิมพ์ การไฟฟ้านครหลวง.
- การไฟฟ้านครหลวง. (2538). *กฎการเดินสายและติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้า*. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : แผนกโรงพิมพ์ : การไฟฟ้านครหลวง.
- โกศล เพ็ชรสุวรรณ และ ชิงกิ โซจิ. (2535). *เทคโนโลยีโทรคมนาคม*. พิมพ์ครั้งที่ 6. กรุงเทพฯ : ศูนย์การพิมพ์ดวงกมล.
- เข็มทอง นิมศิริ. (2536). *วิศวกรรมวางสายโทรศัพท์ตอนนอก*. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : ม.ป.พ.
- คณะกรรมการสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า. (2539). *มาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย*.
กรุงเทพฯ : สมาคมวิศวกรรมสถาน แห่งประเทศไทย ในพระบรมราชูปถัมภ์.
- ถวัลย์วงศ์ ไกรโรจนานันท์. (2542). *อิเล็กทรอนิกส์ระบบดิจิทัล ฉบับปรับปรุง*. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ด ยูเคชั่น.
- เบญจวรรณ บุณยติลก. (2537). *การศึกษาโครงการติดตั้งโทรศัพท์โดยภาคเอกชน*. วิทยานิพนธ์ ศศ.ม. (เศรษฐศาสตร์). กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีสังคม (เกริก) . ถ่ายเอกสาร.
- มงคล เดชนครินทร์ และชาติ ศรี ไพพรรณ. (ม.ป.ป.). *อิเล็กทรอนิกส์พื้นฐาน*. พิมพ์ครั้งที่ 3 . กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดยูเคชั่น.
- บงยุทธ วิทยุธีรตานต์. (2541). *การออกแบบและสร้างชุดเครื่องมือนัดทรานซิสเตอร์*. ปรินูญานิพนธ์ กศ.ม. (อุตสาหกรรมศึกษา) . กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ . ถ่ายเอกสาร.
- ปิ่น ภู่วรรณ. (2532). *ทฤษฎีและการใช้งานอิเล็กทรอนิกส์*. กรุงเทพมหานคร:ซีเอ็ดยูเคชั่น.
- เทเลคอม เอเชีย. (2537). *มาตรฐานวิธีการตรวจสอบงานสนามของการวางเคเบิลสายตอนนอก*. ม.ป.พ.
- ถวัลย์วงศ์ ไกรโรจนานันท์. (2542). *อิเล็กทรอนิกส์ระบบดิจิทัล (ฉบับปรับปรุง)*. กรุงเทพฯ : ซีเอ็ดยูเคชั่น.
- องค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย.กระทรวงคมนาคม. (2539).*แผนวิสาหกิจองค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย ฉบับที่ 4 พ.ศ. 2540-2544*. กรุงเทพฯ : กองการพิมพ์. องค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย
- . (2541). *ฝ่ายวิจัยและพัฒนาเทคนิค*. กรุงเทพฯ. องค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย.
- นิยม สังขวิเชียร. (2542).*การออกแบบและสร้างเครื่องมัลติเพล็กซ์ในระบบสื่อสารสัญญาณของโทรศัพท์ ขนาด32 ช่องสัญญาณ*. ปรินูญานิพนธ์ กศ.ม. (อุตสาหกรรมศึกษา).
กรุงเทพฯ : บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ .ถ่ายเอกสาร.
- สุชิน จำกิต. (2529).*วิศวกรรมโทรศัพท์.แผนกโทรศัพท์ ภาควิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม*
คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.พิมพ์ครั้งที่4.
กรุงเทพฯ : คณะวิศวกรรมศาสตร์.
- เอก ไชยสวัสดิ์. (2538).*สัญญาณและระบบ*. กรุงเทพฯ : เทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ITU-T Recommend(1993).*DIGITAL NETWORKS*. Previously CCITT Recommendation.
- Darold Wobschall . (1990). *Circuit Design for Electronic Instrumentation*. Singapore : Mc Graw-Hill Book Company.

ภาคผนวก

ที่ ทม. ๑๐๑๐(๑๘)/๕

สาขาวิชาอุตสาหกรรมศึกษา
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
สุขุมวิท ๒๓ กรุงเทพฯ ๑๐๑๑๐

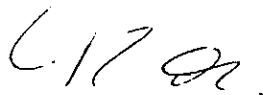
๒๒ สิงหาคม ๒๕๕๔

เรื่อง ขอความอนุเคราะห์ข้อมูลการจัดทำงานวิจัย

เรียน ผก.ดวท. องค์การโทรศัพท์แห่งประเทศไทย

เนื่องด้วย นางสาวพรทิพย์ นุ่มอินทร์ นิสิตปริญญาโท สาขาวิชาเอกอุตสาหกรรมศึกษา คณะศึกษาศาสตร์ ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ อยู่ในระหว่างการจัดทำงานวิจัยเรื่อง การออกแบบและสร้างเครื่องวัดความต้านทานจุดลงดิน แบบดิจิทัลในระบบงานข่ายสายโทรศัพท์ ต่อนนอก ซึ่งมี ดร.ไพรัช วงศ์ยุทธไกร ประธานกรรมการควบคุมงานวิจัย ผศ.ดร.ธีระพล เทพหัสดิน ณ.อยุธยา กรรมการควบคุมงานวิจัย

จึงเรียนมาเพื่อขอข้อมูลมาตรฐานเครื่องวัดความต้านทานจุดลงดิน เพื่อใช้เป็นเกณฑ์ ในการออกแบบและจัดสร้างเครื่องมือดังกล่าว และเพื่อประโยชน์ทางการศึกษาสืบต่อไป



(อาจารย์ ดร.ไพรัช วงศ์ยุทธไกร)

หัวหน้าสาขาวิชาอุตสาหกรรมศึกษา

ประธานคณะกรรมการบริหารหลักสูตรอุตสาหกรรมศึกษา

รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ของแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าคงที่

ตาราง 31 รายละเอียดของตัวเก็บประจุ

ลำดับที่	ขนาดของตัวเก็บประจุ (นาโนฟารัด)	ขนาดของตัวเก็บประจุ (ไมโครฟารัด)	ค่าผิดพลาด (ร้อยละ)	แรงดันไฟฟ้าที่ทนได้ (โวลท์)	ชนิด
1	-	0.01	20	63	เซรามิก
2	-	10	10	35	อิเล็กโทรไลต์

ตาราง 32 รายละเอียดของไดโอด

ลำดับที่	เบอร์	ชนิด	ขนาด (วัตต์)
1	1N4148	ไดโอด	0.25
2	1N4001	ไดโอด	0.25

ตาราง 33 รายละเอียดของทรานซิสเตอร์

ลำดับที่	เบอร์	ชนิด
1	BD139	ไบโพลาร์ NPN
2	BD140	ไบโพลาร์ PNP
3	K30	เฟต

ตาราง 34 รายละเอียดตัวต้านทาน

ลำดับที่	ขนาดของตัวต้านทาน (กิโลโอห์ม)	ขนาดของตัวต้านทาน (กิโลโอห์ม)	ค่าความผิดพลาด (ร้อยละ)	ขนาด (วัตต์)
1	-	100	5	0.25
2	-	220	5	0.25
3	-	10	5	0.25
4	-	2	5	0.25
5	-	1	5	0.25
6	-	50	5	0.25

สวิตช์โยก 6 ขา เปิดปิด

รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ของวงจรขยายสัญญาณไฟฟ้าแบบกลับเฟส

ตาราง 35 รายละเอียดของตัวเก็บประจุ

ลำดับที่	ขนาดของตัวเก็บประจุ (นาโนฟารัด)	ขนาดของตัวเก็บประจุ (ไมโครฟารัด)	ค่าผิดพลาด (ร้อยละ)	แรงดันไฟฟ้าที่ทนได้ (โวลท์)	ชนิด
1	-	0.01	20	63	เซรามิก
2	-	22	10	35	อิเล็กโทรไลต์

ตาราง 36 รายละเอียดตัวต้านทาน

ลำดับที่	ขนาดของตัวต้านทาน (กิโลโอห์ม)	ขนาดของตัวต้านทาน (กิโลโอห์ม)	ค่าความผิดพลาด (ร้อยละ)	ขนาด (วัตต์)
1	-	10	5	0.25
2	-	2	5	0.25

ไอซีเบอร์ MX536

รายละเอียดของอุปกรณ์ที่ใช้ส่วนแสดงผล

ตาราง 37 รายละเอียดของตัวเก็บประจุ

ลำดับที่	ขนาดของตัวเก็บประจุ (นาโนฟารัด)	ขนาดของตัวเก็บประจุ (ไมโครฟารัด)	ค่าผิดพลาด (ร้อยละ)	แรงดันไฟฟ้าที่ทนได้ (โวลท์)	ชนิด
1	100	-	10	35	อิเล็กโทรไลต์
2	-	0.42	10	35	อิเล็กโทรไลต์
3	-	0.22	10	35	อิเล็กโทรไลต์
4	-	0.01	20	65	เซรามิก

ตาราง 38 รายละเอียดของไดโอด

ลำดับที่	เบอร์	ชนิด	ขนาด (วัตต์)
1	1N4148	ไดโอด	.025

19-5038; Rev 0; 1985

MAXIM

3½ Digit A/D Converter With Display Hold

ICL7116/7117

General Description

The Maxim ICL7116 and ICL7117 are 3½ digit monolithic analog to digital converters. They differ from the Maxim ICL7106 and ICL7107 in that the ICL7116 and ICL7117 have a Hold pin which makes it possible to hold or "freeze" a reading. These integrating A/D converters have very high input impedances and directly drive LCD (ICL7116) and LED (ICL7117) displays.

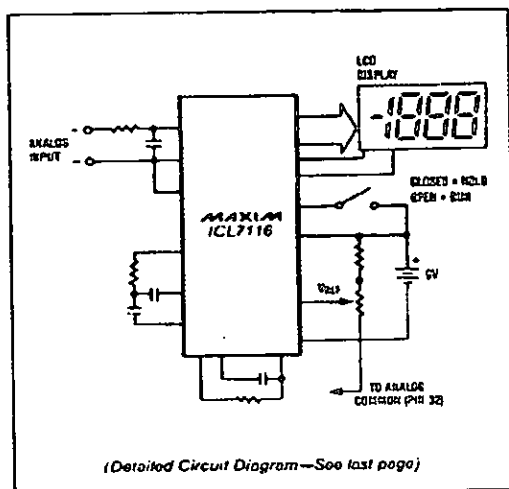
Versatility and accuracy are inherent features of these converters. The dual-slope conversion technique automatically rejects interference signals common in industrial environments. The true differential input is particularly useful when making ratio-metric measurements (ohms or bridge transducers). Maxim has added a zero-integrator phase to the ICL7116 and ICL7117, eliminating overrange hangover and hysteresis effects. Finally, these devices offer high accuracy by lowering rollover error to less than one count and zero reading drift to less than 1µV/°C.

Applications

These devices can be used in a wide range of digital panel meter applications. Most applications, however, involve the measurement and display of analog data:

Pressure	Conductance
Voltage	Current
Resistance	Speed
Temperature	Material Thickness

Typical Operating Circuit



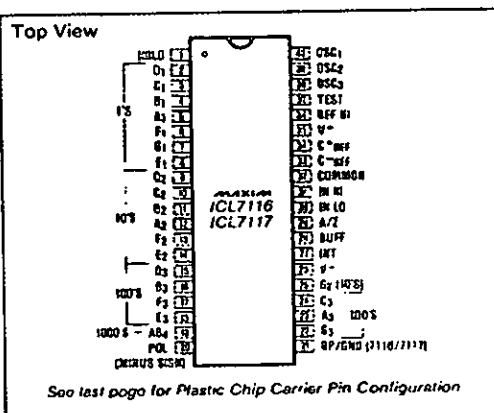
Features

- ◆ Improved 2nd Source! (See 3rd page for "Maxim Advantage™").
- ◆ Hold Pin Allows Indefinite Display Hold
- ◆ Guaranteed First Reading Recovery from Overrange
- ◆ On Board Display Drive Capability — No External Circuitry Required: LCD-ICL7116, LED-ICL7117
- ◆ High Impedance CMOS Differential Inputs
- ◆ Low Noise (< 15µV p-p) Without Hysteresis or Overrange Hangover
- ◆ Clock and Reference On-Chip
- ◆ Zero Input Gives Zero Reading
- ◆ True Polarity Indication for Precision Null Applications

Ordering Information

PART	TEMP. RANGE	PACKAGE
ICL7116CPL	0°C to +70°C	40 Lead Plastic DIP
ICL7116CJL	0°C to +70°C	40 Lead Cerdip
ICL7116CO	0°C to +70°C	44 Lead Plastic Chip Carrier
ICL7116C/D	0°C to +70°C	Dice
ICL7117CPL	0°C to +70°C	40 Lead Plastic DIP
ICL7117CJL	0°C to +70°C	40 Lead Cerdip
ICL7117CQ	0°C to +70°C	44 Lead Plastic Chip Carrier
ICL7117C/D	0°C to +70°C	Dice

Pin Configuration



The "Maxim Advantage™" signifies an upgraded quality level. At no additional cost we offer a second-source device that is subject to the following: guaranteed performance over temperature along with tighter test specifications on many key parameters; and device enhancements, when needed, that result in improved performance without changing the functionality.

MAXIM

Maxim Integrated Products

1

3½ Digit A/D Converter With Display Hold

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Supply Voltage		Power Dissipation (Note 2)	
ICL7116, V^+ to V^-	15V	Ceramic Package	1000mW
ICL7117, V^+ to GND	+6V	Cerdip Package	800mW
ICL7117, V^- to GND	-9V	Plastic Package	800mW
Analog Input Voltage (either input) (Note 1)	V^+ to V^-	Operating Temperature Range	0°C to +70°C
Reference Input Voltage (either input)	V^+ to V^-	Storage Temperature Range	-65°C to +160°C
Clock Input		Lead Temperature (soldering, 60 sec.)	+300°C
ICL7116	Test to V^+		
ICL7117	GND to V^+		

Note 1: Input voltage may exceed supply voltages, provided the input current is limited to $\pm 100\mu\text{A}$.
 Note 2: Dissipation rating assumes device is mounted with all leads soldered to printed circuit board.

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

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (Note 3)

CHARACTERISTICS	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Zero Input Reading	$V_{IN} = 0.0V$ Full Scale = 200.0mV	-000.0	± 000.0	+000.0	Digital Reading
Ratiometric Reading	$V_{IN} = V_{REF} = 100mV$	999	999/1000	1000	Digital Reading
Rollover Error (Difference in Reading for Equal Positive and Negative Reading Near Full Scale)	$-V_{IN} = +V_{IN} = 200.0mV$	-1	± 0.2	+1	Counts
Linearity (Max. Deviation from Best Straight Line Fit)	Full Scale = 200mV or Full Scale = 2.000mV	-1	± 0.2	+1	Counts
Common Mode Rejection Ratio (Note 4)	$V_{CM} = \pm 1V$, $V_{IN} = 0V$ Full Scale = 200.0mV	50		$\mu V/V$	
Noise (Pk-Pk Value Not Exceeded 95% of the Time)	$V_{IN} = 0V$ Full Scale = 200.0mV		15		μV
Leakage Current @ Input	$V_{IN} = 0V$		1	10	pA
Zero Reading Drift	$V_{IN} = 0V$, $0^\circ C < T_A < 70^\circ C$		0.2	1	$\mu V/^\circ C$
Scale Factor Temperature Coefficient	$V_{IN} = 199.0mV$ $0^\circ C < T_A < 70^\circ C$ (Ext. Ref. $0ppm/^\circ C$)		1	5	$ppm/^\circ C$
V^+ Supply Current (Does Not Include LED Current for 7117)	$V_{IN} = 0$		0.8	1.8	mA
V^- Supply Current 7117 Only			0.6	1.8	mA
Analog Common Voltage (With Respect to Pos. Supply)	25 Ω Between Common & Pos. Supply	2.4	2.8	3.2	V
Temp. Coeff. of Analog Common (With Respect to Pos. Supply)	25 Ω Between Common & Pos. Supply		60		$ppm/^\circ C$
Input Resistance, Pin 1 (Note 6)		30	70		k Ω
V_{OL} , Pin 1 (7116 Only)				TEST -1.5	V
V_{OL} , Pin 1 (7117 Only)				GND +1.5	V
V_{IH} , Pin 1 (Both)		$V^+ - 1.5$			V
7116 Only (Note 5)	V^- to $V^+ = 9V$	4	5	6	V
Pk-Pk Segment Drive Voltage, Pk-Pk Backplane Drive Voltage		4	5	6	V
7117 Only (Except Pin 19) Segment Sinking Current (Pin 19 Only)	$V^+ = 5.0V$ Segment Voltage = 3V	5 10	8.0 16		mA

Note 3: Unless otherwise noted, specifications apply to both the 7116 and 7117 at $T_A = 25^\circ C$, $f_{CLOCK} = 48kHz$. 7116 is tested in the circuit of Figure 1. 7117 is tested in the circuit of Figure 2.

Note 4: Refer to "Differential Input" discussion. (See Maxim's ICL7108/ICL7107 data sheet)

Note 5: Backplane drive is in phase with segment drive for 'off' segment, 180° out of phase for 'on' segment. Frequency is 20 times conversion rate. Average DC component is less than 50mV.

Note 6: The 7116 logic input has an internal pull-down resistor connected from HLDR, pin 1, to TEST, pin 37. The 7117 logic input has an internal pull-down resistor connected from HLDR, pin 1, to GROUND, pin 21.

The electrical characteristics above are a reproduction of a portion of Maxim's copyrighted 1993-1994 data book. The information does not constitute any representation by Maxim that Maxim's products will perform in accordance with these specifications. The "Electrical Characteristics Table" along with descriptive excerpts from the original manufacturer's data sheet have been included in this data sheet solely for comparative purposes.

MAXIM

3½ Digit A/D Converter With Display Hold

- ◆ Guaranteed Overload Recovery Time
- ◆ Significantly Improved ESD Protection (Note 8)
- ◆ Low Noise

- ◆ Key Parameters Guaranteed Over Temperature
- ◆ Negligible Hysteresis
- ◆ Maxim Quality and Reliability

◆ Increased Maximum Rating for Input Current (Note 9)

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS: This device conforms to the Absolute Maximum Ratings on adjacent page.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS: Specifications below satisfy or exceed all "tested" parameters on adjacent page.
($V^+ = 9V$, $T_A = 25^\circ C$, $f_{clock} = 48kHz$; test circuit - Figure 1 (ICL7116), Figure 2 (ICL7117) unless noted)

PARAMETERS	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Zero Input Reading	$V_{IN} = 0.0V$, Full Scale = 200.0mV $T_A = 25^\circ C$ (Note 7) $0^\circ C \leq T_A \leq 70^\circ C$ (Note 11)	-000.0 -000.0	± 000.0 ± 000.0	+000.0 +000.0	Digital Reading
Ratiometric Reading	$V_{IN} = V_{REF} = 100mV$ $T_A = 25^\circ C$ (Note 7) $0^\circ C \leq T_A \leq 70^\circ C$ (Note 11)	999 998	999/1000 999/1000	1000 1001	Digital Reading
Rollover Error (Difference in Reading for Equal Positive and Negative Reading Near Full Scale)	$-V_{IN} = +V_{IN} = 200.0mV$ $T_A = 25^\circ C$ (Note 7) $0^\circ C \leq T_A \leq 70^\circ C$ (Note 11)	-1	± 0.2 ± 0.2	+1	Counts
Linearity (Max. Deviation from Best Straight Line Fit)	Full Scale = 200mV or Full Scale = 2.000mV	-1	± 0.2	+1	Counts
Common Mode Rejection Ratio	$V_{CM} = \pm 1V$, $V_{IN} = 0V$ Full Scale = 200.0mV		50		$\mu V/V$
Noise (Pk-Pk Value Not Exceeded 95% of the Time)	$V_{IN} = 0V$ Full Scale = 200.0mV		15		μV
Input Leakage Current	$V_{IN} = 0V$, $T_A = 25^\circ C$ (Note 7) $0^\circ C \leq T_A \leq 70^\circ C$		1 20	10 200	pA
Zero Reading Drift	$V_{IN} = 0V$ $0^\circ C \leq T_A \leq 70^\circ C$ (Note 7)		0.2	1	$\mu V/^\circ C$
Scale Factor Temperature Coefficient	$V_{IN} = 199.0mV$ $0^\circ C \leq T_A \leq 70^\circ C$ (Ext. Ref. 0ppm/ $^\circ C$)		1	5	ppm/ $^\circ C$
V^+ Supply Current (Does Not Include LED Current for 7117)	$V_{IN} = 0V$ $T_A = 25^\circ C$ $0^\circ C \leq T_A \leq 70^\circ C$		0.8	1.8 2	mA
V^- Supply Current 7117 Only			0.8	1.8	mA
Analog Common Voltage (With Respect to Pos. Supply)	25k Ω Between Common & Pos. Supply	2.4	2.8	3.2	V
Temp. Coeff. of Analog Common (With Respect to Pos. Supply)	25k Ω Between Common & Pos. Supply		75		ppm/ $^\circ C$
Input Resistance, Pin 1 (Note 6)		30	70		k Ω
V_{A-} , Pin 1 (7116 Only)				TEST +1.5	V
V_{A-} , Pin 1 (7117 Only)				GND +1.5	V
V_{B+} , Pin 1 (Both)		$V^+ - 1.5$			V
7116 Only (Note 5) Pk-Pk Segment Drive Voltage, Pk-Pk Backplane Drive Voltage	$V^+ \text{ to } V^- = 9V$	4	5	6	V
7117 Only (Except Pin 19) Segment Sinking Current (Pin 19 Only)	$V^+ = 5.0V$ Segment Voltage = 3V	5 10	8.0 16		mA
7116 Only — Test Pin Voltage	With Respect to V^+	4	5	6	V
Overload Recovery Time (Note 10)	V_{IN} changing from $\pm 10V$ to 0V		0	1	Measurement Cycles

Note 7: Test condition is V_{IN} applied between pins IN-HI and IN-LO. I.e., 1M Ω resistor in Figures 1 and 2.

Note 8: All pins are designed to withstand electrostatic discharge (ESD) levels in excess of 2000V. (Test circuit per MIL-Std 883C, Method 3015.2.)

Note 9: Input voltages may exceed the supply voltage provided the input current is limited to $\pm 1mA$ (This revises Note 1 on the adjacent page).

Note 10: Number of measurement cycles for display to give accurate reading.

Note 11: 1M Ω resistor is removed in Figures 1 and 2.

MAXIM

ICL7116/7117

ICL7116/7117

3½ Digit A/D Converter With Display Hold

Detailed Description

The Maxim ICL7116 and ICL7117 3½ digit A/D converter are similar to the Maxim ICL7106 and ICL7107, except for the addition of a Hold pin. For a detailed product description, package dimensions, and applications information (other than the operation of the Hold pin described below) refer to Maxim's ICL7106 and ICL7107 data sheet.

Hold Input

The Hold input is a digital input with a logic threshold approximately midway between V⁺ and Test (ICL7116) or V⁺ and Ground (ICL7117). The ICL7116/7117 continuously performs conversions, independent of the Hold input. When the Hold input is connected to V⁺,

however, the display latch pulse is inhibited, and the display latches are not updated. The Hold input has a 70 kilohm pulldown resistor to Test (ICL7116) or Ground (ICL7117) and the Hold input will be pulled low if it is left open. When Hold is low the ICL7116/ICL7117 updates the display at the end of each conversion. The Hold input is CMOS compatible, and can also be driven by a switch connected to V⁺ (Figure 1 and 2) or by a PNP transistor.

Unlike the ICL7106 and the ICL7107, the ICL7116 and ICL7117 do not have a Reference Low input. Apply the reference voltage between Reference High (REF HI) and Common.

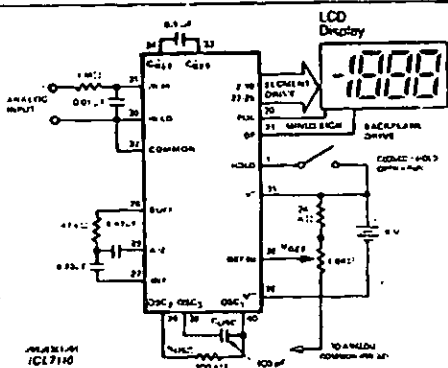


Figure 1. Maxim ICL7116 Typical Operating Circuit. 200mV Reference

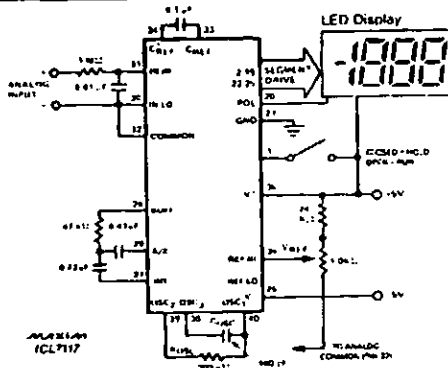
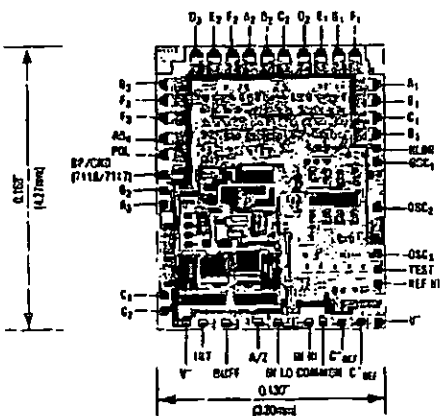


Figure 2. Maxim ICL7117 Typical Operating Circuit. 200mV Reference

Chip Topography





True RMS-to-DC Converters

General Description

MX536A and MX636 are true RMS-to-DC converters. They feature low power and are designed to accept level input signals from 0 to 7V_{RMS} for the MX536A and 0 to 200mV_{RMS} for the MX636. Both devices accept complex input waveforms containing AC and DC components. They can be operated from either a single or dual supplies. Both devices draw less than 1mA quiescent supply current, making them ideal for battery-powered applications.

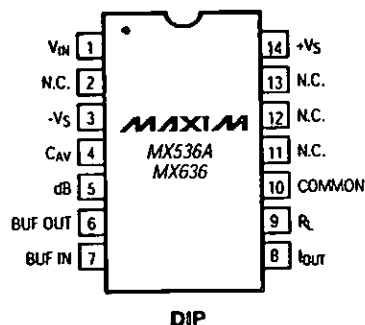
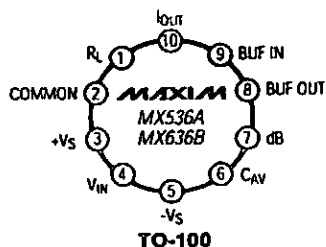
Input and output offset, positive and negative waveform symmetry (DC reversal), and full-scale accuracy are factory trimmed, so that no external trims are required to achieve full rated accuracy.

Applications

Digital Multimeters
Battery-Powered Instruments
Panel Meters
Process Control

Pin Configurations

TOP VIEW



Pin Configurations continued at end of data sheet.

Features

- ♦ True RMS-to-DC Conversion
- ♦ Computes RMS of AC and DC Signals
- ♦ Wide Response:
 - 2MHz Bandwidth for V_{RMS} > 1V (MX536A)
 - 1MHz Bandwidth for V_{RMS} > 100mV (MX636)
- ♦ Auxiliary dB Output: 60dB Range (MX536A)
50dB Range (MX636)
- ♦ Single- or Dual-Supply Operation
- ♦ Low Power: 1.2mA typ (MX536A)
800μA typ (MX636)

Ordering Information

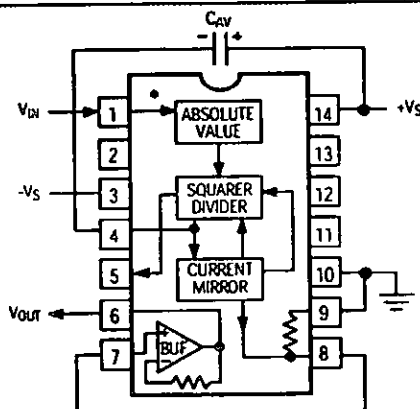
PART	TEMP. RANGE	PIN-PACKAGE
MX536AJC/D	0°C to +70°C	Dice**
MX536AJCWE	0°C to +70°C	16 Wide SO
MX536AJD	0°C to +70°C	14 Ceramic
MX536AJH	0°C to +70°C	10 TO-100
MX536AJN	0°C to +70°C	14 Plastic DIP
MX536AJQ*	0°C to +70°C	14 Cerdip
MX536AKCWE	0°C to +70°C	16 Wide SO
MX536AKD	0°C to +70°C	14 Ceramic
MX536AKH	0°C to +70°C	10 TO-100
MX536AKN	0°C to +70°C	14 Plastic DIP
MX536AKQ*	0°C to +70°C	14 Cerdip
MX536ASD	-55°C to +125°C	14 Ceramic

Ordering information continued at end of data sheet.

* Maxim reserves the right to ship ceramic packages in lieu of Cerdip packages.

** Dice are specified at T_A = +25°C.

Typical Operating Circuits



Typical Operating Circuits continued at end of data sheet.

MX536A/MX636

MAXIM

Maxim Integrated Products 1

For free samples & the latest literature: <http://www.maxim-lc.com>, or phone 1-800-998-8800.
For small orders, phone 408-737-7600 ext. 3468.

True RMS-to-DC Converters

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

Supply Voltage: Dual Supplies (MX536A).....	±18V
(MX636).....	±12V
Single Supply (MX536A).....	+36V
(MX636).....	+24V
Output Voltage (MX536A).....	±25V
(MX636).....	±12V
Power Dissipation (Package)	
Plastic DIP (derate 12mW/°C above +75°C).....	450mW
Small Outline (derate 10mW/°C above +75°C).....	400mW
Ceramic (derate 10mW/°C above +75°C).....	500mW
100 metal can (derate 7mW/°C above +75°C).....	450mW

Output Short-Circuit Duration.....	Indefinite
Operating Temperature Ranges	
Commercial (J, K).....	0°C to +70°C
Military (S).....	-55°C to +125°C
Storage Temperature Range.....	-55°C to +150°C
Lead Temperature (soldering, 10sec).....	300°C

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

ELECTRICAL CHARACTERISTICS—MX536A

+25°C, +V_S = +15V, -V_S = -15V, unless otherwise noted.)

PARAMETER	CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNITS
Transfer Equation			$V_{OUT} = [\text{avg. } (V_{IN})^2]^{1/2}$			
Settling Time Constant	Figure 3		25			ms/ μ F CAV
CONVERSION ACCURACY						
Integral Error, Internal Trim (Note 1)	MX536AJ, AS		$\pm 5 \pm 0.5$			mV $\pm$ % of Reading
	MX536AK		$\pm 2 \pm 0.2$			
Integral Error vs. Temperature	T _{MIN} to +70°C	MX536AJ	$\pm 0.1 \pm 0.01$			mV $\pm$ % of Reading/°C
		MX536AK	$\pm 0.05 \pm 0.005$			
		MX536AS	$\pm 0.1 \pm 0.005$			
	+70°C to +125°C	MX536AS	$\pm 0.03 \pm 0.005$			
Integral Error vs. Supply			$\pm 0.1 \pm 0.01$			mV $\pm$ % of Reading/V
Integral Error vs. DC Reversal	MX536AJ, AS		± 0.2			% of Reading
	MX536AK		± 0.1			
Integral Error, External Trim (Note 1)	MX536AJ, AS		$\pm 3 \pm 0.3$			mV $\pm$ % of Reading
	MX536AK		$\pm 2 \pm 0.1$			
RIPPLE vs. CREST FACTOR (Note 2)						
Additional Error	Crest Factor 1 to 2		Specified Accuracy			% of Reading
	Crest Factor = 3		-0.1			
	Crest Factor = 7		-1.0			
FREQUENCY RESPONSE (Note 3)						
Bandwidth for 1% Additional Error (0.09dB)	V _{IN} = 10mV		5			kHz
	V _{IN} = 100mV		45			
	V _{IN} = 1V		120			
3dB Bandwidth	V _{IN} = 10mV		90			kHz
	V _{IN} = 100mV		450			
	V _{IN} = 1V		2.3			MHz

True RMS-to-DC Converters

MX536A/MX636

ELECTRICAL CHARACTERISTICS—MX536A (continued)

+25°C, +V_S = +15V, -V_S = -15V, unless otherwise noted.)

PARAMETER		CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNITS
INPUT CHARACTERISTICS							
Input Signal Range	±15V Supplies Continuous RMS Peak Transient		0 to 7			V _{RMS}	
			±20			V _{PK}	
	±5V Supplies Continuous RMS Peak Transient		0 to 2			V _{RMS}	
			±7			V _{PK}	
Input Impedance	All Supplies		±25			V _{PK}	
Input Resistance			13.33	16.7	20.00	kΩ	
Input Offset Voltage	MX536AJ, AS		0.8			mV	
	MX536AK		0.5				
OUTPUT CHARACTERISTICS							
Output Offset Voltage	T _A = +25°C	MX536AJ	±1			±2	mV
		MX536AK	±0.5			±1	
		MX536AS				±2	
	T _A = T _{MIN} to T _{MAX}	MX536AJ, AK	±0.1			mV/°C	
		MX536AS					±0.2
	Supply Voltage	MX536AJ, AK	±0.1			mV/V	
		MX536AS	±0.2				
	Output Voltage Swing	±15V Supplies		0 to 11	12.5		V
±5V Supplies		0 to 2					
Output Current	Source		5			mA	
	Sink		-130			μA	
Short Circuit Current			20			mA	
Output Resistance			0.5			Ω	
TEST OUTPUT							
Gain Error	V _{IN} = 7mV to 7V _{RMS} , 0dB = 1V _{RMS}	MX536AJ	±0.4			±0.6	dB
		MX536AK	±0.2			±0.3	
		MX536AS	±0.5			±0.6	
Gain Error Factor			-3			mV/dB	
Gain Error Factor TC (Uncompensated)			0.33			% of Reading/°C	
Offset Current	0dB = 1V _{RMS}		5	20	80	μA	
Offset Current Range			1	100		μA	
TEST TERMINAL							
Test Scale Factor			40			μA/V _{RMS}	
Test Scale Factor Tolerance			±10			±20	%
Test Output Resistance			20	25	30	kΩ	
Test Voltage Compliance			-V _S to (+V _S - 2.5)			V	

True RMS-to-DC Converters

ELECTRICAL CHARACTERISTICS—MX536A (continued)

+25°C. +V_S = +15V, -V_S = -15V, unless otherwise noted.)

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
OPERATIONAL AMPLIFIER					
Input and Output Voltage Range		-V _S to (+V _S - 2.5)			V
Input Offset Voltage	R _S = 25kΩ		±0.5	±4	mV
Input Bias Current			20	300	nA
Input Resistance			10 ⁸		Ω
Input Current	Source	+5			mA
	Sink	-130			μA
Quiescent Current			20		mA
Full-Signal Bandwidth			1		MHz
Slew Rate (Note 4)			5		V/μs

ELECTRICAL CHARACTERISTICS—MX636

+25°C. +V_S = +3V, -V_S = -5V, unless otherwise noted.)

PARAMETER	CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNITS
Transfer Equation			$V_{OUT} = [\text{avg. } (V_{IN})^2]^{1/2}$			
Sampling Time Constant	Figure 3		25			ms/μF C _{AV}
CONVERSION ACCURACY						
Integral Error, Internal Trim (Notes 5, 6)	MX636J		±0.5 ±1.0			mV ±% of Reading
	MX636K		±0.2 ±0.5			
Integral Error vs. Temperature (0°C to +70°C)	MX636J		±0.1 ±0.01			mV ±% of Reading/°C
	MX636K		±0.1 ±0.005			
Integral Error vs. Supply			±0.1 ±0.01			mV ±% of Reading/V
Integral Error vs. DC Reversal	V _{IN} = 200mV	MX636J	±0.2			±% of Reading
		MX636K	±0.1			
Integral Error, External Trim (Note 5)	MX636J		±0.3 ±0.1			mV ±% of Reading
	MX636K		±0.1 ±0.1			
ERROR vs. CREST FACTOR (Note 3)						
Additional Error	Crest Factor 1 to 2		Specified Accuracy			±% of Reading
	Crest Factor = 3		-0.2			
	Crest Factor = 6		-0.5			
FREQUENCY RESPONSE (Notes 6, 8)						
Bandwidth for 1% Additional Error (0.09dB)	V _{IN} = 10mV		14			kHz
	V _{IN} = 100mV		90			
	V _{IN} = 200mV		130			
dB Bandwidth	V _{IN} = 10mV		100			kHz
	V _{IN} = 100mV		900			
	V _{IN} = 200mV		1.5			MHz

True RMS-to-DC Converters

MX536A/MX636

ELECTRICAL CHARACTERISTICS—MX636 (continued)

+25°C, +VS = +3V, -VS = -5V, unless otherwise noted.)

PARAMETER	CONDITIONS		MIN	TYP	MAX	UNITS
INPUT CHARACTERISTICS						
Input Signal Range	Continuous RMS, All Supplies		0 to 200			mVRMS
	Peak Transient	+3V, -5V Supplies	±2.8			V _{PK}
		±2.5V Supplies	±2			
		±5V Supplies	±5			
Input	All Supplies		±12			V _{PK}
Input Resistance			5.33	6.7	8.00	kΩ
Input Offset Voltage	MX636J		±0.5			mV
	MX636K		±0.2			
INPUT CHARACTERISTICS (Note 5)						
Input Offset Voltage	T _A = +25°C	MX636J	±0.5			mV
		MX636K	±0.2			
	T _A = T _{MIN} to T _{MAX}		±10			μV/°C
	With Supply Voltage		±0.1			mV/V
Input Voltage Swing	+3V, -5V Supplies		0 to 1			V
	±5V to ±16.5V Supplies		0 to 1	1.4		
Input Resistance			8	10	12	kΩ
OUTPUT						
Error	7mV ≤ V _{IN} ≤ 300mV	MX636J	±0.3	±0.5		dB
		MX636K	±0.1	±0.2		
Scale Factor			-3			mV/dB
Scale Factor Tempco			+0.33			%/°C
			-0.033			dB/°C
Offset	0dB = 1V _{RMS}		2	4	8	μA
Offset Range			1		50	μA
TERMINAL						
Output Scale Factor			100			μA/V _{RMS}
Output Scale Factor Tolerance			-20	±10	+20	%
Output Resistance			8	10	12	kΩ
Voltage Compliance			-V _S to (+V _S - 2.0)			V
DIFFERENTIAL AMPLIFIER						
Input and Output Voltage Range			-V _S to (+V _S - 2)			V
Input Offset Voltage	R _S = 10kΩ	MX636J	±0.8	±2		mV
		MX636K	±0.5	±1		
Input Current			100	300		nA
Input Resistance			10 ⁸			Ω
Output Current	Source		+5			mA
	Sink		-130			μA
Short-Circuit Current			20			mA
Half-Signal Bandwidth			1			MHz
Rise Rate (Note 9)			5			V/μs

True RMS-to-DC Converters

ELECTRICAL CHARACTERISTICS—MX636 (continued)

(+25°C, +V_S = +3V, -V_S = -5V, unless otherwise noted.)

PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
POWER SUPPLY					
Load Performance			+3/-5		V
Input Supplies		+2/-2.5		±16.5	V
Single Supply		+5		+24	V
Quiescent Current (Note 10)			0.8	1	mA

- 1: Accuracy is specified for 0 to 7V_{RMS}. DC or 1kHz sine-wave input with the MX536A connected as in Figure 2.
- 2: Error vs. crest factor is specified as an additional error for 1V_{RMS} rectangular pulse stream, pulse width = 200μs.
- 3: Input voltages are expressed in volts RMS, and error as % of reading.
- 4: With 2kΩ external pull-down resistor.
- 5: Accuracy is specified for 0 to 200mV, DC or 1kHz sine-wave input. Accuracy is degraded at higher RMS signal levels.
- 6: Measured at pin 8 of DIP and SO (I_{OUT}), with pin 9 tied to COMMON.
- 7: Error vs. crest factor is specified as an additional error for 200mV_{RMS} rectangular pulse input, pulse width = 200μs.
- 8: Input voltages are expressed in volts RMS.
- 9: With 10kΩ external pull-down resistor from pin 6 (BUF OUT) to -V_S.
- 10: With BUF input tied to COMMON.

Detailed Description

The MX536A/MX636 uses an implicit method of RMS computation that overcomes the dynamic range as well as other limitations inherent in a straightforward computation of the RMS. The actual computation performed by the MX536A/MX636 follows the equation:

$$V_{RMS} = \text{Avg.} [V_{IN}^2/V_{RMS}]$$

The input voltage, V_{IN}, applied to the MX536A/MX636 is processed by an absolute-value/voltage to current converter that produces a unipolar current I₁ (Figure 1). This current drives one input of a squarer/divider that produces a current I₄ that has a transfer function:

$$I_4 = \frac{I_1^2}{I_3}$$

The current I₄ drives the internal current mirror through a bypass filter formed by R1 and an external capacitor C_{AV}. As long as the time constant of this filter is greater than the longest period of the input signal, I₄ is averaged. The current mirror returns a current, I₃, to the squarer/divider to complete the circuit. The current I₄ is a function of the average of (I₁²/I₃), which is equal to the RMS.

The current mirror also produces a 2 · I₄ output current, I_{OUT}, that can be used directly or converted to a voltage using resistor R2 and the internal buffer to provide a low-impedance voltage output. The transfer function for the MX536A/MX636 is:

$$V_{OUT} = 2 \cdot R_2 \cdot I_{RMS} = V_{IN}$$

The dB output is obtained by the voltage at the emitter of Q3, which is proportional to the -log V_{IN}. The emitter follower Q5 buffers and level shifts this voltage so that the dB output is zero when the externally set emitter current for Q5 approximates I₃.

Standard Connection (Figure 2)

The standard RMS connection requires only one external component, C_{AV}. In this configuration the MX536A/MX636 measures the RMS of the AC and DC levels present at the input, but shows an error for low-frequency inputs as a function of the C_{AV} filter capacitor. Figure 3 gives practical values of C_{AV} for various values of averaging error over frequency for the standard RMS connections (no post filtering). If a 3μF capacitor is chosen, the additional error at 100Hz will be 1%. If the DC error can be rejected, a capacitor should be connected in series with the input, as would typically be the case in single-supply operation.

The input and output signal ranges are a function of the supply voltages. Refer to the electrical characteristics for guaranteed performance. The buffer amplifier can be used either for lowering the output impedance of the circuit, or for other applications such as buffering high-impedance input signals. The MX536A/MX636 can be used in current output mode by disconnecting the internal load resistor, R_L, from ground. The current output is available at pin 8 (pin 10 on the "H" package) with a nominal scale of 40μA/V_{RMS} input for the MX536A and 100μA/V_{RMS} input for the MX636. The output is positive.

True RMS-to-DC Converters

MX536A/MX636

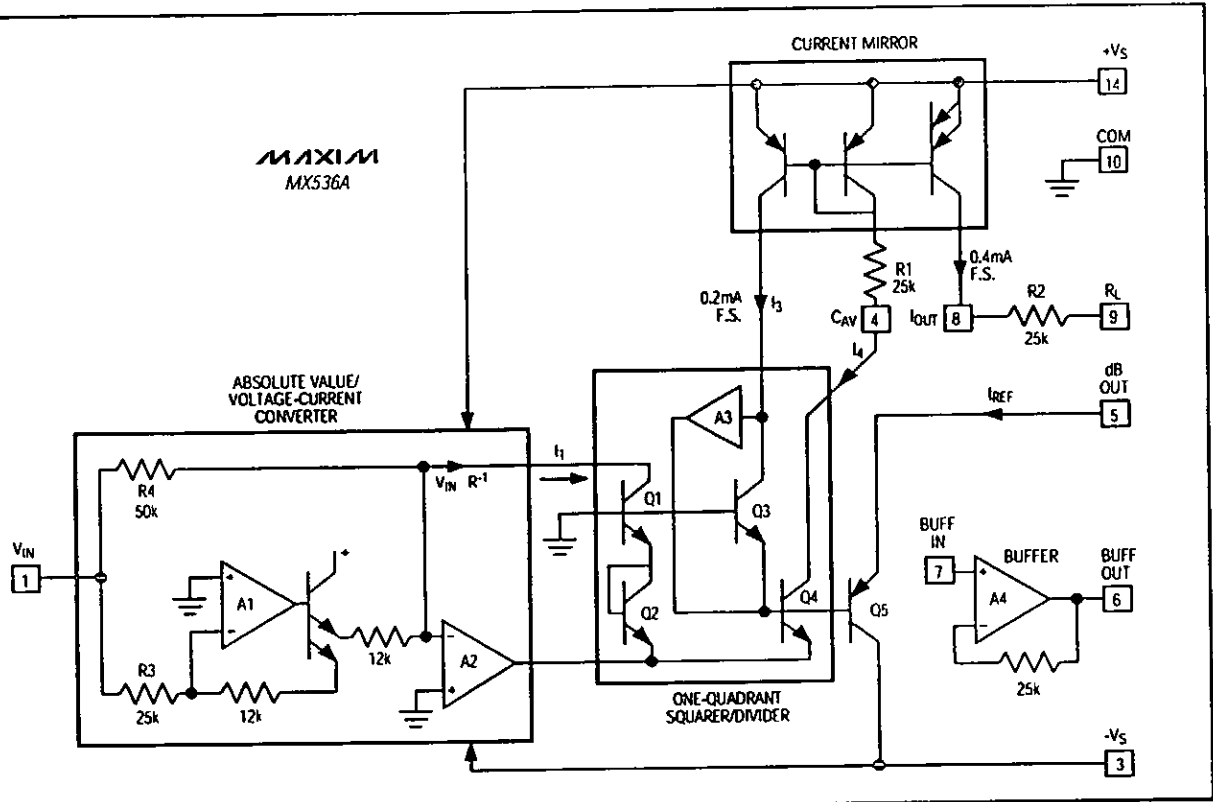


Figure 1. MX536A Simplified Schematic

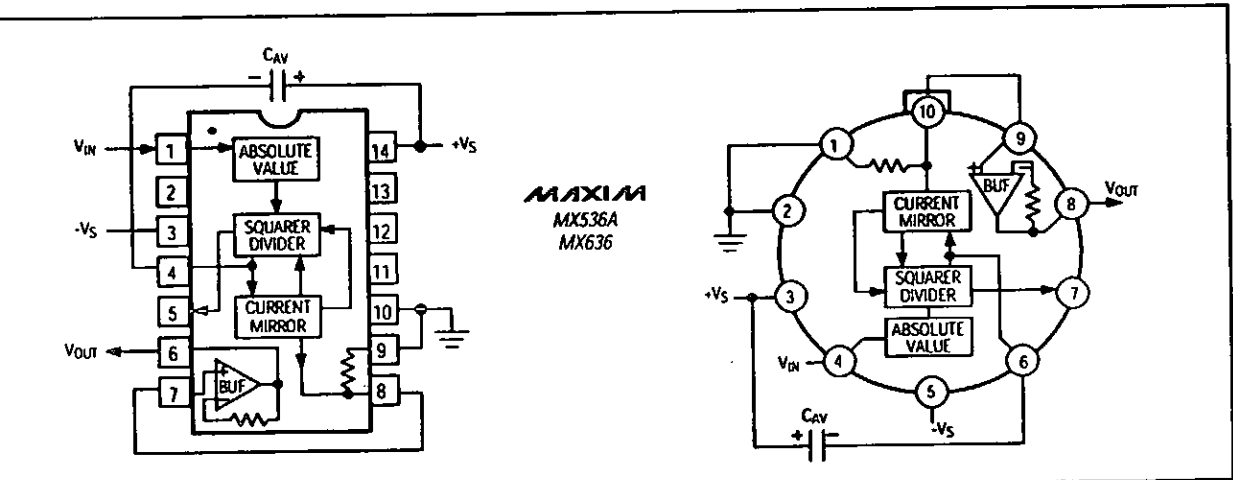


Figure 2. MX536A/MX636 Standard RMS Connection

True RMS-to-DC Converters

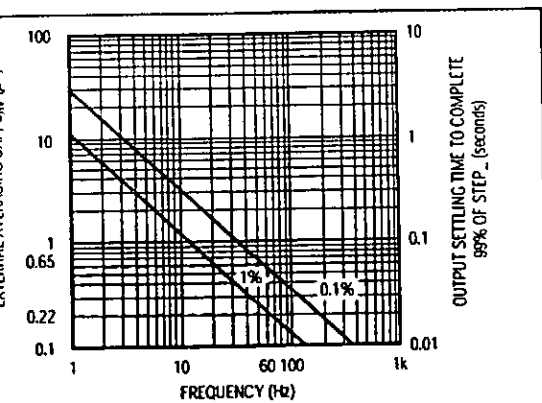


Figure 3. Lower Frequency for Stated % of Reading Error and Settling Time for Circuit shown in Figure 2

High-Accuracy Adjustments

The accuracy of the MX536A/MX636 can be improved by the addition of external trims as shown in Figure 4. Trims adjust the offset. The input should be grounded and adjusted to give zero volts output from pin 6. R1 is chosen to give the correct value for either a calibrated input or a calibrated AC signal. For example: 200mV input should give 200mV DC output; a ± 200 mV ± 10 -to-peak sine-wave should give 141mV DC output.

Single-Supply Operation

The MX536A and the MX636 can be used with a single supply down to +5V (Figure 5). The major limitation of this connection is that only AC signals can be measured, since the differential input stage must be biased off ground for proper operation. The load resistor is necessary to provide output sink current. The input signal is coupled through C2 and the value chosen so that the desired low-frequency break point is obtained with the input resistance of 16.7k Ω for the MX536A and 6.7k Ω for the MX636.

Figure 5 shows how to bias pin 10 within the range of the supply voltage (pin 2 on "H" packages). It is critical that no extraneous signals are coupled into this pin. A capacitor connected between pin 10 and ground is recommended. The common pin requires less than 5 μ A input current, and if the current flowing through resistors R1 and R2 is chosen to be approximately 10 times the common pin current, or 50 μ A, the resistor values can easily be calculated.

Choosing the Averaging Time Constant

For the MX536A and MX636 compute the RMS value of AC and DC signals. At low frequencies and DC, the output tracks the input exactly; at higher frequencies,

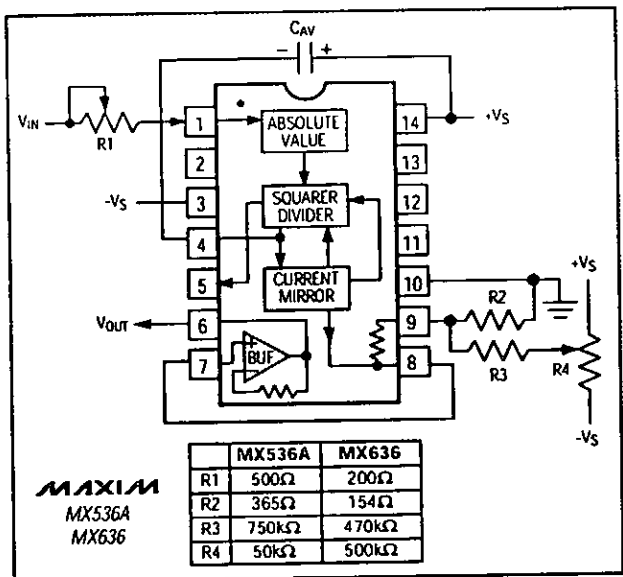


Figure 4. Optional External Gain and Output Offset Trims

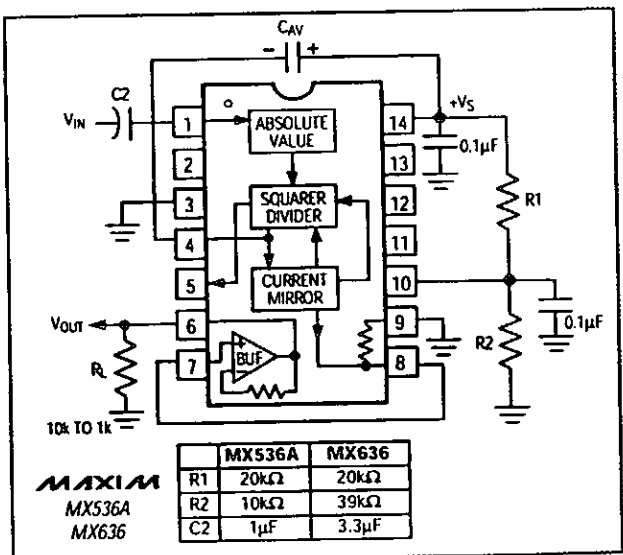


Figure 5. Single-Supply Operation

the average output approaches the RMS value of the input signal. The actual output differs from the ideal by an average (or DC) error plus some amount of ripple.

The DC error term is a function of the value of C_{AV} and the input signal frequency. The output ripple is inverse-

True RMS-to-DC Converters

MX536A/MX636

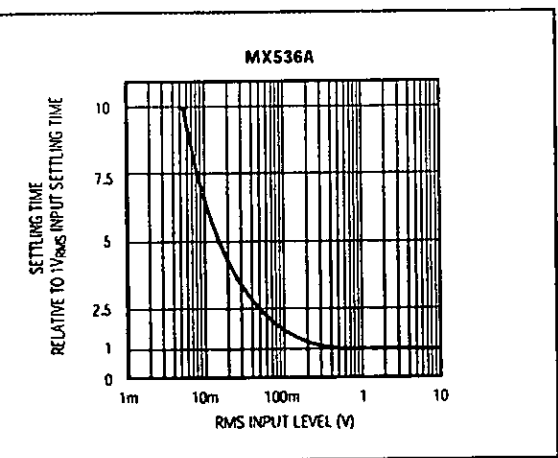


Figure 6a. MX536A Settling Time vs. Input Level

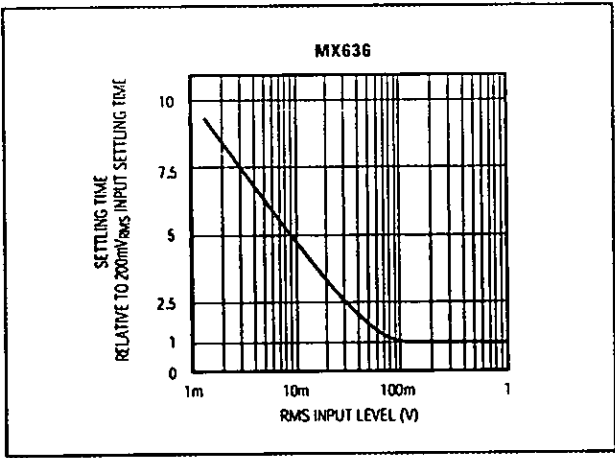


Figure 6b. MX636 Settling Time vs. Input Level

proportional to the value of C_{AV} . Waveforms with high duty factors, such as a pulse train with low duty cycle, could have an average time constant chosen to be at least ten times the signal period.

Using a large value of C_{AV} to remove the output ripple decreases the settling time for a step change in the input signal level. Figure 3 shows the relationship between C_{AV} and settling time, where 115ms settling equals 1μF C_{AV} . The settling time, or time for the RMS converter to settle to within a given percent of the change in RMS level, is set by the averaging time constant, which varies approximately 2:1 between increasing and decreasing input signals. For example, increasing input signals require 2.3 time constants to settle to within 1%, and 4.6 time constants for decreasing signals levels.

In addition, the settling time also varies with input signal levels, increasing as the input signal is reduced, and decreasing as the input is increased as shown in Figures 6a and 6b.

Using Post Filters

A post filter allows a smaller value of C_{AV} , and reduces ripple and improves the overall settling time. The value of C_{AV} should be just large enough to give the maximum DC error at the lowest frequency of interest. The post filter is used to remove excess output ripple. Figures 7, 8, and 9 give recommended filter connections and values for both the MX536A and MX636. Table 1 lists the number of time constants required for the RMS section to settle to within different percentages of the final value for a step change in the input signal.

Table 1. Number of RC Time Constants (τ) Required for MX536A/MX636 RMS Converters to Settle to Within Stated % of Final Value

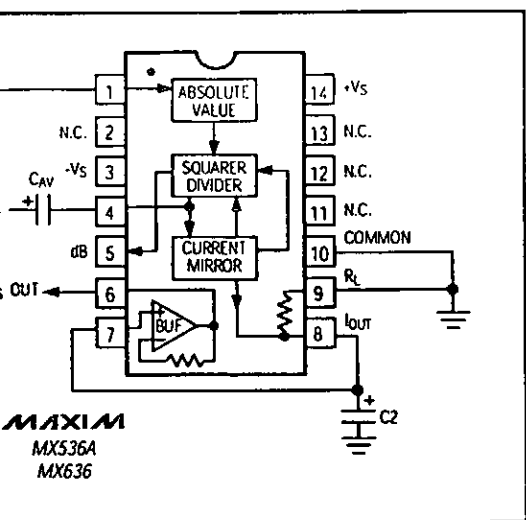
PARAMETERS		FOR INCREASING AMPLITUDES	FOR DECREASING AMPLITUDES
Basic Formulas		$\Delta V \sqrt{1 - e^{-T/RC}}$	$\Delta V \sqrt{e^{-T/RC}}$
Settling Time to Within Stated % of New RMS Level	1%	$4.6\tau/2.0\tau$	$4.6\tau/4.6\tau$
	0.1%	$6.9\tau/3.1\tau$	$6.9\tau/6.9\tau$
	0.01%	$9.2\tau/4.2\tau$	$9.2\tau/9.2\tau$

Note: (τ) Settling Times for Linear RC Filter

Decibel Output (dB)

The dB output of the MX536A/MX636 originates in the squarer/divider section and works well over a 60dB range. The connection for dB measurements is shown in Figure 10. The dB output has a temperature drift of 0.03dB/°C, and in some applications may need to be compensated. Figure 10 shows a compensation scheme. The amplifier can be used to scale the output for a particular application. The values used in Figure 10 give an output of +100mV/dB.

ie RMS-to-DC Converters



7. MX536A/MX636 with a One-Pole Output Filter

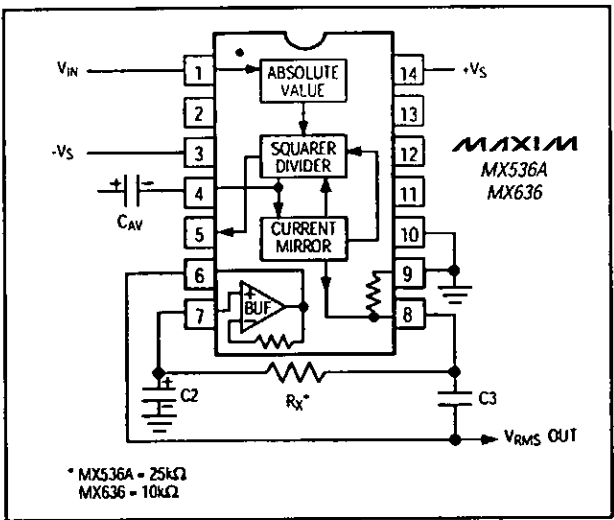
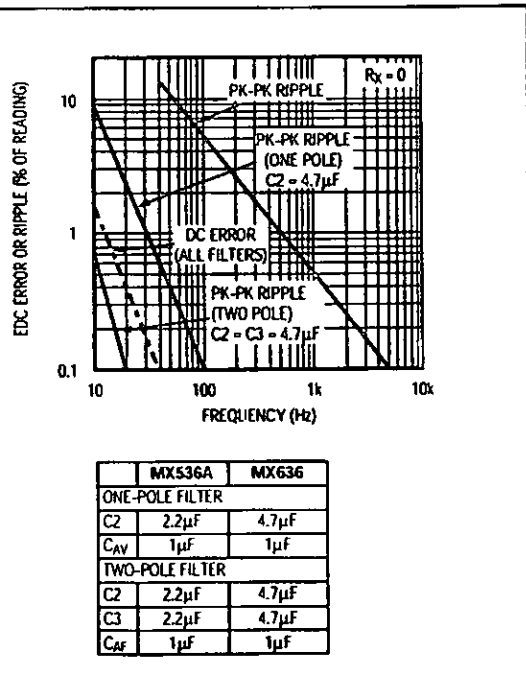


Figure 8. MX536A/MX636 with a Two-Pole Output Filter



9. Performance Features of Various Filter Types for A/MX636

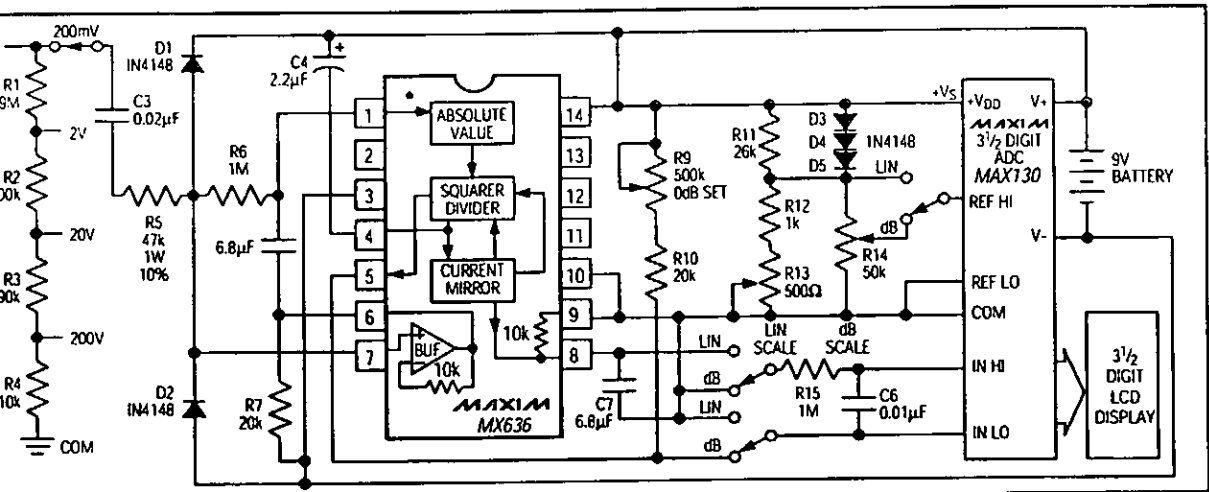
Frequency Response

The MX536A/MX636 utilizes a logarithmic circuit in performing the RMS computation of the input signal. The bandwidth of the RMS converters is proportional to signal level. Figures 11 and 12 represent the frequency response of the converters from 10mV to 7VRMS for the MX536A and 1mV to 1V for the MX636, respectively. The dashed lines indicate the upper frequency limits for 1%, 10%, and ± 3 dB of reading additional error. Caution must be used when designing RMS measuring systems so that overload does not occur. The input clipping level for the MX636 is ± 12 V, and for the MX536A it is ± 20 V. A 7VRMS signal with a crest factor of 3 has a peak input of 21V.

Application in a Low-Cost DVM

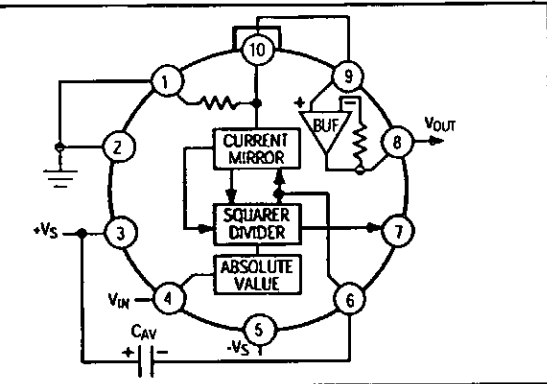
A low-cost digital voltmeter (DVM) using just two integrated circuits plus supporting circuitry and LCD display is shown in Figure 13. The MAX130 is a 3 1/2 digit integrating A/D converter with precision bandgap reference. The 10M Ω input attenuator is AC coupled to pin 6 of the MX636 buffer amplifier. The output from the MX636 is connected to the MAX130 to give a direct reading to the LCD display.

ue RMS-to-DC Converters

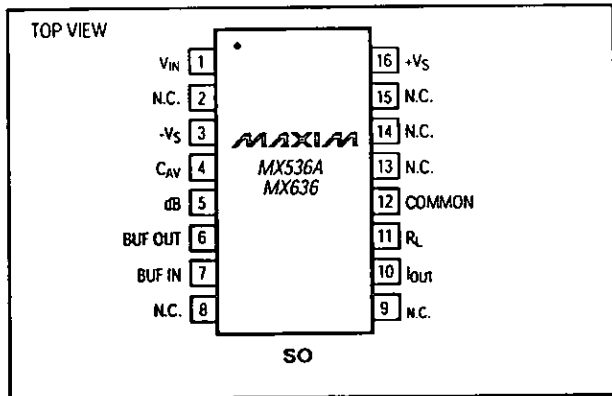


e 13. Portable High-Z Input RMS DPM and dB Meter

Typical Operating
Circuits (continued)



Pin Configurations (continued)



Ordering Information (continued)

PART	TEMP. RANGE	PIN-PACKAGE
536ASH	-55°C to +125°C	10 TO-100
536ASQ*	-55°C to +125°C	14 CERDIP
536JC/D	0°C to +70°C	Dice**
536JCWE	0°C to +70°C	16 Wide SO
536JD	0°C to +70°C	14 Ceramic
536JH	0°C to +70°C	10 TO-100
536JN	0°C to +70°C	14 Plastic DIP

PART	TEMP. RANGE	PIN-PACKAGE
MX636JQ*	0°C to +70°C	14 CERDIP
MX636KCWE	0°C to +70°C	16 Wide SO
MX636KD	0°C to +70°C	14 Ceramic
MX636KH	0°C to +70°C	10 TO-100
MX636KN	0°C to +70°C	14 Plastic DIP
MX636KQ*	0°C to +70°C	14 CERDIP

Maxim reserves the right to ship ceramic packages in lieu of CERDIP packages.
Specifications are specified at $T_A = +25^\circ\text{C}$.

Maxim cannot assume responsibility for use of any circuitry other than circuitry entirely embodied in a Maxim product. No circuit patent licenses are granted. Maxim reserves the right to change the circuitry and specifications without notice at any time.

Maxim Integrated Products, 120 San Gabriel Drive, Sunnyvale, CA 94086 408-737-7600



December 2001

LF155/LF156/LF256/LF257/LF355/LF356/LF357

FET Input Operational Amplifiers

General Description

These are the first monolithic JFET input operational amplifiers to incorporate well matched, high voltage JFETs on the same chip with standard bipolar transistors (BI-FET™ Technology). These amplifiers feature low input bias and offset currents/low offset voltage and offset voltage drift, coupled with offset adjust which does not degrade drift or common-mode rejection. The devices are also designed for high slew rate, wide bandwidth, extremely fast settling time, low voltage and current noise and a low $1/f$ noise corner.

Features

Advantages

- Replace expensive hybrid and module FET op amps
- Rugged JFETs allow blow-out free handling compared with MOSFET input devices
- Excellent for low noise applications using either high or low source impedance—very low $1/f$ corner
- Offset adjust does not degrade drift or common-mode rejection as in most monolithic amplifiers
- New output stage allows use of large capacitive loads (5,000 pF) without stability problems
- Internal compensation and large differential input voltage capability

Applications

- Precision high speed integrators
- Fast D/A and A/D converters
- High impedance buffers
- Wideband, low noise, low drift amplifiers

- Logarithmic amplifiers
- Photocell amplifiers
- Sample and Hold circuits

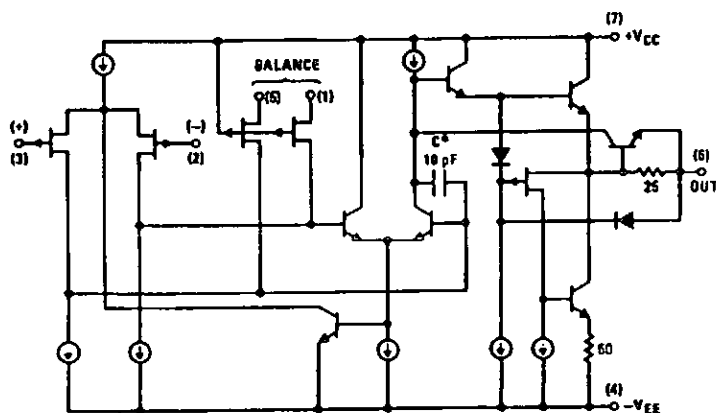
Common Features

- Low input bias current: 30 pA
- Low Input Offset Current: 3 pA
- High input impedance: $10^{12} \Omega$
- Low input noise current: $0.01 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$
- High common-mode rejection ratio: 100 dB
- Large dc voltage gain: 106 dB

Uncommon Features

	LF155/ LF355	LF156/ LF256/ LF356	LF257/ LF357 ($A_V=5$)	Units
■ Extremely fast settling time to 0.01%	4	1.5	1.5	μs
■ Fast slew rate	5	12	50	$\text{V}/\mu\text{s}$
■ Wide gain bandwidth	2.5	5	20	MHz
■ Low input noise voltage	20	12	12	$\text{nV}/\sqrt{\text{Hz}}$

Simplified Schematic



00564401

30 pF in LF357 series.

BI-FET™, BI-FET II™ are trademarks of National Semiconductor Corporation.

Absolute Maximum Ratings (Note 1)

If Military/Aerospace specified devices are required, contact the National Semiconductor Sales Office/Distributors for availability and specifications.

	LF155/6	LF256/7/LF356B	LF355/6/7
Supply Voltage	±22V	±22V	±18V
Differential Input Voltage	±40V	±40V	±30V
Input Voltage Range (Note 2)	±20V	±20V	±16V
Output Short Circuit Duration	Continuous	Continuous	Continuous
T_{JMAX}			
H-Package	150°C	115°C	115°C
N-Package		100°C	100°C
M-Package		100°C	100°C
Power Dissipation at $T_A = 25^\circ\text{C}$ (Notes 1, 8)			
H-Package (Still Air)	560 mW	400 mW	400 mW
H-Package (400 LF/Min Air Flow)	1200 mW	1000 mW	1000 mW
N-Package		670 mW	670 mW
M-Package		380 mW	380 mW
Thermal Resistance (Typical) θ_{JA}			
H-Package (Still Air)	160°C/W	160°C/W	160°C/W
H-Package (400 LF/Min Air Flow)	65°C/W	65°C/W	65°C/W
N-Package		130°C/W	130°C/W
M-Package		195°C/W	195°C/W
(Typical) θ_{JC}			
H-Package	23°C/W	23°C/W	23°C/W
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C	-65°C to +150°C	-65°C to +150°C
Soldering Information (Lead Temp.)			
Metal Can Package			
Soldering (10 sec.)	300°C	300°C	300°C
Dual-In-Line Package			
Soldering (10 sec.)	260°C	260°C	260°C
Small Outline Package			
Vapor Phase (60 sec.)		215°C	215°C
Infrared (15 sec.)		220°C	220°C
See AN-450 "Surface Mounting Methods and Their Effect on Product Reliability" for other methods of soldering surface mount devices.			
ESD tolerance			
(100 pF discharged through 1.5kΩ)	1000V	1000V	1000V

DC Electrical Characteristics

(Note 3)

Symbol	Parameter	Conditions	LF155/6			LF256/7 LF356B			LF355/6/7			Units
			Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
V_{OS}	Input Offset Voltage	$R_S=50\Omega$, $T_A=25^\circ\text{C}$ Over Temperature		3	5 7		3	5 6.5		3	10 13	mV mV
$\Delta V_{OS}/\Delta T$	Average TC of Input Offset Voltage	$R_S=50\Omega$		5			5			5		$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
$\Delta TC/\Delta V_{OS}$	Change in Average TC with V_{OS} Adjust	$R_S=50\Omega$, (Note 4)		0.5			0.5			0.5		$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ per mV
I_{OS}	Input Offset Current	$T_J=25^\circ\text{C}$, (Notes 3, 5) $T_J \leq T_{HIGH}$		3	20 20		3	20 1		3	50 2	pA nA

Electrical Characteristics (Continued)

Parameter	Conditions	LF155/6			LF256/7 LF356B			LF355/6/7			Units
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Input Bias Current	$T_J=25^{\circ}\text{C}$, (Notes 3, 5) $T_J \leq T_{\text{HIGH}}$		30	100 50		30	100 5		30	200 8	pA nA
Input Resistance	$T_J=25^{\circ}\text{C}$		10^{12}			10^{12}			10^{12}		Ω
Large Signal Voltage Gain	$V_S=\pm 15\text{V}$, $T_A=25^{\circ}\text{C}$ $V_O=\pm 10\text{V}$, $R_L=2\text{k}$ Over Temperature	50	200		50	200		25	200		V/mV V/mV
Output Voltage Swing	$V_S=\pm 15\text{V}$, $R_L=10\text{k}$ $V_S=\pm 15\text{V}$, $R_L=2\text{k}$	± 12 ± 10	± 13 ± 12		± 12 ± 10	± 13 ± 12		± 12 ± 10	± 13 ± 12		V V
Input Common-Mode Voltage Range	$V_S=\pm 15\text{V}$	± 11	$+15.1$ -12		± 11	± 15.1 -12		$+10$	$+15.1$ -12		V V
Common-Mode Rejection Ratio		85	100		85	100		80	100		dB
Supply Voltage Rejection Ratio	(Note 6)	85	100		85	100		80	100		dB

Electrical Characteristics

$= 25^{\circ}\text{C}$, $V_S = \pm 15\text{V}$

Parameter	LF155		LF355		LF156/256/257/356B		LF356		LF357		Units
	Typ	Max	Typ	Max	Typ	Max	Typ	Max	Typ	Max	
Input Current	2	4	2	4	5	7	5	10	5	10	mA

Electrical Characteristics

$= 25^{\circ}\text{C}$, $V_S = \pm 15\text{V}$

Parameter	Conditions	LF155/355	LF156/256/ 356B	LF156/256/356/ LF356B	LF257/357	Units
		Typ	Min	Typ	Typ	
Slew Rate	LF155/6: $A_V=1$, LF357: $A_V=5$	5	7.5	12	50	V/ μs V/ μs
Gain Bandwidth Product		2.5		5	20	MHz
Settling Time to 0.01%	(Note 7)	4		1.5	1.5	μs
Equivalent Input Noise Voltage	$R_S=100\Omega$ $f=100\text{ Hz}$ $f=1000\text{ Hz}$	25 20		15 12	15 12	nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$ nV/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Equivalent Input Current Noise	$f=100\text{ Hz}$ $f=1000\text{ Hz}$	0.01 0.01		0.01 0.01	0.01 0.01	pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$ pA/ $\sqrt{\text{Hz}}$
Input Capacitance		3		3	3	pF

Notes for Electrical Characteristics

The maximum power dissipation for these devices must be derated at elevated temperatures and is dictated by $T_{J\text{MAX}}$, θ_{JA} , and the ambient temperature. Maximum available power dissipation at any temperature is $P_D=(T_{J\text{MAX}}-T_A)/\theta_{JA}$ or the 25°C $P_{D\text{MAX}}$, whichever is less.

Unless otherwise specified the absolute maximum negative input voltage is equal to the negative power supply voltage.

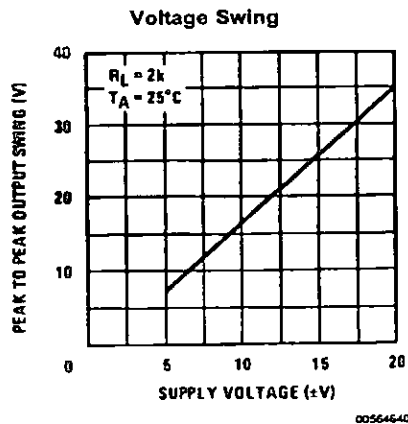
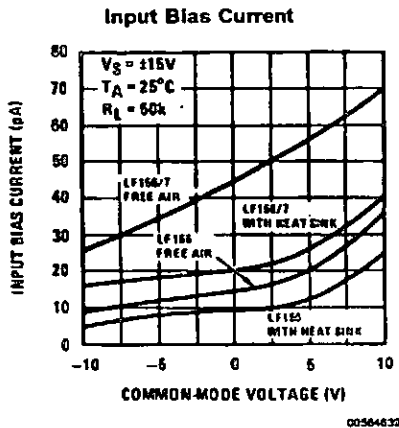
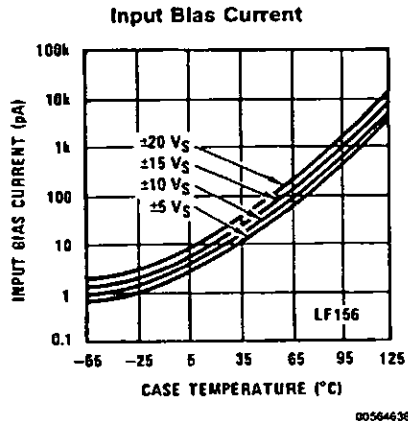
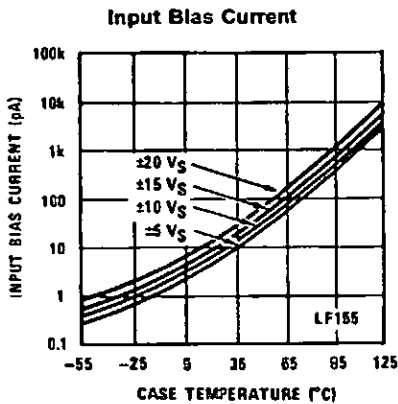
Unless otherwise stated, these test conditions apply:

Notes for Electrical Characteristics (Continued)

	LF155/156	LF256/257	LF356B	LF355/6/7
Supply Voltage, V_S	$\pm 15V \leq V_S \leq \pm 20V$	$\pm 15V \leq V_S \leq \pm 20V$	$\pm 15V \leq V_S \leq \pm 20V$	$V_S = \pm 15V$
T_A	$-55^{\circ}C \leq T_A \leq +125^{\circ}C$	$-25^{\circ}C \leq T_A \leq +85^{\circ}C$	$0^{\circ}C \leq T_A \leq +70^{\circ}C$	$0^{\circ}C \leq T_A \leq +70^{\circ}C$
T_{HIGH}	$+125^{\circ}C$	$+85^{\circ}C$	$+70^{\circ}C$	$+70^{\circ}C$

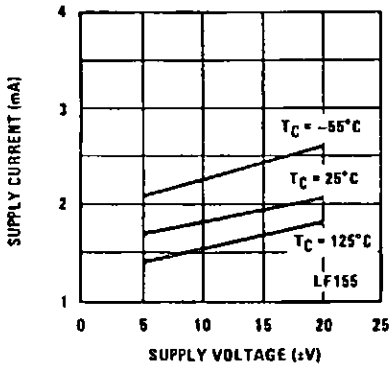
- and V_{OS} , I_B and I_{OS} are measured at $V_{CM} = 0$.
- Note 4: The Temperature Coefficient of the adjusted input offset voltage changes only a small amount ($0.5\mu V/^{\circ}C$ typically) for each mV of adjustment from its original unadjusted value. Common-mode rejection and open loop voltage gain are also unaffected by offset adjustment.
- Note 5: The input bias currents are junction leakage currents which approximately double for every $10^{\circ}C$ increase in the junction temperature, T_J . Due to limited production test time, the input bias currents measured are correlated to junction temperature. In normal operation the junction temperature rises above the ambient temperature as a result of internal power dissipation, P_d . $T_J = T_A + \theta_{JA} P_d$ where θ_{JA} is the thermal resistance from junction to ambient. Use of a heat sink is recommended if input bias current is to be kept to a minimum.
- Note 6: Supply Voltage Rejection is measured for both supply magnitudes increasing or decreasing simultaneously, in accordance with common practice.
- Note 7: Settling time is defined here, for a unity gain inverter connection using $2k\Omega$ resistors for the LF155/6. It is the time required for the error voltage (the voltage at the inverting input pin on the amplifier) to settle to within 0.01% of its final value from the time a 10V step input is applied to the inverter. For the LF357, $A_V = -5$, the feedback resistor from output to input is $2k\Omega$ and the output step is 10V (See Settling Time Test Circuit).
- Note 8: Max. Power Dissipation is defined by the package characteristics. Operating the part near the Max. Power Dissipation may cause the part to operate outside guaranteed limits.

Typical DC Performance Characteristics Curves are for LF155 and LF156 unless otherwise specified.



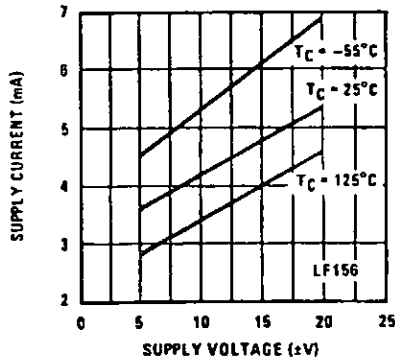
al DC Performance Characteristics Curves are for LF155 and LF156 unless otherwise
(Continued)

Supply Current



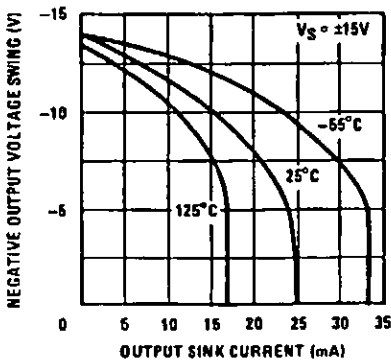
00564641

Supply Current



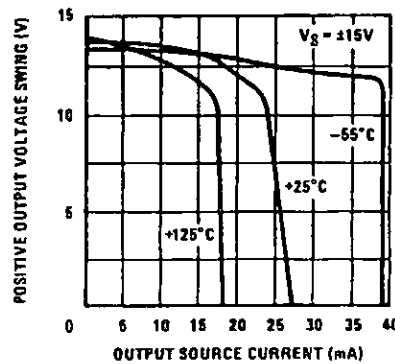
00564642

Negative Current Limit



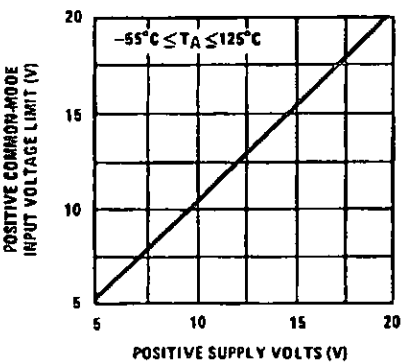
00564643

Positive Current Limit



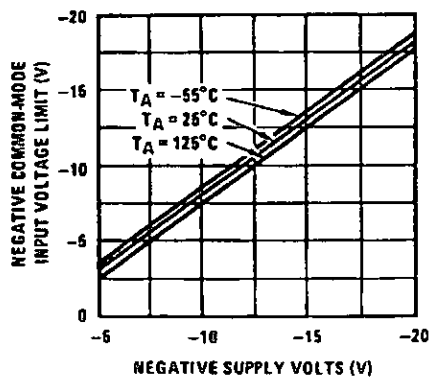
00564644

Positive Common-Mode
Input Voltage Limit



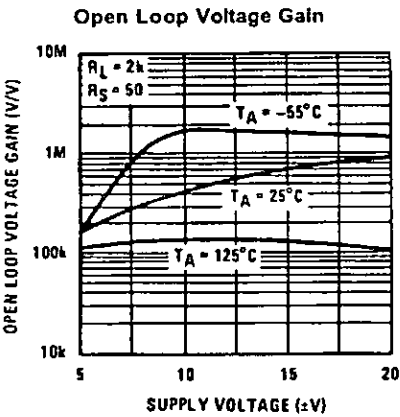
00564645

Negative Common-Mode
Input Voltage Limit

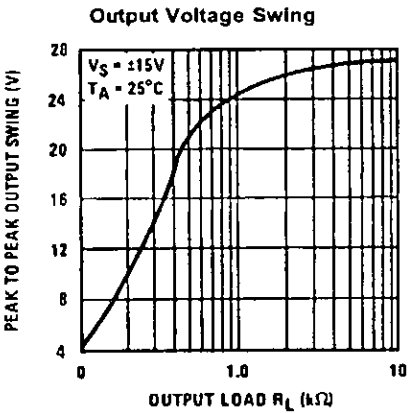


00564646

Typical DC Performance Characteristics Curves are for LF155 and LF156 unless otherwise specified. (Continued)

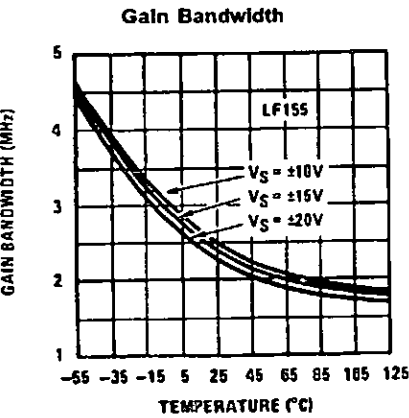


00564647

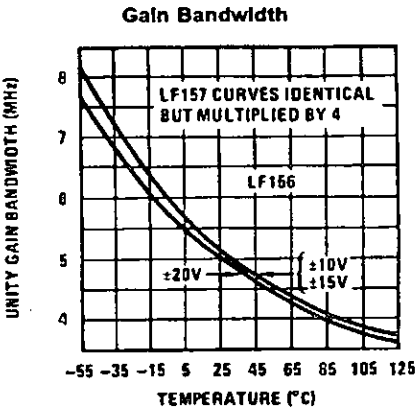


00564648

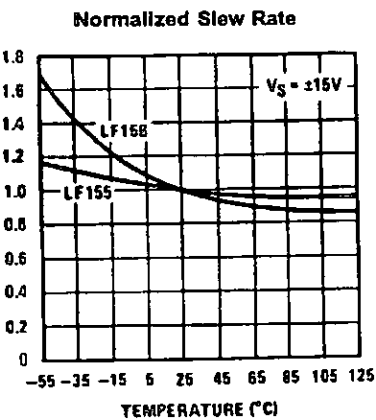
Typical AC Performance Characteristics



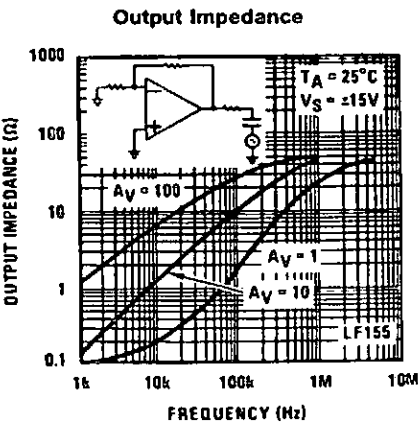
00564649



00564650



00564651

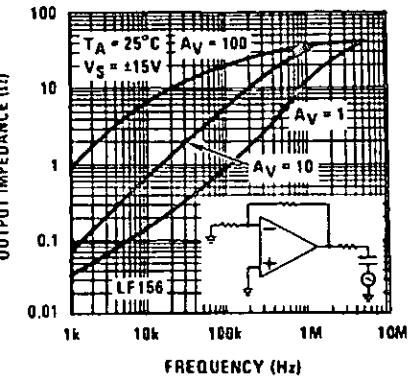


00564652

LF155/LF156/LF256/LF257/LF355/LF356/LF357

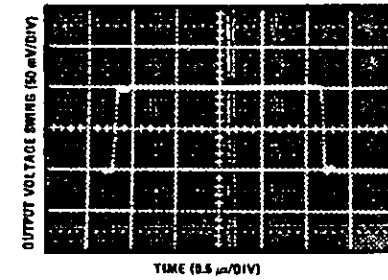
al AC Performance Characteristics (Continued)

Output Impedance



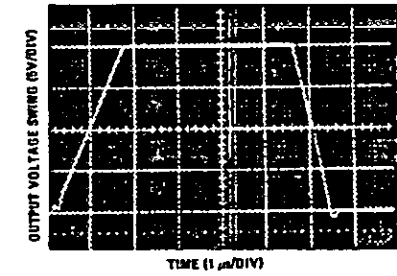
00564653

LF156 Small Signal Pulse Response, $A_V = +1$



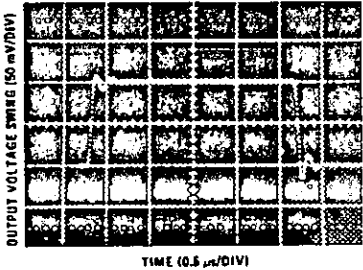
00564606

LF156 Large Signal Puls Response, $A_V = +1$



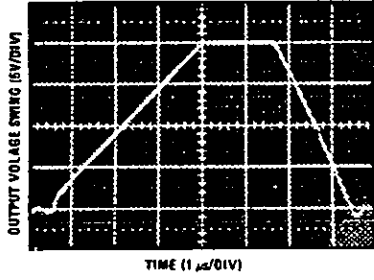
00564603

LF155 Small Signal Pulse Response, $A_V = +1$



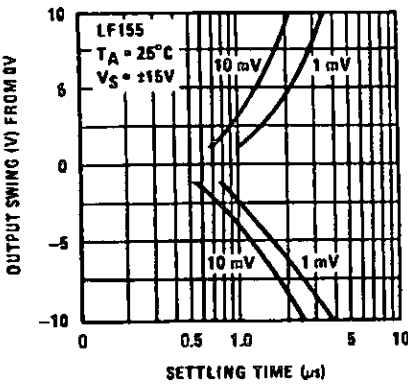
00564605

LF155 Large Signal Pulse Response, $A_V = +1$



00564608

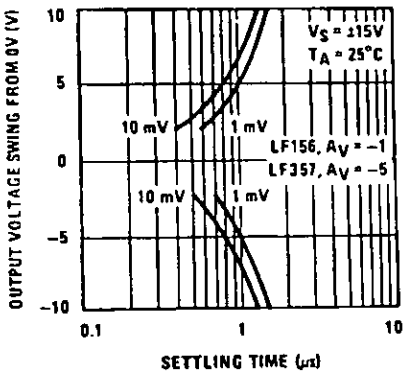
Inverter Settling Time



00564655

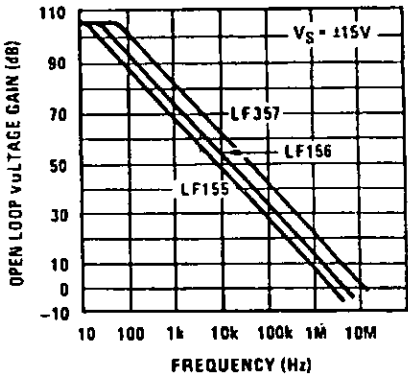
Typical AC Performance Characteristics (Continued)

Inverter Settling Time



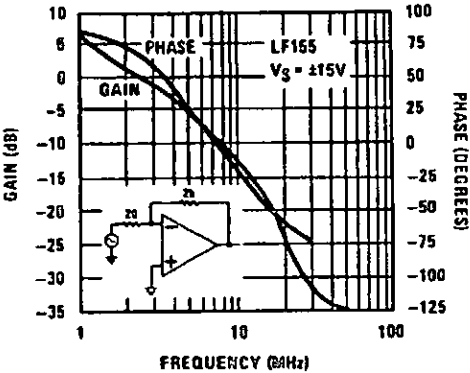
00564656

Open Loop Frequency Response



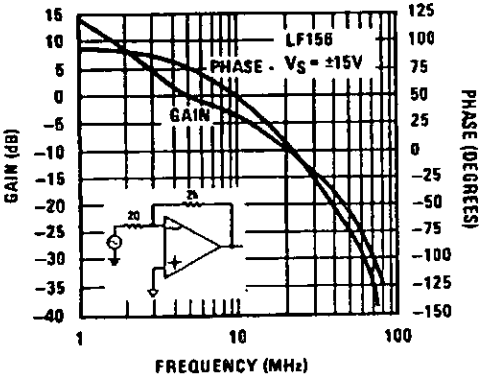
00564657

Bode Plot



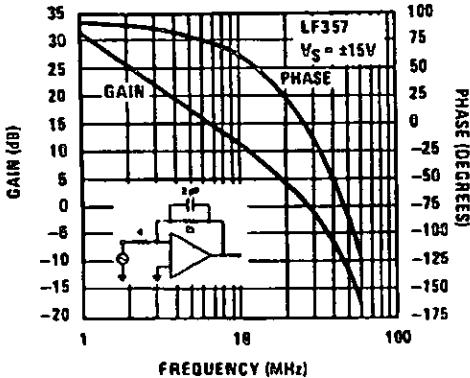
00564658

Bode Plot



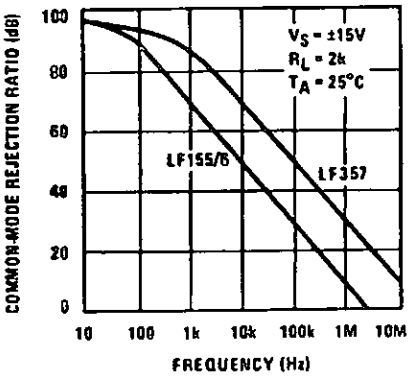
00564659

Bode Plot



00564660

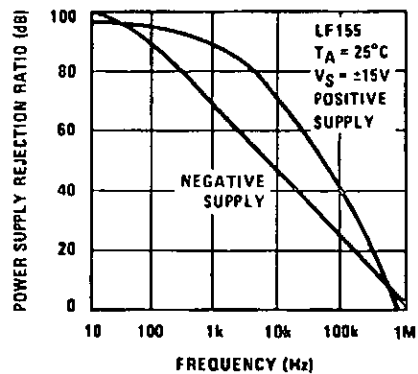
Common-Mode Rejection Ratio



00564661

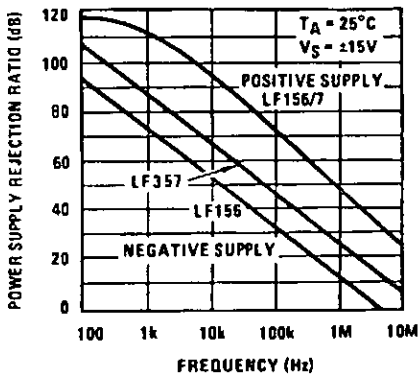
AC Performance Characteristics (Continued)

Power Supply Rejection Ratio



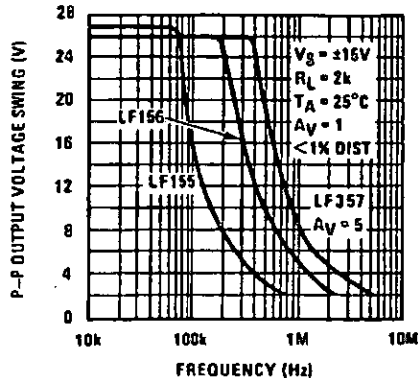
00564662

Power Supply Rejection Ratio



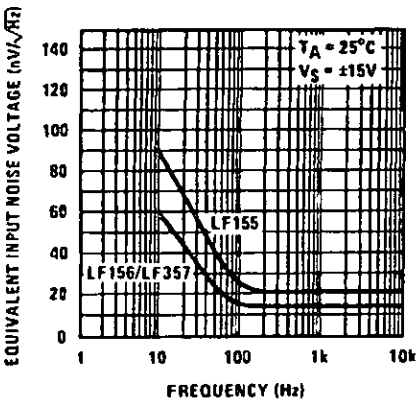
00564663

Undistorted Output Voltage Swing



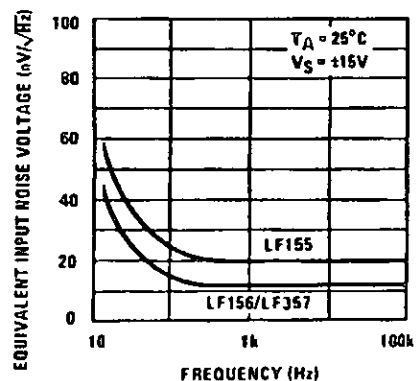
00564664

Equivalent Input Noise Voltage



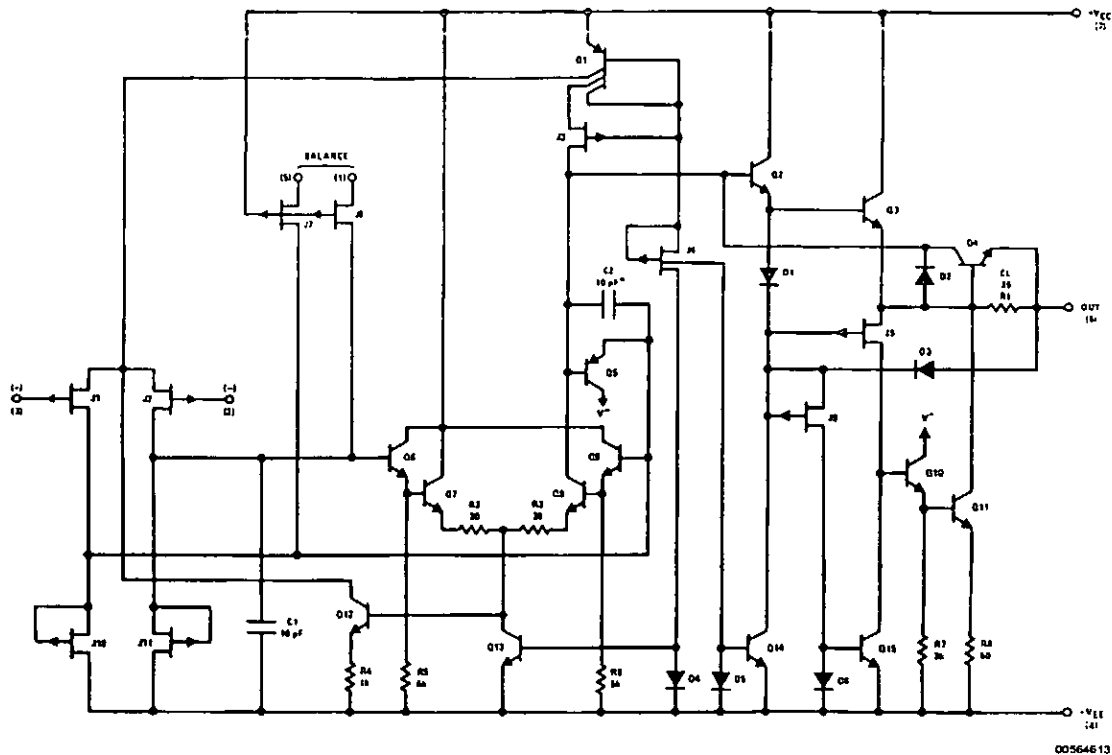
00564665

Equivalent Input Noise Voltage (Expanded Scale)



00564666

Detailed Schematic

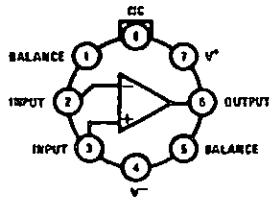


*C = 3pF in LF357 series.

00564613

Connection Diagrams (Top Views)

Metal Can Package (H)

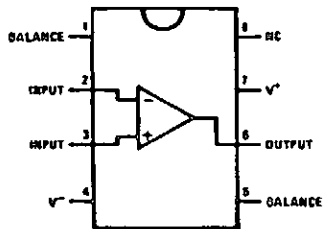


00564014

Order Number LF155H, LF156H, LF256H, LF257H,
LF356BH, LF356H, or LF357H
See NS Package Number H08C

*Available per JM38510/11401 or JM38510/11402

Dual-In-Line Package (M and N)



00564620

Order Number LF356M, LF356MX, LF355N, or LF356N
See NS Package Number M08A or N08E

Application Hints

These are op amps with JFET input devices. These JFETs have large reverse breakdown voltages from gate to source and drain eliminating the need for clamps across the inputs. Therefore large differential input voltages can easily be accommodated without a large increase in input current. The maximum differential input voltage is independent of the supply voltages. However, neither of the input voltages should be allowed to exceed the negative supply as this will cause large currents to flow which can result in a destroyed unit.

Exceeding the negative common-mode limit on either input will force the output to a high state, potentially causing a

Operation Hints (Continued)

of phase to the output. Exceeding the negative common-mode limit on both inputs will force the amplifier to a high state. In neither case does a latch occur when the input back within the common-mode range as the input stage and thus the amplifier in a normal operating mode.

Exceeding the positive common-mode limit on a single input will change the phase of the output however, if both inputs exceed the limit, the output of the amplifier will be in a high state.

These amplifiers will operate with the common-mode input voltage equal to the positive supply. In fact, the common-mode voltage can exceed the positive supply by approximately 100 mV independent of supply voltage and over the full operating temperature range. The positive supply should therefore be used as a reference on an input as, for example, in a supply current monitor and/or limiter.

Precautions should be taken to ensure that the power supply integrated circuit never becomes reversed in polarity. The unit is not inadvertently installed backwards in a circuit as an unlimited current surge through the resulting diode within the IC could cause fusing of the internal wires and result in a destroyed unit.

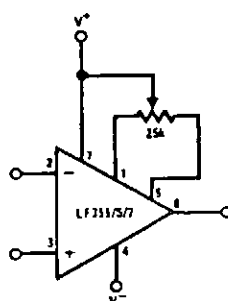
The bias currents in these amplifiers are set by FET sources. The drain currents for the amplifiers are essentially independent of supply voltage.

In most amplifiers, care should be taken with lead component placement and supply decoupling in order to ensure stability. For example, resistors from the output to the input should be placed with the body close to the input to avoid "pickup" and maximize the frequency of the feedback pole by minimizing the capacitance from the input to

the feedback pole is created when the feedback around any amplifier is resistive. The parallel resistance and capacitance at the input of the device (usually the inverting input) to AC set the frequency of the pole. In many instances the frequency of this pole is much greater than the expected 3 dB frequency of the closed loop gain and consequently there is little effect on stability margin. However, if the feedback resistance is less than approximately six times the expected 3 dB frequency a lead capacitor should be placed from the output to the input of the op amp. The value of the added capacitor should be such that the RC time constant of this capacitor in parallel with the feedback resistance is greater than or equal to the feedback pole time constant.

Typical Circuit Connections

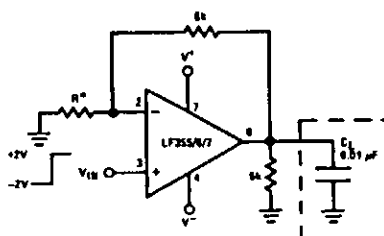
V_{OS} Adjustment



00564657

- V_{OS} is adjusted with a 25k potentiometer
- The potentiometer wiper is connected to V^+
- For potentiometers with temperature coefficient of 100 ppm/°C or less the additional drift with adjust is $\approx 0.5\mu V/^\circ C/mV$ of adjustment
- Typical overall drift: $5\mu V/^\circ C \pm (0.5\mu V/^\circ C/mV \text{ of adj.})$

Driving Capacitive Loads



00564658

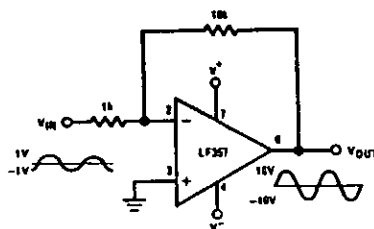
- LF155/6 $R = 5k$
- LF357 $R = 1.25k$

Due to a unique output stage design, these amplifiers have the ability to drive large capacitive loads and still maintain stability. $C_{L(MAX)} \approx 0.01\mu F$.

Overshoot $\leq 20\%$

Settling time (t_d) $\approx 5\mu s$

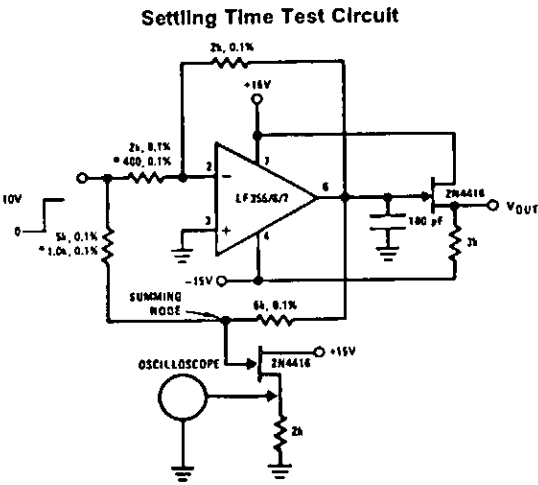
LF357. A Large Power BW Amplifier



00564615

For distortion $\leq 1\%$ and a 20 Vp-p V_{OUT} swing, power bandwidth is: 500kHz.

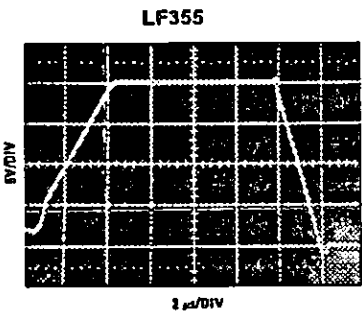
Typical Applications



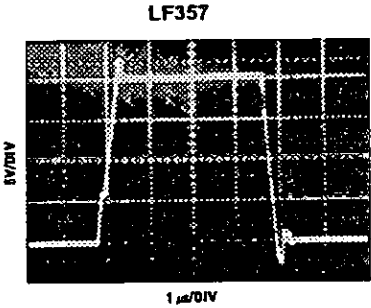
00564616

- Settling time is tested with the LF155/6 connected as unity gain inverter and LF357 connected for $A_v = -5$
- FET used to isolate the probe capacitance
- Output = 10V step
- $A_v = -5$ for LF357

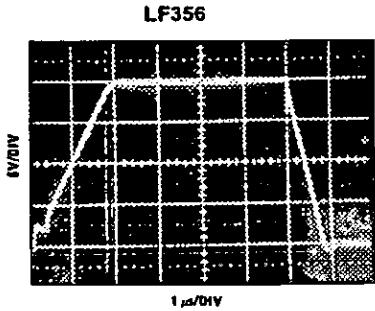
Large Signal Inverter Output, V_{OUT} (from Settling Time Circuit)



00564617



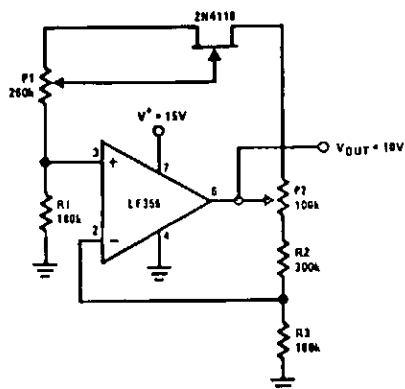
00564619



00564618

al Applications (Continued)

Low Drift Adjustable Voltage Reference



00564620

$$\alpha_{IT}/\Delta T = \pm 0.002\%/^{\circ}\text{C}$$

resistors and potentiometers should be wire-wound

drift adjust

out adjust

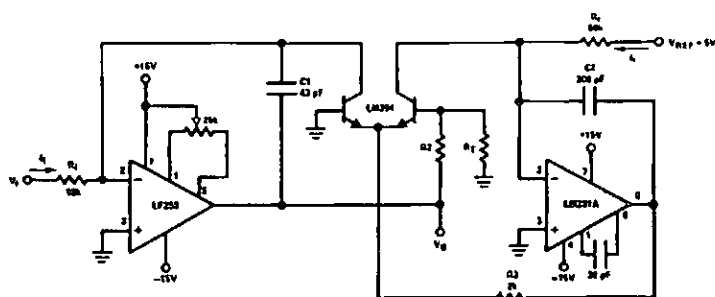
F155 for

 ν_B

W drift

low supply current

Fast Logarithmic Converter



00564821

mic range: $100\mu\text{A} \leq I_t \leq 1\text{mA}$ (5 decades), $|V_O| = 1\text{V/decade}$

ient response: $3\mu\text{s}$ for $\Delta I_1 = 1$ decade

R2, R3: added dynamic compensation

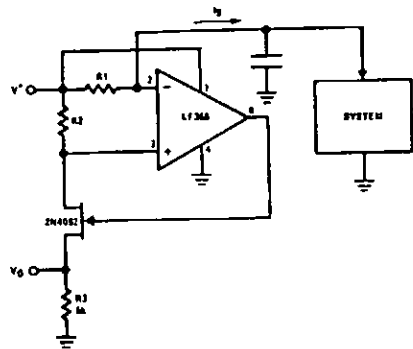
adjust the LF156 to minimize quiescent error

el Labs type Q81 + 0.3%/°C

$$V_T = \left[1 + \frac{R_2}{R_T} \right] \frac{kT}{q} \ln V_i \left[\frac{R_T}{V_{REF} R_i} \right] = \log V_i \frac{1}{R_i I_f} \quad R_2 = 15.7k, R_T = 1k, 0.3\%/^{\circ}C \text{ (for temperature compensation)}$$

Typical Applications (Continued)

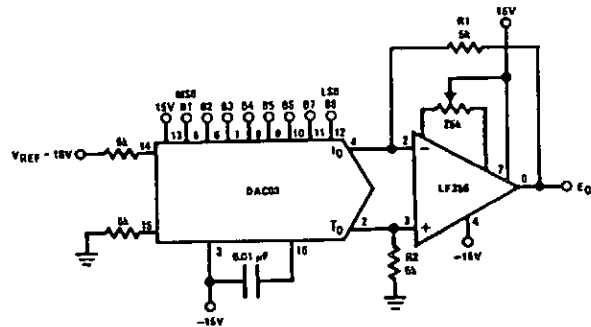
Precision Current Monitor



00504631

- $V_O = 5 R1/R2 (V/mA \text{ of } I_S)$
- R1, R2, R3: 0.1% resistors
- Use LF155 for
 - Common-mode range to supply range
 - Low I_B
 - Low V_{OS}
 - Low Supply Current

8-Bit D/A Converter with Symmetrical Offset Binary Operation

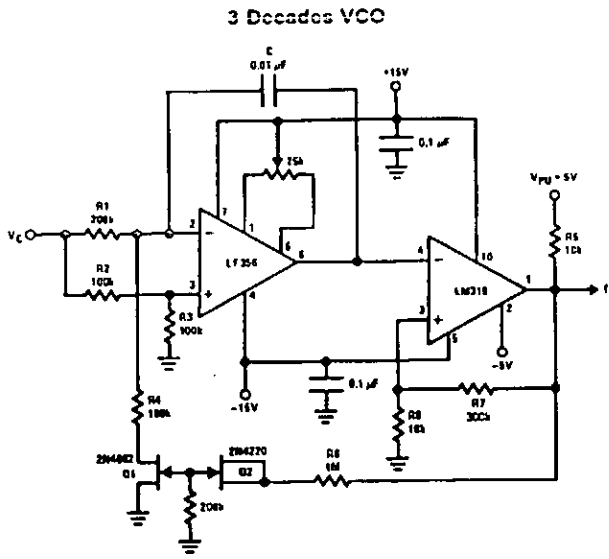


00504632

- R1, R2 should be matched within $\pm 0.05\%$
- Full-scale response time: $3\mu s$

E_O	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	Comments
+9.920	1	1	1	1	1	1	1	1	Positive Full-Scale
+0.040	1	0	0	0	0	0	0	0	(+) Zero-Scale
-0.040	0	1	1	1	1	1	1	1	(-) Zero-Scale
-9.920	0	0	0	0	0	0	0	0	Negative Full-Scale

Typical Applications (Continued)

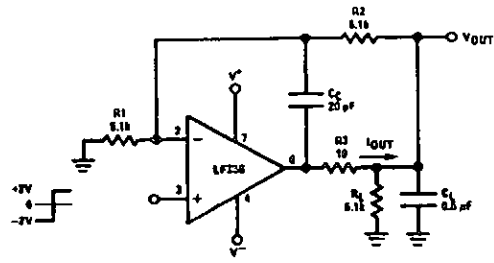


00564624

$$f = \frac{V_C (R8 + R7)}{(8 V_{PU} R8 R1) C} \quad 0 \leq V_C \leq 30V, 10 \text{ Hz} \leq f \leq 10 \text{ kHz}$$

R1, R4 matched. Linearity 0.1% over 2 decades.

Isolating Large Capacitive Loads



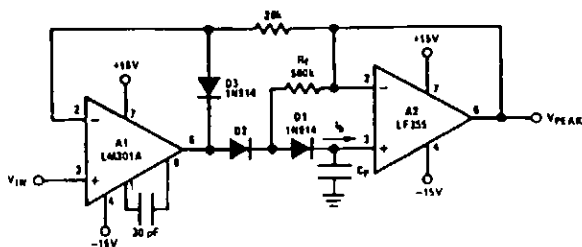
00564622

- Overshoot 6%
- t_p 10μs
- When driving large C_L , the V_{OUT} slew rate determined by C_L and $I_{OUT(MAX)}$:

$$\frac{\Delta V_{OUT}}{\Delta T} = \frac{I_{OUT}}{C_L} \approx \frac{0.02}{0.5} \text{ V}/\mu\text{s} = 0.04 \text{ V}/\mu\text{s} \text{ (with } C_L \text{ shown)}$$

al Applications (Continued)

Low Drift Peak Detector



00564623

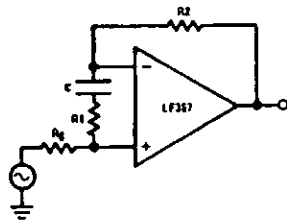
During D1 and R_f , $V_{D1}=0$ during hold mode. Leakage of D2 provided by feedback path through R_f .

Leakage of circuit is essentially I_b (LF155, LF156) plus capacitor leakage of C_p .

D3 clamps V_{OUT} (A1) to $V_{IN}-V_{D3}$ to improve speed and to limit reverse bias of D2.

Maximum input frequency should be $\ll \frac{1}{2\pi R_f C_{D2}}$ where C_{D2} is the shunt capacitance of D2.

Non-Inverting Unity Gain Operation for LF157



00564675

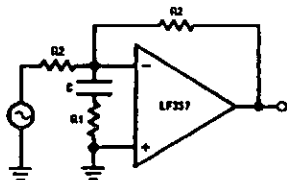
$$R1C \geq \frac{1}{(2\pi)(5 \text{ MHz})}$$

$$R1 = \frac{R2 + R_S}{4}$$

$$A_{V(DC)} = 1$$

$$f_{-3 \text{ dB}} \approx 5 \text{ MHz}$$

Inverting Unity Gain for LF157



00564625

$$R1C \geq \frac{1}{(2\pi)(5 \text{ MHz})}$$

$$R1 = \frac{R2}{4}$$

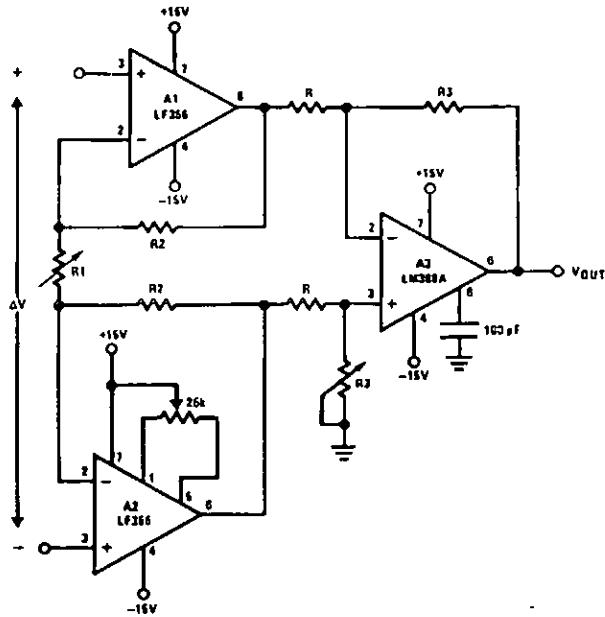
$$A_{V(DC)} = -1$$

$$f_{-3 \text{ dB}} \approx 5 \text{ MHz}$$

LF155/LF156/LF256/LF257/LF355/LF356/LF357

Typical Applications (Continued)

High Impedance, Low Drift Instrumentation Amplifier

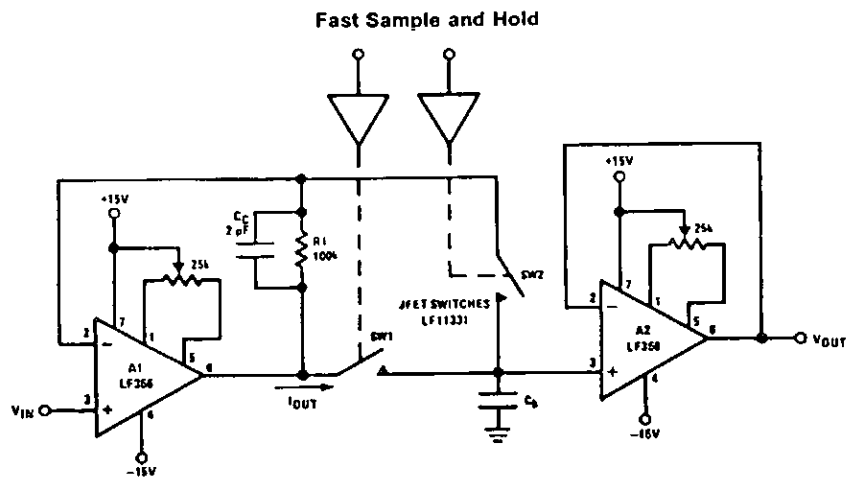


00564626

$$\bullet V_{OUT} = \frac{R3}{R} \left[\frac{2R2}{R1} + 1 \right] \Delta V, V^- + 2V \leq V_{IN \text{ common-mode}} \leq V^+$$

- System V_{OS} adjusted via A2 V_{OS} adjust
- Trim R3 to boost up CMRR to 120 dB. Instrumentation amplifier resistor array recommended for best accuracy and lowest drift

al Applications (Continued)



amplifiers (A1, A2) have feedback loops individually closed with stable responses (overshoot negligible)
 isation time T_A , estimated by:

$$T_A \cong \left[\frac{2R_{ON} \cdot V_{IN} \cdot C_h}{S_r} \right]^{1/2} \text{ provided that:}$$

$$V_{IN} < 2\pi S_r R_{ON} C_h \text{ and } T_A > \frac{V_{IN} C_h}{I_{OUT(MAX)}}, R_{ON} \text{ is of SW1}$$

$$\text{If inequality not satisfied: } T_A \cong \frac{V_{IN} C_h}{20 \text{ mA}}$$

6 develops full S_r output capability for $V_{IN} \geq 1V$

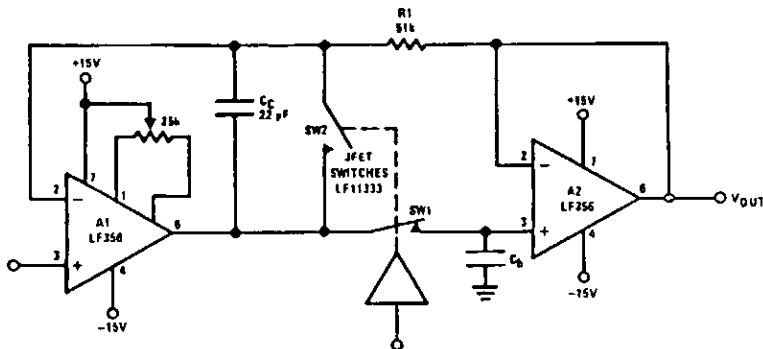
ion of SW2 improves accuracy by putting the voltage drop across SW1 inside the feedback loop

all accuracy of system determined by the accuracy of both amplifiers, A1 and A2

LF155/LF156/LF256/LF257/LF355/LF356/LF357

Typical Applications (Continued)

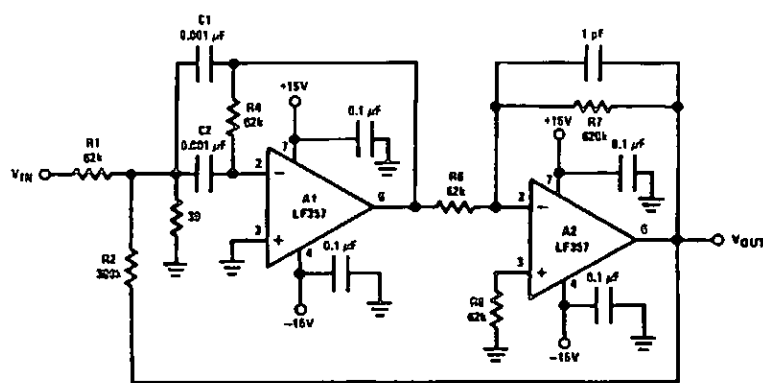
High Accuracy Sample and Hold



00504027

- By closing the loop through A2, the V_{OUT} accuracy will be determined uniquely by A1. No V_{OS} adjust required for A2.
- T_A can be estimated by same considerations as previously but, because of the added propagation delay in the feedback loop (A2) the overshoot is not negligible.
- Overall system slower than fast sample and hold
- $R1$, C_C : additional compensation
- Use LF156 for
 - Fast settling time
 - Low V_{OS}

High Q Band Pass Filter



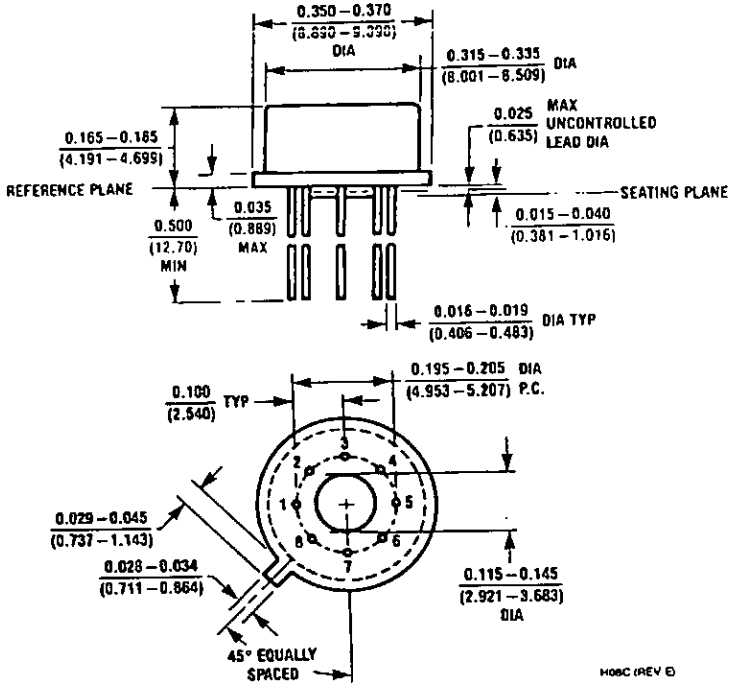
00504020

- By adding positive feedback (R2)
- Q increases to 40
- $f_{BP} = 100 \text{ kHz}$

$$\frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = 10 \sqrt{Q}$$

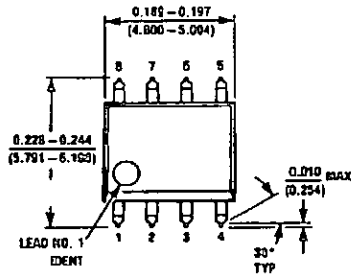
- Clean layout recommended
- Response to a 1Vp-p tone burst: 300μs

Physical Dimensions inches (millimeters) unless otherwise noted



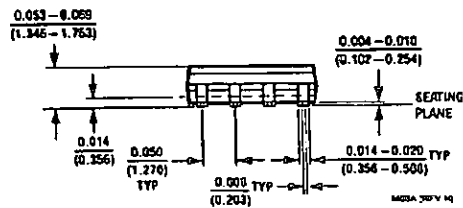
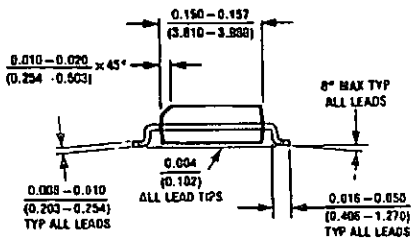
Metal Can Package (H)

Order Number LF155H, LF156H, LF256H, LF257H, LF356BH, LF356H or LF357H
NS Package Number H08C

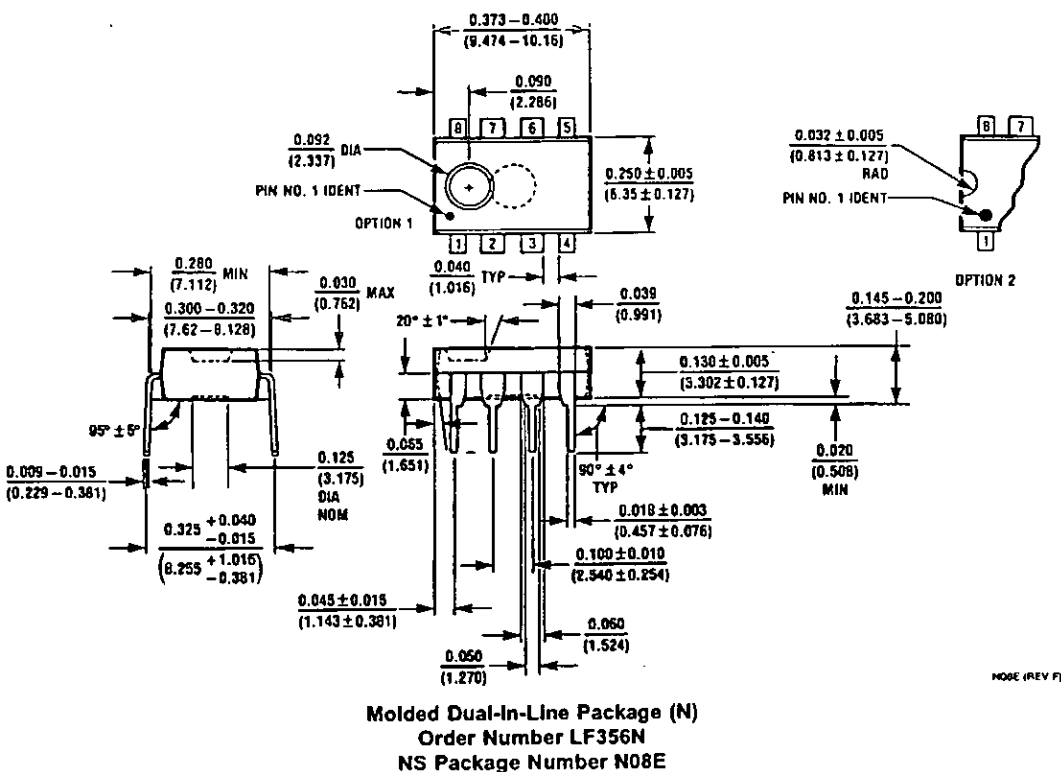


Small Outline Package (M)

Order Number LF356M or LF356MX
NS Package Number M08A



Physical Dimensions inches (millimeters) unless otherwise noted (Continued)



SUPPORT POLICY

NAL'S PRODUCTS ARE NOT AUTHORIZED FOR USE AS CRITICAL COMPONENTS IN LIFE SUPPORT
ES OR SYSTEMS WITHOUT THE EXPRESS WRITTEN APPROVAL OF THE PRESIDENT AND GENERAL
SEL OF NATIONAL SEMICONDUCTOR CORPORATION. As used herein:

support devices or systems are devices or systems which, (a) are intended for surgical implant into the body, or (b) support or sustain life, and whose failure to perform when properly used in accordance with instructions for use provided in the labeling, can be reasonably expected to result in a significant injury to the user.

2. A critical component is any component of a life support device or system whose failure to perform can be reasonably expected to cause the failure of the life support device or system, or to affect its safety or effectiveness.

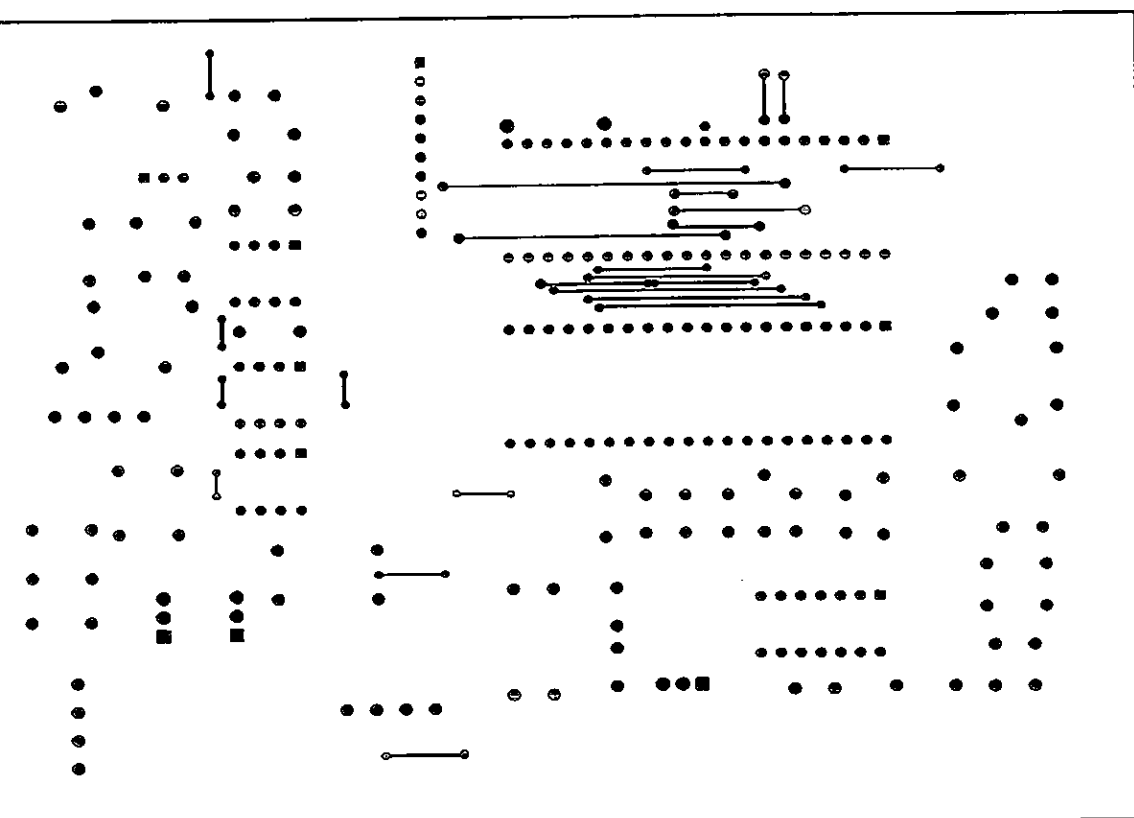
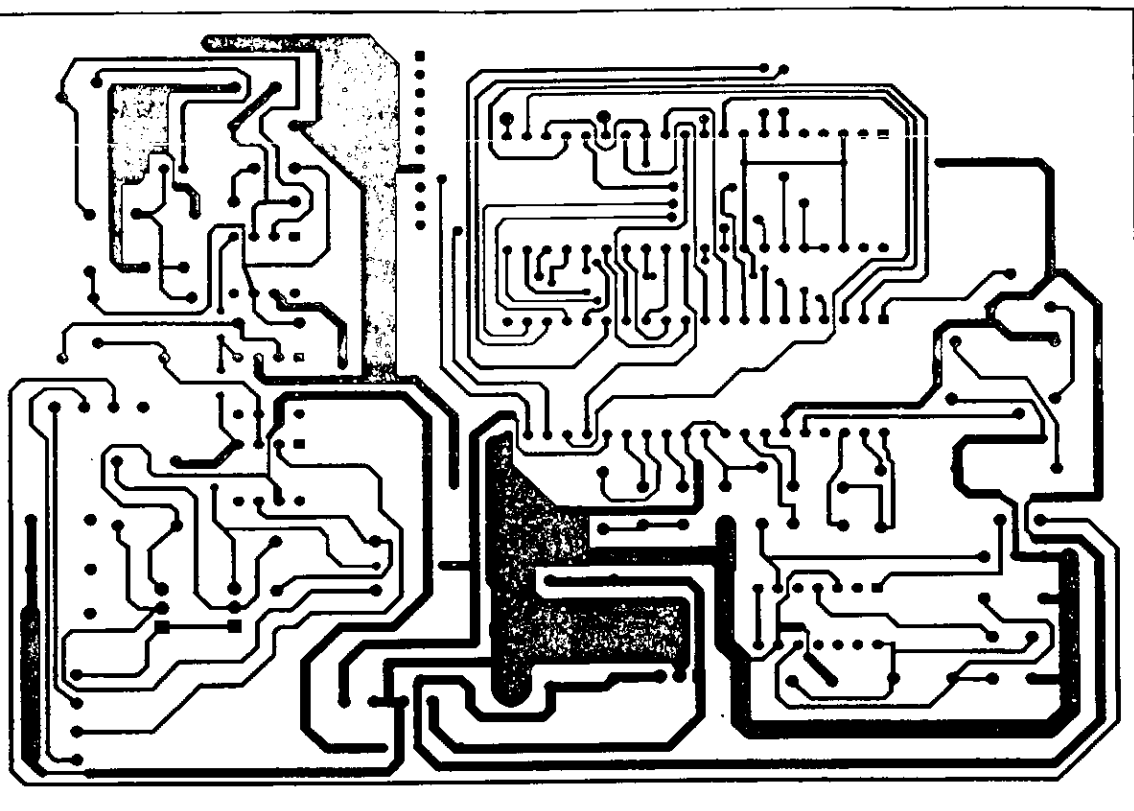
ational Semiconductor
Corporation
Norcross
GA 30064
Tel: 404/241-7400
Fax: 404/241-7401
E-mail: support@ncc.com

National Semiconductor
Europe
Fax: +49 (0) 180-530 85 88
Email: europe.support@nsc.com
Deutsch Tot: +49 (0) 69 9504 6203
English Tot: +44 (0) 870 24 0 2171
Français Tot: +33 (0) 1 41 91 8780

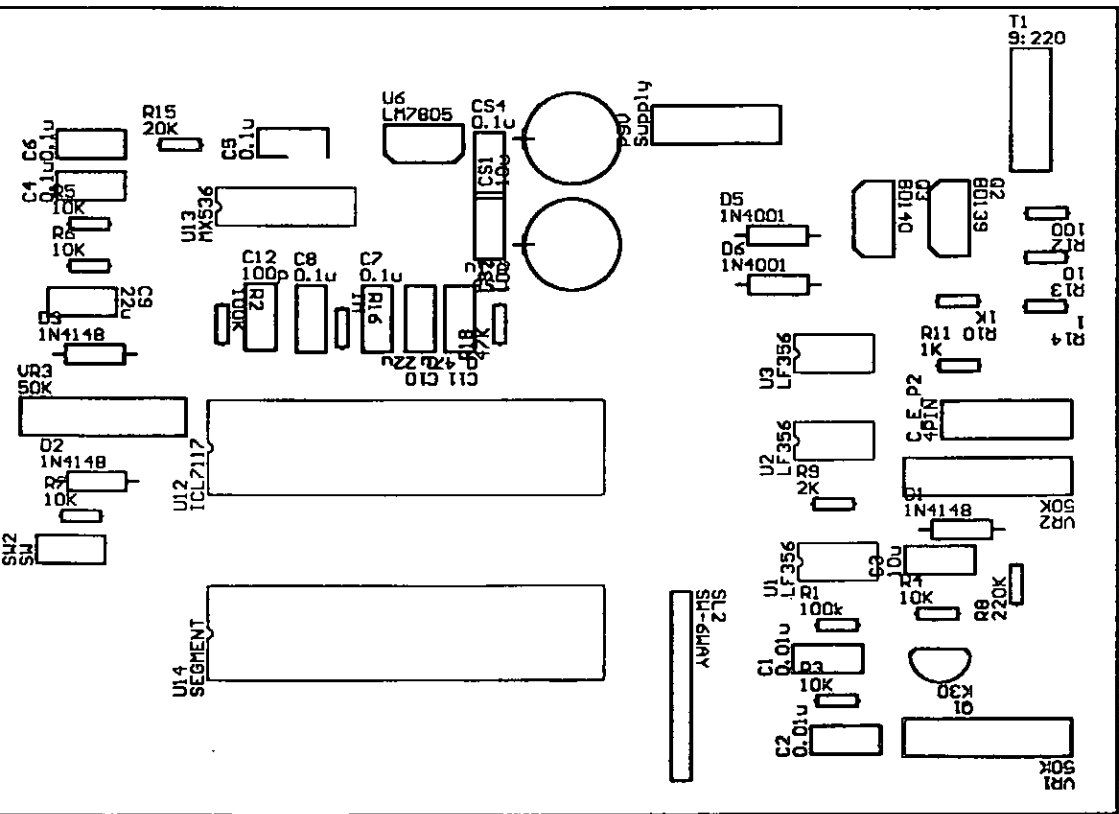
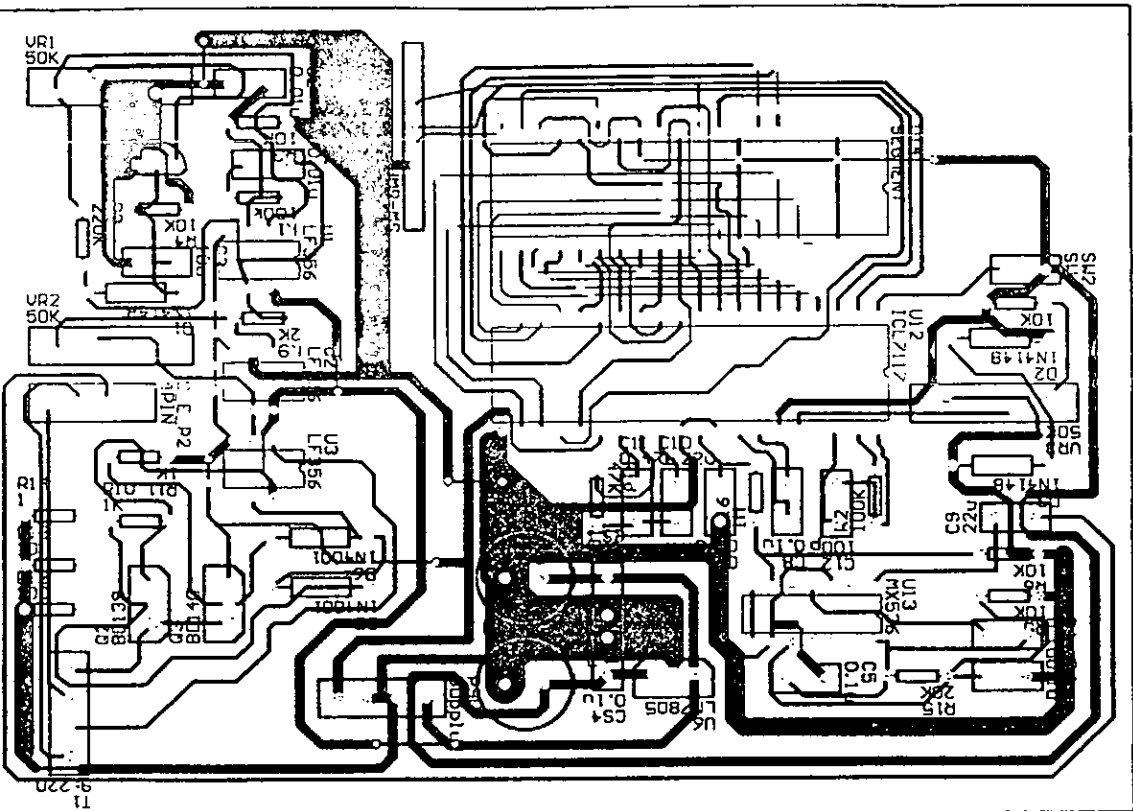
National Semiconductor
Asia Pacific Customer
Response Group
Tel: 65-25444663
Fax: 65-2504468
Email: ap.support@nsc.com

**National Semiconductor
Japan Ltd.**
Tel: 81-3-5639-7560
Fax: 81-3-5639-7507

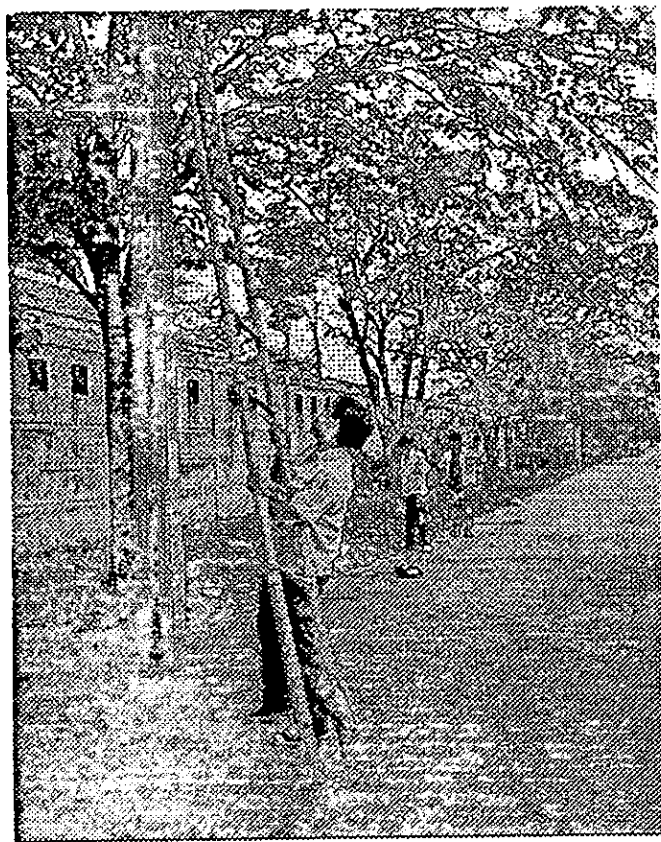
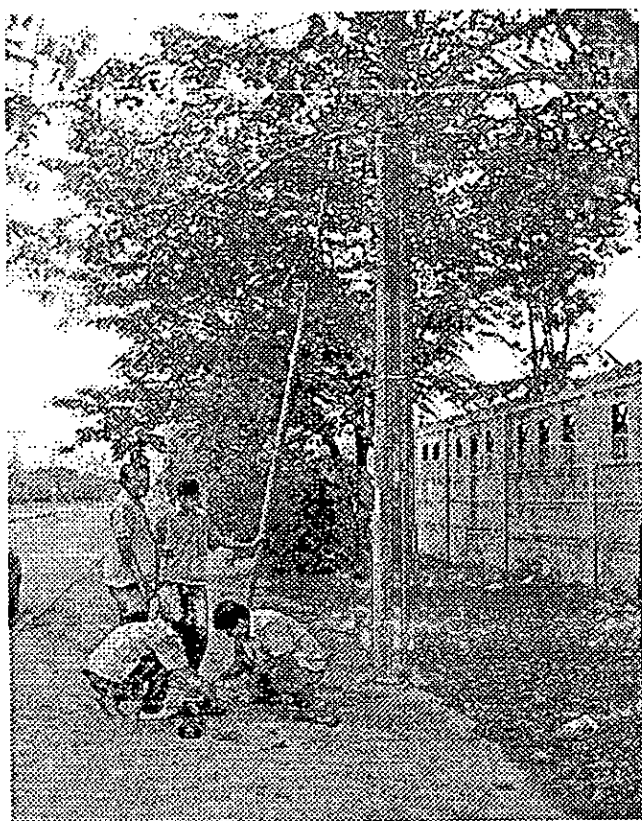
It assumes any responsibility for use of any circuitry described, no circuit patent licenses are implied and National reserves the right at any time without notice to change said circuitry and specifications.



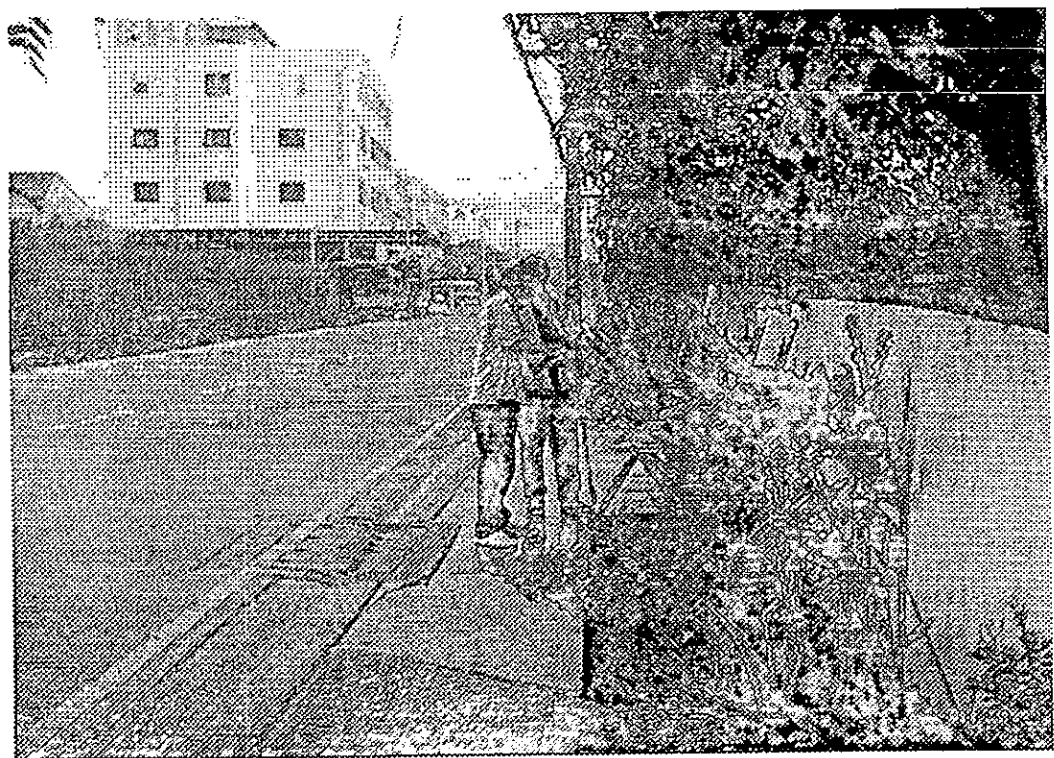
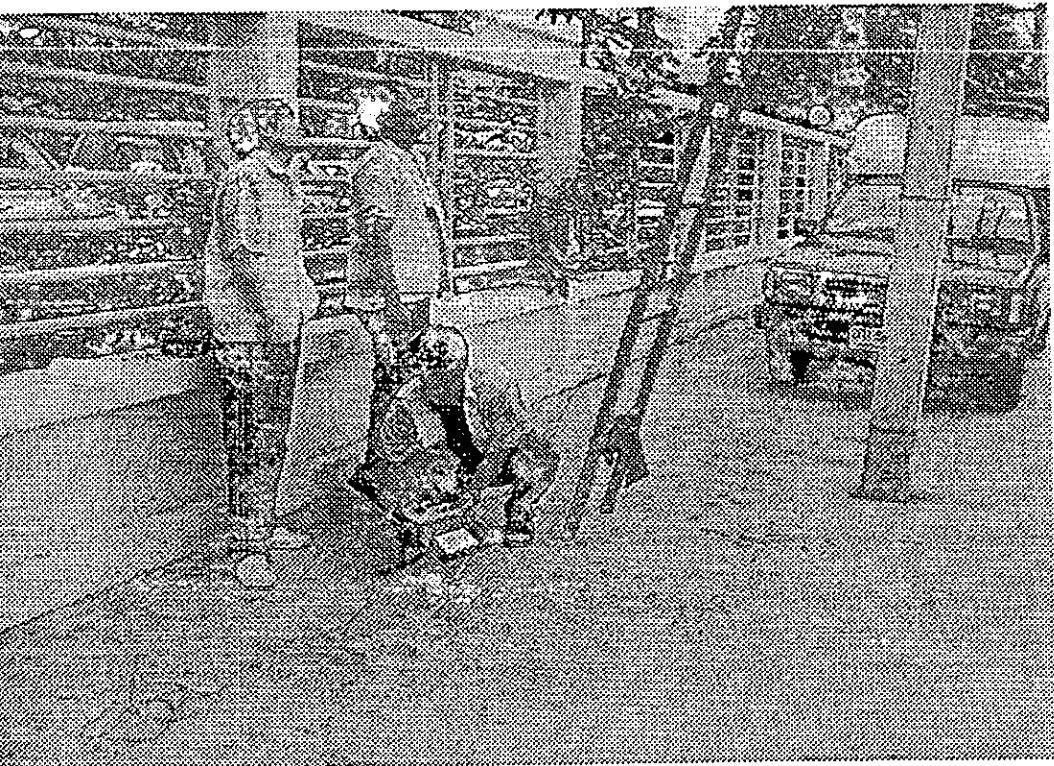
ภาพประกอบ 147 ลายทองแดงของแผงวงจรเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดิน



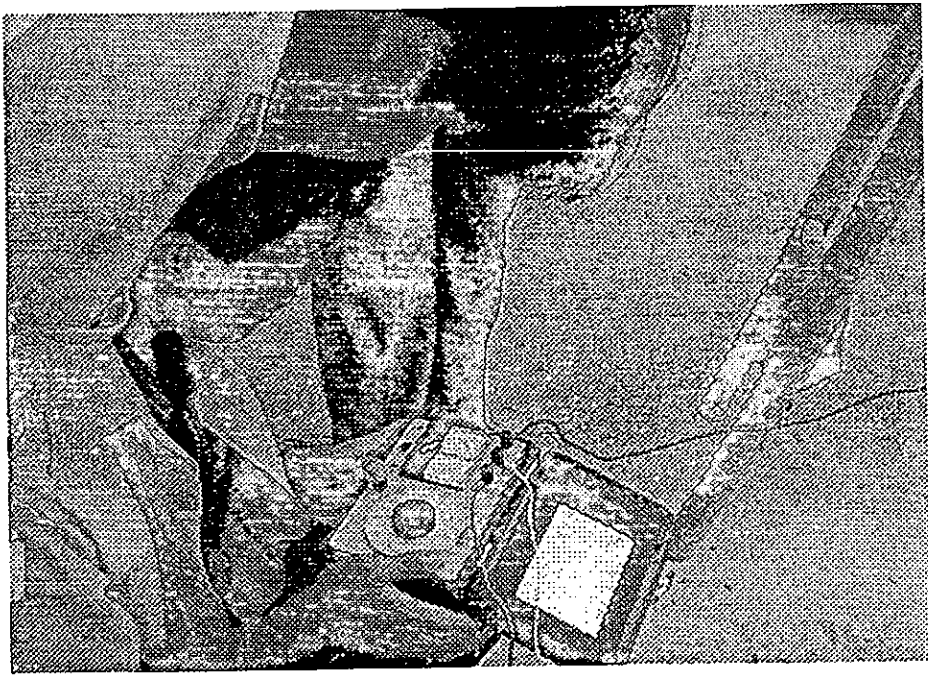
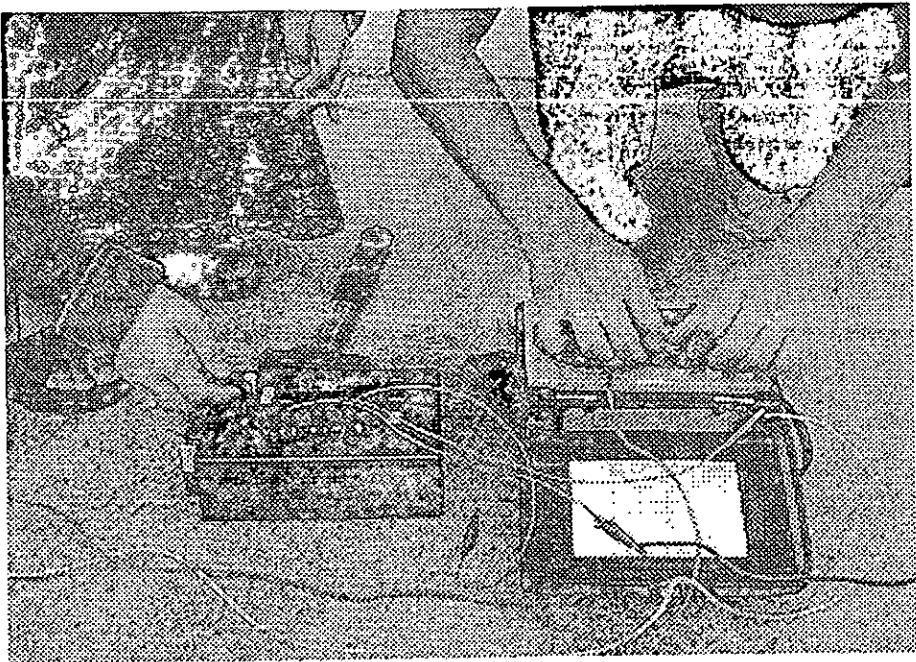
ประกอบ 148 แสดงตำแหน่งของอุปกรณ์บนลายทองแดง



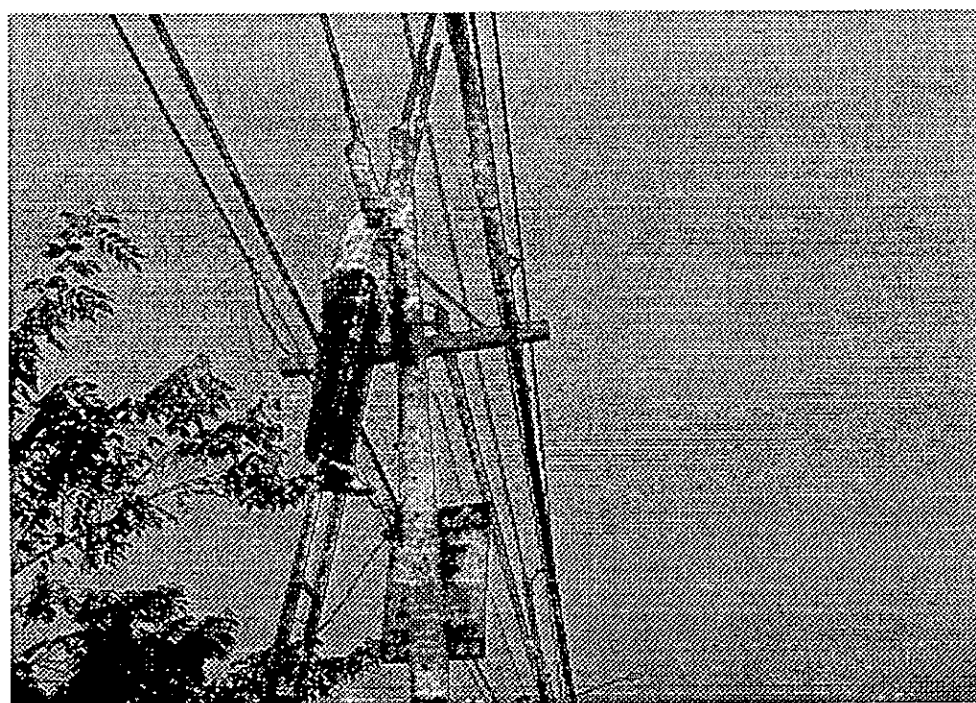
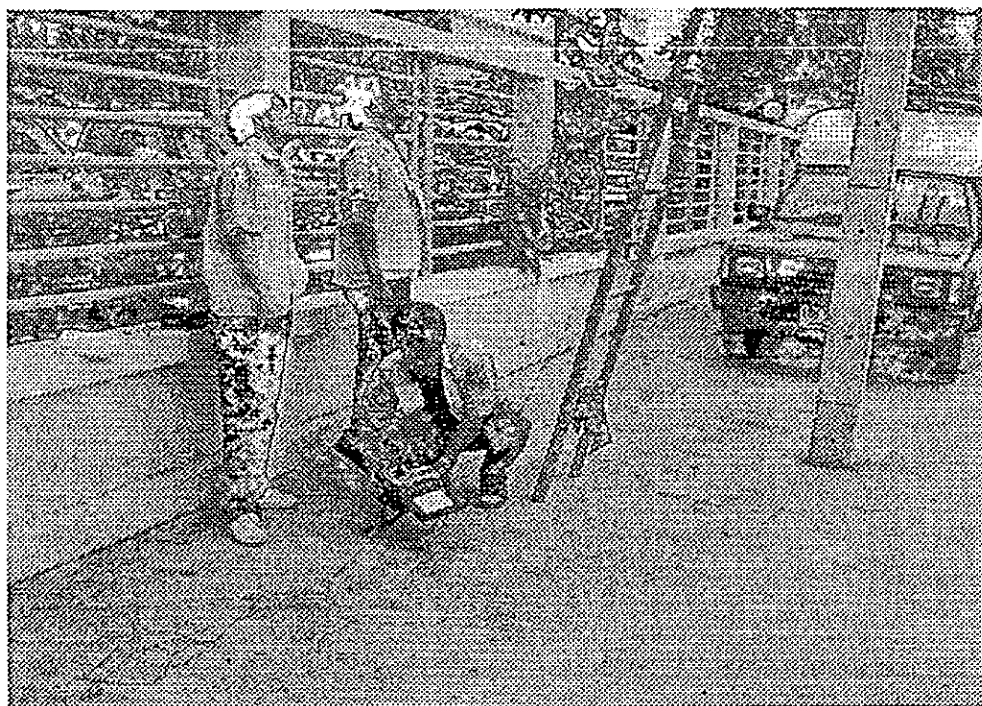
ภาพประกอบ 149 การเตรียมการเพื่อการทดสอบ



ภาพประกอบ 150 ตอกแห่งหลักดินอ้างอิงเพื่อใช้ในการทดสอบ



ภาพประกอบ 151 การต่อสายเข้ากับระบบจุดลงดินรวมของระบบข่ายสายโทรศัพท์ตอนนอก



ภาพประกอบ 152 การทดสอบการทำงานของเครื่องตรวจวัดค่าความต้านทานจุดลงดิน

คำนำ

คู่มือการใช้เครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอล ฉบับนี้จัดทำขึ้นเพื่อให้ท่านได้ทำความเข้าใจเกี่ยวกับชิ้นส่วนและอุปกรณ์ต่างๆ ของเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอล รวมทั้งการใช้งานการบำรุงรักษา เพื่อให้การใช้งานเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอลเป็นไปอย่างถูกต้องและปลอดภัย

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมั่นใจว่าคู่มือฉบับนี้จะทำให้ท่านผู้ใช้งานได้ใช้เครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอลอย่างมีประสิทธิภาพ

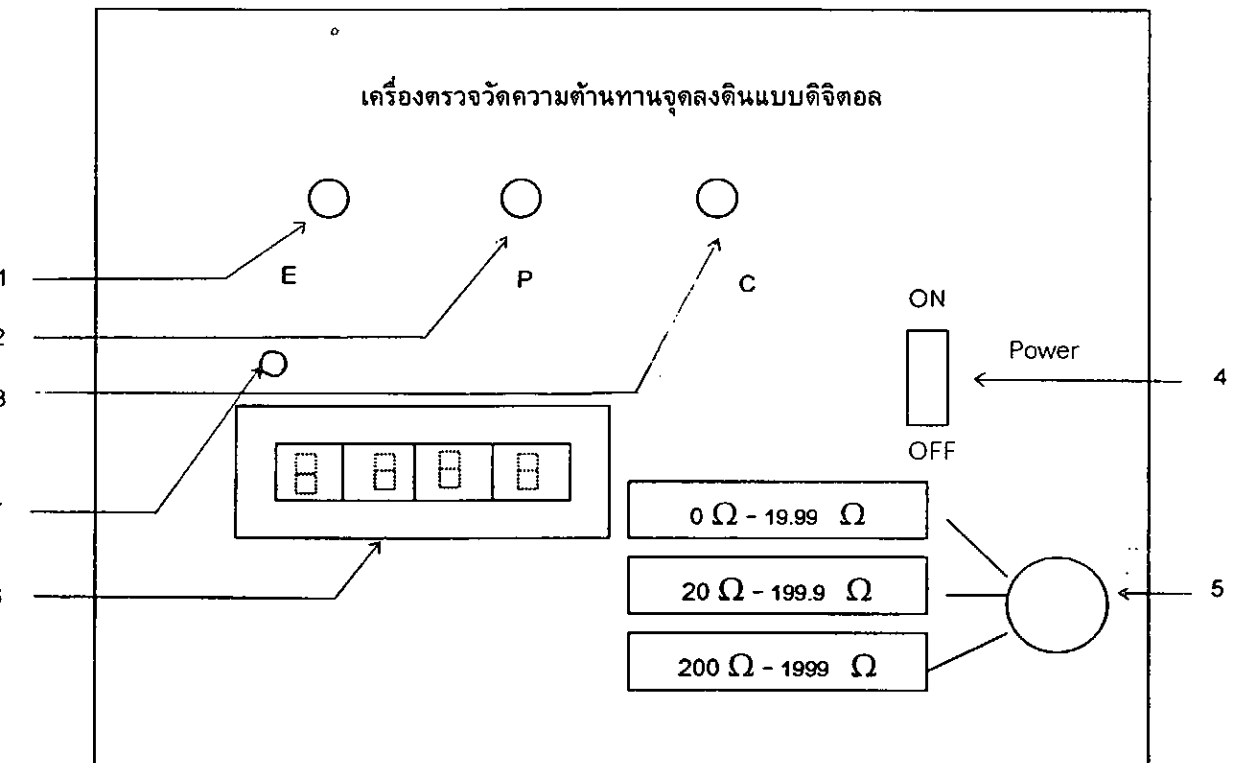
พรทิพย์ นุ่มอินทร์

ความรู้ทั่วไปของการใช้เครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดิน แบบดิจิตอลในระบบงานข่ายสาย
นอก

เครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอลถูกออกแบบและสร้างขึ้นเพื่อการตรวจสอบระบบ
การลงดิน ของจุดลงในระบบงานสร้างข่ายสายโทรศัพท์ เพื่อให้ระบบมีความปลอดภัยต่อผู้ปฏิบัติงานและ
อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องต่างๆ

ส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องตรวจวัดความต้านทานของจุดลงดินแบบดิจิตอล

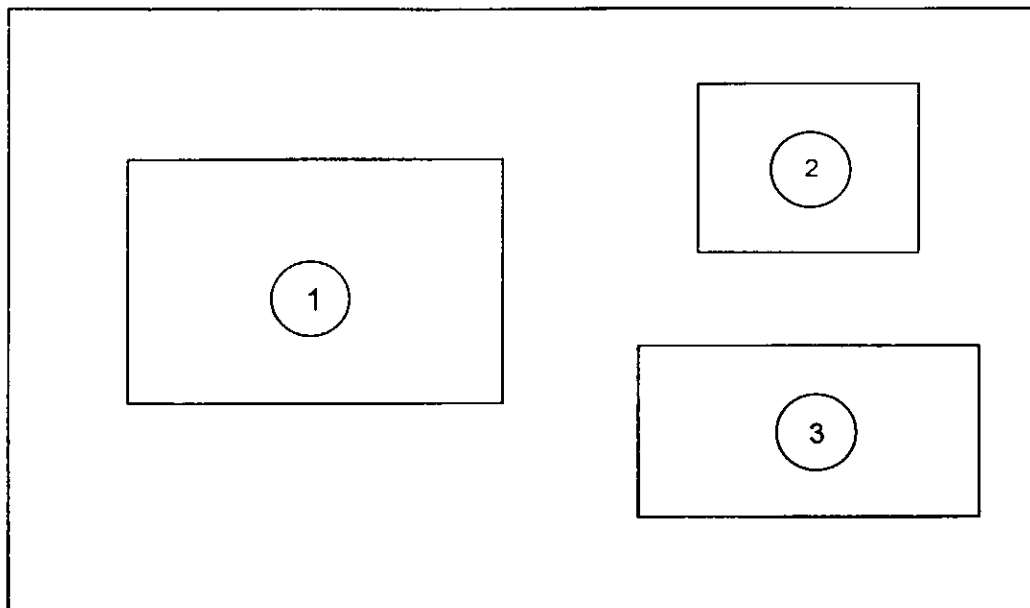
ส่วนประกอบด้านหน้าของเครื่องมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



ภาพประกอบ 153 ด้านหน้าของเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอล

- | | | |
|-----------|----------------------------|--|
| หมายเลข 1 | ปุ่มต่อสายเพื่อการวัด | ปุ่ม E ต่อเข้ากับอุปกรณ์ลงดิน(กราวด์)ที่ต้องการวัด |
| หมายเลข 2 | ปุ่มต่อสายเพื่อการวัด | ปุ่ม P ต่อเข้ากับแท่งหลักดินช่วย |
| หมายเลข 3 | ปุ่มต่อสายเพื่อการวัด | ปุ่ม C ต่อเข้ากับแท่งหลักดินช่วย |
| หมายเลข 4 | สวิตช์เปิด-ปิดเครื่อง | |
| หมายเลข 5 | ปุ่มปรับเลือกย่านของการวัด | |
| หมายเลข 6 | จอแสดงผลการตรวจวัด | |
| หมายเลข 7 | ปุ่มกดดูผลการวัด | |

ส่วนประกอบภายในเครื่อง



ภาพประกอบ 154 ภายในเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิทัล

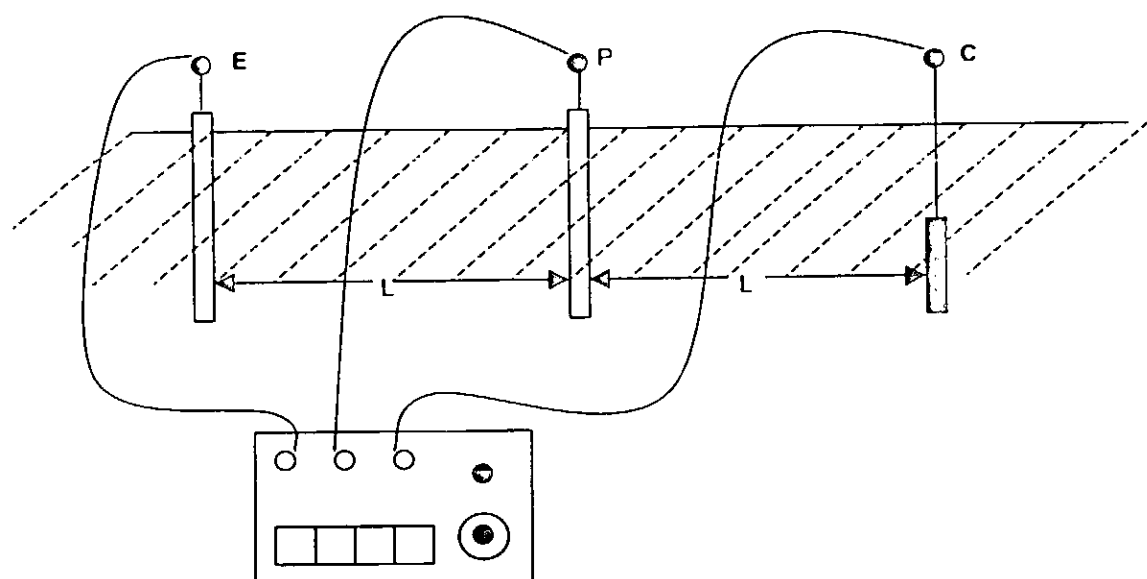
- หมายเลข 1 ชุดตรวจวัดแสดงผล
 หมายเลข 2 หม้อแปลงไฟฟ้า
 หมายเลข 3 ชุดแบตเตอรี่ 1.5 โวลต์

วิธีการใช้งานเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดิน แบบดิจิทัล

3.1 ปุ่มทั้งสามของเครื่องตรวจวัดที่แสดงด้วยตัวอักษร E, P และ C นั้น ปุ่ม E สำหรับต่อเข้ากับระบบลงดินที่ต้องการตรวจสอบปุ่ม P สำหรับต่อเข้ากับแท่งเหล็กดินช่วย ปุ่ม C สำหรับต่อเข้ากับแท่งเหล็กดินช่วยตัวปลาย ต่อสายต่างๆเข้ากับปุ่มของเครื่องตามภาพประกอบ 155 เพื่อให้การวัดได้ผล

- 3.1.1 ระยะ L ควรจะไม่น้อยกว่า 5 – 10 เมตร
 3.1.2 จุด E P และ C ควรจะเรียบกันเป็นเส้นตรงเดียวกัน
 3.1.3 สายทดสอบที่ต่อเข้ากับปุ่ม E ควรมีค่า IMPEDANCE ต่ำ

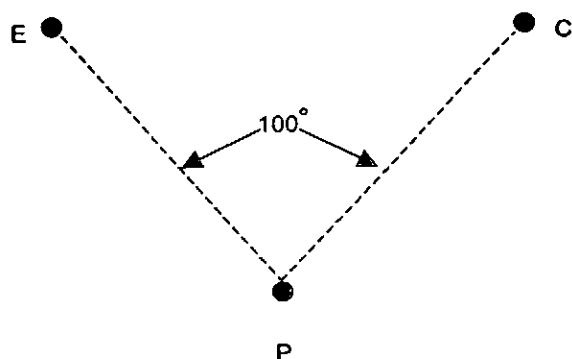
3.2 ข้อควรพิจารณาในทางปฏิบัติระหว่าง EP และ PC ควรมีค่าเท่ากันดังแสดงดังภาพประกอบ ด้วยตัวอักษร L ถ้า $EC \geq 10 \text{ เมตร} > EP \geq PC \text{ 5 เมตร}$ ค่าที่ได้จากการวัดอาจจะเบี่ยงเบนไปในทางเพิ่มมากขึ้นจากค่าที่เป็นจริงในกรณีนี้ P และ C มีโอกาสที่จะเข้าใกล้กันมาก จึงเปรียบเสมือนกับการวัดแบบ TWO-ELECTRODE



ภาพประกอบ 155 แสดงการใช้งานของเครื่องตรวจวัดความต้านทานจุดลงดินแบบดิจิตอล

หมายเหตุ หากส่วนหนึ่งของระบบลงดิน (Ground) ที่ทดสอบเป็นโลหะ และฝังดินขนานใกล้กับแท่งเหล็กดินช่วยที่สองให้ถือว่าเป็นการตรวจสอบแบบ Two Electrode หากมีท่อโลหะที่ฝังใกล้กับระบบลงดินจะนำมาใช้เป็นหลักดินช่วยไม่ได้

3.3 แท่งเหล็กดินช่วย P และ C ควรจะปักเป็นเส้นตรงเดียวกันกับระบบลงดินที่ทดสอบ หากไม่สามารถปฏิบัติได้สามารถปักแท่งเหล็กดินช่วย P และ C ทำมุมกับระบบลงดินที่ทดสอบ E ได้ แต่มุม EPC นี้จะต้องไม่น้อยกว่า 100 องศา ดังแสดงในภาพประกอบ 156 ระยะ EP และ EC ควรจะมากกว่าในสภาวะที่เป็นเส้นตรง



ภาพประกอบ 156 แสดงแท่งหลักดินช่วง P และ C ไม่อยู่ในเส้นตรงเดียวกัน

ประวัติย่อของผู้วิจัย

ชื่อ – ชื่อสกุล	นางสาวพรทิพย์ นุ่มอินทร์
สถานที่เกิด	134 ม. 7 ตำบลบ้านกล้วย อำเภอเมือง จังหวัดชัยนาท 17000 โทร. (056) 412-329
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	80/24 หมู่ 3 หมู่บ้านกฤษดานคร ถนนพหลโยธิน ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12120 โทร 0-2902-0667 , 0-1755-5826
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	ผู้ช่วยผู้จัดการฝ่ายประกันคุณภาพ
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	บริษัท ไทยฟรุ๊ตควา ยูนิคอม เอ็นจิเนียริง จำกัด 68 หมู่ 5 ซอยแสงศรี ถนนพระยาสุเรนทร์ บางชัน คลองสามวา กรุงเทพมหานคร 10510 โทร. 0-2540-6777
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2532	มัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนชัยนาทพิทยาคม อำเภอเมือง จังหวัดชัยนาท
พ.ศ. 2537	วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (วศบ.) สาขาไฟฟ้าสื่อสาร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร กรุงเทพมหานคร
พ.ศ. 2545	การศึกษามหาบัณฑิต (กศ.ม) วิชาเอกอุตสาหกรรมศึกษา มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ กรุงเทพมหานคร