



อุปกรณ์วัดสัญญาณฮาร์โมนิก

HARMONICS DETECTOR



ปริญญานิพนธ์เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2538

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในพิธีการเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่นำไปใช้

037037

ปีการศึกษา 2538

อุปกรณ์วัดสัญญาณฮาร์มอนิก
HARMONICS DETECTOR



อาจารย์ที่ปรึกษา

ผศ.ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล

อาจารย์อานันทวัฒน์ คุณากร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2538

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง อุปกรณ์วัดสัญญาณฮาร์มอนิก

ผู้จัดทำ



1. นายสุรศักดิ์ รอดแก้ว

2. นายอุดม วงศ์ศิรินพคุณ

อาจารย์ที่ปรึกษา

(ผศ. ศิริวัฒน์ โพธิเวชกุล)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญรูป	III
สารบัญตาราง	V
บทที่1 บทนำ	1
บทที่2 ฮาร์โมนิกและผลกระทบต่อระบบ	3
2.1 บทนำ	3
2.2 ศัพท์และปริมาณต่างๆ ในเรื่องฮาร์โมนิก	5
2.3 ประเภทของฮาร์โมนิก	8
2.4 แหล่งกำเนิดฮาร์โมนิก	11
2.5 ผลกระทบของฮาร์โมนิก	15
2.5.1 ผลกระทบต่อระบบไฟฟ้า	15
2.5.2 ผลกระทบต่อสายส่ง	15
2.5.3 ผลกระทบต่อหม้อแปลง	16
2.5.4 ผลกระทบของฮาร์โมนิกต่อเครื่องจักรกลไฟฟ้า	17
2.5.5 ผลกระทบของฮาร์โมนิกต่อสวิตช์เกียร์	18
2.5.6 ผลกระทบของฮาร์โมนิกต่อเบรกคาปาซิเตอร์	18
2.5.7 ผลกระทบของฮาร์โมนิกต่อรีเลย์	19
2.5.8 ผลกระทบของฮาร์โมนิกต่อมิเตอร์วัด ไฟฟ้า	19
2.5.9 ผลกระทบของฮาร์โมนิกต่ออุปกรณ์ใช้ไฟฟ้า	19
2.5.10 ผลกระทบของฮาร์โมนิกต่อระบบสื่อสาร	20
2.5.11 ผลกระทบต่อสายนิวตรอล	20
2.5.12 ผลของฮาร์โมนิกที่เกิดในเซอร์กิตเบรกเกอร์	21
2.5.13 ผลของฮาร์โมนิกในบัสบาร์และจุดเชื่อมต่อ	21
2.5.14 ผลของกระแสฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นในแผงควบคุมระบบไฟฟ้า	21

	หน้า
บทที่ 3 การวิเคราะห์ฮาร์มอนิก	22
3.1 บทนำ	22
3.2 การวิเคราะห์อนุกรมฟูรีเยร์	22
3.3 การแปลงฟูรีเยร์	23
3.4 การแปลงฟูรีเยร์แบบเต็มหน่วย	24
3.5 การแปลงฟาสต์ฟูรีเยร์	28
3.5.1 การแปลงฟาสต์ฟูรีเยร์แบบฐานสอง	28
3.5.1.1 หลักการเบื้องต้นของ FFT	28
3.5.1.2 ขั้นตอนการลดทอนทางเวลา	31
3.5.1.3 การลดทอนทางเวลาโดยวิธีการซ้ำที่	35
3.5.1.4 การแปลงฟาสต์ฟูรีเยร์ชนิดลดทอนทางความถี่	38
บทที่ 4 หน่วยลดทอนสัญญาณ	42
4.1 บทนำ	42
4.2 การแปลงสัญญาณกระแสให้เป็นแรงดัน	42
4.3 วงจรไฟเลี้ยงออปแอมป์และ LEM โมดูล ± 12 โวลต์	44
4.3.1 ขนาดของหม้อแปลง	45
4.3.2 ขนาดของตัวเก็บประจุ	46
4.3.3 ขนาดไดโอดที่ใช้	46
บทที่ 5 ขั้นตอนการประมวลผลสัญญาณฮาร์มอนิกสำหรับ TMS320c26	47
5.1 บทนำ	47
5.2 ขั้นตอนการประมวลผลของโปรแกรมหลัก	47
5.3 ขั้นตอนการคำนวณโปรแกรม FFT	49
5.4 ขั้นตอนการประมวลผลเพื่อแสดงผลบน LCD โมดูล	52
บทที่ 6 การใช้ LCD โมดูลในการแสดงผลสัญญาณ	54
6.1 คุณสมบัติของ DOT MATRIX LCD โมดูล	54
6.2 ขาสัญญาณของ LCD โมดูล	55
6.3 หลักการเขียนข้อมูลให้ LCD โมดูล	55
6.4 การต่อ LCD โมดูลเข้ากับ TMS320c26	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อุปกรณ์วัดสัญญาณฮาร์มอนิก

นายสุรศักดิ์ รอดแก้ว

นายอุดม วงศ์ศิริินพคุณ

ผศ.ศิริวัฒน์ โปธิเวชกุล อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์อานันท์วัฒน์ คุณากร อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 2538

บทคัดย่อ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้เป็นการสร้างอุปกรณ์วัดสัญญาณฮาร์มอนิกซึ่งเป็นส่วนประกอบในระบบไฟฟ้าที่ไม่พึ่งปรารณา ตัวอุปกรณ์เป็นการประยุกต์ใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ TMS320c26 ซึ่งทำหน้าที่ในการประมวลผลและคำนวณองค์ประกอบฮาร์มอนิกโดยใช้เครื่องมือทางคณิตศาสตร์ที่เรียกว่า การแปลงฟาสต์ฟูเรียร์ หรือ FFT (Fast Fourier Transform) อุปกรณ์เริ่มแรกจะออกแบบให้สามารถวัดองค์ประกอบฮาร์มอนิกในกระแสเฟสเดียว แต่สามารถประยุกต์ใช้ในการวัดองค์ประกอบฮาร์มอนิกในแรงดันทั้งในระบบ 1 เฟส และ 3 เฟสได้ต่อไป โดยผลสามารถดูได้จาก LCD โมดูล หรือ กราฟสเปกตรัมบนจออสซิลโลสโคป นอกจากนี้นำไปประยุกต์ใช้ควบคุมวงจรฮาร์มอนิกหรืออุปกรณ์อื่นๆเพื่อลดองค์ประกอบฮาร์มอนิกให้เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด

HARMONICS DETECTOR

Surasak Roadkaew

Udom Wongsirinopphakhun

Siriwat Photiwatchakhun Advisor

Arnatawat Khunakon Advisor

1995

ABSTRACT

The purpose of this thesis is the effort to build the the equipment that detect the harmonic signal in the electrical system .The equipment is base on the application .of the TMS320c26 microprocessor that use FFT (Fast Fourier Transform) as the main tool to evaluate and analysis the harmonic component in any waveform .First ,the equipment is designed to detector harmonic current but can be modified to detect in harmonic voltage in both single phase and three phase system .The display can be seen on LCD display or spectrum graph on oscilloscope monitor. And also the equipment can be modified to send out the control signal to the filter circuit to control the level of harmonic component in limit level.

รูปที่ 7.4 แสดงสเปกตรัมที่วัดได้จากออสซิลโลสโคป ที่สัญญาณไซน์ความถี่ 10 KHz	61
รูปที่ 7.5 แสดงสเปกตรัมที่วัดได้จากออสซิลโลสโคป ที่สัญญาณ รูปคลื่นสี่เหลี่ยมความถี่ 170 KHz	61
รูปที่ 7.6 แสดงสเปกตรัมที่วัดได้จากออสซิลโลสโคป ที่สัญญาณ รูปคลื่นสี่เหลี่ยมความถี่ 170 KHz (ต่อ)	62
รูปที่ 7.7 แสดงสเปกตรัมที่วัดได้จากสเปกตรัมอะนาไลเซอร์	62
รูปที่ 7.8 ค่าที่อ่านได้จากสเปกตรัมอะนาไลเซอร์	68



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 3.1 แสดงค่า $[W^k]$ กรณี $N = 8$	27
ตารางที่ 6.1 แสดงขาสัญญาณต่างๆ ของ LCD โมดูล	55
ตารางที่ 7.1 แสดงผลจากการหาคำราคของเลข 32 บิต	65
ตารางที่ 7.2 แสดงข้อมูลที่ได้จากการแสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิกทาง LCD โมดูล	66
ตารางที่ 7.3 แสดงค่าที่อ่านได้จาก LCD โมดูล	67
ตารางที่ 7.4 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิกลำดับที่จากสเปกตรัมอะนาไลเซอร์	68



บทที่ 1

บทนำ

ในอดีตคำว่า “ฮาร์มอนิก” ยังไม่ค่อยมีใครรู้จักและศึกษากันมากนัก เนื่องจากอุปกรณ์ไม่เชิงเส้น(Non-Linear Device)เช่น อุปกรณ์แปลงผันทางไฟฟ้า(Converter) ,หม้อแปลงไฟฟ้า ,เครื่องจักรกลไฟฟ้า เป็นต้น มีจำนวนน้อย ทำให้ผลของฮาร์มอนิก(ความเพี้ยนของสัญญาณ)เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ามีปริมาณน้อยมาก แต่ในช่วง 2 ทศวรรษที่ผ่านมาอุปกรณ์จำพวกนี้ได้เกิดขึ้นเป็นปริมาณมาก มีการนำเอามาใช้งานในระบบไฟฟ้ามากขึ้น ซึ่งอุปกรณ์พวกนี้จะมีการเปลี่ยนแปลงทางกระแสสูงหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงของกระแสอย่างฉับพลัน เป็นผลให้เกิดความเพี้ยนของสัญญาณหรือฮาร์มอนิก ที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูลในระบบไฟฟ้า เมื่อเกิดความเพี้ยนของสัญญาณขึ้น ทำให้เกิดผลเสียต่อระบบไฟฟ้ามากมายเช่น ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบลดลง เกิดปริมาณกระแสสูงในระบบ ทำให้ฉนวนที่ออกแบบไว้เกิดความเสียหายและอาจทำให้เกิดการรบกวนได้ เป็นต้น

ปริญญานิพนธ์เล่มนี้เป็นเรื่องเกี่ยวกับการสร้างอุปกรณ์วัดสัญญาณฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่พึงปรารถนา และโดยมากจะพยายามกำจัดออกจากระบบ อย่างไรก็ตามในแต่ละระบบอาจมีฮาร์มอนิกประกอบอยู่ในขนาดและระดับที่ต่างกัน จึงเป็นที่มาของการพยายามสร้างอุปกรณ์ในการวัดสัญญาณฮาร์มอนิกขึ้น อุปกรณ์วัดสัญญาณฮาร์มอนิกที่สร้างขึ้นในโครงการนี้ ในระยะแรกจะทำการสร้างอุปกรณ์สำหรับวัดองค์ประกอบฮาร์มอนิกในกระแสก่อน (โดยทั่วไประบบไฟฟ้ามักปรากฏองค์ประกอบฮาร์มอนิกในกระแสเสมอ) แต่ก็สามารถประยุกต์สำหรับวัดองค์ประกอบฮาร์มอนิกในแรงดันทั้งในระบบ 1 เฟส และระบบ 3 เฟส ได้ต่อไป และสามารถนำเอาไปประยุกต์ใช้การกับอุปกรณ์กรองความถี่เพื่อกำจัดสัญญาณฮาร์มอนิกที่มีความเพี้ยนสูงเกินมาตรฐานกำหนดไว้

เนื่องจากการวัดองค์ประกอบฮาร์มอนิก ไม่สามารถวัดได้โดยตรง ดังเช่น การวัดขนาดกระแสหรือขนาดแรงดันโดยทั่วไปแต่จะต้องนำลักษณะรูปคลื่น(wave form)ที่ได้นำมาประมวลผลวิเคราะห์องค์ประกอบที่เป็นฮาร์มอนิกต่อไป ดังนั้นในโครงการนี้การสร้างอุปกรณ์วัดจะประยุกต์ใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ TMS320C26 ของบริษัทเท็กซัสอินสตรูเมนต์มาใช้ในการประมวลผล

ลักษณะโดยรวมของโครงการจะประกอบด้วย

1.หน่วยลดทอนสัญญาณ เนื่องจากจำเป็นต้องใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ในการประมวลผลวิเคราะห์ซึ่งตัวไมโครโปรเซสเซอร์นี้จะรับรู้ลักษณะสัญญาณในรูปของแรงดันภายในค่าจำกัดเท่านั้น จึงไม่ปลอดภัยและไม่ถูกต้องหากทำการวิเคราะห์จากกระแสหรือแรงดันจริงโดยตรง จึงต้องมี

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การลดทอนสัญญาณลงให้อยู่ภายในค่าที่เหมาะสม แต่โดยความสำคัญคืออุปกรณ์ที่ใช้ลดทอนสัญญาณที่มีผลทำให้ลักษณะรูปคลื่นมีความผิดเพี้ยนไปจากเดิม น้อยที่สุด

2. หน่วยประมวลผล ซึ่งทำหน้าที่ในการนำลักษณะรูปคลื่นที่ได้มาวิเคราะห์หาองค์ประกอบฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ ซึ่งในที่นี้ได้เลือกใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ TMS320C26 ซึ่งเป็นไมโครโปรเซสเซอร์ประเภทประมวลผลเชิงเลข (DSP: Digital Signal Processing) ซึ่งเหมาะในด้านความเร็วและความยืดหยุ่นของคำสั่งใช้งาน แต่อย่างไรก็ตามก่อนทำการประมวลผลจะต้องมีหน่วยหนึ่งซึ่งทำหน้าที่ในการแปลงสัญญาณลักษณะรูปคลื่นที่เป็นสัญญาณอนาล็อกไปเป็นสัญญาณดิจิทัล (Analog to Digital) เพื่อนำค่าดังกล่าวไปประมวลผลใน TMS320C26 ต่อไป หน่วยดังกล่าวจะใช้ TLC32040 ซึ่งมีความเร็วในการแปลงที่เหมาะสมเพียงพอในการใช้งานร่วมกับไมโครโปรเซสเซอร์

3. หน่วยแสดงผล โดยจะทำการแสดงในรูปของเปอร์เซ็นต์ต่อค่าหลักมูล (Fundamental component) ซึ่งในระบบไฟฟ้าทั่วไปเป็นค่าที่ความถี่ 50 Hz โดยแสดงผลทาง LCD โมดูล และในรูปกราฟสเปกตรัมออกทางออสซิลโลสโคป

องค์ประกอบรวมสามารถแสดงได้จากแผนภาพต่อไปนี้



รูปที่ 1. แสดงแผนภาพโดยรวมของอุปกรณ์วัด

บทที่ 2

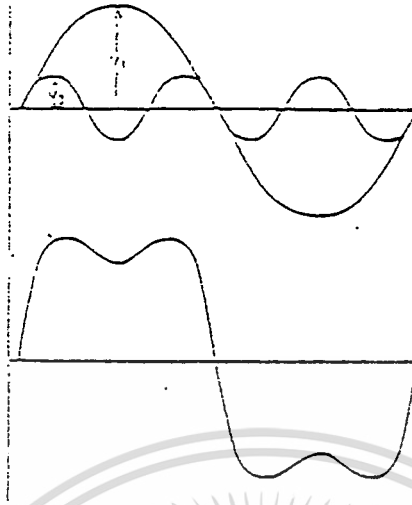
ฮาร์มอนิกและผลกระทบต่อบรรยากาศ (Harmonics and Effect)

2.1 บทนำ

ระบบไฟฟ้าในอุดมคติที่เราต้องการนั้นจะเป็นระบบซึ่งมีความถี่ที่คงที่ ที่แรงดันซึ่งมีขนาดคงที่ อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติเราเกือบจะไม่พบลักษณะเช่นนี้เลย แต่เราสามารถควบคุมลักษณะเบี่ยงเบนหรือความเพี้ยนเหล่านี้ให้อยู่ในระดับที่ยอมรับได้ ซึ่งในการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้ากำลังนั้นเราจะตัดผลจากความเพี้ยนเล็กน้อยเหล่านี้ทิ้งได้ ความเพี้ยนในระบบไฟฟ้านั้นเริ่มเป็นปัญหามาตั้งแต่เราเริ่มรู้จักกับไฟฟ้ากระแสสลับ ในระยะแรกปัญหานี้เป็นผลสืบเนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นจำนวนมากของจำนวนอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลังที่มีความไม่เป็นเชิงเส้นสูง (highly non-linear power electronic devices) ในระบบ ความเพี้ยนของคลื่นไซน์จะถูกวัดและแสดงในรูปของขนาดของฮาร์มอนิกต่างๆทั้งนี้โดยอาศัยวิธีการทางคณิตศาสตร์ในการวิเคราะห์ในช่วง 2 ทศวรรษที่ผ่านมา ในการประชุมระดับนานาชาติ ได้มีการให้ความสำคัญกับปัญหาความเพี้ยนหรือผลของฮาร์มอนิกมากขึ้น ซึ่งปัจจุบันได้มีการกำหนดขนาดของฮาร์มอนิกในระบบ ซึ่งระบุไว้ในหลายมาตรฐาน เช่น IEEE และ IEC เป็นต้น

ในวิชาเสียง คำว่า “ฮาร์มอนิก” หมายถึง การสั่น(Vibration) ของเชือกหรือลำอากาศ(Column of Air) ที่มีความถี่ของการสั่นเป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูล(Fundamental Frequency) แต่ในวิชาทางไฟฟ้า “ฮาร์มอนิก” จะหมายถึง สัญญาณที่เกิดจากการรวมกันของสัญญาณ Sine Wave ที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูล ที่ได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า(Generator) สำหรับในระบบไฟฟ้ากำลังของประเทศไทย ความถี่หลักมูล คือ 50 Hz ความถี่ของแรงดันฮาร์มอนิกหรือกระแสฮาร์มอนิกจะเป็น 100Hz, 150Hz, 200 Hz,....

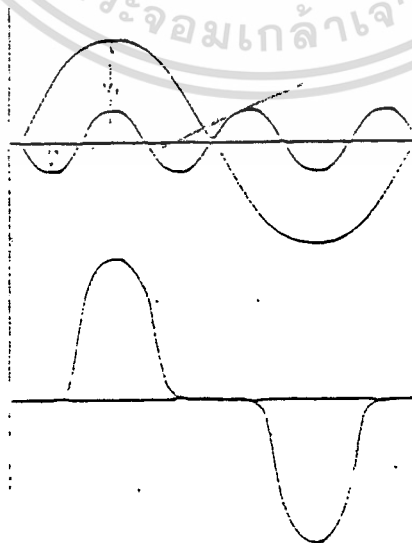
ในวิชาเสียง ความสัมพันธ์กันของมุมเฟสระหว่างส่วนประกอบฮาร์มอนิกกับความถี่หลักมูลจะทำให้คุณภาพของเสียงเปลี่ยนแปลงไป แต่ผลของการได้ยินเสียง(Audible Effect) ยังคงเหมือนเดิม จะไม่มีผลกระทบต่อกระตือรือร้นต่อการได้ยินแต่อย่างใด แต่ในทางไฟฟ้าความสัมพันธ์ระหว่างมุมเฟสนี้จะเป็นสิ่งสำคัญมาก เพราะจะมีผลกระทบต่อรูปคลื่นโดยรวม ดังเช่น



รูปที่ 2.1 รูปคลื่นรวมแบบขอดแบน

จากรูปที่ 2.1 เป็นการรวมกันของสัญญาณที่มีความถี่ หลักมูล(Fundamental) กับสัญญาณที่ความถี่เป็น 3 เท่าของความถี่ หลักมูล หรือ ฮาร์โมนิกที่ 3 โดยมุมเฟสเท่ากับ 0 องศา เท่ากับมุมเฟสของความถี่หลักมูล ลักษณะของรูปคลื่นรวมที่ได้จะมีค่ายอดของสัญญาณลดลงและจากรูปเรา จะเห็น ได้ว่ารูปคลื่นรวมแบบขอดแบนนี้เกิดจากสัญญาณ ไซน์จำนวน 2 ชุดที่มีความถี่ต่างกัน 3 เท่ารวมกัน ดังสมการ(2.1)

$$v(t) = V_1 \sin(\omega t) + V_3 \sin(3\omega t) \quad (2.1)$$



รูปที่ 2.2 รูปคลื่นรวมแบบขอดแหลม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.2 เป็นการรวมกันของสัญญาณที่มีความถี่ Fundamental กับสัญญาณที่มีความถี่เป็น 3 เท่าของความถี่ Fundamental เช่นกัน แต่ว่ามีมูฟเฟสของสัญญาณเท่ากับ -90 องศา ทำให้รูปคลื่นรวมต่างจากรูป 1 โดยรูปคลื่นรวมจะมีค่ายอดของสัญญาณสูงขึ้น และจากรูปจะเห็นรูปคลื่นแบบขอดแหลมนี่เกิดจากรูปคลื่นไซน์จำนวน 2 ชุด ที่มีความถี่ต่างกัน 3 เท่าเหมือนรูปที่ 1 มารวมกัน แต่มีมูฟเฟสต่างกัน ดังสมการ(2.2)

$$v(t) = V_1 \sin(\omega t) + V_3 \sin(3\omega t) \quad (2.2)$$

จากตัวอย่างจะเห็นได้ว่าความสัมพันธ์ของมูฟเฟสของสัญญาณเป็นสิ่งสำคัญมากต่อลักษณะของรูปคลื่นโดยรวม

ในอดีตยังไม่มีการศึกษาเรื่องฮาร์มอนิกกันอย่างจริงจัง เนื่องจากอุปกรณ์ไม่เชิงเส้น(Non-Linear Device) มีจำนวนน้อย ทำให้ผลของฮาร์มอนิกที่เกิดในระบบไฟฟ้ากำลังมีค่าน้อย แต่ในช่วง 10 ปีที่ผ่านมาอุปกรณ์ไม่เชิงเส้นเกิดขึ้นอย่างมาก มีการผลิตขึ้นมาใช้กันอย่างแพร่หลาย ตัวอย่างเช่น เครื่องแปลงผันไฟฟ้า(Converter) อุปกรณ์ไม่เชิงเส้นเหล่านี้อาจทำหน้าที่เป็นโหลดหรือแหล่งกำเนิดก็ได้ อุปกรณ์ไม่เชิงเส้นเหล่านี้จะการเปลี่ยนแปลงทางกระแสสูง การเปลี่ยนแปลงของกระแสอย่างฉับพลันนี้ เป็นผลให้เกิดฮาร์มอนิกหรือสัญญาณรบกวนที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าทวีคูณของความถี่เดิมขึ้นในระบบไฟฟ้าและความไม่เป็นเชิงเส้นจะทำให้เกิดการผิดเพี้ยนของสัญญาณไป

ในปัจจุบันจึงได้มีการค้นคว้าและทำการวิจัยปัญหาเกี่ยวกับฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นกันอย่างแพร่หลาย ตลอดจนหาวิธีการวิเคราะห์สัญญาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นและหาทางแก้ไขให้ระบบไฟฟ้ากำลังมีสัญญาณฮาร์มอนิกต่ำที่สุดหรือให้เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนด

2.2 ศัพท์และปริมาณต่างๆในเรื่องฮาร์มอนิก

ศัพท์ที่สำคัญในการศึกษา ระบุ และวัดความเพี้ยนเรื่องฮาร์มอนิกของระบบ ที่สำคัญมีดังนี้

- 1 Distortion Factor : DF
- 2 Harmonics Factor : HF
- 3 Total Harmonic Content : THC
- 4 Total Harmonic Distortion :THD

ค่าทั้งหมดนี้มีความหมายใกล้เคียงกันมาก ต่างก็ใช้ในการระบุปริมาณของฮาร์มอนิก ที่มีอยู่ทั้งหมด โดยเปรียบเทียบกับค่าอาร์เอ็มเอสของส่วนประกอบความถี่หลักมูล หรือเทียบกับค่าอาร์เอ็มเอส ของปริมาณทั้งหมด ทั้งนี้แล้วแต่มาตรฐานต่างๆจะกำหนดนิยามไว้

ในมาตรฐาน IEEE Std. 519:1992

$$DF_v = HV_v = THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \times 100\% \quad (2.3)$$

$$DF_i = HV_i = THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \times 100\% \quad (2.4)$$

จาก AS2279.1-1991 และ AS2279.2-1991

$$U_T (= THD_v) = \frac{100}{U_1} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2} \% \quad (2.5)$$

$$I_T (= THD_i) = \frac{100}{I_1} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} \% \quad (2.6)$$

จาก IEC 555-1 :1982

$$HD_v (= THD_v) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} V_n^2}} \times 100\% \quad (2.7)$$

= (ค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันฮาร์มอนิก) $\times 100\%$
(ค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันทั้งหมด)

$$HD_i (= THD_i) = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2}} \times 100\% \quad (2.8)$$

= (ค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสฮาร์มอนิก) $\times 100\%$
(ค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสทั้งหมด)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในนิยามของมาตรฐาน IEEE และ AS ค่า THD มีโอกาสเกิน 100% ถ้าในรูปคลื่นของกระแสหรือแรงดันมีฮาร์มอนิกปนอยู่มาก แต่ค่า THD ตามนิยามของมาตรฐาน IEC จะไม่มีโอกาสที่จะเกิน 100%

ดังนั้นในการกล่าวถึงปริมาณ THD ของอุปกรณ์ใดๆแล้วจะมีการนำมาเปรียบเทียบกับเพื่อดูข้อดีและข้อเสีย จะต้องทำความเข้าใจให้ตรงกันตั้งแต่แรกก่อนว่า THD นั้นนิยามไว้ตามมาตรฐานใดไม่เช่นนั้นจะทำให้การเปรียบเทียบได้ผลที่ผิดไปจากที่ต้องการ

5. ลำดับฮาร์มอนิก (Harmonic Order (n))

ลำดับฮาร์มอนิกคือ อัตราส่วนของความถี่ฮาร์มอนิก และความถี่หลักมูล เช่นเมื่อเรากล่าวถึงฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 หากความถี่หลักมูลเป็น 50 Hz จะได้ความถี่ของฮาร์มอนิกที่ 3 เป็น 150 Hz แต่ถ้าความถี่หลักมูลเป็น 60 Hz ก็จะได้ความถี่ของความถี่ของฮาร์มอนิกที่ 3 เป็น 180 Hz เป็นต้น

6. Displacement Power Factor (DPF)

โดยปกติเมื่อทำการวิเคราะห์สัญญาณต่างๆออกมาในรูปองค์ประกอบที่เป็นฮาร์มอนิกต่างๆ เราสามารถหาตัวประกอบกำลัง (power factor) โดย

$$PF = \frac{\text{active power}}{\text{appearance power}} = \frac{V_1 I_1}{V_1 I_{rms}} \cos \phi_1 = \frac{I_1}{I_{rms}} \cos \phi_1 \quad (2.9)$$

เราเรียก $\cos \phi_1$ ว่า Displacement Power Factor หรือ DPF โดยที่ ϕ_1 เป็นมุมซึ่ง องค์ประกอบกระแสที่มีความถี่เท่ากับความถี่หลักมูล (Fundamental component) ตาม (lag) องค์ประกอบแรงดันที่มีความถี่เท่ากับความถี่หลักมูล นั่นคือ

$$DPF = \cos \phi_1 \quad (2.10)$$

7. Total Power Factor (PF)

เมื่อเรากล่าวถึงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า (Power Factor) ตามนิยามแล้วจะหมายถึง อัตราส่วนของกำลังงานจริง (W หรือ KW) ต่อกำลังงานปรากฏ (VA หรือ KVA) และถ้าหารูปคลื่นของแรงดันและกระแสมีลักษณะเป็นรูปคลื่นไซน์เราอาจพูดถึงตัวประกอบกำลังในเทอมของ cosine ของมุมระหว่างแรงดันกับกระแสก็ได้ แต่ในระบบที่มีฮาร์มอนิกปนอยู่ค่าทั้งสองนี้จะไม่เท่ากัน

โดย

PF คือ อัตราส่วนของกำลังงานจริงต่อกำลังงานปรากฏ ดังสมการ (2.9)

DPF คือ อัตราส่วนของกำลังงานจริงต่อกำลังองรูปคลื่นความถี่หลักมูลต่อกำลังงานปรากฏของรูปคลื่นความถี่หลักมูล (2.10)

หรือคือ ค่า cosine ของมุมเฟสของแรงดันกับกระแสที่ความถี่หลักมูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.3 ประเภทของฮาร์มอนิก

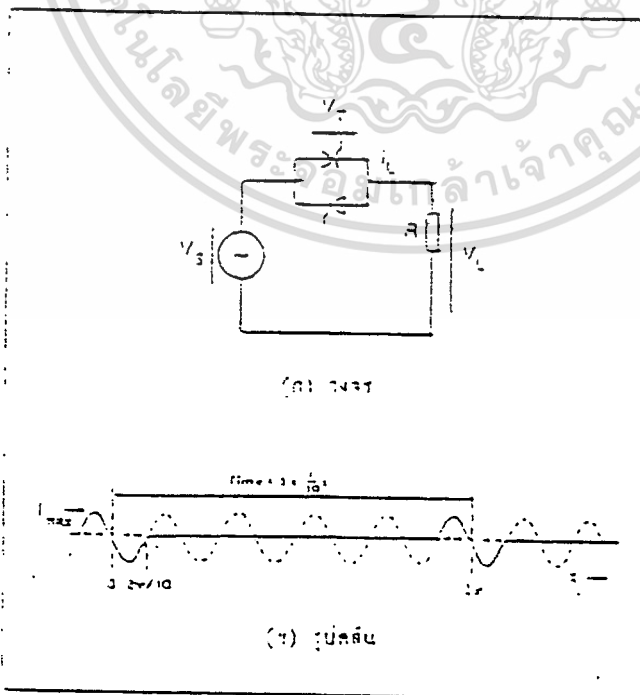
ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นปะปนอยู่ในกระแสหรือแรงดันในระบบไฟฟ้าอาจแบ่งออกเป็นประเภทต่างๆ ได้ดังต่อไปนี้

2.3.1 ฮาร์มอนิก (Harmonic)

หมายถึง ส่วนประกอบรูปคลื่นไซน์ของรูปคลื่นรายคาบใดๆ ที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าลงตัวของความถี่หลักมูล เช่น รูปคลื่นสี่เหลี่ยม (Square Wave) จะมีฮาร์มอนิกปนอยู่มากตั้งแต่ฮาร์มอนิกลำดับที่ 2,3,4,... หรือรูปคลื่นในรูปที่ 1 และ 2 จะมีเฉพาะฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 ปนอยู่เท่านั้น

2.3.2 อินเตอร์ฮาร์มอนิก (Interharmonic)

หมายถึง ส่วนประกอบรูปคลื่นไซน์ของรูปคลื่นรายคาบใดๆ ที่มีความถี่ไม่เป็นจำนวนเท่าลงตัวของความถี่หลักมูล อินเตอร์ฮาร์มอนิก นี้ส่วนมากจะพบในกระแสของเตาหลอมแบบอาร์ก (Arc Furnace) เนื่องจากในระหว่างหลอมเหล็ก โดยเฉพาะในช่วงเริ่มต้นการหลอม กระแสอาร์กจะยังไม่เสถียรภาพ ทำให้คาบของกระแสไม่แน่นอน กล่าวคือ ปกติความถี่ 50 Hz 1 คาบจะกินเวลา 20 มิลลิวินาที แต่กระแสอาร์ก จะมีคาบเวลาไม่เป็น 20 มิลลิวินาทีทุกคาบ ทำให้เกิดอินเตอร์ฮาร์มอนิกขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถพบอินเตอร์ฮาร์มอนิกได้ในอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีการควบคุมการทำงานแบบ เต็มลูกคลื่น (Integral Cycle Control หรือ Burst Firing) ดังรูป



รูปที่ 2.3 การควบคุมกระแสที่ไหลผ่านโหลดแบบเต็มลูกคลื่น Integral Cycle Control โยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ้าให้

N คือ จำนวนลูกคลื่นที่ผ่านวงจรควบคุมแบบเต็มคลื่น (Integral Cycle Control) ขณะอยู่ในสถานะออน

M คือ จำนวน Cycle ที่ Pattern ของรูปคลื่นกลับมาซ้ำเต็ม จะคำนวณหากระแสฮาร์มอนิก ลำดับต่างๆ ได้ดังนี้

$$I_n = -I_{\max} \frac{2M}{\pi} \frac{\sin((N/M)n\pi)}{m^2 - n^2} \quad (2.11)$$

ตัวอย่างเช่นถ้าเราให้ $M = 5$ และ $N = 1$ ที่ความถี่หลักมูล 50 Hz จะได้ $f_1 = f/M = 10$ Hz และให้ $n = 1$ สอดคล้องกับความถี่ 10 Hz จะได้

$$I_1(10 \text{ Hz}) = -0.078 I_{\max}$$

$$I_2(20 \text{ Hz}) = -0.144 I_{\max}$$

$$I_3(30 \text{ Hz}) = -0.189 I_{\max}$$

$$I_4(40 \text{ Hz}) = -0.208 I_{\max}$$

$$I_5(50 \text{ Hz}) = -0.200 I_{\max}$$

$$I_6(60 \text{ Hz}) = -0.170 I_{\max}$$

$$I_7(70 \text{ Hz}) = -0.126 I_{\max}$$

$$I_8(80 \text{ Hz}) = -0.078 I_{\max}$$

$$I_9(90 \text{ Hz}) = -0.033 I_{\max}$$

$$I_{10}(100\text{Hz}) = 0.000$$

$$I_{11}(110\text{Hz}) = +0.019 I_{\max}$$

$$I_{12}(120\text{Hz}) = +0.025 I_{\max}$$

$$I_{13}(130\text{Hz}) = +0.021 I_{\max}$$

$$I_{14}(140\text{Hz}) = +0.011 I_{\max}$$

$$I_{15}(150\text{Hz}) = 0.000$$

$$I_{16}(160\text{Hz}) = -0.008 I_{\max}$$

จากตัวอย่างการวิเคราะห์นี้ จะพบว่ากระแสฮาร์มอนิกที่ลำดับเป็นเลขลงตัวของความถี่หลักมูล 50 Hz จะเป็นศูนย์ แต่กระแสฮาร์มอนิกที่มีความถี่หรือมีลำดับไม่เป็นเลขลงตัวของความถี่หลักมูลจะมีค่าไม่เป็นศูนย์ เราเรียกฮาร์มอนิกเหล่านี้ว่า อินเตอร์ฮาร์มอนิก

2.3.3 คาแรกเตอร์ิสติก ฮาร์มอนิก (Characteristic Harmonic)

หมายถึงฮาร์มอนิกที่ถูกสร้างโดยเครื่องแปลงผันทางไฟฟ้าโดยแปลงจากไฟฟ้ากระแสตรงเป็นไฟฟ้ากระแสสลับ หรือกลับกัน โดยใช้สารตัวนำ เช่น ไดโอด, SCR เป็นตัวสวิตซ์ตัดต่อกระแส ในสภาวะการทำงานปกติ

ลำดับของคาแรกเตอร์ิสติก ฮาร์มอนิกหาได้จากสมการ

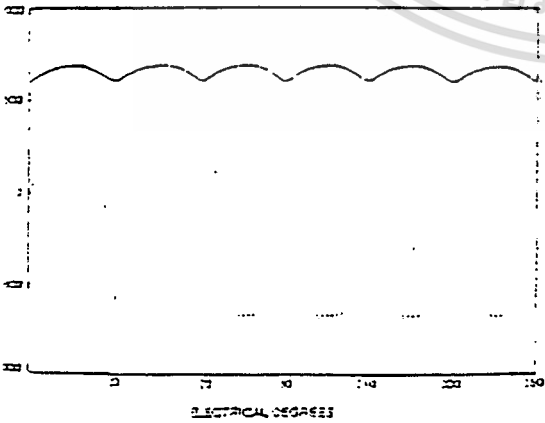
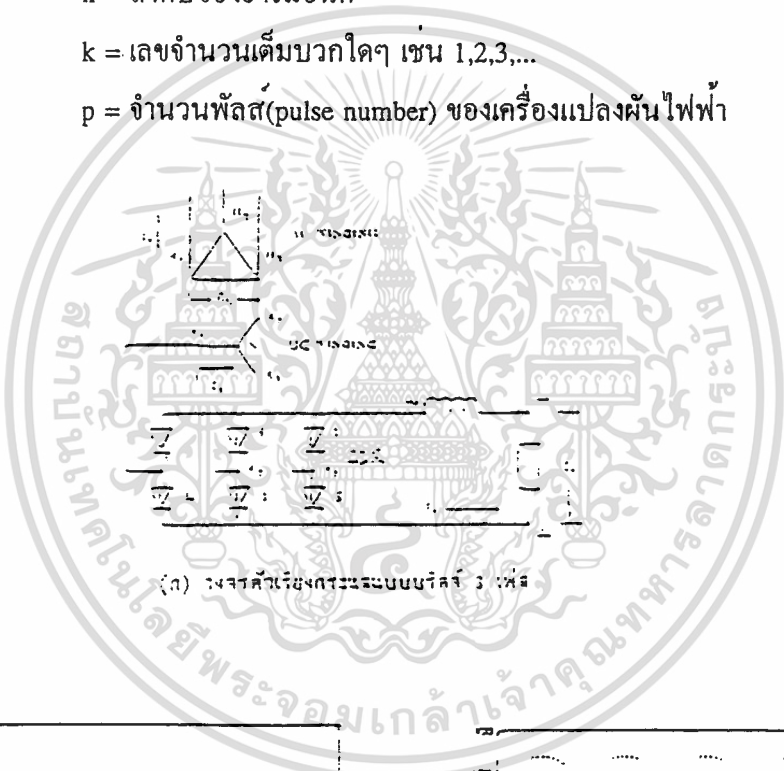
$$n = kp \pm 1 \tag{2.12}$$

โดยที่

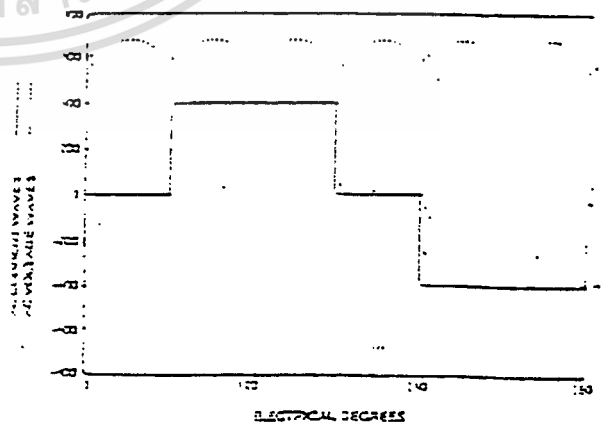
n = ลำดับของฮาร์มอนิก

k = เลขจำนวนเต็มบวกใดๆ เช่น 1,2,3,...

p = จำนวนพัลส์ (pulse number) ของเครื่องแปลงผันไฟฟ้า



(ก) รูปคลื่นของแรงดันขาออก (ในอุดมคติ)



(ข) รูปคลื่นของกระแสทางขั้ว AC (เป็นรูปคลื่นในอุดมคติ)

รูปที่ 2.4 แสดงวงจรเรียงกระแสและรูปคลื่นในอุดมคติ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 2.4(ก) แสดงวงจรตัวเรียงกระแสแบบบริดจ์ 3 เฟส ใช้ ไทริสเตอร์ จำนวน 6 ตัว ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ตัดต่อกระแส ดังนั้นใน 1 ลูกคลื่น ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ จะเกิดกระแสไหลผ่าน ไทริสเตอร์ ในลักษณะกระแสพัลส์ จำนวน 6 ครั้ง จึงมีค่า P_1 เป็น 6

รูปที่ 2.4(ข) แสดงรูปคลื่นของแรงดันขาออก จะเห็นได้ว่าเป็นแรงดันไฟตรงที่มีค่า ripple ซึ่งอยู่ ค่า ripple นี้มีการเปลี่ยนแปลง 6 ลูกคลื่น ใน 1 ลูกคลื่น ของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับค่า ripple 6 ลูกคลื่น จะส่งผลถึงฮาร์มอนิกของกระแสทางด้านไฟฟ้ากระแสสลับด้วย

รูปที่ 2.4(ค) แสดงรูปคลื่นของกระแสทางด้านกระแสสลับ จากรูปคลื่นจะพบว่ากระแสฮาร์มอนิกจะมีเฉพาะลำดับที่ $6K \pm 1$ หรือ 5,7,11,13,17,19,... เท่านั้น เราเรียกกระแสฮาร์มอนิกที่มีลำดับเหล่านี้ว่า คาแรกเตอร์ิสติกฮาร์มอนิก(Characteristic Harmonic)

2.3.4 นอน-คาแรกเตอร์ิสติกฮาร์มอนิก (Noncharacteristic Harmonic)

หมายถึง ฮาร์มอนิกที่ถูกสร้างโดยเครื่องแปลงผันทางไฟฟ้าที่ไม่เป็นไปตามสมการ

$n = kp \pm 1$ เช่นเครื่องแปลงผันไฟฟ้าชนิด 12 พัลส์ควมมีเฉพาะ คาแรกเตอร์ิสติกฮาร์มอนิก ที่มีลำดับ 11,13,23,25,35,37 ดังนั้นถ้ามีฮาร์มอนิกที่มีลำดับเป็น 5,7,17,19 ปนมาด้วย ฮาร์มอนิกเหล่านี้ถือว่าเป็น นอนคาแรกเตอร์ิสติกฮาร์มอนิก

2.3.5 ทริปลเพลนฮาร์มอนิก (Triplen Harmonic)

หมายถึงฮาร์มอนิกที่มีลำดับที่ถูกหารด้วย 3 ลงตัว ได้แก่ฮาร์มอนิกลำดับที่ 3,6,9,... ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มที่มีลำดับ(Sequence) เป็นศูนย์ ในกรณีที่ระบบ 3 เฟส 4 สาย ฮาร์มอนิกกลุ่มนี้ จะรวมกันไหลอยู่ในสายนิวทรัล ทำให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับระบบไฟฟ้าได้ เช่นสายนิวทรัลร้อน ฉนวนเกิดความเสียหาย หรือเกิดการลัดวงจรขึ้นได้

2.4 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก(Source of Harmonics)

แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังจะมีอยู่จำนวนมาก อุปกรณ์ที่เป็นแหล่งกำเนิดสัญญาณฮาร์มอนิกที่สำคัญ มีดังต่อไปนี้

2.4.1 หม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer)

ในการทำงานในสถานะคงตัว(Steady State) หม้อแปลงจะไม่ทำให้เกิดการเพี้ยนของสัญญาณ(Distortion)ในข่ายของวงจร(Network) แต่ในสถานะทรานเซียน(Transient State) หรือในขณะที่หม้อแปลงไฟฟ้าทำงานเกินขอบเขตสถานะปกติ(Normal State Range) จะทำให้เกิดฮาร์มอนิกขึ้นในระบบไฟฟ้า และในกรณีที่หม้อแปลงไฟฟ้าไม่มีการจ่ายโหลด (No-Load) แรงดันทางด้านปฐมภูมิที่มีลักษณะของสัญญาณเป็นรูปคลื่นไซน์ จะสร้างพัลส์แม่เหล็กไฟฟ้าขึ้นมานะเป็น

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ลักษณะรูปคลื่นไซน์เช่นกัน แต่กระแสทางด้านปฐมภูมิที่เกิดขึ้นไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ เพราะค่าของฟลักซ์แม่เหล็กไฟฟ้าที่เกิดขึ้นทางปฐมภูมิไม่เป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสสร้างอำนาจแม่เหล็กนี้ (Magnetizing Current)

ในระบบที่มีการควบคุมของฮาร์มอนิกสูง จะทำให้เกิดความร้อนสูงในตัวหม้อแปลงไฟฟ้า และสายนิวตรอลในระบบไฟ 3 เฟส 4 สายได้ ซึ่งกรณีที่มีการกระชากของกระแสสูงๆอาจจะทำให้เซอร์กิตเบรกเกอร์ตัดวงจรได้

2.4.2 เครื่องจักรกลไฟฟ้า (Electrical Machine)

เครื่องจักรกลไฟฟ้าจะมีลักษณะคล้ายหม้อแปลงไฟฟ้า กล่าวคือ ในสภาวะคงตัว ตัวมันจะไม่ทำให้เกิดการเพี้ยนของสัญญาณแก่ขั้ววงจร แต่ในสภาวะ ทรานเซียน หรือในขณะที่เครื่องจักรกลไฟฟ้าทำงานเกิดขอบเขตสถานะปกติ จะทำให้เกิดฮาร์มอนิกขึ้น เครื่องจักรกลไฟฟ้าจะผลิตกระแสฮาร์มอนิก กระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นนี้จะอยู่ในรูปของฟังก์ชันของความถี่(Speed) กับจำนวนร่องสลอทของอาร์เมเจอร์ (Number of Armature Slot) ดังนั้นในการออกแบบเครื่องจักรกลไฟฟ้าที่ดี ต้องทำให้ระดับของกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยที่สุด ในทางปฏิบัติกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในอุปกรณ์ชนิดนี้จะมีฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 มากที่สุด เราจะทำการสกัดกัน(Block) โดยการต่อเครื่องจักรกลไฟฟ้านี้กับหม้อแปลงแบบเดลต้า(Delta Connection)

2.4.3 อุปกรณ์อาร์ก (Arc Equipment)

อุปกรณ์อาร์กมีมากมายหลายชนิดที่ใช้งานกันในทุกวันนี้ ตัวอย่างเช่น เตาอาร์กแบบใหญ่ (Large Arc Furnace) ,เครื่องเชื่อม (Welder),แสงสว่างอาร์ก(Arc Lighting) ที่ใช้กับถนนและลานจอดรถ เป็นต้น อุปกรณ์อาร์กนี้ทำให้เกิดปัญหาฮาร์มอนิกและเกิดไฟกระพริบ(Flicker Problem) ในระบบไฟฟ้าในอุปกรณ์อาร์กจะทำให้ทั้งกระแสและแรงดันเกิดการ Distortion ในการเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิก (Harmonic Current Distortion) มีขนาดเท่ากับ10% ของกระแสฟิสิกส์ในอุปกรณ์บางชนิดอาจมีค่าสูงถึง30% แต่ถ้าวัดแรงดันทางขาออก(Output Voltage) ของเตาอาร์ก จะพบว่าแรงดันฮาร์มอนิก (Harmonic Voltage Distortion) มีการเปลี่ยนแปลงอย่างมากและมีค่าไม่แน่นอนดังนี้

- ขณะเริ่มทำการหลอม (Meltdown) แรงดันฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 จะมีขนาด 8 %
เมื่อเทียบกับแรงดันหลักมูล(Fundamental Voltage)
- เมื่อสิ้นสุดการหลอม(End of Meltdown)แรงดันฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 มีขนาด 6%
- ขณะทำการถลุงแร่ (Refining) แรงดันฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 มีขนาด 2.5 %

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4.4 หลอดฟลูออเรสเซนต์ (Fluorescent Lamp)

หลอดฟลูออเรสเซนต์นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอาคารที่พักอาศัยและในโรงงานอุตสาหกรรมบางชนิด จึงถือว่าหลอดฟลูออเรสเซนต์เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกที่สำคัญ ในการปล่อยประจุ (Discharge) ในหลอดฟลูออเรสเซนต์ถือว่าเป็นแบบไม่เชิงเส้นอย่างมาก (Highly Non-Linear) ซึ่งจะทำให้เกิดกระแสฮาร์โมนิกอันดับคี่ (Odd-Ordered Harmonic Current)

2.4.5 เครื่องแปลงผัน (Converter)

เครื่องแปลงผันใช้กันอย่างกว้างขวางในปัจจุบันตั้งแต่ในบ้านเรือนจนถึงในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ในการที่อุปกรณ์ชนิดนี้ได้รับความนิยมสูงก็เนื่องมาจากประสิทธิภาพในการทำงานของอุปกรณ์ชนิดนี้มีค่าสูงมาก

ในเครื่องแปลงผันขนาดเล็ก ปกติจะเป็นชนิดเฟสเดียว ซึ่งจะใช้ในอุปกรณ์พวก

- เครื่องรับโทรทัศน์ (Television Receiver)
- คอมพิวเตอร์ (Computer)
- อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในบ้าน

ส่วน Three Phase Converter ที่ใช้กันทั่วไปจะทำหน้าที่ใช้เปลี่ยนกำลังไฟฟ้า (Power Conversion) สามารถแบ่งออกได้ดังนี้

- AC/DC จะใช้เป็นแหล่งจ่ายให้แก่ มอเตอร์กระแสตรง, แบตเตอรี่ หรือกระบวนการเคมี (Chemical Process)
- AC/DC/AC ใช้กับมอเตอร์ซิงโครนัสและมอเตอร์เหนี่ยวนำ การที่จะต้องทำการเปลี่ยนจากไฟ AC/DC อีกครั้งเพื่อทำให้มอเตอร์สามารถจ่ายกำลังที่ความถี่มากกว่า 50 Hz
- AC/AC ได้ หม้อแปลงไฟฟ้าทั้งแบบเฟสเดียวและหลายเฟส

เครื่องแปลงผันสามารถแบ่งแยกได้ตามจำนวนพัลส์ของสัญญาณขาออก(output) ที่ได้ เช่น 3,6,12,18,24 พัลส์ และมากกว่านี้ จำนวนพัลส์ของสัญญาณสามารถที่จะบอกถึงอุปกรณ์ที่ใช้ในการเปิดปิดวงจร ปกติวงจรที่เป็นชนิดโซลิดสเตต (Solid State Switching Devices) จะใช้ไทรสเตอร์ในการควบคุมการเปิดปิดวงจร เพราะมุมไฟริง (Firing Angle) ของมันสามารถที่จะควบคุมได้ง่าย ในงานโดยทั่วไปนิยมใช้ชนิด 6 พัลส์หรือ 12 พัลส์ สำหรับงานที่ต้องการกำลังต่ำจะใช้ชนิด 3 พัลส์ ส่วนงานที่ต้องการกำลังสูงจะใช้ชนิด 18 พัลส์หรือมากกว่านี้

สำหรับเครื่องแปลงผัน เราสามารถหาอันดับและขนาดของสัญญาณฮาร์โมนิกที่เกิดขึ้นได้จากสมการ

$$n = kq \pm 1 \quad (2.13)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

n = อันดับฮาร์มอนิก

k = เลขจำนวนเต็มบวก มีค่าเท่ากับ 1,2,3,...

q = จำนวนพัลส์ของเครื่องแปลงผัน

และ

$$I_n = I_1/n \quad (2.14)$$

โดยที่

I_n = กระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ n

I_1 = กระแสที่ความถี่ Fundamental

n = อันดับฮาร์มอนิก

2.4.6. อุปกรณ์พวกรวมพิวเตอร์และอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในการปรับความเร็วรอบมอเตอร์

เป็นอุปกรณ์ที่สามารถก่อให้เกิดฮาร์มอนิกมารบกวนระบบได้มากที่สุด เนื่องจากอุปกรณ์พวกนี้จะใช้ระบบควบคุมและสั่งงานแบบดิจิทัล ซึ่งมีลักษณะเป็นพัลส์ของกระแสที่เปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็ว เมื่อผ่านขดลวดก็จะเหนี่ยวนำเป็นแรงดันมารบกวนระบบ และการกระชากของกระแสในวงจรของกระแสขนาดใหญ่อันเนื่องมาจากโหลด ก็เป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดฮาร์มอนิกด้วยเช่นกัน

2.4.7 วงจรเรกติไฟายและวงจรกรองกระแสของภาคจ่ายไฟขนาดใหญ่

อุปกรณ์พวกนี้ถ้าดึงกระแสของโหลดมากเกินไป จะทำให้ตัวเก็บประจุในวงจรกรองกระแสจ่ายให้โหลดไม่ทันทำให้เกิดการกระชากของกระแสขึ้น ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจากการกระชากของกระแสจะไหลกลับเข้าไปยังหม้อแปลงผ่านความต้านทานของสายและอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลง เกิดเป็นแรงดันฮาร์มอนิกตกรวมขึ้นมา แรงดันฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นเพียง 1 โวลต์ หากตกรวมอิมพีแดนซ์ 0.1 โอห์ม จะเกิดกระแสฮาร์มอนิกถึง 10 แอมป์ ซึ่งไม่ใช่น้อยๆผลคือจะทำให้หม้อแปลงจะต้องจ่ายกำลังส่วนหนึ่งสูญเสียไปในระบบ

2.4.8 ตัวเก็บประจุที่ใช้เป็นตัวแก้เพาเวอร์แฟกเตอร์

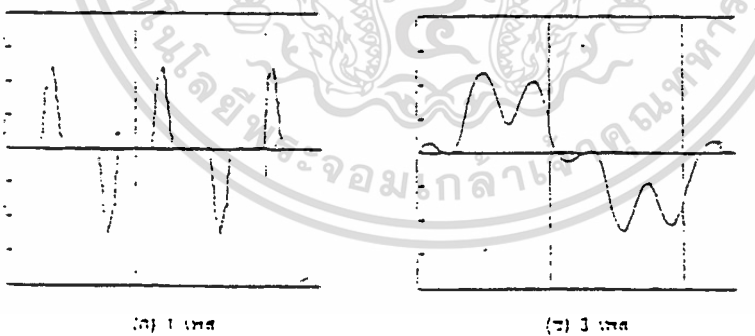
ตัวเก็บประจุที่ใช้เป็นตัวแก้เพาเวอร์แฟกเตอร์ สามารถที่จะก่อให้เกิดผลอย่างรุนแรงต่อแรงดันฮาร์มอนิกได้ หากตัวเก็บประจุเกิดการเรโซแนนซ์กับส่วนของตัวเหนี่ยวนำในระบบ และความถี่เรโซแนนซ์นี้มีค่าใกล้เคียงกับความถี่ของแรงดันฮาร์มอนิก ซึ่งจะเป็นผลให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกอย่างมากจนวงจรเกิดการโอเวอร์โหลด (Overload) เนื่องจากตัวเก็บประจุนั้นได้

2.5 ผลกระทบของฮาร์มอนิก(Effect of Harmonics)

2.5.1 ผลของฮาร์มอนิกต่อระบบไฟฟ้า

แรงดันฮาร์มอนิกและกระแสฮาร์มอนิก มีผลกระทบต่อระบบไฟฟ้าดังต่อไปนี้

- 1 ทำให้เกิดการขยายระดับสัญญาณฮาร์มอนิกอันเนื่องมาจากผลของการเกิดเรโซแนนซ์อนุกรมและขนาน(Series and Parallel Resonance)
- 2 ทำให้การผลิต(Generation) การส่งจ่าย (Transmission) และการใช้ (Utilization) กำลังไฟฟ้ามีประสิทธิภาพลดลงอย่างมาก
- 3 ทำให้ฉนวนของอุปกรณ์เสื่อมสภาพลง อันเนื่องมาจากกระแสฮาร์มอนิกไหลผ่าน ซึ่งทำให้เกิดความร้อนปริมาณมาก ความร้อนนี้จะมีผลทำให้ฉนวนของอุปกรณ์เสื่อมคุณภาพลง และอายุการใช้งานของอุปกรณ์จะสั้นลง
- 4 ทำให้เกิดความผิดพลาดในการทำงานของโรงจักร (Plant Maloperation) ลักษณะของกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าในระบบไฟ 1 เฟสกับ 3 เฟสจะแตกต่างกันดังรูป



รูปที่ 2.5 แสดงรูปคลื่นของกระแสในระบบไฟฟ้า

2.5.2 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อระบบสายส่ง

เมื่อมีกระแสฮาร์มอนิกไหลในระบบสายส่ง ทำให้เกิดผลเสียที่สำคัญ 2 ประการคือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1 ทำให้กำลังสูญเสีย(Power Loss) ในระบบเพิ่มขึ้น โดยเป็นผลมาจากค่าอาร์เอ็มเอสของรูปคลื่นกระแส(I_{rms}) ตามสมการ

$$P_{loss} = \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 R_n \quad (2.15)$$

โดยที่

P_{loss} = กำลังสูญเสียในระบบ

I_n = กระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ n (ค่าอาร์เอ็มเอส)

R_n = ความต้านทานของระบบที่ความถี่ฮาร์มอนิก

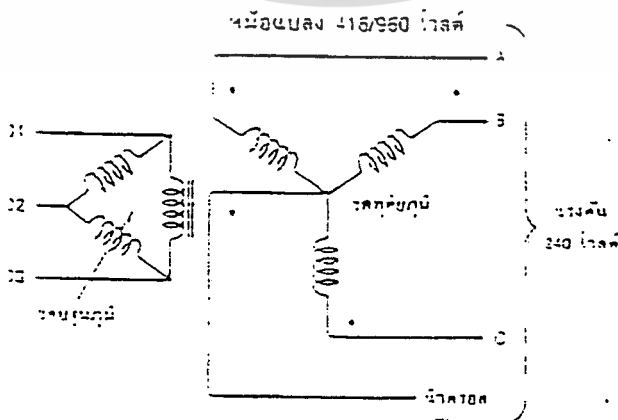
ซึ่งค่าความต้านทานของระบบจะเปลี่ยนไปตามค่าของความถี่ที่เปลี่ยนไป อันเป็นผลมาจากปรากฏการณ์ Skin effect

2 ทำให้เกิดแรงดันตกคร่อม(Voltage Drop)อิมพีแดนซ์วงจร (Circuit Impedance) โดยเป็นผลมาจากกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลในวงจร โดยเฉพาะในระบบไม่มั่นคง (Weak System) ซึ่งระบบชนิดนี้จะมีค่าอิมพีแดนซ์สูงและมีระดับการเกิดฟอลต์ต่ำ(Low Fault Level) ทำให้เกิดแรงดันตกเป็นปริมาณมาก ซึ่งเป็นผลให้เกิดการเพี้ยนของแรงดัน ส่วนในระบบที่มั่นคง(Stiff System) ซึ่งเป็นระบบที่มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำและมีระดับฟอลต์สูงแรงดันตกที่เกิดขึ้นจะไม่ค่อยมีผลทำให้สัญญาณเกิดความเพี้ยน แต่จะมีผลต่อสายเคเบิลคือจะทำให้เกิดความเครียดไดอิเล็กตริก(Dielectric Stress) สูงกว่าปกติ เป็นผลทำให้อายุการใช้งานของสายเคเบิลสั้นลงและทำให้เกิดฟอลต์ขึ้นง่ายในระบบ

2.5.3 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อหม้อแปลง

ผู้ผลิตหม้อแปลงไฟฟ้ากำลังส่วนมากจะทำหม้อแปลงชนิด 3 เฟส 4 สาย 380/220

โวลต์เคลตา-สตาร์ออกมาเท่านั้น ดังในรูป



รูปที่ 2.6 แสดงหม้อแปลง 3 เฟส 4 สาย ต่อแบบเคลตา-สตาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผลกระทบของฮาร์มอนิกที่มีผลต่อหม้อแปลง จะมีอยู่ด้วยกัน 3 ประการดังนี้

1. กระแสฮาร์มอนิกจะทำให้กำลังสูญเสียกระแสสวน(Eddy Current Loss)และกำลังสูญเสียฮิสเตอรีซิส(Hysteresis Loss)เพิ่มขึ้น โดยถ้ามีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า(Power Supply)จ่ายแรงดันรูปคลื่นไซน์ให้กับหม้อแปลง จะสามารถหาค่ากำลังสูญเสียในแกนเหล็กได้ดังสมการต่อไปนี้

$$P_{core} = (K_1 f + K_2 f^2) V^2 \quad (2.16)$$

โดยที่

P_{core} = กำลังสูญเสียในแกนเหล็ก

$K_1 f$ = กำลังสูญเสียฮิสเตอรีซิส

$K_2 f^2$ = กำลังสูญเสียกระแสสวนในแกนเหล็ก

V = แรงดันรูปคลื่นไซน์ของแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้า

2. กระแสฮาร์มอนิกจะทำให้กำลังสูญเสีย(Power Loss) ขณะมีโหลด และกำลังสูญเสียสเตรย์ฟลักซ์(Stray Flux Loss) มีค่าเพิ่มมากขึ้น

3. ทำให้เกิดเรโซแนนซ์(Resonance)ที่ความถี่ฮาร์มอนิก ระหว่างขดลวดหม้อแปลงกับแคปาซิเตอร์ของสาย(Line Capacitor)

4. เมื่อโหลดของหม้อแปลงไม่เป็นเชิงเส้น จะทำให้เกิดความร้อนสูงในสายนิวตรอล เมื่อกระแสนิวตรอลเข้ายังหม้อแปลง จะเหนี่ยวนำย้อนกลับเข้าสู่ขดปฐมภูมิของหม้อแปลง ผลก็คือจะทำให้เกิดความร้อนสูง ทำความเสียหายให้กับตัวหม้อแปลงได้

เราจะเห็นได้ว่ากำลังสูญเสียในหม้อแปลงเกิดขึ้นจากกระแสฮาร์มอนิกและแรงดันฮาร์มอนิก จะขึ้นกับค่าความถี่ของสัญญาณฮาร์มอนิกนั้น โดยถ้ามีความถี่ฮาร์มอนิกมากจะทำให้กำลังสูญเสียมีค่าเพิ่มมากขึ้นด้วย ดังนั้นฮาร์มอนิกสูงๆจะทำให้เกิดความร้อนแก่หม้อแปลงมากกว่าฮาร์มอนิก ระดับต่ำๆ

2.5.4 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อเครื่องจักรกลไฟฟ้า

ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อเครื่องจักรกลไฟฟ้า จะทำให้กำลังสูญเสีย(Power Loss) ขณะมีโหลดและไม่มีโหลดมีค่าเพิ่มมากขึ้น เป็นผลให้เครื่องจักรกลไฟฟ้าวอร์มกว่าปกติ นอกจากนี้ฮาร์มอนิกยังมีผลต่อประสิทธิภาพ(Efficiency) และแรงบิด (Torque) ของเครื่องจักรกล ไฟฟ้าด้วย

ในมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส (3 phase Induction Motor) ที่มีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้าไม่เป็นรูปคลื่นไซน์ (Nonsinusoidal Supply) จะสร้างคลื่นความหนาแน่นฟลักซ์แม่เหล็ก(Flux Density Wave) ออกมา จะทำให้เกิดสัญญาณรบกวนอย่างมาก(Higher Noise Emission) เมื่อเทียบกับกรณีที่มีแหล่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ารูปคลื่นไซน์ (Sinusoidal Supply) สัญญาณฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจะทำให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับวิชาการเชิงนโยบายเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่เชิงพาณิชย์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เกิดฟลักซ์ลัพธ์ (Resultant Flux) กระจายตัวในช่องอากาศ (Air gap) และจะมีผลให้เกิดปรากฏการณ์คอกกิ้ง (Cogging) คือ การที่มอเตอร์ไม่สามารถทำการเดินเครื่องได้ หรือเกิดการครอว์ลิง (Crawling) คือ การที่ความเร็วของมอเตอร์ (Rotor Speed) มีขนาดต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส (Synchronous Speed)

2.5.5 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อสวิตช์เกียร์

กระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจะเพิ่มความร้อนและกำลังสูญเสียให้กับตัวสวิตช์เกียร์ และยังมีผลต่อความสามารถในการตัดกระแส (Current Interruption Capability) ของสวิตช์เกียร์ เป็นผลให้การตัดกระแสเป็นไปได้ยากมาก

เซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker) เมื่อมีฮาร์มอนิกในตัวมัน จะทำให้ไม่สามารถทำการตัดกระแสได้ ทั้งนี้เนื่องมาจากขดลวดเป่าดับอาร์ก (Blowout Coils) ซึ่งทำหน้าที่ในการช่วยให้อาร์กเข้าไปในอาร์กชุต (Arc Chute) เพื่อทำการตัดอาร์ก มีประสิทธิภาพในการทำงานลดลง เป็นผลให้อาร์กไม่ขาด ตัวเซอร์กิตเบรกเกอร์จึงไม่สามารถทำการตัดกระแสได้ ปัญหานี้ยังพบได้ในอุปกรณ์อื่นๆ ที่ใช้ในการตัดกระแส เช่น โหลดเบรกสวิตช์ (Load Break Switch) สวิตช์ตัดวงจร (Circuit Switcher) เป็นต้น แต่เบรกเกอร์ชนิดสูญญากาศ (Vacuum Breaker) จะมีความไว (Sensitive) ต่อกระแสฮาร์มอนิกนี้น้อยมาก

ในปัจจุบันยังไม่มีมาตรฐานทางอุตสาหกรรม ในการกำหนดระดับของฮาร์มอนิกที่สวิตช์เกียร์สามารถตัดได้ เนื่องจากในปัจจุบันการทดสอบความสามารถในการตัดวงจร จะทำที่ความถี่พิกัดของแหล่งจ่ายไฟ (Rated Supply Frequency)

2.5.6 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อเบงกค่าปาซิเตอร์

ผลกระทบของฮาร์มอนิกจะทำให้เกิดความร้อนและความเครียดไดอิเล็กตริก (Dielectric Stress) กับเบงกค่าปาซิเตอร์อย่างมาก การเพี้ยนของแรงดัน จะทำให้เกิดกำลังสูญเสียในคาปาซิเตอร์ ซึ่งสามารถหาได้จากสมการต่อไปนี้

$$P_{\text{loss}} = \sum C(\tan\delta)\omega_n V_n \quad (2.17)$$

โดยที่

$$P_{\text{loss}} = \text{กำลังสูญเสียในคาปาซิเตอร์}$$

$$\tan\delta = \text{Loss Factor} = R/(1/\omega C)$$

$$\omega_n = 2\pi f_n$$

$$V_n = \text{แรงดัน Rms ของฮาร์มอนิกอันดับที่ } n$$



2.5.7 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อรีเลย์

ในอุปกรณ์พวงรีเลย์จะมีฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 มากที่สุด ซึ่งการที่มีฮาร์มอนิกที่ 3 มากเกินไปนี้จะทำให้กราวด์รีเลย์(Ground Relay) ทริพผิดพลาด (False Trip) ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อรีเลย์ สามารถสรุปได้ดังนี้

1 ฮาร์มอนิกทำให้รีเลย์มีแนวโน้มที่จะทำงานช้าลง หรือมีค่าเริ่มต้น(Pickup Value)ในการทำงานที่สูง ซึ่งในสถานะที่ไม่มีฮาร์มอนิกจะมีการทำงานอย่างรวดเร็ว หรือทำงานด้วยค่าเริ่มต้นที่ต่ำ

2 ฮาร์มอนิกจะทำให้รีเลย์สถิตแบบความถี่ต่ำ(Static Underfrequency Relays)มีความไวหรือ Sensitivity มากกว่าปกติ ทำให้เกิดการผิดพลาดในการทริพ

3 ฮาร์มอนิกทำให้รีเลย์กระแสและแรงดันเกิน (Overcurrent and Overvoltage Relays)เปลี่ยนลักษณะการทำงาน(Operating Characteristics)

4 ฮาร์มอนิกทำให้แรงบิดขณะทำงาน(Operating Torque)ของรีเลย์กลับทิศทาง

5 ฮาร์มอนิกทำให้ฮ่อมพีแดนซ์รีเลย์ชนิดคานสมดุล (Balanced Beam Impedance Relay) วัตรระยะที่เกิดฟอลต์ผิดพลาดมาก(Overreach) หรือน้อยเกินไป(Underreach)

6 ฮาร์มอนิกทำให้ความเร็วในการทำงานของรีเลย์ชนิดผลต่าง (Differential Relay) ทำงานช้าลง

โดยทั่วไประดับฮาร์มอนิกที่ทำให้รีเลย์ทำงานผิดพลาดจะสูงกว่าอุปกรณ์อื่นๆ และขีดจำกัดของฮาร์มอนิกต้องมีค่า 10-20 % จึงจะทำให้เกิดปัญหากับอุปกรณ์รีเลย์ขึ้นได้

2.5.8 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อมิเตอร์วัดไฟฟ้า

มิเตอร์และเครื่องวัดต่างๆ ก่อนจะนำมาใช้งานจะต้องทำการปรับแต่ง(Calibration)ที่ไฟฟ้ากระแสสลับ(AC) รูปคลื่นไซน์ที่ความถี่หลักมูล(Fundamental) ดังนั้นถ้านำมิเตอร์มาใช้กับระบบที่มีฮาร์มอนิก ค่าที่ทำการวัดได้จะผิดพลาด หรือกรณีเกิดเรโซแนนซ์ในระบบไฟฟ้า ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดแรงดันฮาร์มอนิกอันดับสูงในวงจรไฟฟ้า ทำให้มิเตอร์ประเภทงานเหนี่ยวนำ(Induction Disk) เช่นวัตต์ชั่วโมงมิเตอร์(Watthour Meter) จะทำงานผิดพลาด อันเนื่องมาจากการเพี้ยนของฮาร์มอนิก โดยทั่วไปการเพี้ยนของฮาร์มอนิกมากกว่า 20 % จึงจะมีผลต่อมิเตอร์

2.5.9 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่ออุปกรณ์ผู้ใช้ไฟฟ้า

1 เครื่องรับโทรทัศน์ ฮาร์มอนิกจะมีผลต่อแรงดันยอด(Peak Voltage)ทำให้ขนาดและความสว่างของภาพเปลี่ยนไป

2 หลอดฟลูออเรสเซนต์และหลอดเมอคิวรีอาร์ก(Fluorescent and Mercury Arc Lamp) การทำงานของหลอดชนิดนี้ต้องมีบัลลาสต์ บางครั้งมีกะแปซิเตอร์ด้วย จึงอาจเกิดเรโซแนนซ์กับตัวเหนี่ยวนำ (Inductance) ของบัลลาสต์และวงจร ทำให้หลอดเกิดความร้อนสูงจนเกิดความเสียหาย

3 คอมพิวเตอร์ คอมพิวเตอร์จะไวต่อความถี่ของฮาร์มอนิกอย่างมาก ทุกบริษัทมีขีดจำกัดฮาร์มอนิกที่ค่าหนึ่ง ที่เครื่องสามารถทนได้ ซึ่งขึ้นกับการออกแบบของแต่ละบริษัท ถ้าระบบไฟฟ้ามีฮาร์มอนิกมากกว่าขีดจำกัดนี้ จะทำให้คอมพิวเตอร์เสียหายได้

2.5.10 ผลกระทบของฮาร์มอนิกต่อระบบสื่อสาร

ฮาร์มอนิกจะก่อให้เกิดสัญญาณรบกวน(Noise)ในระบบสื่อสาร ทำให้คุณภาพของการส่งสัญญาณลดลง สัญญาณรบกวนระดับต่ำ(Low Level Noise) เช่นในระบบโทรศัพท์จะก่อให้เกิดความรำคาญ ฮาร์มอนิกจะเหนี่ยวนำให้เกิดสัญญาณรบกวน ทำให้การได้ยินเสียงเบากว่าปกติหรือมีเสียงรบกวนต่อการได้ยิน แต่สัญญาณรบกวนระดับสูง(High Level Noise) ฮาร์มอนิกจะทำให้คุณภาพการส่งลดลงและอาจเกิดการสูญเสียของข่าวสาร หรือทำให้ระบบสื่อสารใช้การไม่ได้

ในระบบการสื่อสารโทรคมนาคม ที่ใช้สายนำข้อมูลเป็นระยะทางไกลๆ มักจะมีผลของกระแสฮาร์มอนิกเข้ามาเกี่ยวข้องกับควายเสมอ สายเคเบิลเพื่อใช้ในการสื่อสารตามปกติจะวางคู่กันไปกับสายเคเบิลกำลัง การที่จะลดผลการแทรกสอดหรือเหนี่ยวนำการรบกวนจากกระแสของสายเฟสจะต้องวางสายเคเบิลให้ไกลจากสายส่งให้มากที่สุด หรือวางให้ไกลกับสายนิวตรอลของระบบ ผลจากการแทรกสอดรบกวนสามารถได้ยินได้จากไลน์สายโทรศัพท์ ซึ่งจะเป็นสิ่งบอกได้อย่างดีว่าระบบสื่อสารนี้มีปัญหาการรบกวนจากกระแสฮาร์มอนิกแล้ว

2.5.11 ผลกระทบต่อสายนิวตรอล

ผลของกระแสฮาร์มอนิกทำให้เกิดความร้อนในสายนิวตรอลในระบบ 3 เฟส 4 สาย เนื่องจากในสภาพที่ใช้งานปกติวิศวกรผู้ออกแบบระบบจะพยายามสมดุลโหลดให้เท่ากันทุกเฟส เวกเตอร์ผลรวมของกระแสจึงเท่ากับศูนย์พอดี สายนิวตรอลจึงมีขนาดเล็กหรือไม่ก็ไม่ได้ เนื่องจากกระแสนิวตรอลมีค่าน้อยมาก แต่ในความเป็นจริงโหลดในระบบไฟฟ้าส่วนมากไม่เป็นเชิงเส้น และมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา

ผลของฮาร์มอนิกจะทำให้กระแสนิวตรอลมีค่าสูง อาจจะทำให้กระแสเฟสปกติเลยทีเดียว สภาวะเช่นนี้นอกจากสายนิวตรอลจะจำเป็นต้องใช้แล้ว ยังต้องมีขนาดสายที่พอเหมาะด้วย ถ้าสายนิวตรอลมีขนาดเล็กจะทำให้เกิดความร้อนในสายและอาจร้อนมากจนเกิดการลุกไหม้ได้ เนื่องจากนิวตรอลไม่มีเซอร์กิตเบรกเกอร์คอยจำกัดกระแส และตัดวงจรเหมือนอย่างสายเฟส

2.5.12 ผลของฮาร์มอนิกที่เกิดในเซอร์กิตเบรกเกอร์

เซอร์กิตเบรกเกอร์จะทำหน้าที่ตัดแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าออกจากระบบเมื่อในระบบเกิดการโอเวอร์โวลตหรือลัดวงจร เบรกเกอร์ที่มีขายตามท้องตลาดโดยส่วนใหญ่จะเป็นแบบที่ทำงานด้วยความเร็วที่เกิดจากกระแสที่ไหลผ่านตัวมันเป็นตัวควบคุมการตัดวงจร การวัดค่ากระแสจริงที่สามารถให้กำลังงานความร้อนได้ จะวัดเป็นค่าอาร์เอ็มเอส ดังนั้นการเลือกใช้งานเบรกเกอร์จะต้องเลือกแบบที่แสดงรายละเอียดเกี่ยวกับตัวมันเป็นค่าอาร์เอ็มเอสด้วย และต้องเลือกแบบที่มีระบบป้องกันการลัดวงจรและปรับกระแสได้ด้วย เหตุที่ต้องเลือกเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบนี้เพราะจะทำให้เราสามารถควบคุมการทริปหรือการตัดวงจรของเซอร์กิตเบรกเกอร์ได้นั่นเอง

การเลือกเซอร์กิตเบรกเกอร์แบบนี้สามารถตรวจสอบสถานะในระบบไฟฟ้าได้ ถ้ามีฮาร์มอนิกเข้ามากระทบระบบ วงจรป้องกันการลัดวงจรในเซอร์กิตเบรกเกอร์จะตรวจจับค่าพีคของแรงดันซึ่งมีค่าพีคของแรงดันฮาร์มอนิกมีค่าสูงมาก เซอร์กิตเบรกเกอร์จะตัดตัวเองเป็นการป้องกันไว้ก่อน

2.5.13 ผลของกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดในบัสบาร์และจุดเชื่อมต่อ

โดยปกติแล้วบัสบาร์และจุดเชื่อมต่อต่างๆในระบบไฟฟ้า จะได้รับการตรวจตราอย่างสม่ำเสมอ เพราะสาเหตุเพียงเล็กน้อยแต่อาจทำให้เกิดอันตรายได้อย่างมากให้แก่ระบบได้ บัสบาร์ที่มีขนาดเล็กหรือจุดเชื่อมต่อที่ไม่สมบูรณ์จะมีค่าความต้านทานเกิดขึ้นมา แม้จะมีค่าน้อยแต่ถ้าในระบบเกิดฮาร์มอนิกขึ้น กระแสรวมระหว่างกระแสโวลตและกระแสฮาร์มอนิก สามารถทำให้เกิดความร้อนสูงในบัสบาร์และจุดเชื่อมต่อนั้นได้ ซึ่งจะเป็นอันตรายอย่างยิ่ง

2.5.14 ผลของกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในแผงควบคุมระบบไฟฟ้า

การออกแบบแผงควบคุมระบบไฟฟ้าที่ดีมีความจำเป็นอย่างมาก แผงควบคุมระบบไฟฟ้าที่ออกแบบมาไม่ดีจะเกิดฮาร์มอนิกขึ้นมาได้ เนื่องจากการเรโซแนนซ์ระหว่างอุปกรณ์บนแผงควบคุมระบบไฟฟ้านั้น ผลของกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจะทำให้ตู้ควบคุมสันเป็นเสียงฮัมของฮาร์มอนิกออกมา

บทที่ 3

การวิเคราะห์ฮาร์มอนิก (Harmonics Analysis)

3.1 บทนำ (Introduction)

โดยทั่วไปเราอาจกล่าวได้ว่าฟังก์ชันต่อเนื่อง (Continuous function) ใดๆ ซึ่งมีการซ้ำทุกๆ ช่วงเวลา T เราจะสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของผลบวกของคลื่นไซน์ (Sine wave) ที่มีความถี่หลักมูล (Fundamental) กับความถี่ฮาร์มอนิกที่ลำดับสูงขึ้นไป ซึ่งเป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูลได้เสมอ

ดังนั้นในการ การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกจะกล่าวถึง กระบวนการในการคำนวณขนาด (Magnitude) และมุมเฟส (Phase angle) ของแต่ละส่วนประกอบที่เป็นมูลฐานและในลำดับฮาร์มอนิกที่สูงขึ้น ผลของอนุกรมที่ได้เรียกว่า อนุกรมฟูเรียร์ (Fourier Series) ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ในรูปโดเมนเวลา (Time domain) และ โดเมนความถี่ (Frequency domain)

ในกรณีการวิเคราะห์สำหรับฟังก์ชันทั่วไป ซึ่งอยู่ในช่วง ∞ ถึง $-\infty$ จะทำการวิเคราะห์โดยอาศัยการแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transform) และอินเวอร์สการแปลงฟูเรียร์ (Inverse Fourier Transform) ซึ่งการแปลงฟูเรียร์เป็นการแปลงฟังก์ชันในโดเมนเวลา ไปสู่โดเมนความถี่ ในทางกลับกัน อินเวอร์สการแปลงฟูเรียร์เป็นการแปลงฟังก์ชันในโดเมนความถี่ไปสู่โดเมนเวลา ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า อนุกรมฟูเรียร์เป็นกรณีหนึ่งของการแปลงฟูเรียร์

อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติ ข้อมูลหรือค่าที่จะทำการวิเคราะห์นั้น เป็นค่าซึ่งได้จากการสุ่มค่า (Sampled data) ของฟังก์ชันในโดเมนเวลา ซึ่งค่าที่ได้จะอยู่ในรูปของขนาดของฟังก์ชัน ณ เวลาที่ทำการสุ่ม ซึ่งระยะห่างในการสุ่มแต่ละครั้ง จะเป็นช่วงเวลาที่แน่นอน ในการแปลงฟูเรียร์ของค่าที่ได้จากการสุ่มเหล่านี้จะต้องใช้การแปลงที่เรียกว่า การแปลงฟูเรียร์ได้ ม หน่วย (Discrete Fourier Transform : DFT) แต่เราสามารถทำ DFT ให้รวดเร็วขึ้นโดยอาศัยวิธีการที่เรียกว่า การแปลงฟาสต์ฟูเรียร์ (Fast Fourier Transform : FFT) FFT เป็นวิธีการพื้นฐานซึ่งถือได้ว่ารวดเร็ว และได้รับการยอมรับมากที่สุด ในการนำมาวิเคราะห์สเปกตรัม และฮาร์มอนิกของระบบ ดังนั้นในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก และการประยุกต์ใช้ต่อไป จะเน้นความสำคัญของ FFT

3.2 การวิเคราะห์อนุกรมฟูเรียร์ (Fourier Series Analysis)

อนุกรมฟูเรียร์ของฟังก์ชันคาบ (Periodic function) $x(t)$ ใดๆ อาจแสดงได้ดังนี้

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) \right) \quad (3.1)$$

โดยที่ a_0 เป็นค่าเฉลี่ยของฟังก์ชัน $x(t)$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้สำหรับใช้ในงานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

a_n และ b_n เป็นสัมประสิทธิ์ของอนุกรมของฟังก์ชัน $x(t)$

ทั้งนี้ a_0 , a_n และ b_n สามารถหาได้จากผลการอินทิเกรตต่อไปนี้

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) dt \quad (3.2)$$

ซึ่งหมายถึงพื้นที่ใต้กราฟของ $x(t)$ ในช่วง $-T/2$ ถึง $T/2$ นั่นเอง

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) dt \quad \text{โดยที่ } n = 1 \rightarrow \infty \quad (3.3)$$

และ

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \sin\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) dt \quad \text{โดยที่ } n = 1 \rightarrow \infty \quad (3.4)$$

3.2.1 อนุกรมฟูรีเยร์ในรูปเชิงซ้อน (Complex Form of The Furier Series)

โดยทั่วไปเราสามารถเขียนอนุกรมฟูรีเยร์ของฟังก์ชันคาบ $x(t)$ ใดๆ ได้ในรูปต่อไปนี้

$$x(t) = a_0 + A_1 \sin(\omega t + \phi_1) + A_2 \sin(2\omega t + \phi_2) + \dots \quad (3.5)$$

โดยแต่ละลำดับของอนุกรมอาจสามารถเขียนได้ดังนี้

$$X(f_n) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) e^{-j2\pi f_n t} dt \quad \text{เมื่อ } f_n = nf \quad (3.6)$$

โดยที่ $e^{-j2\pi f_n t}$ เป็นเวกเตอร์หนึ่งหน่วย และ $X(f_n)$ เป็นแอมพลิจูดและมุมเฟสของเวกเตอร์ฮาร์มอนิกใดๆ

ดังนั้นสำหรับฟังก์ชันในโดเมนเวลา $x(t)$ ใดๆ เราสามารถเขียนในรูปเชิงซ้อนได้ดังนี้

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} X(f_n) e^{j2\pi f_n t} \quad \text{และ } f_{-n} = -f_n \quad (3.7)$$

3.3 การแปลงฟูรีเยร์ (Furier transform)

ในการวิเคราะห์ฟูรีเยร์นั้น สำหรับสัญญาณซึ่งเป็นคาบ เราจะได้ว่าผลการวิเคราะห์จะอยู่ในรูปของอนุกรมของแต่ละความถี่ซึ่งเป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูลเท่านั้น (Series of discrete frequency component)

ถ้าเรานำมาประยุกต์ใช้กับสัญญาณซึ่งต่อเนื่องทั่วไปซึ่งไม่จำเป็นต้องเป็นสัญญาณที่เป็นคาบ โดยขยายการอินทิเกรตในช่วงคาบ T ให้กว้างมากๆ หรือเป็นช่วง ∞ นั่นเอง ดังนั้นช่วงกว้างของแต่ละความถี่จึงเข้าใกล้ศูนย์ ดังนั้นเราจะได้ ฟังก์ชัน $X(f_n)$ เป็นฟังก์ชันต่อเนื่อง หรือเราอาจเขียนใหม่ได้เป็น

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi f t} dt \quad (3.8)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $x(t)$ เป็นฟังก์ชันโดเมนเวลาซึ่งต่อเนื่อง และเรียก $X(f)$ ว่าเป็นการแปลงฟูเรียร์ของโดเมนเวลา $x(t)$ ในทางกลับกัน เราจะได้

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} X(f) e^{j2\pi ft} dt \quad (3.9)$$

เรียก $x(t)$ ว่าเป็นอินเวอร์สการแปลงฟูเรียร์ของฟังก์ชันโดเมนความถี่ $X(f)$

โดยเรียกคู่ $x(t)$ และ $X(f)$ ว่าเป็นคู่การแปลงฟูเรียร์ (Fourier Transform Pair)

โดยทั่วไป $X(f)$ จะอยู่ในรูปเชิงซ้อนซึ่งอาจเขียนได้ดังนี้

$$X(f) = \text{Re } X(f) + j \text{Im } X(f) \quad (3.10)$$

ส่วนจริงของ $X(f)$ หาได้จาก

$$\begin{aligned} \text{Re } X(f) &= \frac{1}{2} [X(f) + X(-f)] \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cos 2\pi ft dt \end{aligned} \quad (3.11)$$

และส่วนจินตภาพของ $X(f)$ หาได้จาก

$$\begin{aligned} \text{Im } X(f) &= \frac{1}{2} j [X(f) - X(-f)] \\ &= -\int_{-\infty}^{\infty} x(t) \sin 2\pi ft dt \end{aligned} \quad (3.12)$$

ดังนั้นสเปกตรัมของแอมพลิจูด (Amplitude spectrum) ของแต่ละความถี่หาได้จาก

$$|X(f)| = [(\text{Re } X(f))^2 + (\text{Im } X(f))^2]^{1/2} \quad (3.13)$$

และสเปกตรัมของมุมเฟส (Phase spectrum) หาได้จาก

$$\phi (f) = \tan^{-1} \left[\frac{\text{Im } X(f)}{\text{Re } X(f)} \right] \quad (3.14)$$

3.4 การแปลงฟูเรียร์แบบเต็มหน่วย (Discrete Furier Transform)

ในกรณีที่ต้องการให้ค่าในโดเมนความถี่เป็นฟังก์ชันที่ผ่านการสุ่มค่าเช่นเดียวกับในโดเมนเวลา ผลการแปลงฟูเรียร์ที่ได้จะประกอบด้วยส่วนประกอบย่อยรวมกันดังนี้

$$X(f_k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(t_n) e^{-j2\pi n t_n / N} \quad (3.15)$$

เรียกการแปลงฟูเรียร์ลักษณะนี้ว่า การแปลงฟูเรียร์แบบเต็มหน่วย (Discrete Furier Transform :

DFT) และ

$$x(t_n) = \sum_{k=0}^{N-1} X(f_k) e^{j2\pi n t_n / N} \quad (3.16)$$

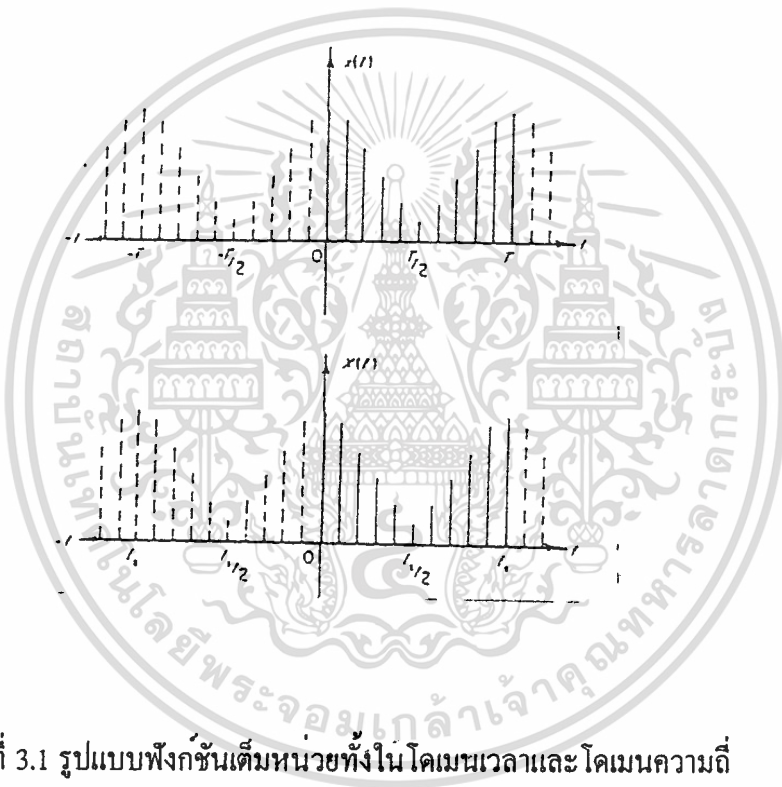
เรียกการแปลงลักษณะนี้ว่า อินเวอร์สการแปลงฟูเรียร์แบบเต็มหน่วย (Inverse Discrete Furier

Transform : IDFT)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมมติให้ฟังก์ชันทั้งในโดเมนเวลาและ โดเมนความถี่เป็นฟังก์ชันคาบคงรูปที่ 1 ซึ่งมีอัตรา
การสุ่ม N ครั้งต่อคาบ

คู่การแปลงฟูเรียร์ที่ได้จะอยู่ในรูปเต็มหน่วย (Discrete form) ซึ่งเป็นรูปแบบที่เหมาะสม
สมในการนำมาคำนวณ โดยการประมวลผลแบบดิจิทัลต่อไป



รูปที่ 3.1 รูปแบบฟังก์ชันเต็มหน่วยทั้งใน โดเมนเวลาและ โดเมนความถี่

เราอาจเขียนผลการแปลงได้ใหม่ในรูปดังนี้

$$X(f_k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(t_n) W^{kn} \quad (3.17)$$

โดยที่

$$W = e^{-j2\pi/N} \quad (3.18)$$

ดังนั้นจากสมการดังกล่าวเราอาจเขียนในรูปเมตริกได้ดังนี้

$$\begin{bmatrix} X(f_0) \\ X(f_1) \\ \vdots \\ X(f_k) \\ \vdots \\ X(f_{N-1}) \end{bmatrix} = \frac{1}{N} \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 & \dots & 1 \\ 1 & W & \dots & W^k & \dots & W^{N-1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 1 & W^k & \dots & W^{k^2} & \dots & W^{k(N-1)} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ 1 & W^{N-1} & \dots & W^{(N-1)k} & \dots & W^{(N-1)^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t_0) \\ x(t_1) \\ \vdots \\ x(t_k) \\ \vdots \\ x(t_{N-1}) \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

หรือเขียนในรูปอย่างง่ายได้เป็น

$$[X(f_k)] = \frac{1}{N} [W^{kn}] [x(t_n)] \quad (3.19)$$

จะเห็นว่าตามสมการข้างบนถ้าต้องการคำนวณค่าในโดเมนความถี่จากข้อมูลซึ่งได้จากการสุ่มค่าในโดเมนเวลาจำนวน N คำนับจะต้องทำการคูณค่าเชิงซ้อนถึง N^2 ครั้ง

แต่ละสมาชิกในเมตริก $[W^{kn}]$ นั้นแสดงเวกเตอร์หนึ่งหน่วยซึ่งหมุนตามเข็มนาฬิกาเมื่อมุมเฟส $2p\pi/N$ ($p=0, 1, 2, \dots, (N-1)$)

และ

$$W^{kn} = W^{[kn \bmod N]} \quad (3.20)$$

โดย $kn \bmod N$ หมายถึง เศษจากการหาร kn ด้วย N

ตัวอย่างเช่นในกรณีที่มี $N=8$ ดังนี้

$$W = e^{-2\pi/8} = \cos \frac{\pi}{4} - j \sin \frac{\pi}{4} \quad (3.21)$$

ดังนั้นจะได้

$$\begin{aligned} W^0 &= -W^4 = 1 \\ W^1 &= -W^5 = (1/\sqrt{2} - j1/\sqrt{2}) \\ W^2 &= -W^6 = -j \\ W^3 &= -W^7 = -(1/\sqrt{2} + j1/\sqrt{2}) \end{aligned} \quad (3.22)$$

เราอาจมองว่าเวกเตอร์หนึ่งหน่วยแต่ละตัวหมุนไปโดยมีมุมเฟส $\pm 0^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 90^\circ$ และ $\pm 135^\circ$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตามลำดับจะสังเกตได้ว่า W^8 มีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งเป็นการหมุนที่ครบรอบ ดังนั้นสำหรับ kn ซึ่งมากกว่า 8 เราหาค่าเวกเตอร์หนึ่งหน่วยดังกล่าวได้โดยลบจำนวนที่เต็มรอบออกจาก kn ตัวอย่างเช่น $k = 5$ และ $n = 6$ ดังนั้น $kn = 30$ และ จะได้ $W^{30} = W^{(3 \times 8) + 6} = W^6 = j$ สำหรับ $N = 8$ จะได้ $[W^{kn}]$ ดังนี้

1	1	1	1	1	1	1	1
1	W	-j	W ³	-1	-W	j	-W ³
1	-j	-1	j	1	-j	-1	j
1	W ³	1	W	-1	-W ³	-j	-W
1	-1	-1	-1	1	-1	1	-1
1	-W	-j	-W ³	-1	W	j	W ³
1	j	-1	-j	1	j	-1	-j
1	-W ³	j	-W	-1	W ³	-j	W

ตารางที่ 3.1 แสดงค่า $[W^{kn}]$ กรณี $N = 8$

จากสมการเมตริกจะเห็นชัดว่าส่วนดีซี (DC component : $X(f_0)$) ของสเปกตรัมความถี่ ได้จากการรวมค่าจากการสุ่มในโดเมนเวลาทุกค่า แล้วหารผลรวมดังกล่าวด้วยจำนวนข้อมูลที่ได้จากการสุ่มค่า ซึ่งหมายถึงค่าเฉลี่ยของข้อมูลจากการสุ่มค่าในโดเมนเวลานั้นเอง

ในแถวถัดลงมาค่าจากการสุ่มแต่ละค่าจะถูกถ่วงน้ำหนักโดยเวกเตอร์ที่มีมุมต่างกันซึ่งขึ้นกับลำดับของแถวนั้นๆ ดังนั้นสำหรับ $X(f_1)$ แต่ละเวกเตอร์ที่นำมาถ่วงน้ำหนักค่าจากการสุ่มจะมีมุมต่างกัน $-(1/N)2\pi$ และสำหรับ $X(f_2)$ แต่ละเวกเตอร์จะมีมุมต่างกัน $-(2/N)2\pi$

3.5 การแปลงฟูรีเยร์ (Fast Fourier Transform หรือ FFT)

โดยทั่วไปการคำนวณ DFT สำหรับสัญญาณเข้าที่ยาว N ลำดับนั้น คอมพิวเตอร์จะต้องทำการคูณจำนวนเชิงซ้อนถึง $N \times N$ ครั้ง และบวกจำนวนเชิงซ้อนอีก $N(N-1)$ ครั้ง ซึ่งโดยทั่วไปคอมพิวเตอร์จะทำการบวกได้ง่ายและเร็วกว่าการคูณมากดังนั้นอาจกล่าวได้ว่า ความเร็วในการคำนวณ DFT ขึ้นอยู่กับจำนวนครั้งการคูณเป็นสำคัญ

เราจะกล่าวถึงวิธีการซึ่งสามารถลดจำนวนครั้งของการคูณลงได้เหลือ $N \log_2 N$ ครั้ง หรือจำนวนครั้งลดไปถึง $N / (\log_2 N)$ เท่า ซึ่งเรียกววิธีการนี้ว่า การแปลงฟูรีเยร์ (Fast Fourier Transform หรือ FFT)

3.5.1 การแปลงฟูรีเยร์แบบฐานสอง (Radix 2 FFT)

3.5.1.1 หลักการเบื้องต้นของ FFT

เพื่อความสะดวกเราอาจละพจน์ $1/N$ ในการคำนวณ DFT ดังนั้นการแปลงฟูรีเยร์แบบเต็มหน่วยสำหรับ ลำดับ $x(m)$ ที่ยาว N จุด ที่นิยามคือ

$$X(k) = \sum_{m=0}^{N-1} x(m) \cdot W^{mk} \quad (3.23)$$

โดยที่ $k, m = 0, 1, \dots, N-1$ และจำนวนเชิงซ้อน $W = \exp(-j2\pi/N)$ $x(m)$ และ $X(k)$ เป็นสัญญาณในโดเมนเวลาและโดเมนความถี่ตามลำดับ

เราสามารถเขียนสมการ (3.23) ในรูปของสมการเมตริกซ์ได้เป็น

$$\{X\} = \{A\} \cdot \{x\} \quad (3.24a)$$

โดยที่ $\{X\}$ และ $\{x\}$ เป็นเวกเตอร์แนวตั้ง (column vector) ที่ประกอบด้วยสมาชิก $X(k)$ และ $x(m)$ ตามลำดับจำนวน N ลำดับ และ $\{A\}$ เป็นเมตริกซ์จัตุรัส (square matrix) ขนาด $N \times N$ ที่มีสมาชิกเป็นจำนวนเชิงซ้อน W^{mk} เช่นถ้าพิจารณารณกรณีที่ $N=4$ เราสามารถเขียนแยกออกได้เป็น

$$\begin{bmatrix} X(0) \\ X(1) \\ X(2) \\ X(3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W^0 & W^0 & W^0 & W^0 \\ W^0 & W^1 & W^1 & W^3 \\ W^0 & W^2 & W^4 & W^6 \\ W^0 & W^3 & W^6 & W^9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(0) \\ x(1) \\ x(2) \\ x(3) \end{bmatrix} \quad (3.24b)$$

แต่เนื่องจากคุณสมบัติความเป็นคาบของ W คือ

$$W^{mk} = W^{[mk \bmod(N)]} \quad (3.25)$$

สมการ (3.24b) อาจเขียนได้เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{bmatrix} X(0) \\ X(1) \\ X(2) \\ X(3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & W^1 & W^2 & W^3 \\ 1 & W^2 & W^0 & W^2 \\ 1 & W^3 & W^2 & W^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(0) \\ x(1) \\ x(2) \\ x(3) \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

คุณสมบัติความเป็นคาบทำให้เราสามารถแยกตัวประกอบของเมทริกซ์ ออกเป็นเมทริกซ์ย่อยหลาย เมทริกซ์คู่กัน และ สมาชิกภายในเมทริกซ์ย่อยให้มีค่าเป็นศูนย์มากที่สุด วิธีการแยกตัวประกอบนี้ จะไม่กระทำโดยตรงจาก แต่จะมีการสลับตำแหน่งหรือจัดกลุ่มของเมทริกซ์ด้วยวิธีการกลับบิต (bit reversal) และเมทริกซ์หลังจัดการสลับแถวแล้วนำมาแยกตัวประกอบอีกครั้งหนึ่ง

วิธีการแยกตัวประกอบอาจทำโดยวิธีการใช้ตัวเลขฐานสอง โดยการแทนดรรชนี k และ m ของสมการ (3.23) ด้วยเลขฐานสอง กรณีที่ ดรรชนี k และ m จะมีค่าได้เพียง 0,1,2 และ 3 เท่านั้น ดังนั้น

$$k = (k_1, k_0) \quad , \quad m = (m_1, m_0) \quad (3.27)$$

โดยที่ k_1, k_0, m_1 และ m_0 เป็นเลขโดดที่มีค่าแค่ 0 และ 1 เท่านั้น ดังนั้น

$$k = 2k_1 + k_0 \quad , \quad m = 2m_1 + m_0 \quad (3.28)$$

แทนค่า และ ลงในสมการ (3.23)

$$X(k_1, k_0) = x(m_1, m_0) W^{(2m_1+m_0).(2k_1+k_0)} \quad (3.29)$$

โดยคุณสมบัติความเป็นคาบของ W และ $W^{4m_1k_1} = 1$ ดังนั้นสมการ (3.29) ได้ใหม่เป็น

$$\begin{aligned} X(k_1, k_0) &= \sum_{m_0=0}^1 \left\{ \sum_{m_1=1}^1 x(m_1, m_0) W^{(2m_1k_0)} \right\} W^{(2k_1+k_0)m_0} \\ &= \sum_{m_0=0}^1 \{ x(k_0, m_0) \} W^{(2k_1+k_0)m_0} \end{aligned} \quad (3.30a)$$

โดยสมมติให้ตัวแปร เป็นการคำนวณระหว่างกลาง ผลของสมการ (3.30a) เขียนเป็นเมทริกซ์ใหม่ๆ ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} x(0,0) \\ x(1,0) \\ x(0,1) \\ x(1,1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & W^0 & 0 & 0 \\ 1 & W^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & W^1 \\ 0 & 0 & 1 & W^0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & W^0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & W^0 \\ 1 & 0 & W^2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & W^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(0,0) \\ x(0,1) \\ x(1,0) \\ x(1,1) \end{bmatrix} \quad (3.30b)$$

ซึ่งมีผลลัพธ์ระหว่างกลาง และ ผลลัพธ์ เป็น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{matrix} (k_0, k_0) \\ \begin{bmatrix} x_1(0,0) \\ x_1(0,1) \\ x_1(1,0) \\ x_1(1,1) \end{bmatrix} \end{matrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & W^0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & W^0 \\ 1 & 0 & W^2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & W^2 \end{bmatrix} \begin{matrix} (m_1, m_0) \\ \begin{bmatrix} x(0,0) \\ x(0,1) \\ x(1,0) \\ x(1,1) \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (3.31a)$$

และ ค่า DFT ของสัญญาณเป็น

$$\begin{matrix} (k_0, k_0) \\ \begin{bmatrix} x(0,0) \\ x(1,0) \\ x(0,1) \\ x(1,1) \end{bmatrix} \end{matrix} = \begin{bmatrix} 1 & W^0 & 0 & 0 \\ 1 & W^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & W^1 \\ 0 & 0 & 1 & W^0 \end{bmatrix} \begin{matrix} (m_1, m_0) \\ \begin{bmatrix} x_1(0,0) \\ x_1(0,1) \\ x_1(1,0) \\ x_1(1,1) \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (3.31b)$$

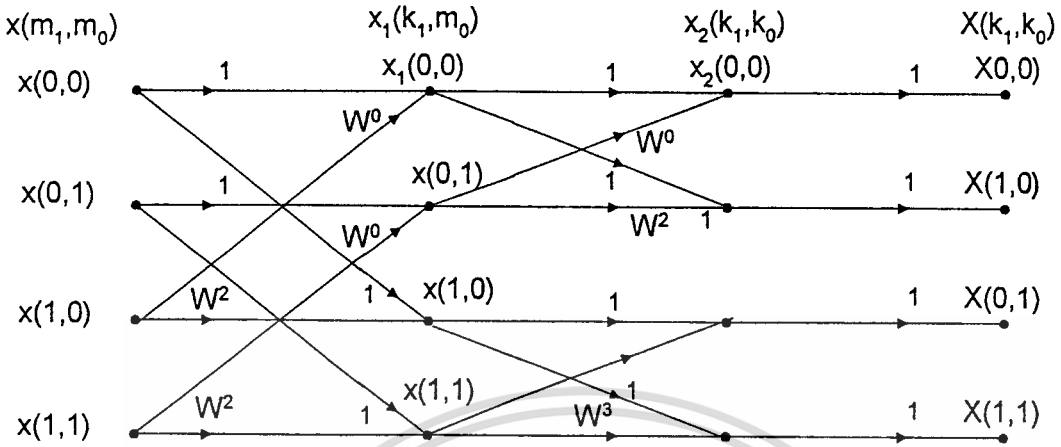
จะเห็นว่าจากผลการแยกตัวประกอบของ $\{A\}$ ได้ว่า สมาชิกตามแนวอนของตัวประกอบเมตริกซ์ จะมีเพียง 2 ตัวเท่านั้นที่มีค่าไม่เป็นศูนย์ และในสองตัวนี้จะมีสมาชิกหนึ่งตัวมีค่าเป็นศูนย์เสมอ ในขณะที่อีกตัวจะเป็นจำนวนเชิงซ้อน ซึ่งเราต้องการคูณจำนวนเชิงซ้อนเพียง $N \log_2 N = 8$ ครั้ง และบวกจำนวนเชิงซ้อนอีก 8 ครั้ง ในขณะที่การคำนวณปกติใช้การคูณจำนวนเชิงซ้อน 16 ครั้ง และบวกจำนวนเชิงซ้อน 12 ครั้ง

เรายังสามารถลดจำนวนการคูณลงได้อีก จากการคำนวณสัญญาณระหว่างกลาง $x_1(0,0)$ และ $x_1(0,1)$ ซึ่ง

$$x_1(0,0) = x(0,0) + W^0 \cdot x(1,0) = x(0,0) + W^0 \cdot x(1,0) \quad (3.32)$$

และ $x_1(1,0) = x(0,0) + W^2 \cdot x(1,0) = x(0,0) - W^0 \cdot x(1,0)$ เนื่องจากคุณสมบัติของจำนวนเชิงซ้อน $W^2 = -W^0$ ทำให้การคำนวณ $x_1(0,0)$ และ $x_1(0,1)$ ต้องการคูณจำนวนเชิงซ้อนเพียงครั้งเดียวเท่านั้น ซึ่งทำได้โดยการคำนวณพจน์ $W^0 \cdot x(1,0)$ ก่อนแล้วนำไปบวกและลบกับพจน์ $x(0,0)$ เพื่อให้ได้ลำดับ $x_1(0,0)$ และ $x_1(1,0)$ ตามลำดับ

เราอาจแสดงวิธีการคำนวณ FFT โดยแสดงเป็นกราฟการไหล ดังรูป 3.2 โดยหวัลดทอนที่ทิศทางคำนวณ ส่วนตัวอักษรกำกับเป็นค่าตัวคูณค่าของสัญญาณที่ต้นลูกศรนั้น และที่ บัพ หรือ ปม (Node) เป็นการรวมหรือบวกกันของสัญญาณ ส่วน $x_1(k_0, m_0)$ แทนการคำนวณระหว่างกลาง และ $X(k_1, k_0)$ เป็นค่า DFT ของลำดับสัญญาณ



รูปที่ 3.2 กราฟการไหลแสดงถึงวิธีการคำนวณตามสมการ (3.31)

3.5.1.2 ขั้นตอนการลดทอนทางเวลา

วิธีการที่เสนอมานั้น จะเป็นการจัดกลุ่มลำดับสัญญาณในโดเมนเวลา $x(m)$ ที่มีขนาด N จุด ออกเป็นสองลำดับสัญญาณที่มีความยาว $N/2$ จุดเท่ากัน โดยเรียกลำดับสัญญาณคู่และลำดับสัญญาณคี่ โดยที่ลำดับสัญญาณคู่เกิดจากการเอาลำดับสัญญาณในตำแหน่งเลขคู่มาเรียงกันที่เหลือเป็นลำดับสัญญาณคี่ ดังนั้นถ้าเราให้ $x_E(m)$ เป็นลำดับคู่ และ ลำดับคี่เป็น $x_o(m)$ เพราะฉะนั้น

$$x_E(m) = x(2m) \quad ; \quad m = 0, 1, \dots, (N/2) - 1 \quad (3.33)$$

$$x_o(m) = x(2m+1) \quad ; \quad m = 0, 1, \dots, (N/2) - 1$$

และถ้าเราให้ W_N แทน W ของลำดับ ที่ยาว N จุด ทำให้การคำนวณการแปลง DFT ของลำดับสัญญาณ $x(m)$ ที่ยาว N จุดเขียนได้ใหม่เป็น

$$\begin{aligned} X(k) &= \sum_{m=0}^{N-1} x_E(m)(W_N)^{km} + \sum_{m=0}^{N-1} x_o(m)(W_N)^{km} \\ &= \sum_{m=0}^{(N/2)-1} x(2m)(W_N)^{2mk} + \sum_{m=0}^{(N/2)-1} x(2m+1)(W_N)^{(2m+1)k} \end{aligned} \quad (3.34)$$

โดยที่พจน์ $(W_N)^2 = W_{N/2}$ ซึ่งหมายถึงค่า W ของลำดับซึ่งยาว $N/2$ ดังนั้นจะเขียนใหม่เป็น

$$\begin{aligned} X(k) &= \sum_{m=0}^{N/2-1} x_E(m)(W_{N/2})^{km} + (W_N)^k \sum_{m=0}^{N/2-1} x_o(m)(W_{N/2})^{km} \\ X(k) &= X_1(k) + (W_N)^k X_2(k) \end{aligned} \quad (3.35)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่ $X_1(k)$ และ $X_2(k)$ ผลการแปลง DFT ขนาด $N/2$ จุดของลำดับ $x_E(m)$ และ $x_O(m)$ ตามลำดับ สมการที่ (3.35) แสดงให้เห็นว่าการคำนวณ DFT ขนาด N จุดนั้นสามารถแบ่งการคำนวณย่อยออกเป็นการคำนวณ DFT ขนาด $N/2$ จุด สองอันได้ และข้อสำคัญคือ จะทำให้การคูณจำนวนเชิงซ้อนลดลงไปประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ โดยหลักการเดียวกันนี้ทำให้เรายังสามารถแบ่งทอนลำดับ $x_E(m)$ และ $x_O(m)$ ออกเป็นลำดับคู่และลำดับคี่ได้อีก จนในที่สุดเหลือเพียงลำดับขนาด 2 จุด หรือกล่าวได้ว่า การคำนวณ DFT ขนาด N จุด ทำได้โดยการแปลง DFT ขนาด 2 จุด จำนวน $N/2$ ภาคด้วยกัน ข้อสังเกตที่สำคัญคือการซอยเพื่อแบ่งลำดับ $x(n)$ ออกเป็นที่ละครึ่งจนเหลือการคำนวณ DFT ขนาด 2 จุด นี้ สำหรับสัญญาณ N ลำดับ จะทำการแบ่งได้ $\log_2 N$ ครั้ง (ดังรูป 3.4)

การนำ DFT ขนาด 2 จุด จำนวน $N/2$ ภาคนี้มาประกอบกันเพื่อให้ได้การคำนวณ DFT ขนาด N จุดนั้น จะต้องมียุทธศาสตร์ในการทำเพื่อไม่ให้ค่าที่ได้ผิดพลาดไป ดังนั้นเราต้องทำการนิยามสมการ (3.35) สำหรับ $k > N/2$ ด้วยซึ่งทำได้โดยการเขียน

$$\begin{aligned} X(k) &= X_1(k) + (W_N)^k X_2(k) && ; 0 \leq k \leq (N/2) - 1 \\ &= X_1(k - N/2) + (W_N)^k X_2(k - N/2) && ; N/2 \leq k \leq N - 1 \end{aligned} \quad (3.36)$$

พจน์ $(W_N)^k$ ในสมการ (3.36) เรียกว่า ตัวประกอบการหมุน (Twiddle factor หรือ phase หรือ rotation factor) ซึ่งมีความสำคัญในการนำ DFT ขนาด 2 จุด หรือ DFT ขนาด $N/2$ จุด มาประกอบกันเป็น DFT ขนาด N จุด ได้เหมือนเดิม

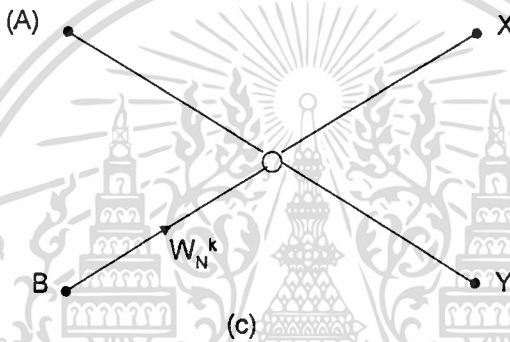
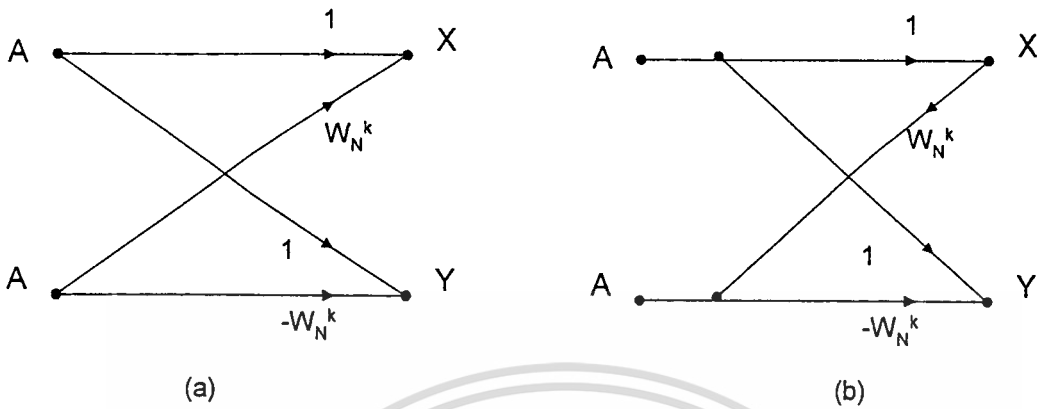
และจากความสัมพันธ์ $(W_N)^{k-N/2} = -(W_N)^k$ เราจะได้

$$X(k) = X_1(k) + (W_N)^k X_2(k) \quad ; 0 \leq k \leq (N/2) - 1 \quad (3.37a)$$

$$= X_1(k - N/2) - (W_N)^{k-N/2} X_2(k - N/2) \quad ; N/2 \leq k \leq N/2 - 1 \quad (3.37b)$$

ตามสมการ (3.37) ทำให้ทราบว่าในการคำนวณหา DFT ของลำดับคู่หนึ่ง จะประกอบด้วยลำดับ $X(k)$ ในสมการ (3.37a) และลำดับ $X(k)$ ในสมการ (3.37b) ซึ่งจะห่างออกไปจากลำดับ $X(k)$ ในสมการ (3.37a) ไป $N/2$ จุดนั้น สามารถคำนวณได้โดยใช้สูตรการคูณจำนวนเชิงซ้อนเพียงครั้งเดียวเท่านั้น จากผลอันนี้เราจะนำไปสร้างหน่วยความจำที่มีชื่อว่าหน่วย ความจำผีเสื้อ (butterfly unit) โดยหน่วยคำนวณนี้ (อาจอยู่ในรูปแบบของวงจรหรือโปรแกรม) มีข้อมูลเข้าสองข้อมูลคือ A และ B และให้ข้อมูลออกเป็น X และ Y เป็น

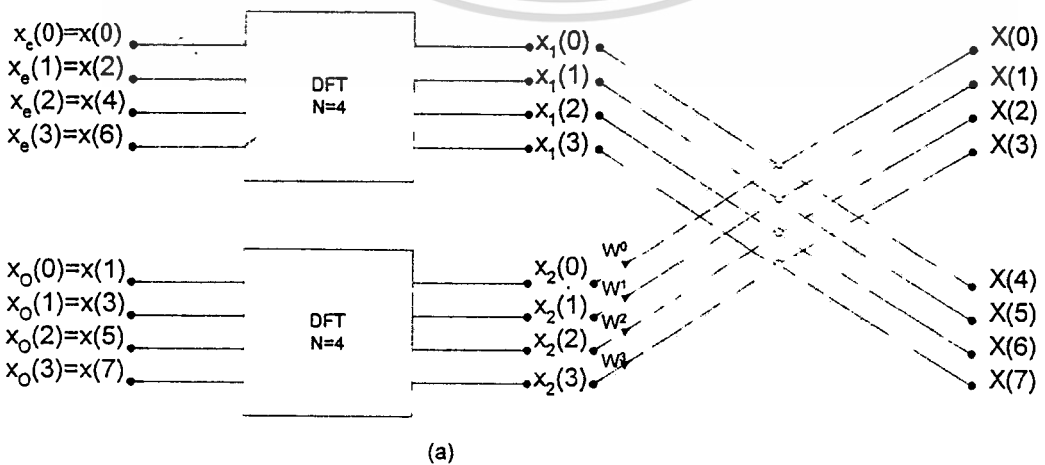
$$\begin{aligned} X &= A + (W_N)^k \cdot B \\ Y &= A - (W_N)^k \cdot B \end{aligned} \tag{3.38}$$

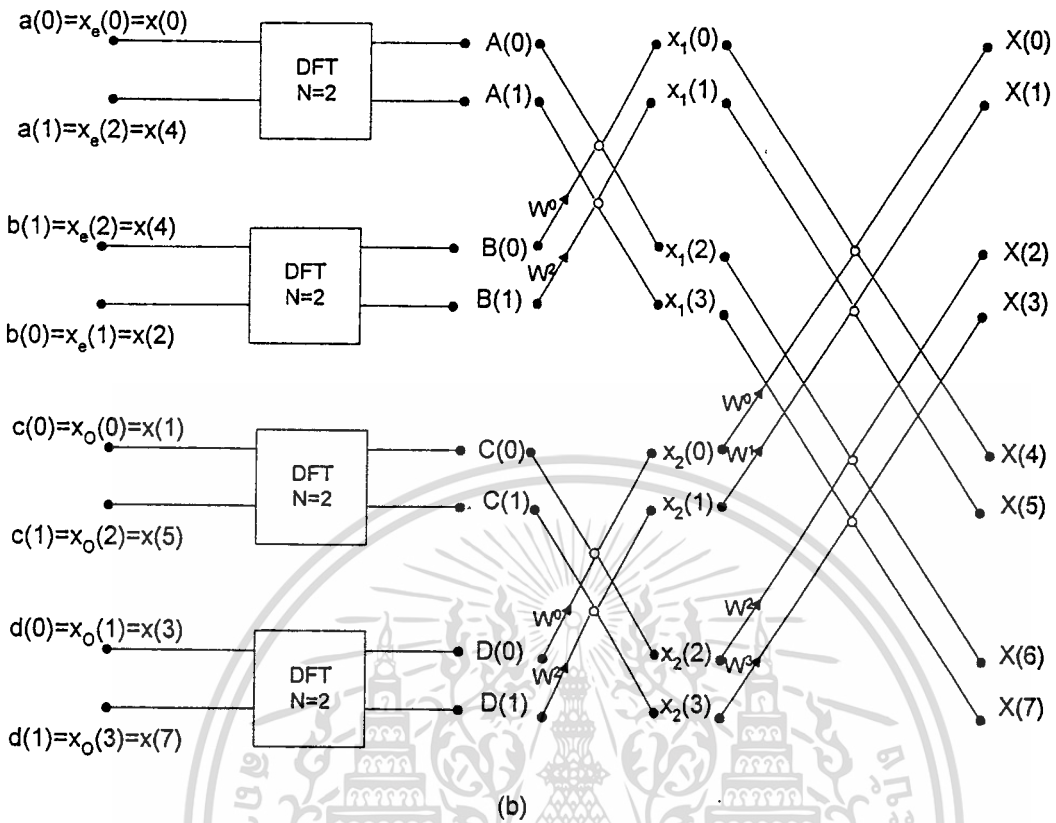


รูปที่ 3.3 หน่วยสี่เส้นของการคำนวณตามขั้นตอนวิธีลดทอนทางเวลา

โดยที่การทำงานของหน่วยสี่เส้น แทนได้ด้วยกราฟการไหล ดังแสดงไว้ในรูป 3.3(a) 3.3(b) หรือ 3.3(c)

โดยในรูปที่ 3.4 แสดงการคำนวณ DFT แบบ 8 จุด





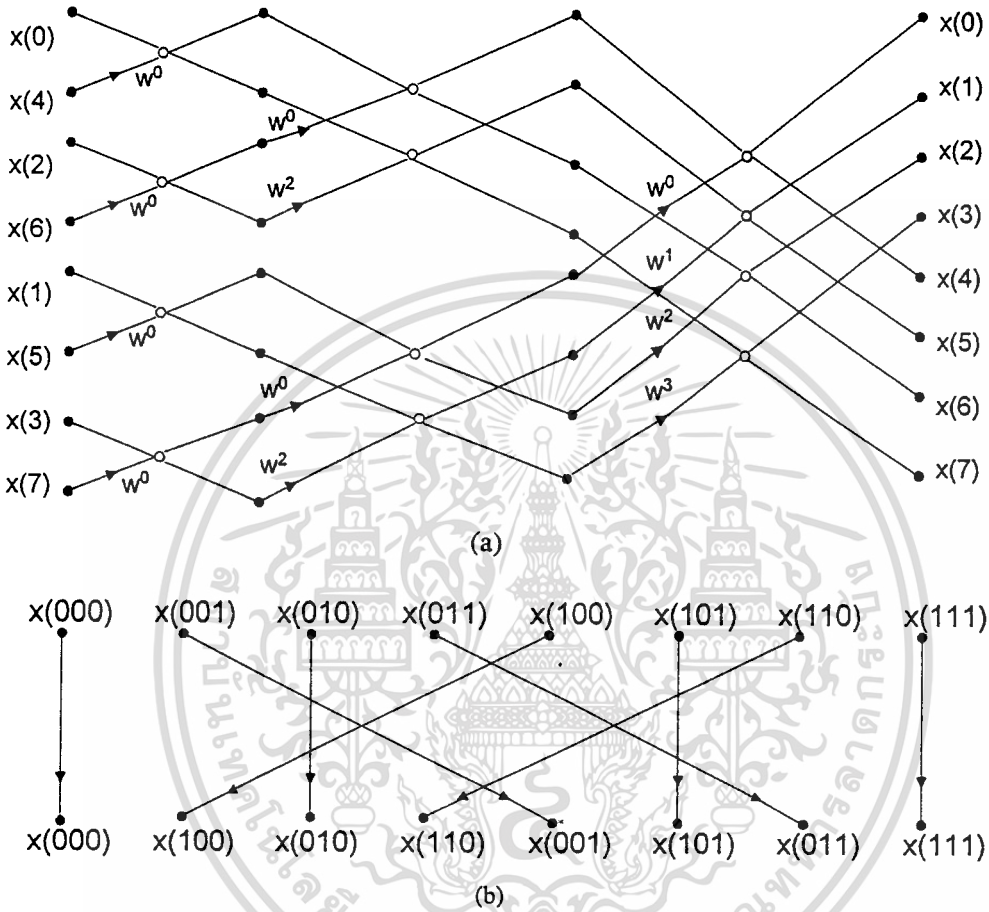
รูปที่ 3.4 (a) และ (b) แสดงขั้นตอนแบบ การลดทอนทางเวลา สำหรับ DFT แบบ 8 จุด

ตามรูป 3.5(a) ลำดับสัญญาณเข้า $x(n)$ ไม่ได้ถูกจัดเรียงอย่างต่อเนื่อง หรือ ตามธรรมชาติ แต่ได้ถูก สลับตำแหน่งกันอย่างมีหลักเกณฑ์ คือการสลับตำแหน่ง หรือสลับอันดับ กันนี้จะเป็นไปตามวิธีการที่เรียกว่า การผันกลับบิต นั่นคือถ้าเราแทนคิรรชนี n ของลำดับ $x(n)$ ด้วยเลขฐานสอง โดยที่จำนวนบิตต้องเพียงพอที่จะแทนค่า N ได้ เช่น ในกรณี $N=8$ ที่ต้องแทนกันด้วยเลขฐานสอง 3 บิต จากนั้นการจัดลำดับ $x(n)$ ใหม่จะได้จากการผันกลับบิตของเลขฐานสองที่แทนคิรรชนี n ดังรูป 3.5(b) คือ $x(001)$ จะถูกแทนด้วย $x(100)$ และ $x(110)$ ถูกแทนด้วย $x(011)$ เป็นต้น เนื่องจากคิรรชนี n เป็นคิรรชนีในโดเมนเวลา และวิธีการของ FFT แบบนี้เป็นการลดทอนเวลาทางการคำนวณโดยการ สับ หรือ ตัดทอน ลำดับในโดเมนเวลา หรือ $x(n)$ ออกเป็นกลุ่มย่อยโดยแต่ละกลุ่มประกอบด้วยลำดับ $x(n)$ เพียงสองลำดับที่เป็น ปมคู่ กัน การจัดกลุ่มนี้คล้ายกับเป็นการสุมตัวอย่างลำดับเดิมอีกครั้งหนึ่ง ด้วยอัตราการสุมตัวอย่างที่ต่ำกว่า และถ้าหากเราถือว่าแต่ละกลุ่มข้อมูลใหม่ที่จัดทำขึ้นมา ต่างเป็นลำดับ ข้อมูลชุดหนึ่งแล้ว ก็เท่ากับว่าเราได้ตัดทอนลำดับในโดเมนเวลาลงไปเป็นกลุ่มลำดับข้อมูลย่อยหลายลำดับ ดังนั้นจึงเรียกววิธีการแบบนี้ว่า การลดทอนทางเวลา ซึ่งแสดงแผนภาพลำดับวิธีการของ การลดทอนทางเวลา ได้ดังรูป 3.5.1.5 โดยที่ DFT ขนาด N จุดเดิมถูก

เอ็กสารนเป็นเอ็กสารทสงวนเวสาทหบการเขงนเพอการชกชเอทานน เมอญูญเตเทมเปดเบอระบชนดานการค้ำ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แบ่งออกเป็น DFT ขนาด $N/2$ จุดจำนวน 2 ภาคนำมารวมกันโดยใช้ตัวประกอบการหมุน และลำดับนี้จะทำงานกระทั่งผลลำดับสุดท้ายเป็นการแปลง DFT ขนาด 2 จุด โดยที่ การนำเอา DFT ขนาด $N/2$ จุดมาประกอบกัน มีวิธีการที่ขึ้นอยู่กับการจัดเรียงตัวของตัวประกอบการหมุน



รูปที่ 3.5 (a) กราฟการไหลสัญญาณแสดงการคำนวณตามรูป 3.4 (b) แสดงการสลับตำแหน่งของลำดับ $x(n)$ ด้วยการผันกลับบิต

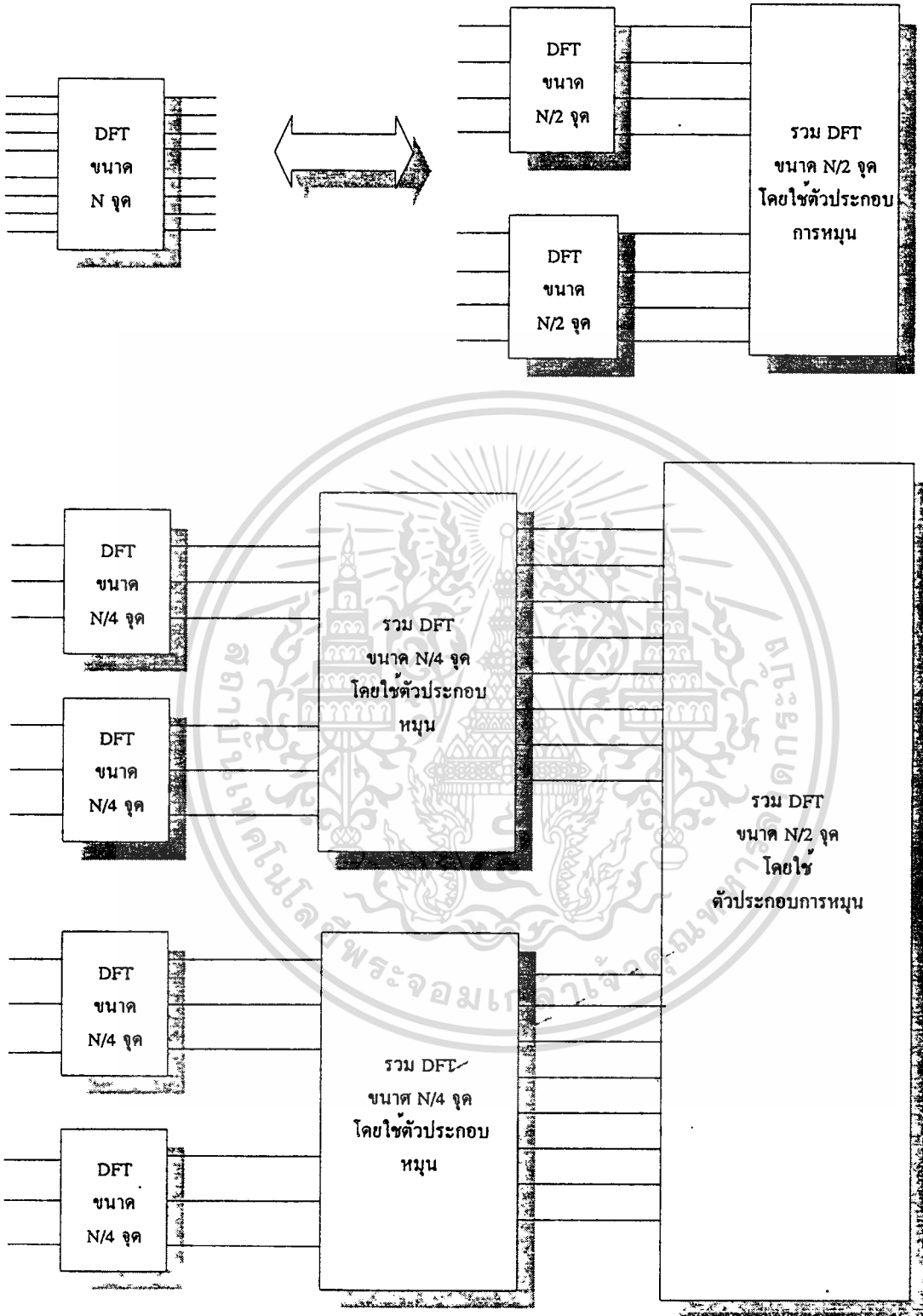
3.5.1.3 การลดทอนทางเวลาโดยวิธีการซ้ำที่

คุณสมบัติที่เป็นข้อดีบางประการของการแปลงฟาสต์ฟูเรียร์ ตามรูป 3.5(a) โดยทั่วไปแล้วอาจกล่าวได้ว่าการคำนวณการแปลง DFT นั้นแท้จริงแล้วก็คือ การนำลำดับจำนวนเชิงซ้อนที่มีอยู่ N ลำดับ มาทำการแปลงเป็นจำนวนเชิงซ้อนอีกกลุ่มหนึ่งที่มีอยู่ N ลำดับเช่นกัน โดยการใช้ FFT การแปลงเช่นนี้จะกระทำ $\log_2 N$ ขั้นตอนด้วยกัน ดังนั้นตามรูป 3.5(a) ซึ่ง $N=8$ ควรต้องมีหน่วยความจำ ($\log_2 N$) หรือ 3 แถวลำดับ (array) ด้วยกันสำหรับเก็บข้อมูลที่ต้องใช้ในการคำนวณ โดยที่แถวลำดับแรกไว้เก็บลำดับข้อมูล $x(n)$ สองแถวลำดับต่อมาไว้เก็บผลการคำนวณระหว่างกลาง $x_1(k)$ และแถวลำดับสุดท้ายสำหรับผลลัพธ์ $X(k)$ โดยการคำนวณจะประกอบด้วยขั้นตอนการคำนวณ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หน่วยสี่เหลี่ยม ซึ่งลักษณะการคำนวณของหน่วยสี่เหลี่ยมนี้ หากเรามีหน่วยความจำต่างหากไว้สำหรับเก็บค่าผลคูณของจำนวนเชิงซ้อน $(W_N)^k$.B ผลลัพธ์ X กับ Y ที่คำนวณสามารถเก็บแทนที่ไว้ในหน่วยความจำที่เก็บลำดับข้อมูลเข้า A และ B ได้ (ดังรูป 3.3) โดยลักษณะการทำเช่นนี้จะเห็นว่า ตามรูป 3.5(a) ผลลัพธ์การคำนวณทางขวามือสามารถบรรจุแทนที่ในหน่วยความจำทางด้านซ้ายมือได้ โดยไม่มีผลต่อการคำนวณส่วนอื่นๆ ซึ่งเรียกว่าเป็น การคำนวณแบบซ้ำที่ (in place) ซึ่งมีข้อดีคือใช้หน่วยความจำเพียงหนึ่งแถวลำดับ หรือต้องการหน่วยความจำสำหรับเก็บจำนวนเชิงซ้อนเพียง $N+1$ ค่าเท่านั้น วิธีการนี้จะเหมาะสมสำหรับข้อมูลยาวมาก โดยการคำนวณจะไม่เปลืองเนื้อที่หน่วยความจำ ข้อดีอีกประการคือ ตัวประกอบหมุน $(W_N)^k$ นั้นจะถูกเรียกอย่างเป็นลำดับคือจากกำลังน้อยไปสู่กำลังมาก จึงทำให้การเขียนโปรแกรม หรือสร้างวงจรทำได้ง่ายกว่า แต่ก็มีข้อเสียตรงที่ว่าลำดับ $x(n)$ จะต้องมีการสลับตำแหน่งกันตาม วิธีการผันกลับบิด จึงต้องมีโปรแกรมหรือวงจรเพิ่มเติม





รูปที่ 3.6 ภาพรวมแสดงขั้นตอนวิธีการคำนวณ DFT ขนาด N จุด แบบลดทอนทางเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5.1.4 การแปลงฟูรีเยร์ชนิดลดทอนทางความถี่

(Decimation-in-Frequency หรือ DIF)

ลำดับการคำนวณ FFT ซึ่งใช้กันมากและประยุกต์ใช้ในโครงงานนี้คือ การลดทอนทางความถี่ ซึ่งมีหลักการคล้ายคลึงกับ การลดทอนทางเวลา โดยที่การลดทอนทางความถี่จะแบ่งลำดับโดเมนเวลา $x(m)$ ออกเป็นสองส่วนเท่าๆกัน โดยการแบ่งครึ่งซึ่งทำได้โดย ถ้าให้ $x_E(m)$ และ $x_O(m)$ แทนลำดับสัญญาณที่ได้จากการแบ่งครึ่งนี้

$$\begin{aligned} x_E(m) &= x(m) & ; m = 0, 1, \dots, (N/2) - 1 \\ x_O(m) &= x(m + N/2) & ; m = 0, 1, \dots, (N/2) - 1 \end{aligned} \quad (3.39)$$

เพราะฉะนั้นการคำนวณ DFT ขนาด N จุด ของ $x(n)$ สามารถเขียนแยกได้สองส่วนคือ

$$\begin{aligned} X(k) &= \sum_{m=0}^{(N/2)-1} x(m)(W_N)^{mk} + \sum_{m=N/2}^{N-1} x(m)(W_N)^{mk} \\ &= \sum_{m=0}^{(N/2)-1} x_E(m)(W_N)^{mk} + \sum_{m=0}^{(N/2)-1} x_O(m)(W_N)^{(m+N/2)k} \\ X(k) &= \sum_{m=0}^{(N/2)-1} x_E(m)(W_N)^{mk} + (W_N)^{Nk/2} \sum_{m=0}^{(N/2)-1} x_O(m)(W_N)^{mk} \end{aligned} \quad (3.40)$$

เพราะว่าพจน์ $(W_N)^{Nk/2} = \exp(-j\pi k) = (-1)^k$ จึงเขียนได้เป็น

$$X(k) = \sum_{m=0}^{(N/2)-1} [x_E(m) + (-1)^k \cdot x_O(m + N/2)](W_N)^{mk} \quad (3.41)$$

และถ้าเราแยกกรณี k ออกเป็นเลขคู่และคี่ เพราะฉะนั้น $X(2k)$ และ $X(2k+1)$ จะแทน DFT จะแทนส่วนของเลขคู่และเลขคี่ตามลำดับหรือ

$$\begin{aligned} X(2k) &= \sum_{m=0}^{(N/2)-1} [x_E(m) + x_O(m)](W_N)^{2mk} \\ &= \sum_{m=0}^{(N/2)-1} f(m)(W_{N/2})^{mk} \end{aligned} \quad (3.42)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ

$$\begin{aligned}
 X(2k) &= \sum_{m=0}^{(N/2)-1} [x_E(m) + x_O(m)] (W_N)^{2mk} \\
 &= \sum_{m=0}^{(N/2)-1} f(m) (W_{N/2})^{mk}
 \end{aligned}
 \tag{3.43}$$

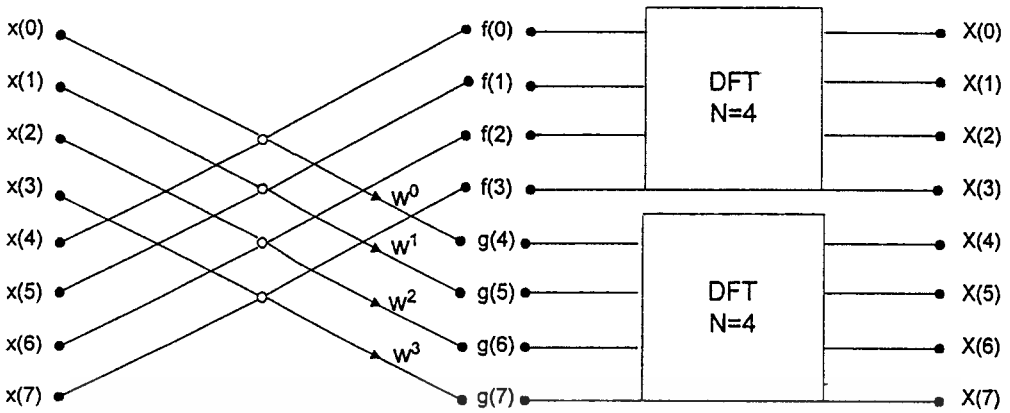
จากผลของ (3.42) และ (3.43) แสดงว่าการคำนวณ DFT ขนาด N จุด ด้วยวิธีนี้จะทำได้โดย ในเบื้องต้นจากลำดับ $x(m)$ เราทำการแบ่งครึ่งออกเป็น 2 ลำดับ ดังสมการ (3.39) แล้วนำมาสร้างเป็นลำดับอันใหม่ที่ยาว $N/2$ จุด 2 ลำดับ โดยสมมติให้ลำดับใหม่นี้ชื่อ $f(m)$ และ $g(m)$ ลำดับคู่นี้สามารถสร้างได้โดยใช้สมการ

$$\begin{aligned}
 f(m) &= x_E(m) + x_O(m) \quad ; m = 0, 1, \dots, (M/2) - 1 \\
 g(m) &= [x_E(m) - x_O(m)] \cdot (W_N)^{mk} ;
 \end{aligned}
 \tag{3.44}$$

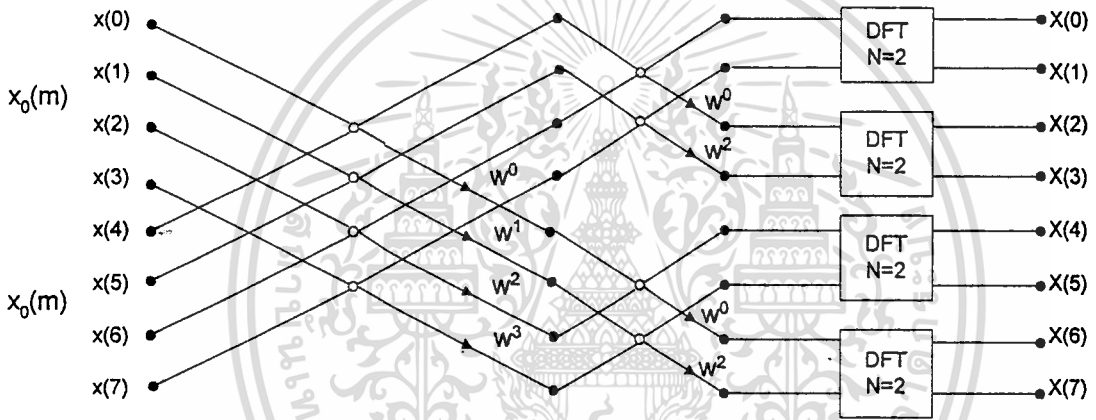
และจากลำดับยาว $N/2$ จุดในสมการ (3.44) เราก็อาจนำไปคำนวณหา DFT ขนาด $N/2$ จุด โดยใช้ (3.42) และ (3.43) เพราะฉะนั้นโดยรวมแล้วจะเห็นว่า การคำนวณ DFT ขนาด N จุด ได้ถูกแบ่งเป็นการคำนวณ DFT ขนาด $N/2$ จุดสองภาคด้วยกัน

จะเห็นว่าเหมือนกับในการลดทอนทางเวลา การแบ่งการคำนวณย่อยออกเป็น DFT ขนาด $N/2$ จุด นี้สามารถแบ่งย่อยออกไปได้เรื่อยๆ จนในที่สุดเหลือการคำนวณขนาด 2 จุด ตัวอย่างที่แสดงการคำนวณโดยใช้ กราฟการไหลกรณี $N=8$ แสดงไว้ในรูป 3.7 โดยในรูปแสดงการแบ่งลำดับย่อยออกตามลำดับนั้น จนเหลือการคำนวณ DFT ขนาด 2 จุด และการแบ่งย่อยทำได้ 3 ครั้ง หรือ $\log_2 8$ และจำนวนครั้งในการคูณจำนวนเชิงซ้อนจะประมาณ $N \log_2 N$ เช่นเดียวกัน

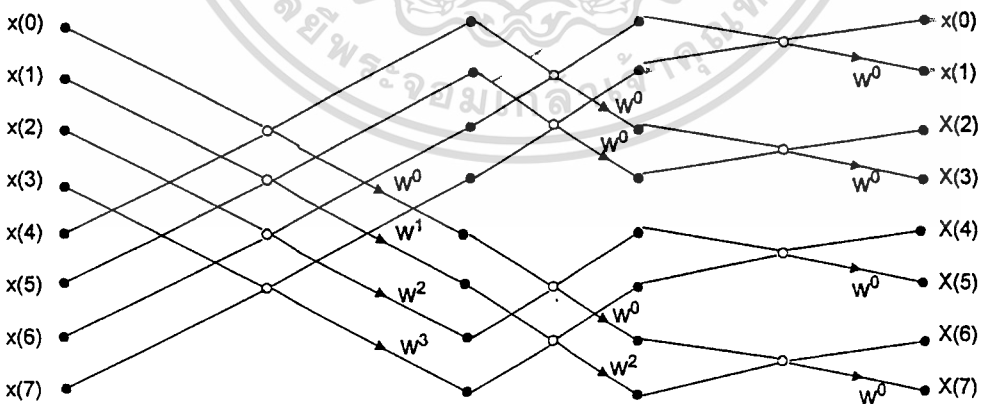
ข้อแตกต่างระหว่างสองวิธีขั้นตอนการคำนวณทั้งสองวิธีคือ ประการแรก การลดทอนทางเวลา $x(n)$ ต้องสลับตำแหน่งกัน แต่ $X(k)$ เรียงตามธรรมชาติ ส่วนการลดทอนทางความถี่จะตรงข้ามคือ $x(n)$ จะเรียงตามธรรมชาติ และ $X(k)$ จะถูกเรียงสลับแบบผกกลับบิต ประการที่สอง หน่วยสี่เหลี่ยมของการลดทอนทางความถี่ต่างไปจากการลดทอนทางเวลาคือเพราะได้จากการเอาลำดับ $x_E(m)$ และ $x_O(m)$ มาบวกและลบกันก่อนแล้วจึงทำการคูณด้วยจำนวนเชิงซ้อน $(W_N)^k$ หน่วยคำนวณสี่เหลี่ยมของการลดทอนทางความถี่ แสดงดังรูป 3.8



(a)



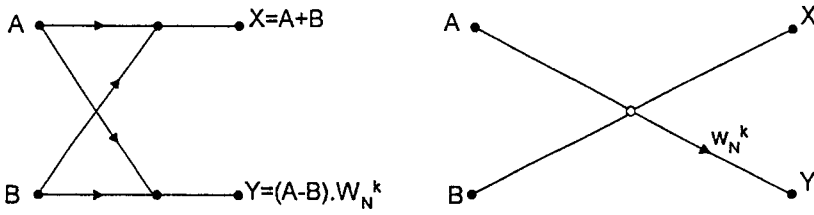
(b)



(c)

รูปที่ 3.7 แสดงลำดับขั้นตอนวิธีการของ FFT ชนิดการลดทอนทางความถี่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.8 แสดงการคำนวณของ หน่วยเซลล์ ของขั้นตอนวิธีชนิดคทอนทางความถี่



บทที่ 4

หน่วยลดทอนสัญญาณ

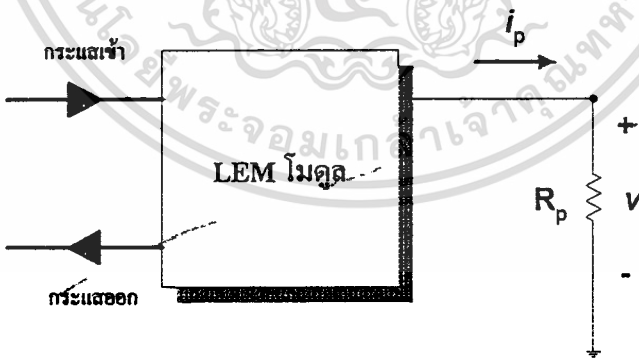
4.1 บทนำ

ข้อสำคัญประการหนึ่งในการวัดสัญญาณฮาร์มอนิกคือเราไม่สามารถวัดขนาดและรูปร่างสัญญาณเข้ามาคำนวณขนาดขององค์ประกอบฮาร์มอนิกได้โดยตรง เนื่องจากจะต้องนำรูปคลื่นกระแสมาทำการคำนวณโดยอาศัย การประมวลผลเชิงตัวเลข (DSP ;Digital Signal Processing) ผ่านการ์ดประมวลผล TMS320C26 ซึ่งก่อนทำการประมวลผลลักษณะรูปคลื่นซึ่งเป็นสัญญาณอนาลอก (Analog) จะถูกเปลี่ยนเป็นสัญญาณดิจิทัลโดย TLC32040 ซึ่งเป็นตัวแปลงสัญญาณอนาลอกเป็นดิจิทัล ซึ่งอยู่ในการ์ด DSP อยู่แล้ว สัญญาณอนาลอกนี้จะเป็นสัญญาณที่อยู่ในช่วง ± 3 โวลต์ ดังนั้น จึงจะต้องลดทอนสัญญาณเข้าอยู่ในรูปของสัญญาณแรงดันไม่เกิน ± 3 โวลต์ โดยที่หลังการลดทอนสัญญาณลักษณะรูปคลื่น(wave form)ต้องมีผิดเพี้ยน(distortion)น้อยที่สุด

โดยความจำเป็นอันนี้จึงเลือกใช้ LEM โมดูลซึ่งเป็นตัวแปลงกระแสโดยอาศัยหลักการของปรากฏการณ์ของฮอลล์(Hall effect)โดยการทำงานจะคล้ายกับหม้อแปลงกระแสโดยทั่วไปคือให้กระแสออกจากด้านทุติยภูมิแต่มีความผิดเพี้ยนของสัญญาณน้อยกว่า

4.2 การแปลงสัญญาณกระแสให้เป็นสัญญาณแรงดัน

กระแสที่ออกจาก LEM โมดูลจะถูกแปลงเป็นสัญญาณแรงดันค่าไม่เกิน ± 3 โวลต์ โดยให้กระแสผ่านความต้านทานค่าคงที่ค่าหนึ่งแล้วนำแรงดันตกคร่อมมาใช้

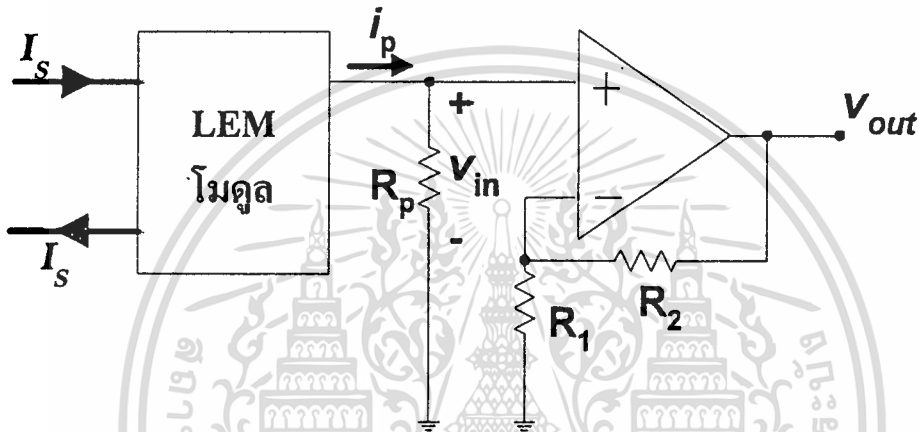


รูปที่ 4.1 . แสดงการแปลงสัญญาณกระแสจาก LEM โมดูลให้เป็นสัญญาณแรงดัน ซึ่งแรงดันตกคร่อม R_p หาได้จาก

$$v = i_p R_p \quad (4.1)$$

แต่อย่างไรก็ตามการนำแรงดันตกคร่อม R_p ป้อนการ์ด DSP โดยตรงนั้นอาจมีผลให้การวัดผิดเพี้ยนได้เนื่องจากการดึงกระแสของการ์ด DSP (ถึงแม้จะมีค่าน้อยแต่สามารถหลีกเลี่ยงได้)

ดังนั้นจะใช้วงจร นอน-อินเวอร์ตติง(non-inverting) มาขึ้นกลางโดยใช้ออปแอมป์ LF351 ซึ่งเป็นออปแอมป์ที่ใช้งานได้ในช่วงความถี่ได้สูง (4 MHz)ซึ่งใช้ได้ในช่วงการใช้งานสำหรับสัญญาณในการวัดสัญญาณฮาร์มอนิกไม่เกินลำดับที่ 35 คือ ที่ความถี่ $35 \times 50 = 1750$ Hz หรือ 1.75 KHz



รูปที่ 4.2 แสดงการใช้วงจร นอน อินเวอร์ตติง (non-inverting) มาขึ้นกลางระหว่างสัญญาณแรงดันจาก LEM โมดูล กับ สัญญาณเข้า การ์ด DSP

จากวงจรรูปที่ 4.2 จะได้

$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) V_{in} \quad (4.2)$$

โดยเลือกใช้ $R_1 = R_2 = 5 \text{ K}\Omega$

เราจะได้ $V_{out} = 2 \cdot V_{in}$ และเนื่องจาก V_{out} เป็นสัญญาณที่จะต้องป้อนเข้าการ์ด DSP ซึ่งจำกัดขนาดแรงดันสูงสุดไม่เกิน ± 3 โวลต์ ดังนั้น V_{in} ต้องมีขนาดไม่เกิน ± 1.5 โวลต์ เนื่องจาก LEM โมดูลที่ใช้เป็นแบบ LA25 NP ซึ่งทนกระแสได้ 25 แอมแปร์ ดังนั้นจะทนกระแสสูงสุดได้ $25 \times \sqrt{2} = 35.4$ แอมแปร์ หรือประมาณ 36 แอมแปร์

โดยเลือกใช้อัตราส่วน(turn ratio)เป็น 1000/1 ดังนั้น

$$\begin{aligned} i_p &= \frac{36}{1000} \text{ A} \\ &= 36 \text{ mA} \end{aligned}$$

จากสมการ (4.1) จะสามารถคำนวณ R_p ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$R_p = \frac{v}{i_p} \Omega$$

แต่ เนื่องจาก $v = v_{in}$ ดังนั้น

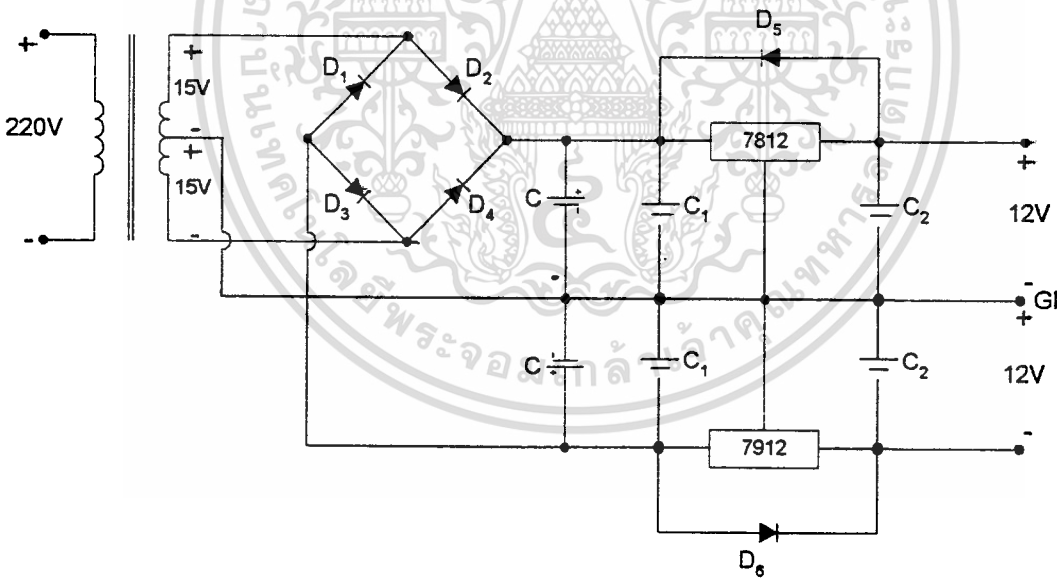
$$R_p = \frac{v_{ac}}{i_p} \Omega \quad (4.3)$$

หาค่า $R_p = 1.5/36 \times 10^{-3} \Omega$
 $= 41.7 \Omega$

ดังนั้นเลือกใช้ $R_p = 40 \Omega$

4.3 วงจรสร้างไฟเลี้ยงออปแอมป์ และ LEM โมดูล ± 12 โวลต์

โดยการจ่ายไฟสลับ 220 โวลต์ ผ่านหม้อแปลง ผ่านวงจรบริดจ์เรกติฟายแบบเต็มคลื่น ผ่านฟิลเตอร์ แล้วทำให้เรียบด้วยไอซีเรกกูเลตดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 วงจรจ่ายไฟเลี้ยง ± 12 โวลต์

ใช้ไอซีเรกกูเลต MC7812 และ MC7912

4.3.1 ขนาดของหม้อแปลง

คำนวณ V_{ac} ที่ได้จาก

$$V_{ac} = \frac{(V_o + V_{reg} + V_{rect} + V_{ripple})}{0.92} \times \frac{V_{Nom}}{V_{min}} \times \frac{1}{\sqrt{2}} \quad (4.4)$$

เมื่อ V_o = ค่าแรงดันไฟตรงที่ผ่านการเรกกูเลตแล้ว

V_{reg} = แรงดันที่ตกคร่อมไอซีเรกกูเลต ซึ่งมีค่าประมาณ 3 โวลต์ สำหรับไอซีเรกกูเลตเบอร์ 78XX และ 79XX

V_{rect} = ค่าแรงดันคัทอิน(cutin voltage)ที่ตกคร่อมไดโอด ซึ่งประมาณ 1.1 โวลต์

V_{ripple} = ค่าแรงดันที่ไม่เรียบสูงสุด(peak ripple voltage) ที่ผ่านตัวเก็บประจุฟิลเตอร์ (C filter) ซึ่งมีค่าประมาณน้อยกว่า 1 โวลต์

V_{Nom} = ค่าแรงดันไฟสลับที่จ่ายให้วงจรในภาวะปกติ ใช้ 220 โวลต์

V_{min} = ค่าแรงดันไฟสลับที่จ่ายวงจรในภาวะผิดปกติ เช่น ไฟตก เป็น 200 โวลต์

0.92 = ค่าประสิทธิภาพการเรกตีฟาย (Rectifier efficiency)

ดังนั้นจะได้

$$V_{ac} = \frac{(12 + 3 + 1.1 + 0.5)}{0.92} \times \frac{220}{200} \times \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$= 4.0 \text{ โวลต์}$$

ใช้ V_{ac} 15 โวลต์ในการใช้งาน

เนื่องจากหม้อแปลงที่ใช้เป็นแบบมีแท็ปกลาง(center tap) ดังนั้นพิกัดหม้อแปลงที่ใช้คือ 220/30 โวลต์

$$\begin{aligned} \text{กระแสไฟตรง } I_{dc} \text{ ที่ต้องใช้} &= \text{กระแสจ่ายออปแอมป์} + \text{กระแสจ่าย LEM โมดูล} \\ &= 1.8 \text{ mA} \quad + \quad 25 \text{ mA} \\ &= 26.8 \text{ mA} \end{aligned}$$

เนื่องจากเป็นวงจรบริดจ์เรกตีฟายแบบเต็มคลื่นดังนั้น

$$I_{ac} = 1.65 I_{dc} \quad (4.5)$$

ดังนั้นจะคำนวณ $I_{ac} = 1.65 \times 26.8 = 44.2 \text{ mA}$

เพื่อค่าไว้เป็น $I_{ac} = 100 \text{ mA}$

ดังนั้นขนาดหม้อแปลงเป็น $0.1 \times 30 = 3 \text{ VA}$

ดังนั้นใช้หม้อแปลงขนาดใหญ่กว่า 3 VA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.3.2 ขนาดตัวเก็บประจุ

ค่า C_1 และ C_2 สำหรับ 7812 และ 7912 ดูได้จากเอกสารประกอบ (data sheet) ใช้

$$C_1 = 0.22 \mu\text{F} \text{ และ } C_2 = 0.1 \mu\text{F}$$

สำหรับค่าตัวเก็บประจุสำหรับฟิลเตอร์คำนวณได้จาก

$$C = \frac{I_{dc}}{2fV_{r(p-p)}} \quad (4.6)$$

เมื่อ $f = 50 \text{ Hz}$

หรืออาจคำนวณได้จาก

$$C = \frac{1}{2\sqrt{3}fR_L r} \quad (4.7)$$

เมื่อ $f = 100 \text{ Hz}$ $r =$ ค่าเปอร์เซ็นต์ความไม่เรียบ (percent ripple)

$$\text{และ } R_L = \frac{V_{dc}}{I_{dc}} \quad (4.3)$$

ดังนั้นคำนวณหาค่า C ที่ใช้ได้อย่างน้อยเท่ากับ $\frac{1}{2\sqrt{3} \times 100 \times \left(\frac{12}{0.027}\right) \times 0.01} = 650 \mu\text{F}$

ในที่นี้ใช้ $C = 2200 \mu\text{F}$

4.3.3 ขนาดไดโอดที่ใช้

ในวงจรเรกติฟายแบบเต็มคลื่น ไดโอดต้องทนแรงดันด้านกลับสูงสุด (PIV: Peak Invert Voltage) ได้อย่างน้อย 2 เท่าของค่าสูงสุดของแรงดันด้านทุติยภูมิเทียบกับแท่งปกกลาง คือ

$$PIV \geq 2V_m \text{ แต่เพื่อความปลอดภัยใช้ อย่างน้อย 3 เท่า } PIV \geq 3V_m$$

เนื่องจากแรงดันแท่งปกกลางด้านทุติยภูมิเป็น 15 โวลต์

ดังนั้น

$$V_m = 5 \times \sqrt{2} = 21.2 \text{ โวลต์}$$

นั่นคือ

$$PIV \geq 3 \times 21.2 = 63.4 \text{ โวลต์}$$

ดังนั้นเลือกใช้ไดโอดเบอร์ 1N4002 ซึ่งมี $PIV = 100$ โวลต์

ไดโอด D_5 และ D_6 ใช้สำหรับป้องกันการคายประจุจาก C_2 และ C_3 ผ่านไอซีเรกกูเลต

7812 และ 7912 เบอร์ของ D_5 และ D_6 ดูได้จากเอกสารประกอบ (data sheet) ซึ่งได้ $D_5 = D_6$

เป็น 1N4001

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

ขั้นตอนการประมวลผลสัญญาณฮาร์โมนิก

สำหรับ TMS320C26

5.1 บทนำ

โปรแกรมที่ใช้ในการประมวลผลสัญญาณที่รับเข้ามาทางด้านอินพุทของ อะนาล็อกอินเตอร์เฟซเซอร์กิต (Analog Interface Circuit) ได้แบ่งโหมดในการแปลงจากภาษาแอสเซมบลีเป็นภาษาเครื่อง ของโปรแกรมแอสเซมเบลอร์ เป็น 2 โหมดด้วยกัน ดังนี้คือ

1. โหมดการแสดงผลทางออสซิลโลสโคป (Oscilloscope Display)
2. โหมดการแสดงผลทาง LCD โมดูล (LCD Module display)

ในโหมดของการแสดงผลทางออสซิลโลสโคปนั้น เป็นการแสดงผลข้อมูลเป็นสัญญาณอะนาล็อก ออกทางออสซิลโลสโคป เป็นลักษณะของสเปกตรัมของความถี่ต่างๆ ส่วนในโหมดของการแสดงผลทาง LCD โมดูล เป็นการแสดงผลเป็นสัญญาณดิจิทัล ซึ่งเป็นการแสดงในรูปของเปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิกลำดับที่ 3,5,7,9,11 และ 13 ออกทาง LCD โมดูล

ในการเลือกโหมดในการทำงานผู้ใช้สามารถเซตค่าได้ตามต้องการ ซึ่งสามารถทำการเซตค่าในโปรแกรมหลัก และสั่งให้แอสเซมเบลอร์ทำการคอมไพล์โปรแกรม และเรียกโปรแกรมดีบักเกอร์ เพื่อทำการประมวลผลสัญญาณ และสั่งให้บอร์ดทำงาน

5.2 ขั้นตอนในการประมวลผลของโปรแกรมหลัก(Main Program)

ขั้นตอนที่ 1

กำหนดโหมดของการประมวลผล และการแสดงผล ซึ่งสามารถกำหนดได้ 2 โหมด ดังนี้คือ

1. โหมดการแสดงผลทางออสซิลโลสโคป

ให้ทำการเซตค่าดังนี้	OSCILLOSCOPE	.set	YES
	LCDMODULE	.set	NO

2. โหมดการแสดงผลทาง LCD โมดูล

ให้ทำการเซตค่าดังนี้	OSCILLOSCOPE	.set	NO
	LCDMODULE	.set	YES

ขั้นตอนที่ 2

กำหนดค่า เริ่มต้นในการรับส่งข้อมูลระหว่างคอมพิวเตอร์กับบอร์ด ทางสาย RS232 ซีเรียลพอร์ต ซึ่งกำหนดให้เป็นการรับส่งข้อมูลแบบ 16 บิต และมีขาสัญญาณ FSX (Frame Synchronize Serial port) เป็นขาสัญญาณควบคุมการรับส่งข้อมูลและกำหนดอัตราการสุ่มข้อมูล (Sampling Frequency) ของอะนาล็อกอินเทอร์เฟซ เซอร์กิต โดยกำหนดให้ในโหมดการแสดงผลทางออสซิลโลสโคป มีอัตราการสุ่มข้อมูลเท่ากับ 44 KHz และในโหมดการแสดงผลทาง LCD โมดูล มีอัตราการสุ่มข้อมูลเท่ากับ 3215เฮิร์ต

ขั้นตอนที่ 3

กำหนดจำนวนจุดของการสุ่มข้อมูล ซึ่งเป็นค่าขนาดของการคำนวณโปรแกรม FFT และ เช็ตค่าตำแหน่งบัพเฟอ์ของข้อมูลอินพุทที่รับเข้ามา และบัพเฟอ์ของข้อมูลที่จะส่งออกออสซิลโลสโคป

ขั้นตอนที่ 4

คำนวณ โปรแกรม FFT ซึ่งสามารถ แสดงขั้นตอนการคำนวณได้ ดังรูปที่ 5.1 โดยทำการเปลี่ยนข้อมูลในแกนเวลา เป็นค่าในแกนความถี่ ซึ่งจะได้ค่าจริงและค่าจินตภาพออกมา

ขั้นตอนที่ 5

ในโหมดการแสดงผลทางออสซิลโลสโคป จะหาขนาดของผลลัพธ์ที่ได้ในขั้นตอนที่4 โดยทำการหาค่าลอการิทึมฐาน2 เพื่อ่ายในการแสดงผลทางออสซิลโลสโคป ส่วนใน โหมดของการแสดงผลทาง LCD โมดูล จะทำการหาขนาดแอมพลิจูด ของจำนวนจริงและจำนวนจินตภาพ และเก็บผลลัพธ์ที่ได้ใน คาด้า อาร์เรย์ เช่นเดิม

ขั้นตอนที่ 6

ทำการผันกลับบิตข้อมูลใน ตำแหน่งจริงและเก็บในตำแหน่งจินตภาพ ของคาด้า อาร์เรย์

ขั้นตอนที่ 7

ในโหมดของการ์แสดงผลทางออสซิลโลสโคป จะส่งข้อมูลเอาท์พุท ที่ได้ออกไปแสดงผลที่ออสซิลโลสโคป ส่วนในโหมดของการแสดงผลทาง LCD โมดูล จะนำค่าข้อมูลใน ตำแหน่งที่เก็บค่าฮาร์มอนิกก็ ทำการคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับค่าความถี่มูลฐานและส่งผลไปแสดงทาง LCD โมดูล

ขั้นตอนที่ 8

รอให้ข้อมูลอินพุทที่รับเข้ามาและเก็บในบัพเฟอ์เต็ม และเตรียมข้อมูลโดยคูณค่าข้อมูลอินพุท ด้วยค่า ตัวประกอบการหมุน เพื่อเป็นข้อมูลให้โปรแกรม FFT

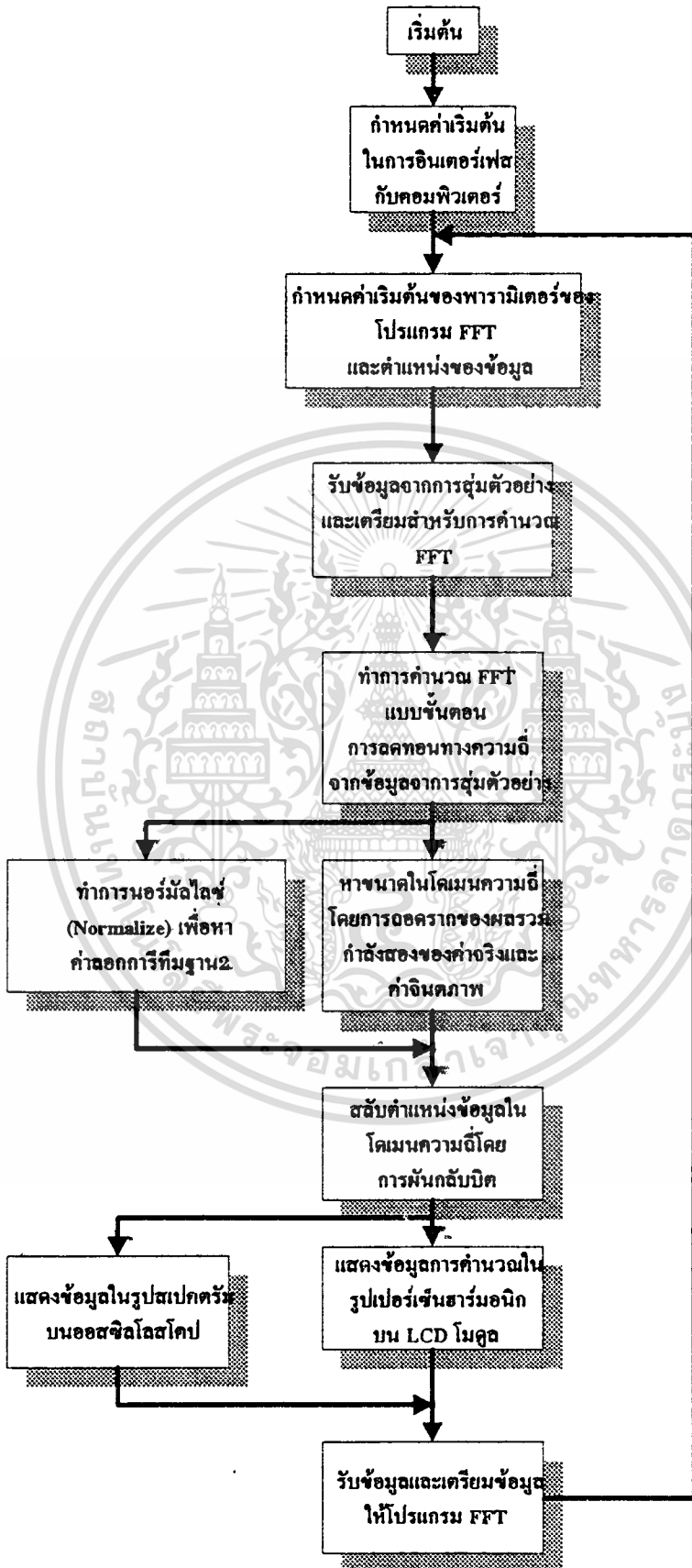
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ขั้นตอนที่ 9

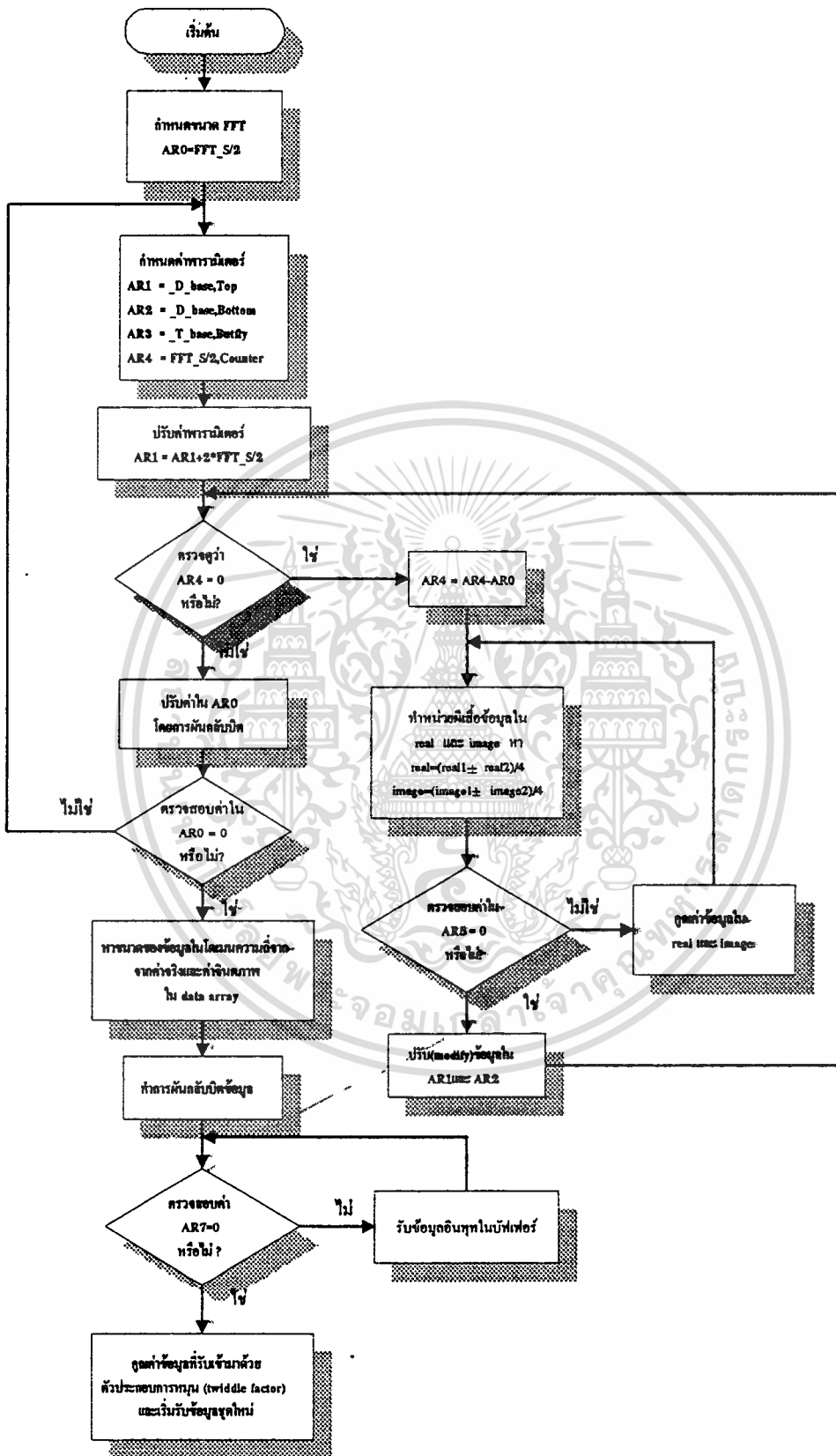
ทำรูปของโปรแกรม โดยกลับไปทำที่ขั้นตอนที่ 3 อีกต่อ ไปเรื่อยๆ ซึ่งสามารถแสดงได้ดังรูป 5.1

5.3 ขั้นตอนในการคำนวณโปรแกรม FFT

- 1.กำหนดขนาด FFT เพื่อบอกให้โปรแกรมทราบว่า จะให้ทำการประมวลผลกี่จุด ในที่นี้ถ้าเป็นโหมดการแสดงผลทางออสซิลโลสโคป กำหนดให้เป็น 256 จุด สำหรับ TMS320c26 และ 1024 จุด สำหรับ TMS320c50 ส่วนโหมดในการแสดงผลทาง LCD โมดูลกำหนดให้เป็น 64 จุด เนื่องจากข้อจำกัดทางด้านหน่วยความจำภายในของ TMS320c26
- 2.ทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ โดย AR1 และ AR2 เป็นรีจิสเตอร์ที่เก็บตำแหน่งแอดเดรสของ data array ส่วน AR3 เก็บแอดเดรสของตัวประกอบการหมุน และ AR4 เป็นตัวนับสำหรับการประมวลผล
- 3.ทำบัตเตอร์ฟลาย(Butterfly)ข้อมูลในตำแหน่งจริงและตำแหน่งจินตภาพ และคูณค่าตัวประกอบการหมุน นำผลที่ได้เก็บใน data array
- 4.ทำการหาขนาดของข้อมูลโดยถ้าเป็นโหมดการแสดงผลทางออสซิลโลสโคป จะหาค่าลอการิทึมฐานสอง และโหมดการแสดงผลทาง LCD โมดูล จะทำการหาค่าแอมป์ลิจูด โดยการถอดรหัสข้อมูล
- 5.ทำการผันกลับบิต
- 6.ตรวจสอบข้อมูลอินพุตอินพุตที่รับเข้ามาเต็มหรือไม่ ถ้ายังไม่เต็มให้รับข้อมูลอินพุตต่อไป ถ้าเต็มแล้วให้ทำการคูณค่าข้อมูลด้วย ค่าตัวประกอบการหมุน และกำหนดค่าเริ่มต้นและตำแหน่งของการเก็บข้อมูลชุดใหม่ให้โปรแกรม FFT



เอกสารนี้ระบุที่ 5.1 แผนภาพแสดงการทำงานของโปรแกรมหลักนั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

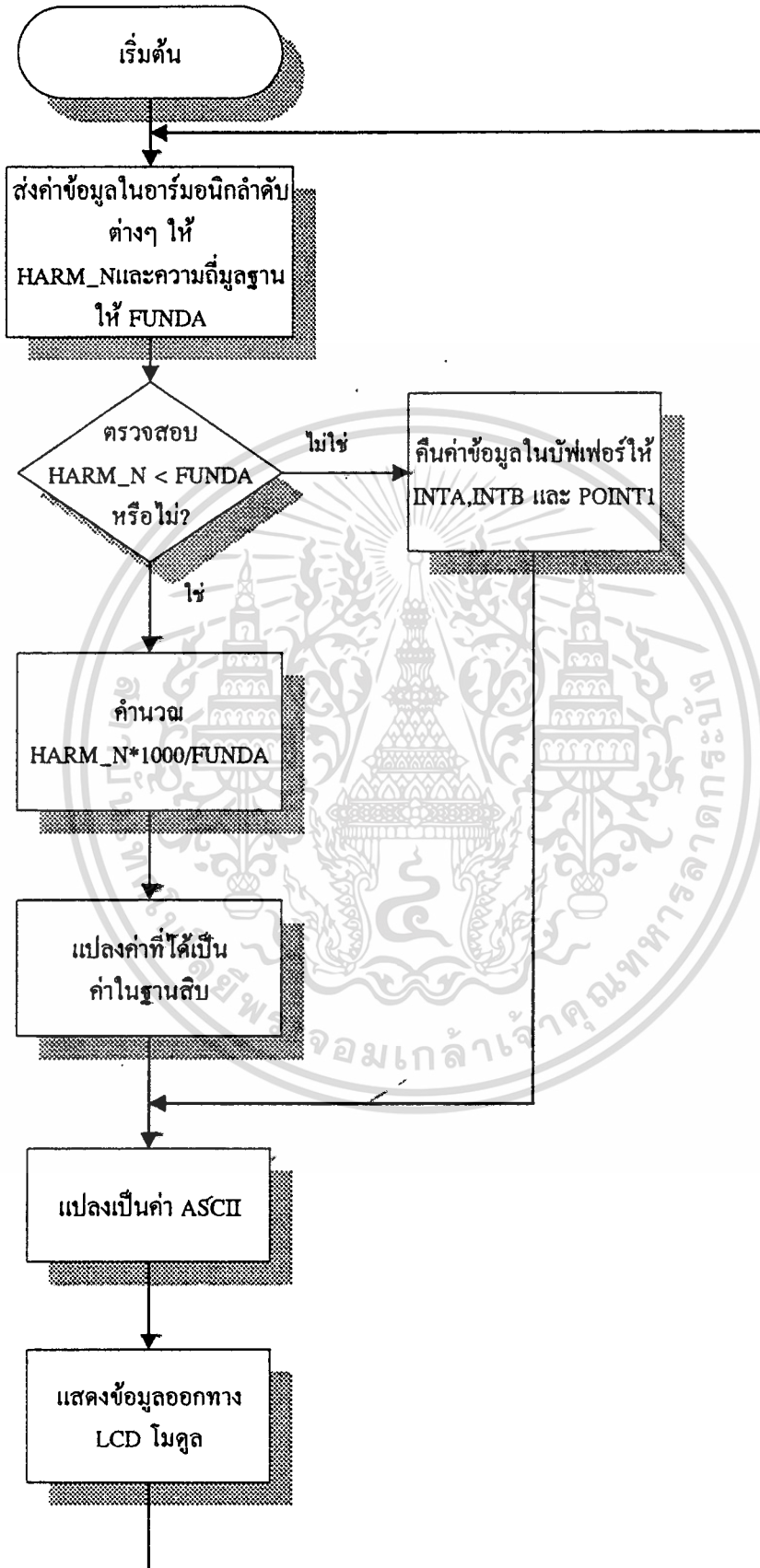


เอกสารรูปที่ 5.2 แสดงแผนภาพขั้นตอน(flow chart)การคำนวณ FFT ของหน่วยประมวลผลขั้นด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.4 ขั้นตอนการประมวลผลเพื่อแสดงผลบน LCD โมดูล

- 1.ส่งค่าข้อมูลในฮาร์โมนิกเลขคี่ และค่าความถี่มูลฐานให้กับตัวแปร
- 2.ตรวจสอบว่า ค่าฮาร์โมนิกมากกว่าค่าความถี่มูลฐาน หรือไม่ ถ้ามากกว่าคืนค่าข้อมูลเดิมให้ตัวแปรที่เก็บข้อมูลตัวเลขในการแสดงผล ถ้าน้อยกว่า ทำขั้นตอนต่อไป
- 3.คูณค่าข้อมูลใน HARM-N ด้วย 1000 เพื่อแสดงผลเป็นเลขทศนิยม 1 หลัก และจำนวนเต็ม 2 หลัก ในรูปของเปอร์เซ็นต์
- 4.หารค่าที่ได้ด้วยความถี่มูลฐานที่เก็บในตัวแปร FUNDA
- 5.แปลงค่าที่ได้เป็นค่าในเลขฐาน 10
- 6.แปลงค่าที่ได้เป็นรหัสแอสกี เพื่อแสดงผลเป็นตัวเลขทาง LCD โมดูล
- 7.แสดงข้อมูลทาง LCD โมดูล
- 8.กลับไปรับข้อมูลฮาร์โมนิก อันดับต่อไป มาประมวลผล และแสดงผลต่อไป





เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.3 แผนภาพขั้นตอนของโปรแกรมการแสดงผลบนLCD โมดูล

บทที่ 6

การใช้ LCD โมดูล ในการแสดงผลสัญญาณ
(LCD MODULE DISPLAY)

ในการใช้ LCD เป็นเครื่องมือในการแสดงผล เนื่องจากสามารถใช้แสดงผลเป็นตัวอักษร และตัวเลขหรือแสดงเป็นกราฟฟิคได้ แต่ในโครงการนี้เราใช้การแสดงผลเป็นตัวเลขและตัวอักษร เท่านั้นหรือที่เรียกว่า DOT MATRIX LCD โดยตัว LCD นั้นกินกระแสต่ำ สามารถต่อใช้งานกับ ระบบไมโคร โปรเซสเซอร์ได้ง่ายและสะดวกสำหรับการเขียน โปรแกรม รวมทั้งมีจำหน่ายกันอย่าง กว้างขวาง และมีราคาที่เหมาะสม

6.1 คุณสมบัติของ DOT MATRIX LCD โมดูล

1. มีให้เลือกหลายรุ่นตามการใช้งาน โดยมีจำนวนตัวอักษรและบรรทัดแตกต่างกัน ไป แต่ ในโปรเจกต์นี้เราเลือกใช้งานรุ่น DMC162 แบบ 16 ตัวอักษร 2 แถว
2. ตัวอักษรแสดงด้วย DOT MATRIX ขนาด 5*8 DOT
3. สามารถต่อเข้ากับระบบ ไมโคร โปรเซสเซอร์ได้ 2 ลักษณะ คือแบบ MEMORY MAP (20 PIN LCD BUS) และแบบผ่าน พอร์ต ในโครงการนี้เราเลือกใช้ ไอซี เบอร์ 74LS374 ต่อเข้า กับ DATA BUS เพื่อต่อให้เป็น พอร์ตข้อมูล ทำให้ข้อมูลที่ส่งจาก ไมโคร โปรเซสเซอร์สามารถค้าง ข้อมูลในการแสดงผลได้
4. การใช้งานง่ายและสะดวก ระบบ ไมโคร โปรเซสเซอร์เพียงแค่ส่งข้อมูลให้กับ LCD โม ดูล เท่านั้น ข้อความก็จะปรากฏบนแผงแสดงผล และจะคงค้างไว้ตลอด ทำให้ไม่ต้องเสียเวลาหลัก ของระบบไมโครโปรเซสเซอร์
5. มีคำสั่งพิเศษสำหรับอำนวยความสะดวกมากมาย เช่น CLEAR DISPLAY, HOME CURSOR, ON OFF CURSOR, BLINK CHARACTER และอื่นๆอีกมากมาย
6. สามารถแสดงผลเป็นตัวอักษรภาษาอังกฤษและตัวเลขได้ 160 ตัว และสัญลักษณ์พิเศษ อีก 32 ตัว รวมทั้งสามารถกำหนดอักษรที่ออกแบบเองได้อีก 8 ตัว
7. กินกระแสต่ำ และมีน้ำหนักเบา รวมทั้งทำงานได้ด้วยไฟเลี้ยงระดับ 5 โวลต์ เท่านั้น

6.2 ขาสัญญาณของ LCD โมดูล

ขา(PIN)	สัญลักษณ์ (SYMBOL)	ระดับ สัญญาณ (LEVEL)	หน้าที่ (FUNCTION)
1	Vss	-----	0 V GND
2	Vcc	-----	+5 V POWER SUPPLY
3	Vee	-----	+V FOR LIQUID CRYSTAL DRIVE
4	RS	H/L	REGISTER SELECT H:DATA INPUT L:INSTRUCTION
5	R/W	H/L	INPUT
6	E	H	H:DATA READ L:DATA WRITE
7	DB08	H/L	ENABLE SIGNAL (L---->H)
8	DB1	H/L	DATA BUS BIT 0
9	DB2	H/L	DATA BUS BIT 1
10	DB3	H/L	DATA BUS BIT 2
11	DB4	H/L	DATA BUS BIT 3
12	DB5	H/L	DATA BUS BIT 4
13	DB6	H/L	DATA BUS BIT 5
14	DB7	H/L	DATA BUS BIT 6 DATA BUS BIT 7

ตารางที่ 6.1 แสดงขาสัญญาณต่างๆของ LCD โมดูล

6.3 หลักการในการเขียนข้อมูลให้ LCD โมดูล

การเขียนข้อมูลให้กับ LCD โมดูล จะแบ่งเป็น 2 ลักษณะ คือ คำสั่ง(INSTRUCTION) และ ข้อมูล(DATA) โดยจะกำหนดด้วยขาสัญญาณ RS คือถ้า $RS = 0$ จะหมายถึงส่งสัญญาณควบคุม(INSTRUCTION) หรืออ่านค่า FLAG สภาพการทำงานของ LCD โมดูล และถ้า $RS = 1$ จะหมายถึงการเขียนหรืออ่าน DATA กับ LCD โมดูล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.หลักการในการเขียนข้อมูลให้ LCD โมดูล นี้ คือเมื่อมีการเขียนข้อมูลไปแล้ว ตัว LCD โมดูล จะต้องใช้เวลาในการทำงานชั่วขณะหนึ่ง (ตามค่า EXECUTE TIME)ซึ่งระบบไมโครโปรเซสเซอร์สามารถตรวจสอบได้จาก BUSY FLAG และถ้าเรียบร้อยแล้วจึงจะสามารถเขียนข้อมูลอันต่อไปได้ ในกรณีที่การต่อวงจรเป็นแบบ I/O พอร์ต คือไม่สามารถอ่านข้อมูลย้อนกลับได้ ระบบไมโครโปรเซสเซอร์จะต้องใช้วิธีการหน่วงเวลาแทน

3.การเขียนข้อมูลให้กับ LCD โมดูล นี้ สามารถทำได้ทั้งแบบ 8 บิต และ 4 บิต โดยกรณี 4 บิต จะใช้สายสัญญาณข้อมูล เพียง 4 เส้น คือ DB4-DB7 ซึ่งใช้สำหรับระบบไมโครโปรเซสเซอร์แบบ 4 บิต หรือเพื่อการประหยัดสาย ในการเขียนข้อมูลจะกระทำเหมือน 8 บิต เพียงแต่ให้เขียน 2 ครั้ง คือ DB4-DB7 ก่อน แล้วตามด้วย DB0-DB3 และจะต้องกำหนดคุณสมบัติตามค่า DL ในคำสั่ง FUNCTION SET ด้วย

4.DDRAM(DISPLAY DATA RAM) คือหน่วยความจำภายในตัว LCD โมดูล ที่เป็นบัฟเฟอร์(BUFFER) ของข้อมูล โดยถ้าเขียนรหัส ASCII ใดๆ ลงไปในหน่วยความจำนี้ ก็จะปรากฏเป็นตัวอักษรที่แสดงผลทันที

5.CGRAM (CHARACTER GENERATOR RAM)คือหน่วยความจำภายในตัว LCD โมดูล สำหรับเก็บภาพตัวอักษรที่ผู้ใช้สามารถสร้างได้เอง (8ตัว) โดยจะอ้าง แอดดเรส(ADDRESS) ได้ทั้งหมด 64 ไบท์(BYTE) คือ 8 ตัวอักษรคูณกับ 8 แถว(ROW)

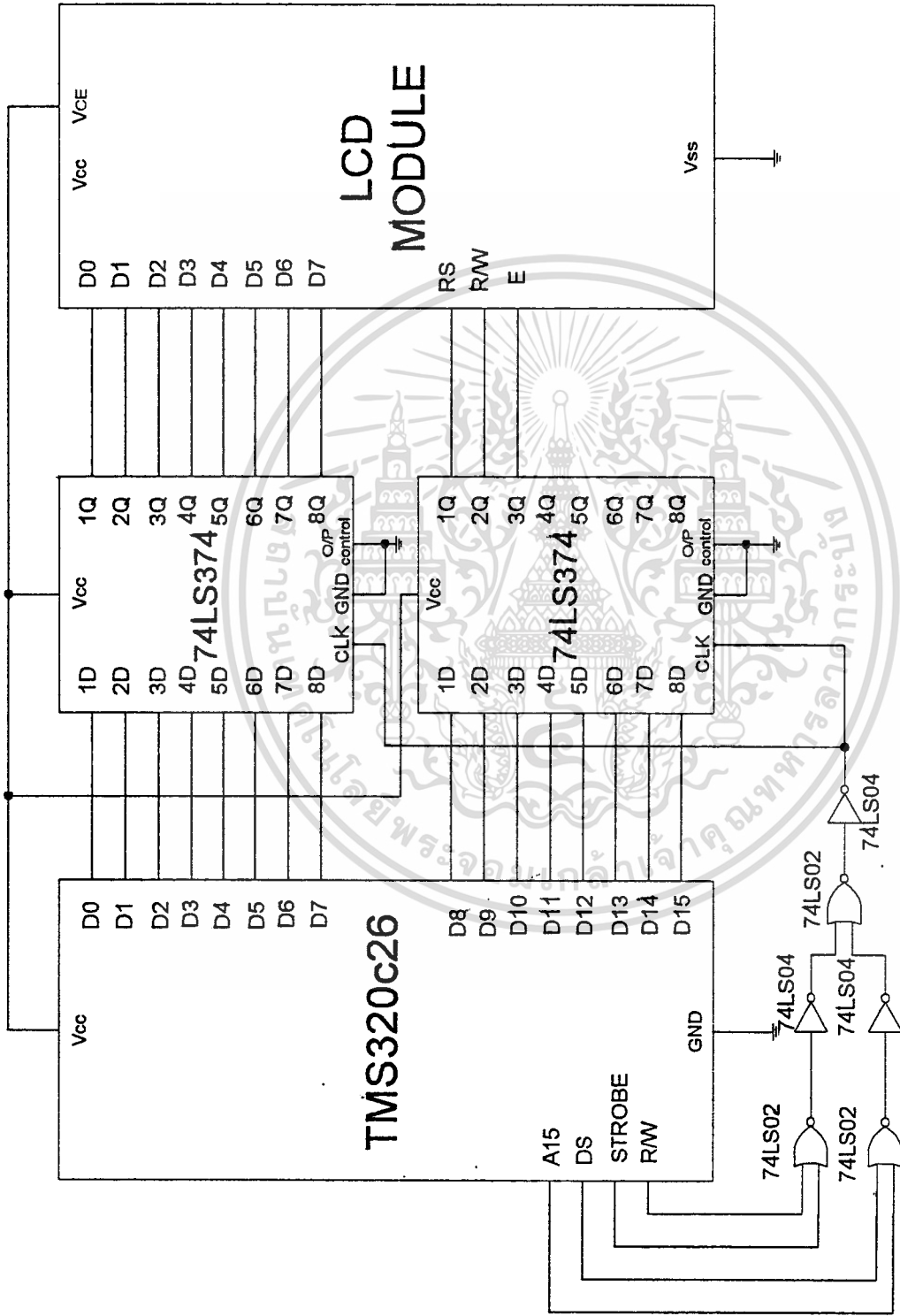
6.4 การต่อ LCD โมดูล เข้ากับ TMS320C26

จากแผนภาพการต่อ LCD โมดูล เข้ากับ TMS 320C26 อธิบายได้ดังนี้

1.บัสข้อมูล(DATA BUS) ของ TMS320C26 จำนวน 16 เส้นคือ DB0-DB15 จะต่อเข้ากับ ไอซี เบอร์ 74LS374 ซึ่งเป็นพอร์ตขนาด 8 บิต เราใช้จำนวน 2 ตัวเพื่อทำให้ บัสข้อมูล ขนาด 16 บิต เป็นพอร์ตขนาด 16 บิต ส่วนสัญญาณแรงดัน 5 โวลต์ ได้จากขา Vcc ของตัวไมโครโปรเซสเซอร์ และขา GROUND และขา OUTPUT CONTROL ต่อเข้ากับขา GND ของตัวไมโครโปรเซสเซอร์เช่นเดียวกัน ส่วนขา CLK ของ ไอซี จะต่อเข้ากับ OUTPUT ของวงจร LOGIC เพื่อเป็นตัวกำหนดการเขียนข้อมูลให้กับ ไอซี เบอร์ 74LS374 และ LCD โมดูล

2.วงจรลอจิกใช้ ไอซี เบอร์ 74LS02 ซึ่งเป็น NOR GATE และ ไอซี เบอร์ 74LS04 ซึ่งเป็น NOT GATE โดยรับสัญญาณอินพุตจากขา STROBE,R/W,DS และ A15 ของไมโครโปรเซสเซอร์เพื่อกำหนดลักษณะการเขียนข้อมูลให้กับพอร์ต

3.ขาสัญญาณอินพุตของ LCD โมดูล จำนวน 10 บิต ถูกต่อเข้ากับขาเอาต์พุตของ ไอซี เบอร์ 74LS374 เพื่อเป็นขาสัญญาณในการติดต่อกับ LCD โมดูล



รูปที่ 6.1 แสดงวงจรการต่อ LCD โมดูล เข้ากับ TMS 320c26

บทที่ 7

ผลการทดลอง

ในการวิเคราะห์สัญญาณอินพุตที่อยู่ในรูปของค่าในแกนเวลาเป็นค่าในแกนความถี่หรือการหาค่าแอมพลิจูดของสเปกตรัมที่ความถี่ต่างๆ โดยใช้โปรแกรม FFT เพื่อแสดงให้เห็นผลของการแสดงผลสัญญาณเอาต์พุตทางด้านดิจิทัลและทางอะนาลอก ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 โหมคดังนี้

1. โหมคการแสดงผลทางออสซิลโลสโคป เพื่อแสดงผลเป็นสัญญาณอะนาลอก
2. โหมคการแสดงผลทาง LCD โมดูล เพื่อแสดงผลเป็นสัญญาณดิจิทัล

7.1 โหมคการแสดงผลทางออสซิลโลสโคป

7.1.1 วิธีการทดลอง

(1) ต่อสาย RS232 ซีเรียลพอร์ต (serial port) เข้ากับ DSK บอร์ด ทางชอคเก็ต DB9

ที่เมียล(female) และต่ออีกด้านหนึ่งของสายสัญญาณเข้ากับพอร์ตสื่อสาร 1 หรือ 2 ของคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการรับส่งข้อมูลกับคอมพิวเตอร์

(2) ป้อนแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ 9 โวลท์ ขนาด 250 มิลลิแอมป์ ทางคอนเนคเตอร์สำหรับไฟเลี้ยงบนบอร์ด

(3) ป้อนสัญญาณอินพุต ไซน์เวฟ(sine wave) และ รูปคลื่นสี่เหลี่ยม(square wave) ที่ความถี่ต่างๆ จากฟังก์ชันเจเนเรเตอร์เข้าทางคอนเนคเตอร์อินพุต (Input Connecto-J1)

(4) ต่อสายเอาต์พุตจากคอนเนคเตอร์เอาต์พุต (Output connector-J2) บนบอร์ดเข้ากับออสซิลโลสโคป เพื่อดูผลสัญญาณเอาต์พุตในรูปของสัญญาณอะนาลอก

(5) เปิดคอมพิวเตอร์และฟังก์ชันเจเนเรเตอร์

(6) กำหนดโหมคของการแสดงผลจากโปรแกรม Complete.asm

```
โดยกำหนดให้ OSCILLOSCOPE .set YES
และ LCDMODULE .set NO
```

(7) ทำการคอมไพล์โปรแกรม Complete.asm ด้วยแอสแซมเบลอร์ DSKA

(8) เรียกคำสั่ง DSKD ml เพื่อเข้าสู่โปรแกรมดีบักเกอร์ สั่งโหลดโปรแกรม

Complete.DSK ลงหน่วยความจำภายในบอร์ด

(9) สั่งให้บอร์ดทำการเอ็กเซคิวต์โปรแกรม

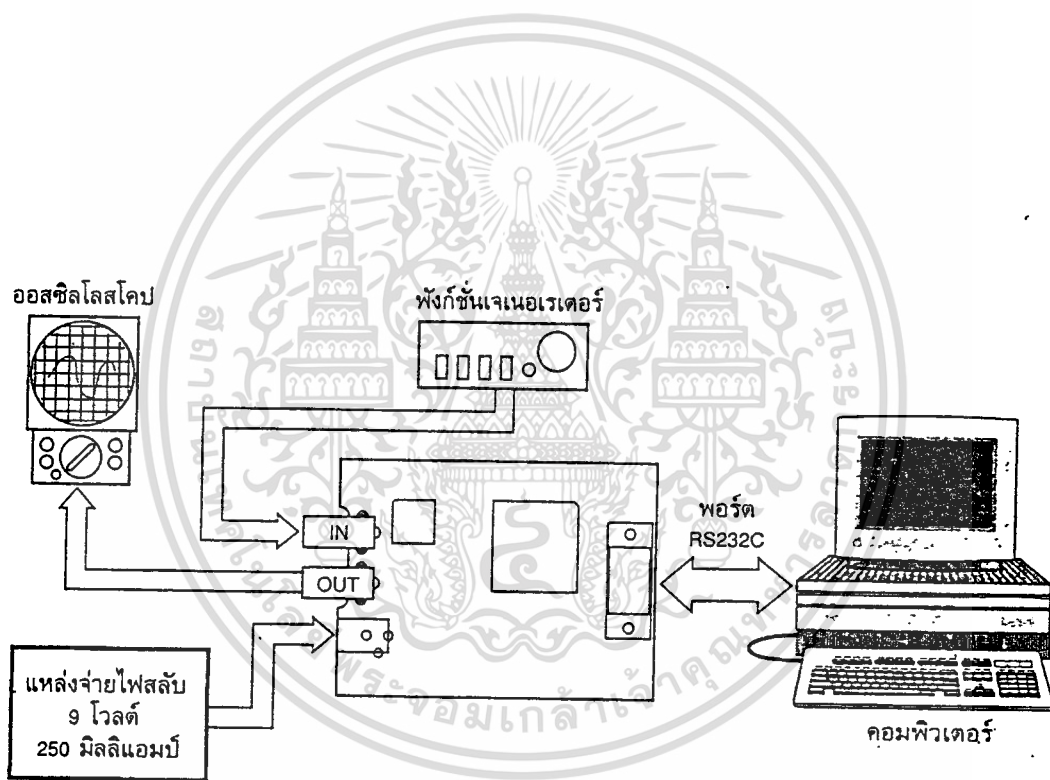
(10) พิจารณากราฟและบันทึกผลที่ได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้ในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุเปลี่ยนแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ

ค่าที่อ่านได้จากออสซิลโลสโคป เป็นค่าที่แสดงโดยการหาค่าลอการิทึม ของขนาดความถี่ของสัญญาณสเปกตรัมที่ได้จากการคำนวณ โปรแกรม FFT จุดประสงค์เพื่อง่ายในการแสดงผลและสามารถดูลักษณะสัญญาณ ได้ละเอียดมากขึ้น

วิธีในการต่อบอร์ดเพื่อทำการเอ็กซ์คิวส์โปรแกรม สามารถแสดงได้ ดังรูปที่ 7.1



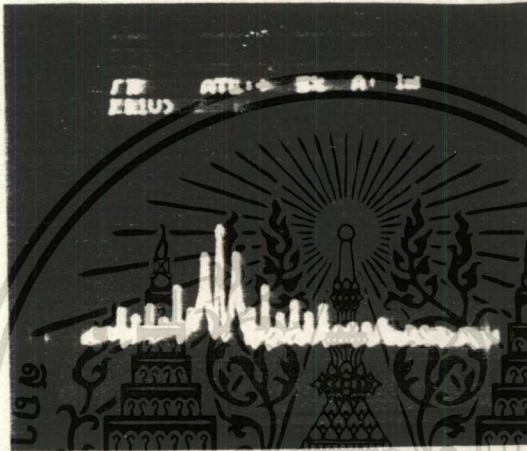
รูปที่ 7.1 การต่อใช้งานบอร์ด DSK

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

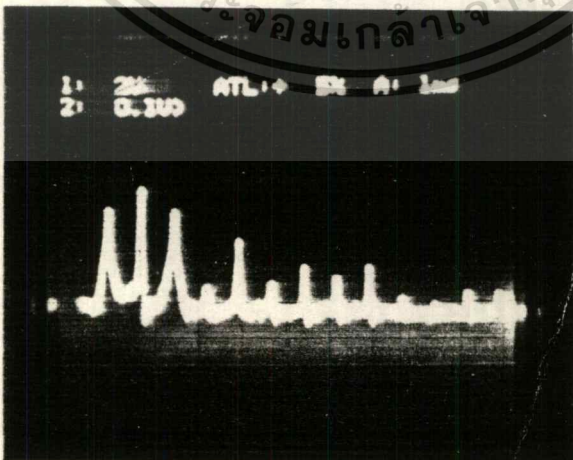
7.1.2 ผลการทดลอง

เมื่อทำการปรับความถี่สัญญาณไซน์ และ รูปคลื่นสี่เหลี่ยม จากฟังก์ชันเจนเนอเรเตอร์และ แสดงผลการวิเคราะห์สัญญาณที่ได้ทางออสซิลโลสโคป สามารถบันทึกผลที่ได้ดังนี้

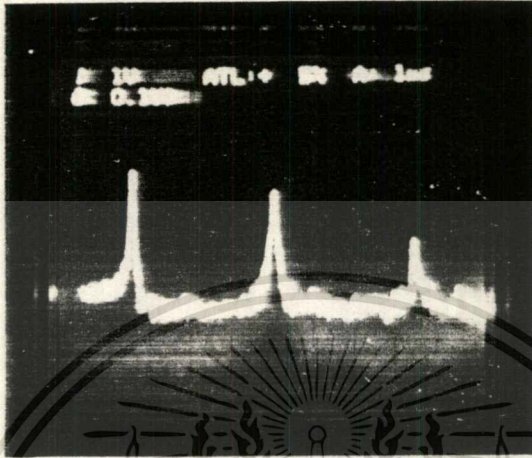
(7.1.2.1) เมื่อป้อนสัญญาณไซน์(Sine Wave) ที่ความถี่ 1 KHz .1.5 KHz และ 10 KHz



รูปที่ 7.2 แสดงสเปกตรัมที่วัดได้จากออสซิลโลสโคป ที่สัญญาณไซน์ความถี่ 1 KHz

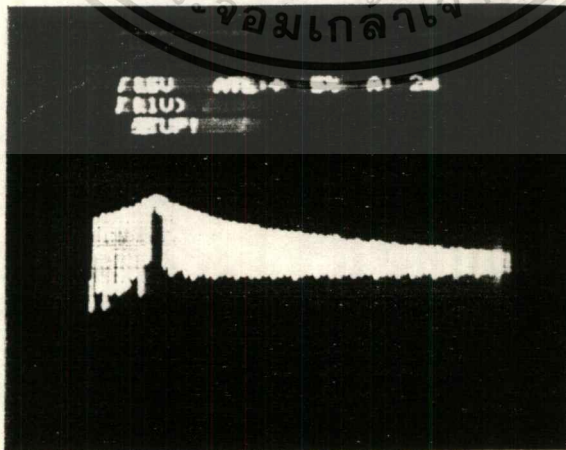


เอกสารรูปที่ 7.3 แสดงสเปกตรัมที่วัดได้จากออสซิลโลสโคป ที่สัญญาณไซน์ความถี่ 1.5 KHz
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.4 แสดงสเปกตรัมที่วัดได้จากออสซิลโลสโคป ที่ความถี่ 10 KHz

(7.1.2.2) ทำการป้อนสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม (Square Wave) ที่ความถี่ 170 KHz



รูปที่ 7.5 แสดงสเปกตรัมที่วัดได้จากออสซิลโลสโคป ที่สัญญาณ รูปคลื่นสี่เหลี่ยม 170 KHz ด้านการคำ
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.1.3 วิเคราะห์ผลการทดลอง

ในการป้อนสัญญาณอินพุทที่มีความถี่ค่าต่างๆ เมื่อทำการปรับความถี่ของสัญญาณอินพุทมากขึ้น จะเห็นได้ว่ายอดคลื่นที่มีค่าแอมพลิจูดสูงสุด จะมีการสไลด์ออกจากแกนกลางออกไปที่ลำดับความถี่ที่สูงขึ้น ทำให้สามารถวิเคราะห์ได้ว่า เมื่อทำการป้อนสัญญาณไซน์ที่ค่าความถี่ต่างๆ สัญญาณสเปกตรัมที่ความถี่นั้นจะมีค่ามากที่สุด ซึ่งสรุปได้ในขั้นต้นว่าโปรแกรมสามารถวิเคราะห์ความถี่ต่างๆ ได้จริงตามความเป็นจริง

จากกราฟรูป 7.6 จะเห็นได้ว่าสัญญาณเอาท์พุทที่ส่งออกจากบอร์ดให้กับออสซิลโลสโคป เมื่อผ่านการประมวลผลสัญญาณอินพุทจากฟังก์ชันเจนเรเตอร์ที่อยู่ในแกนของเวลา เป็นค่าแกนของความถี่ ด้วยโปรแกรม FFT จะได้แถบสเปกตรัมของความถี่บนออสซิลโลสโคป ที่มีผลใกล้เคียงกับกราฟที่วัดได้จากการใช้ สเปกตรัม อะนาไลเซอร์ โดยจะได้ค่าสเปกตรัมของความถี่ฮาร์โมนิกเลขที่ 7 ที่ความถี่ต่างๆออกมา โดยมีขนาดสัญญาณลดลงเรื่อย ๆ เมื่อความถี่มีค่ามากขึ้น ตามกราฟรูปที่ 7.6 ซึ่งผลที่ได้ตรงตามทฤษฎีของการวิเคราะห์สัญญาณด้วยฟาสต์ฟูเรียร์ และตรงกับที่อ่านได้จากสเปกตรัม อะนาไลเซอร์

7.1.4 สรุปผลการทดลอง

ในโหมดของการแสดงผลทางออสซิลโลสโคป เราสามารถวิเคราะห์สัญญาณในแกนเวลาเป็นแกนความถี่ได้ โดยส่งค่าเอาท์พุทที่ได้ให้กับออสซิลโลสโคปและสามารถวิเคราะห์ได้ตลอดย่านความถี่ของการสุ่มข้อมูล ซึ่งจะสังเกตได้จากแถบของสเปกตรัมบนออสซิลโลสโคป แต่มีข้อเสียตรงที่ไม่สามารถอ่านค่าความถี่ที่แน่นอนได้ เนื่องจากข้อจำกัดในการแสดงผลทางออสซิลโลสโคป ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้ ถ้ามีอุปกรณ์ช่วยในการแสดงผลทางหน้าจอ โดยรับข้อมูลเอาท์พุทไปเก็บและนำไปแสดงผลให้ผู้ใช้งานสามารถทราบรายละเอียดได้ง่าย

จากการเปรียบเทียบสัญญาณที่ได้จากออสซิลโลสโคปและสเปกตรัมอะนาไลเซอร์ สามารถสรุปได้อีกอย่างหนึ่งว่า โปรแกรม FFT มีความถูกต้องและสามารถวิเคราะห์สเปกตรัมได้จริง ส่วนจะมีความละเอียดในการวิเคราะห์มากน้อยเพียงใด ขึ้นกับความสามารถของบอร์ดในรุ่นต่างๆ จำนวนจุดในการวิเคราะห์และอัตราการสุ่มข้อมูลของอะนาล็อก อินเตอร์เฟส เซอร์กิต โดยสามารถกำหนดได้ตามลักษณะโครงสร้างของบอร์ดรุ่นนั้นๆ

7.2 โหมดการแสดงผลทาง LCD โมดูล

7.2.1 วิธีการทดลอง

(7.2.1.1) ต่อ RS232 serial port เข้ากับ DSK บอร์ด ทางขอกเกิด DB9 female และอีกด้านของสายสัญญาณให้ต่อเข้ากับพอร์ตสื่อสาร 1 หรือ 2 ของคอมพิวเตอร์เพื่อใช้ในการรับส่งข้อมูลกับคอมพิวเตอร์

(7.2.1.2) ป้อนแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ 9 โวลต์ ขนาด 250 มิลลิแอมป์ ทางคอนเนคเตอร์สำหรับเป็นไฟเลี้ยงบนบอร์ด

(7.2.1.3) ป้อนสัญญาณอินพุตความถี่ 50 Hz square wave จากฟังก์ชันเจเนเรเตอร์เข้าทางคอนเนคเตอร์อินพุต (input connector-J1)

(7.2.1.4) เปิดคอมพิวเตอร์และฟังก์ชันเจเนเรเตอร์

(7.2.1.5) ทดลองโปรแกรมแสดงผลทาง LCD โมดูล โดยแบ่งการทดลองโปรแกรมออกเป็น 3 ตอนด้วยกันคือ

-ทดลองโปรแกรมหาค่ารากของเลขฐานสองขนาด 32 บิต

-ทดลองโปรแกรมการหาค่าเปอร์เซ็นต์ฮาร์มอนิก และการแสดงผลทาง LCD โมดูล โดยกำหนดค่าเริ่มต้นใดๆ ให้ตัวแปร

-รวมโปรแกรม FFT ,โปรแกรมการหาค่าราก และโปรแกรมในการแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ เป็นโปรแกรมในการวิเคราะห์ความถี่โดยแสดงผลทาง LCD โมดูล

(7.2.1.6) กำหนดโหมดในการแสดงผลทาง LCD โมดูล จากโปรแกรมหลัก และทำการประมวลผลสัญญาณ ซึ่งสามารถทำได้ดังนี้

OSCILLOSCOPE .set NO

LCDMODULE .set YES

(7.2.1.7) ทำการบันทึกผลการทดลองโปรแกรมทั้ง 3 ส่วนและบันทึกผลที่ได้

(7.2.1.8) วิเคราะห์และสรุปผลการทดลอง



รูปที่ 7.8 แสดงการต่อบอร์ดเพื่อแสดงผลในโหมด LCD โมดูล

7.2.2 การทดลองโปรแกรมหาค่ารากของเลขฐานสอง ขนาด 32 บิต

ผลการทดลอง

ลำดับที่	ค่าที่กำหนดให้หาค่าราก ภายในแอสกีมูเรเตอร์	ค่าที่คำนวณได้ จากเครื่องคิดเลข	ค่าที่อ่านได้ จากการทำโปรแกรม
1	45B533E4h	8596h	8596h
2	11373249h	4263h	4263h
3	014BA364h	1236h	1236h
4	79000000h	B000h	B000h
5	37C1B731h	7779h	7779h
6	572C6449h	9563h	9563h
7	7918C144h	3012h	3012h
8	27F4A2C9h	6523h	6523h
9	49AD28E0h	8956h	8956h
10	6F053754h	A896h	A896h
11	5C283D71h	9999h	9999h
12	719A3D48h	AA89h	AA88h
13	656D0AC9h	A123h	A123h
14	0B89AAF1h	3659h	3659h

ตารางที่ 7.1 แสดงผลจากการหาค่ารากของเลข 32 บิต

สรุปผลการทดลอง

เมื่อทำการป้อนค่าใดๆ ให้กับแอสกีมูเรเตอร์ ทางโปรแกรมดีบั๊กเกอร์ และทำการเอ็กซีคิวต์โปรแกรมดังกล่าว สามารถทำการหาค่ารากของเลขฐานสอง ขนาด 32 บิต ได้ถูกต้องเมื่อเทียบกับการคำนวณโดยใช้เครื่องคิดเลข จึงสรุปได้ว่าโปรแกรมการหาค่ารากถูกต้อง และสามารถหาค่ารากใดๆ ได้ตามต้องการ

7.2.3 การทดลองโปรแกรมหาค่าเปอร์เซ็นต์ฮาร์มอนิกและแสดงผลทาง LCD โมดูล

โปรแกรมที่ใช้สามารถดูได้จากภาคผนวก ข. ในโปรแกรมย่อย Display.asm โดยการกำหนดค่าเริ่มต้นให้กับตัวแปรต่างๆ และอ่านผลที่อ่านได้จาก LCD โมดูล

ผลการทดลอง

ชื่อข้อมูลบัพเฟอว์	ข้อมูลที่กำหนด		เปอร์เซ็นต์ที่ได้ จากเครื่องคิดเลข	เปอร์เซ็นต์ที่ได้จาก LCD โมดูล
FUNDA	7DD0h	32208d	100	100
HAR03	5692h	22162d	68.8	68.8
HAR05	0123h	291d	00.9	00.9
HAR07	0E46h	3654d	11.3	11.3
HAR09	4A56h	19030d	59.0	59.0
HAR11	0489h	1161d	03.6	03.6
HAR13	0036h	54d	00.1	00.1
FUNDA	FB68h	64360d	100	100
HAR03	B781h	46977d	72.9	72.9
HAR05	0A00h	2560d	03.9	03.9
HAR07	0999h	2457d	03.8	03.8
HAR09	CDEBh	52715d	81.9	81.9
HAR11	0569h	1385d	02.1	02.1
HAR13	E001h	57345d	89.1	89.1
FUNDA	4690h	18064d	100	100
HAR03	0B59h	2937d	16.2	16.2
HAR05	0114h	276d	01.5	01.5
HAR07	2EFFh	12031d	66.6	66.6
HAR09	4003h	16387d	90.7	90.7
HAR11	2698h	9880d	54.6	54.6
HAR13	0653h	1619d	08.9	08.9

เอกสารนี้ร่างที่ 7.2 แสดงข้อมูลที่ได้อีกการแสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์ฮาร์มอนิกทาง LCD โมดูลขึ้นด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อทำการกำหนดค่าความถี่มูลฐานและค่าฮาร์โมนิกส์ต่างๆให้กับตัวแปรในโปรแกรมหลัก และทำการเอ็กซิคิวต์โปรแกรม โปรแกรมจะทำการหาค่าเปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิกส์ลำดับต่างๆ โดยมีสูตรดังนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิก} = \frac{\text{ขนาดที่ความถี่ฮาร์โมนิก (magnitude of harmonic component)} \times 100}{\text{ขนาดที่ความถี่หลักมูล(magnitude of fundamental component)}}$$

ผลที่คำนวณได้จะส่งออกแสดงผลทาง LCD โมดูล โดยแสดงค่าที่ละ 2 ลำดับฮาร์โมนิกจำนวน 3 หลัก โดยทำการวนลูบในการแสดงผลไปเรื่อยๆ โดยค่าที่ได้ถูกต้องตาม เมื่อเทียบกับการคำนวณด้วยเครื่องคิดเลข จึงสรุปได้ว่า โปรแกรมย่อยส่วนนี้สามารถหาค่าเปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิกและการแสดงผลทาง LCD โมดูล ถูกต้องตามค่าที่กำหนดไว้ในตัวแปร

7.2.4 การทดลองโปรแกรมแสดงผลทาง LCD โมดูลทั้งหมด

โดยการรวมโปรแกรมในการหาค่าเปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิกและแสดงผลทาง LCD เข้ากับโปรแกรม FFT เพื่อนำผลที่ได้แสดงออกทาง LCD โมดูล แทนการแสดงผลทางออสซิลโลสโคป และแทรกโปรแกรมการหาค่าราก แทนโปรแกรมส่วนการหาค่าลอการิทึมฐานสอง จะได้ค่าแอมพลิจูดจริงๆ ของสัญญาณสเปกตรัม เพื่อนำไปใช้หาค่าเปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิกและแสดงผลทาง LCD โมดูลต่อไป

ผลการทดลอง

ครั้งที่	HAR 03	HAR 05	HAR 07	HAR09	HAR 11	HAR 13
1	72.3	67.6	67.3	42.0	84.6	22.3
2	49.9	43.5	63.2	11.3	17.6	66.6
3	36.5	65.3	12.6	49.9	56.3	49.6
4	23.3	04.3	43.8	77.8	54.1	38.9
5	33.5	37.8	49.6	09.8	36.5	56.3
6	45.6	0.00	99.7	41.6	46.8	14.7
7	01.2	0.32	25.6	06.5	01.3	14.6
8	75.3	14.6	25.6	65.4	32.1	49.8
9	44.6	15.6	35.1	02.3	11.0	36.5
10	53.3	93.5	10.6	20.1	74.2	11.3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนตัวร่างที่ 7.3 แสดงค่าที่อ่านได้จาก LCD โมดูล ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่อวัดค่าที่อ่านได้เทียบกับค่าที่บันทึกได้จาก สเปกตรัม อะนาไลเซอร์



รูปที่ 7.9 ค่าที่อ่านได้จาก สเปกตรัม อะนาไลเซอร์

HAR 03	HAR 05	HAR 07	HAR09	HAR 11	HAR 13
87.1	76.8	81.0	67.6	57.5	50.6

ตารางที่ 7.4 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ฮาร์มอนิกลำดับที่จาก สเปกตรัม อะนาไลเซอร์

สรุปผล

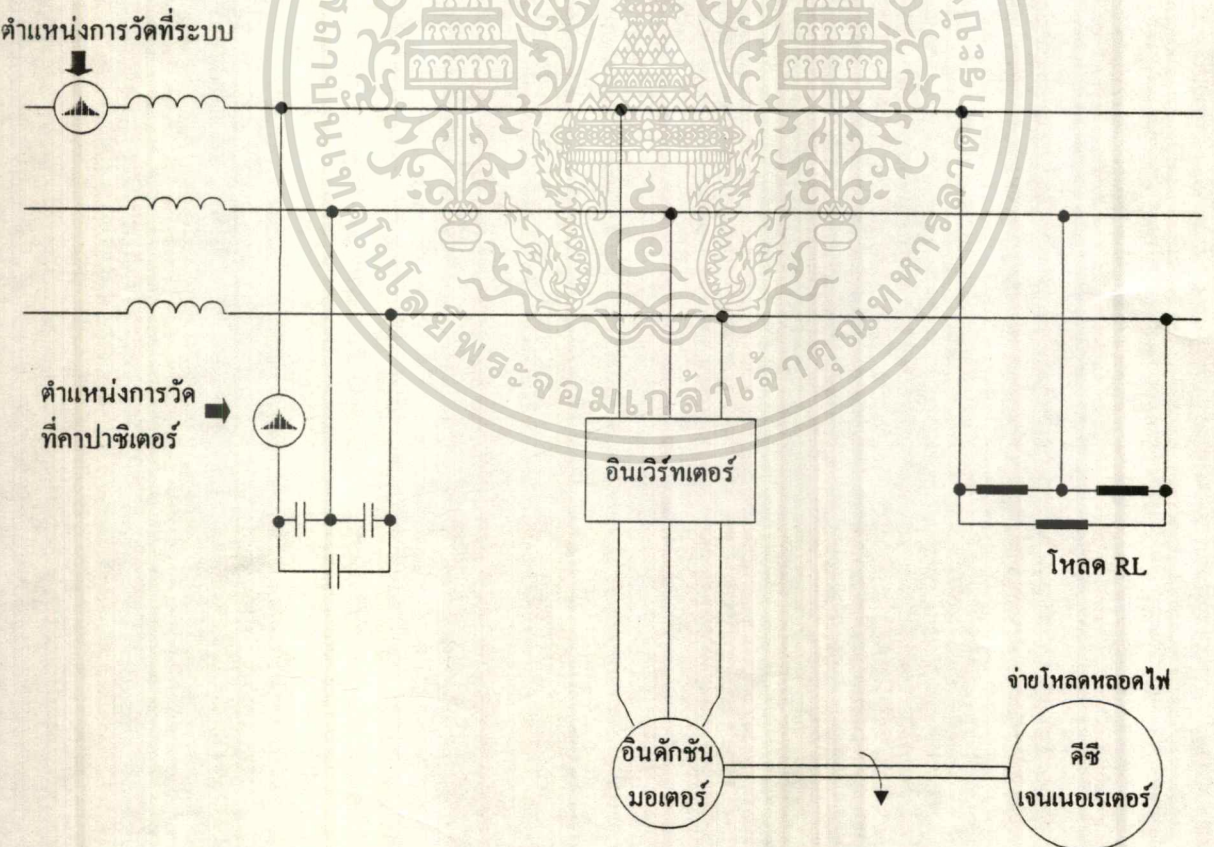
ค่าที่สามารถอ่านได้จาก LCD โมดูล ยังไม่สามารถคำนวณได้แม่นยำเหมือนที่วัดได้ใน สเปกตรัม อะนาไลเซอร์ ยังมีความคลาดเคลื่อนในการแสดงผล เนื่องมาจากข้อจำกัดทางด้านการทำงานของบอร์ด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.3 โหมคการแสดงผลทางออสซิลโลสโคป โดยทำการวัดสัญญาณกับโหลดจริง

7.3.1 วิธีการทดลอง

- (1) ต่อวงจรอินเวอร์เตอร์ขับอินคักชั่นมอเตอร์ โดยที่อินคักชั่นมอเตอร์เป็นต้นกำลังให้กับ คีซี เจนเนอเรเตอร์ และคีซี เจนเนอเรเตอร์ทำการต่อกับโหลดหลอดไฟ ต่ออินคักเตอร์เข้ากับระบบ เพื่อทำการวัดสัญญาณเปรียบเทียบกับ ในสถานะที่ไม่มีอินคักเตอร์ต่อกับระบบ
- (2) ต่ออินพุทของวงจรถลตอนแรงดันเข้ากับอินพุทของระบบ และที่ตำแหน่งเทอร์มินอลของคาปาซิเตอร์ เพื่อเป็นสัญญาณอินพุทให้กับบอร์ด DSK
- (3) ต่อวงจรส่วนลทตอนแรงดัน และวงจรไฟเลี้ยง เข้ากับบอร์ด
- (4) ต่อเอาท์พุทของบอร์ดเข้ากับออสซิลโลสโคป เพื่อทำการแสดงผลในโหมคนี้
- (5) ต่อสาย RS232 ซีเรียลพอร์ท เข้ากับคอมพิวเตอร์ทางคอนเนคเตอร์ DB9
- (7) ทำการเอ็คซิกิวส์โปรแกรมใน โหมคการแสดงผลทางออสซิลโลสโคป
- (8) บันทึกผลการทดลอง

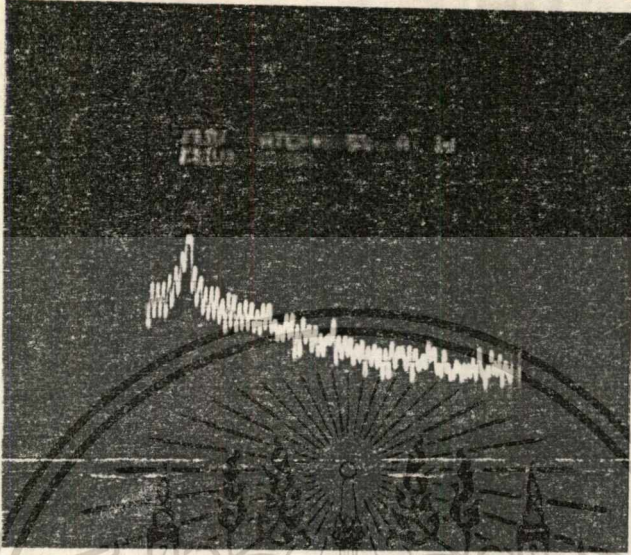


รูปที่ 7.10 แสดงการต่อวงจรทดลอง เพื่อทำการวัดสัญญาณกับ โหลดจริง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

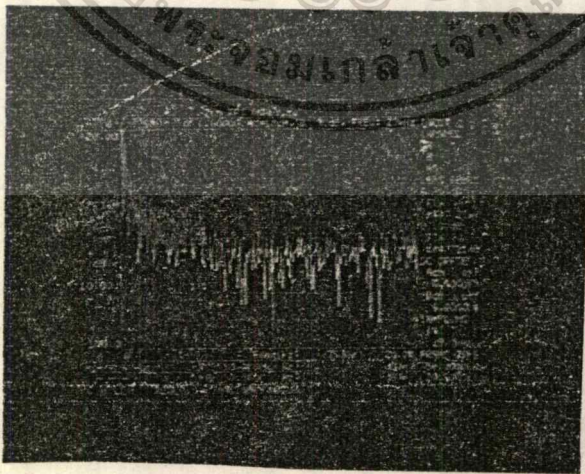
7.3.2 ผลการทดลอง

1. ทำการต่ออินคัลเตอร์เข้ากับระบบ และวัดสัญญาณอินพุทที่ระบบ



รูปที่ 7.11 แสดงสัญญาณที่วัดได้จากออสซิลโลสโคป
เมื่อต่ออินคัลเตอร์เข้ากับระบบและวัดสัญญาณที่ระบบ

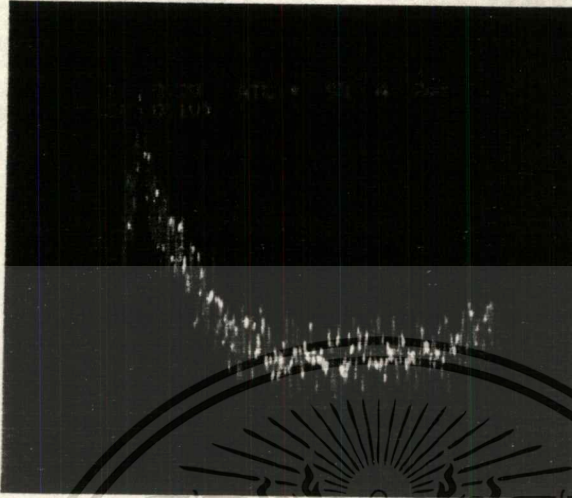
เมื่อทำการวัดสัญญาณเทียบกับ สเปกตรัม อะนาไลเซอร์ ได้ดังรูป



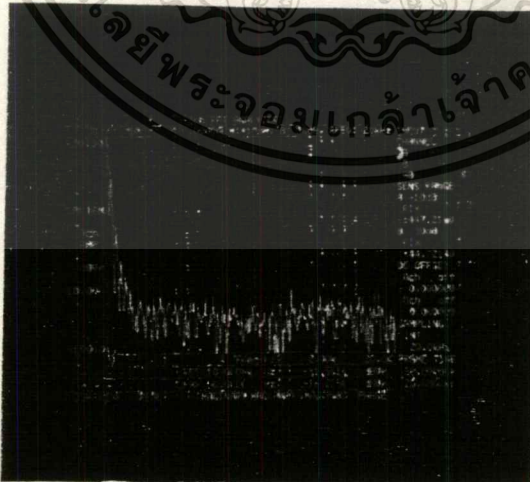
รูปที่ 7.12 แสดงสัญญาณที่วัดได้จาก สเปกตรัม อะนาไลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่ดัดแปลงโดยต่ออินคัลเตอร์เข้ากับระบบและวัดสัญญาณที่ระบบ ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. ทำการต่ออินคัลเตอร์และวัดสัญญาณอินพุทที่คาปาซิเตอร์



รูปที่ 7.13 แสดงสัญญาณที่วัดได้โดยออสซิลโลสโคป
เมื่อต่ออินคัลเตอร์เข้ากับระบบและวัดสัญญาณที่คาปาซิเตอร์
เมื่อทำการวัดสัญญาณเทียบกับ สเปกตรัม อะนาไลเซอร์ ได้ดังรูป

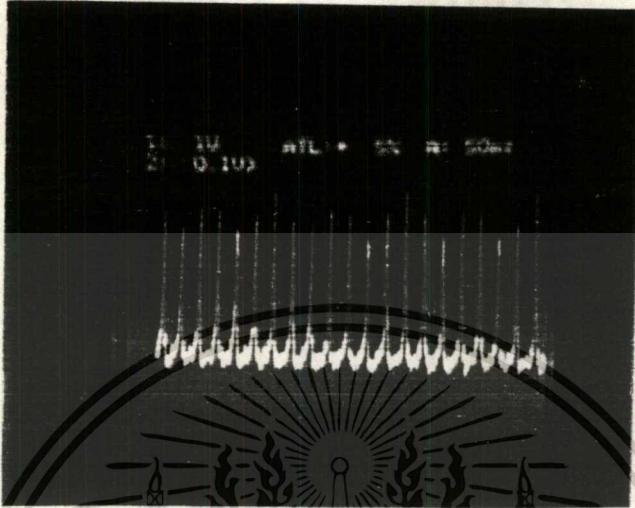


รูปที่ 7.14 แสดงสัญญาณที่วัดได้จาก สเปกตรัม อะนาไลเซอร์

โดยต่ออินคัลเตอร์เข้ากับระบบและวัดสัญญาณที่คาปาซิเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

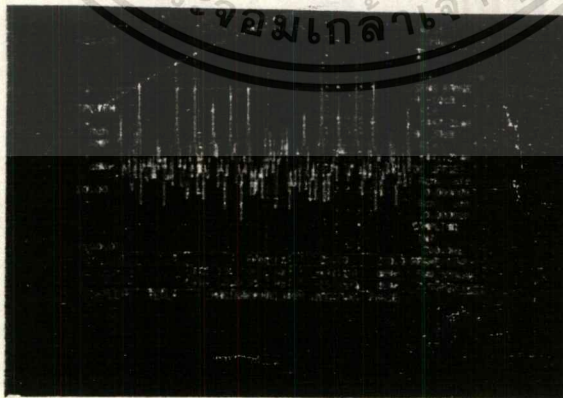
3. วัดสัญญาณอินพุตที่ระบบ โดยไม่มีการต่ออินเตอร์คัทเตอร์เข้ากับระบบ



รูปที่ 7.15 แสดงสัญญาณที่วัดได้โดยออสซิลโลสโคป

เมื่อไม่มีการต่ออินเตอร์คัทเตอร์กับระบบและวัดสัญญาณที่ระบบ

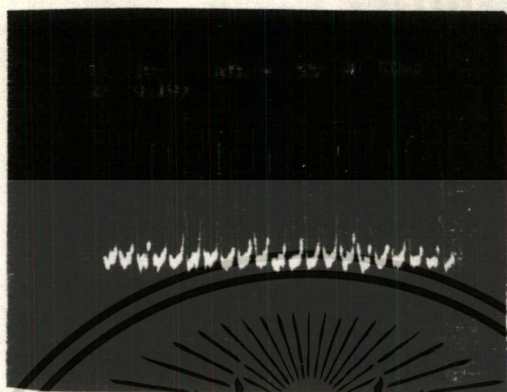
ทำการวัดสัญญาณเทียบกับ สเปกตรัม อะนาไลเซอร์ ได้ดังรูป



รูปที่ 7.16 แสดงสัญญาณที่วัดได้จาก สเปกตรัม อะนาไลเซอร์

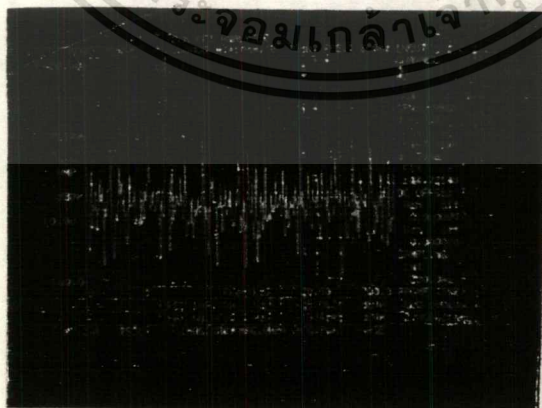
เอกสารนี้เป็นเอกสารโดยไม่ต่ออินเตอร์คัทเตอร์กับระบบและทำการวัดสัญญาณที่ระบบ หน้าไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. วัดสถัญญานอินทอยู่ที่คาปาซิเตอร์ โดยไม่มีการต่ออินคค์เคอร์เข้ากับระบบ



รูปที่ 7.17 แสดงสัญญาณที่วัดได้โดยออสซิลโลสโคป

เมื่อไม่มีการต่ออินคค์เคอร์เข้ากับระบบและวัดสัญญาณที่คาปาซิเตอร์
ทำการวัดสัญญาณเทียบกับ สเปกตรัม อะนาไลเซอร์ ได้ดังรูป



รูปที่ 7.18 แสดงสัญญาณที่วัดได้จาก สเปกตรัม อะนาไลเซอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารเมื่อไม่มีการต่ออินคค์เคอร์เข้ากับระบบและวัดสัญญาณที่คาปาซิเตอร์ ใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการทดลอง

เมื่อทำการต่อโหลดจริง โดยทำการต่อวงจรอินเวอร์เตอร์เข้ากับ ดีซี เจเนอเรเตอร์ และทำการขับโหลดของ ดีซี เจเนอเรเตอร์ ด้วยหลอดแสงสว่างและทำการวัดสัญญาณอินพุทเมื่อมีการต่ออินดักเตอร์และไม่มีการต่ออินดักเตอร์เข้ากับระบบ และทำการวัดสัญญาณอินพุทที่ระบบ และที่เทอร์มินอลของคาปาซิเตอร์ โดยสัญญาณอินพุทที่ได้เป็นค่าแอมพลิจูดของกระแสในสายเมนสัญญาณอินพุทที่ได้จะผ่านวงจรลดทอนแรงดัน เพื่อลดทอนแรงดันให้อยู่ในระดับไม่เกินพิกัดสัญญาณอินพุทของบอร์ดที่สามารถจะรับได้ โดยปกติมีค่าไม่เกิน 3 โวลต์ และทำการเอ็ชชีควิสโปรแกรมในโหมดการแสดงผลทางออสซิลโลสโคปในโปรแกรมวิเคราะห์ FFT สัญญาณที่ทำการวิเคราะห์ได้เมื่อเปรียบเทียบกับ สเปกตรัม อะนาไลเซอร์ ลักษณะของกราฟที่ได้มีลักษณะใกล้เคียงกันมาก ดังรูปข้างต้น จึงสามารถสรุปได้ว่าบอร์ดสามารถทำการวิเคราะห์สัญญาณจากระบบจริงๆ



บทที่ 8

สรุปและวิจารณ์

8.1 สรุปผลการทดลอง

8.1.1 โหมดการแสดงผลทางออสซิลโลสโคป

ในการคำนวณในโหมดการแสดงผลทางออสซิลโลสโคป สามารถทำการวัดสัญญาณทางด้านอินพุต และวิเคราะห์หาสเปกตรัมความถี่ เพื่อนำไปแสดงผลทางออสซิลโลสโคป สามารถทำการแสดงผลได้ตรงตามหลักการวิเคราะห์สัญญาณดิจิทัล และเมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้กับสเปกตรัม อะนาไลเซอร์ ผลที่ได้มีลักษณะกราฟสเปกตรัมที่ได้ใกล้เคียงกันมาก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการแสดงผลในโหมดนี้ทำงานได้ดีมาก และมีความถูกต้อง แต่มีข้อจำกัดในการแสดงผลกับออสซิลโลสโคปตรงที่ว่าไม่สามารถแสดงสเกลค่าสเปกตรัมที่ความถี่ ที่แน่นอนได้ ซึ่งถ้าได้มีการพัฒนาส่วนการแสดงผลสัญญาณ โดยใช้อุปกรณ์ภายนอกช่วยในการแสดงค่าสเกลของสัญญาณ โดยนำค่าสัญญาณเอาท์พุท ไปทำการแสดงผลในรูปแบบที่สามารถอ่านค่าได้โดยง่าย ซึ่งควรทำงานเป็นอิสระ และมีบัฟเฟอร์สำหรับเก็บข้อมูลได้มากด้วย

8.1.2 โหมดการแสดงผลทาง LCD โมดูล

โปรแกรม FFT ที่ได้ทำการตรวจสอบแล้วว่าสามารถแสดงผลทางสเปกตรัมได้ถูกต้อง จากโหมดการแสดงผลทางออสซิลโลสโคป และได้ทำการเพิ่มเติมโปรแกรมย่อยบางส่วนเพื่อเปลี่ยนค่าที่ได้เป็นแอมพลิจูดของค่าความถี่ต่างๆและแสดงผลทาง LCD โมดูล โดยได้ทำการ ทดสอบโปรแกรมย่อยต่างๆ เช่น การหาค่าราก การหาเปอร์เซ็นต์ฮาร์มอนิก และการแสดงผลทาง LCD โมดูล ซึ่งได้ทำการทดสอบแล้วว่าสามารถทำงานได้ถูกต้องจริง และเมื่อนำโปรแกรมทั้งหมดมารวมกันเพื่อวิเคราะห์สัญญาณอินพุตในค่าของแกนทางเวลา เป็นค่าเปอร์เซ็นต์ฮาร์มอนิก โปรแกรมสามารถงานในการแสดงผลได้ตามที่ต้องการ โดยมีการวนรูปของการแสดงผลได้ถูกต้องเมื่อเทียบกับการทดลองในส่วนของโปรแกรมย่อย แต่เมื่อเปรียบเทียบค่าที่อ่านได้กับสเปกตรัม อะนาไลเซอร์แล้ว ค่าที่ได้ยังไม่ตรงกัน และค่าที่อ่านได้มีการเปลี่ยนแปลงตลอดในรูปของการแสดงผล ซึ่งสามารถอธิบายสาเหตุของความผิดพลาดในการแสดงค่าของ LCD โมดูล ในหัวข้อต่อไป

8.2 ปัญหาที่พบและสาเหตุของความผิดพลาดในการแสดงผล

ในโหมดของการแสดงผลทาง LCD โมดูล ยังมีความคลาดเคลื่อนในการแสดงผล โดยพบว่าค่าที่อ่านได้ยังไม่ถูกต้อง และมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ซึ่งในการแสดงผลแต่ละครั้งค่าที่ได้จะมีความแตกต่างกัน โดยได้ทำการวิเคราะห์สาเหตุที่การแสดงผลในโหมดนี้มีความคลาดเคลื่อนโดยสรุปได้ดังนี้

(1) ในการแสดงผลเป็นเปอร์เซ็นต์ฮาร์มอนิกทาง LCD โมดูล เป็นการนำเอาค่า ฮาร์โมนิกลำดับที่ มาหารด้วยค่าความถี่มูลฐาน และคูณด้วย 100 เพื่อทำเป็นเปอร์เซ็นต์ การหาค่าและแสดงผลจะมีความถูกต้อง เมื่อเรากำหนดค่าต่างๆ ให้ตัวแปร โปรแกรมสามารถแสดงค่าเปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิกได้ถูกต้องเมื่อเปรียบเทียบกับกรคิดด้วยเครื่องคิดเลข แต่เมื่อนำไปวัดกับสัญญาณอินพุทที่รับเข้ามาจริง ถ้าความถี่มูลฐานของสัญญาณอินพุทไม่ตรงกับที่กำหนดไว้ในโปรแกรม ที่ทำการเซตค่าไว้ที่ความถี่มูลฐาน 50 Hz ค่าที่นำไปแสดงทาง LCD โมดูลจะเกิดความคลาดเคลื่อนขึ้น ซึ่งจะเห็นได้ว่าการแสดงผลในโหมดนี้มีข้อจำกัดค่อนข้างมาก

(2) ข้อจำกัดทางด้านหน่วยความจำ เนื่องจาก TMS320C26 มีหน่วยความจำโปรแกรมและหน่วยความจำข้อมูลน้อย ทำให้เราไม่สามารถคำนวณจำนวนจุดของ FFT ได้มากนัก ดังนั้นความถี่ที่เราสามารถคำนวณได้จึงค่อนข้างจำกัดค่าความถี่ ทำให้การประมวลผลเป็นเปอร์เซ็นต์ฮาร์โมนิกมีขีดจำกัด ซึ่งสามารถแก้ปัญหานี้ได้โดยใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ที่มีหน่วยความจำภายในมากขึ้น ในรุ่นที่สูงขึ้น

(3) ข้อจำกัดทางด้านโปรแกรมและความเร็วในการคำนวณ เมื่อทำการแสดงผลทางออสซิลโลสโคป ในส่วนของโปรแกรม FFT สามารถคำนวณได้เสร็จเร็วกว่าที่ข้อมูลในบัฟเฟอร์ที่รับเข้ามาทางอินพุทจะเต็ม ทำให้การรับสัญญาณอินพุทเพื่อนำไปคำนวณมีความต่อเนื่อง ซึ่งจะไม่มีการขาดข้อมูลอินพุทส่วนใดหายไป แต่เมื่อทำการแสดงผลทาง LCD โมดูล ปัญหาเกิดตรงที่ว่าเมื่อทำการคำนวณ FFT เสร็จแล้ว จะต้องไปทำโปรแกรมน้อยในส่วนของการแสดงผลทาง LCD โมดูล โดยจะต้องหน่วงเวลาในการแสดงผลให้ผู้ใช้สามารถสังเกต ตามลักษณะการทำงานของ LCD โมดูลเอง และเนื่องจากจำนวนข้อมูลที่จะต้องนำไปแสดงผลมีหลายค่า เมื่อรวมเวลาทั้งหมดในการแสดงผล จะเห็นได้ว่าใช้เวลาในการทำงานค่อนข้างนาน ดังนั้นเมื่อส่วนของโปรแกรมที่รับข้อมูลอินพุทรับข้อมูลมาเก็บในบัฟเฟอร์เต็มแล้ว แต่ยังต้องรอให้การแสดงผลทาง LCD โมดูล ทำเสร็จก่อนถึงจะสามารถรับข้อมูลชุดใหม่เข้ามาได้เพื่อไม่ให้เกิดการทับกับข้อมูลชุดเดิม ทำให้ข้อมูลอินพุทบางส่วนหายไป ในขณะที่ต้องรอเวลาในการรับข้อมูล ส่งผลให้การคำนวณ FFT ในครั้งต่อไปมีความผิดพลาดทางด้านข้อมูลอินพุทเริ่มต้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

8.3 เปรียบผลจากการแสดงผลทั้ง 2 โหมดและข้อเสนอแนะ

ในการทดลองโดยแสดงผลทางออสซิลโลสโคปจะสามารถแสดงผลได้ถูกต้องมากกว่าการแสดงผลทาง LCD โมดูล ซึ่งในโหมด LCD โมดูลนั้นมีข้อจำกัดในการแสดงผลค่อนข้างมาก โดยในการแสดงผลทางออสซิลโลสโคปสามารถวิเคราะห์สัญญาณสเปกตรัมได้จริง ซึ่งสามารถดูสัญญาณสเปกตรัมโดยรวมได้ถูกต้องตามทฤษฎีของการเกิด FFT และเทียบผลที่ได้ สเปกตรัม อะนาไลเซอร์ แต่เนื่องจากการแสดงผลทางออสซิลโลสโคปไม่สามารถอ่านค่าที่ความถี่ใดๆ ได้ชัดเจน ดังนั้นในการใช้งานโหมดของการแสดงผลทางออสซิลโลสโคปนี้ เหมาะในการนำไปใช้เพื่อวิเคราะห์สัญญาณสเปกตรัมโดยรวม ทำให้สามารถทราบว่าความถี่ฮาร์มอนิกในย่านความถี่ช่วงใดที่มีค่ามากขึ้นไป เพื่อพิจารณาในการแก้ฮาร์มอนิกในช่วงความถี่นั้นๆ ได้

แต่ถ้าต้องการความแม่นยำในการวัดค่าที่ฮาร์มอนิกใดๆ จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ช่วยตัวอื่นมาใช้ร่วมกับ TMS320CXX เพื่อเป็นบัฟเฟอร์ของข้อมูลเอาต์พุตและอินพุตแยกต่างหากจากบอร์ด และสามารถทำงานได้อิสระไม่ขึ้นกับบอร์ด โดยต้องมีความสามารถในการบัฟเฟอร์ข้อมูลได้มากด้วย และมีอุปกรณ์ในการตรวจสอบความถี่มูลฐานได้ เพื่อตรวจสอบว่าความถี่ใดมีขนาดมากที่สุด ทำให้การคิดเปอร์เซ็นต์ฮาร์มอนิกมีความถูกต้องมากขึ้น ซึ่งผลจากการทดลองในโปรเจกต์นี้จะเป็นประโยชน์อย่างมากสำหรับการพัฒนาการทำงานในการแสดงผลให้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ∴ ต่อไปในอนาคต

ภาคผนวก ก

TMS320c26

หน่วยประมวลผลสัญญาณสัญญาณทางดิจิทัล

Digital Signal Processing(DSP Board)

1. ลักษณะโดยทั่วไปของ TMS320C26 (Key Features)

1.คือการทำงานคำสั่งในแต่ละคำสั่งใช้เวลาเพียง 100 ns และคำสั่งส่วนใหญ่จะใช้เวลาเพียง 1 ลูกคลื่นเท่านั้น ดังนั้นจึงมีความสามารถในการทำงานได้สูงกว่า 10 ล้านคำสั่งในเวลาเพียง 1 วินาที

2.มีหน่วยความจำโปรแกรมและข้อมูล (Program/Data RAM)ภายในขนาด 1568 เวิร์ด (1 เวิร์ด = 16 bits) ซึ่งแบ่งออกเป็น 4 Block คือ B0,B1,B2,B2 โดย B2 เป็นหน่วยความจำข้อมูลขนาด 32 เวิร์ด ส่วน B0,B1 และ B3 จะกำหนดให้เป็นหน่วยความจำโปรแกรมหรือหน่วยความจำข้อมูลก็ได้แล้วแต่ผู้ใช้กำหนด และสามารถขยายหน่วยความจำภายนอกได้สูงสุดถึง 64 k เวิร์ด ซึ่งมีจำนวนมาก จึงเป็น DSP Board ที่มีการต่อหน่วยความจำภายนอกได้สูง

3.มี ROM ภายในขนาด 128 เวิร์ด ไว้เก็บคำสั่งภายในชิพ ทำให้สามารถปฏิบัติคำสั่งได้อย่างรวดเร็ว และยังสามารถ Load โปรแกรมจากหน่วยความจำภายนอกมาเก็บไว้ในส่วนของบล็อก B0 ที่ถูกกำหนดให้เป็นหน่วยความจำโปรแกรมเพื่อใช้เป็นหน่วยความจำภายใน ทำให้การทำงานสามารถทำงานได้เร็วขึ้น

4.ในการทำงานแต่ละคำสั่งของ TMS320c26 จะมีการทำงานเป็นแบบ Pipeline คือ เฟรช (fetch) , ดีโคด(decode) และเอ็กซีคิวต์(execute) โดยการทำงานไม่สามารถเห็นได้โดยผู้ใช้งาน เพราะเป็นการทำงานที่เกิดขึ้นพร้อมกัน(Overlap) เพื่อเพิ่มความเร็วในการทำคำสั่ง

5.ALU/Accumulator มีขนาด 32 บิต ทำให้มีความสามารถในการประมวลผลทางคณิตศาสตร์และตรรกได้เร็วและสามารถทำการประมวลผลกับเลขทศนิยมได้อีกด้วย ซึ่งไม่ค่อยพบได้จากตัว Controller เบอร์อื่นๆ

6.คำสั่งในการคูณ-หารเลขและบวก-ลบเลข ใช้เวลาเพียง 1 ลูกคลื่นเท่านั้น ส่วนในการคูณ-หารเลขเป็นอุปกรณ์ทาง Hardware ทำให้การประมวลผลมีความถูกต้อง รวดเร็วและมีความสะดวกในการเรียกใช้คำสั่งในการคูณเลข-หาร ซึ่งจะช่วยลดปัญหาในการเขียน software ในการทำการคูณหารเลข

7.มีคำสั่งในการทำคำสั่งใดคำสั่งหนึ่งซ้ำๆ ได้ ซึ่งสามารถใช้เขียนโปรแกรมการทำงานที่เป็นลักษณะ Loop

8.มีวงจรจับเวลา(Timer)ภายใน ซึ่งใช้ในการควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ภายในต่างๆ ให้สัมพันธ์กัน

9.มีความสามารถในการโอนย้ายข้อมูลเป็นบล็อกระหว่างหน่วยความจำ โดยเฉพาะ ข้อมูลที่เป็นลักษณะของตารางข้อมูล

10.รีจิสเตอร์ช่วย(Auxillary Register) ภายใน 8 ตัว ซึ่งใช้ในการอ้างอิงข้อมูลแบบ Indirect Addressing หรือใช้ในการเก็บข้อมูลชั่วคราว (Temporary register)

11 ฮาร์ดแวร์สแตค(Hardware Stack) 8 ระดับ ในการเก็บค่าของ Program Counter เมื่อมีการเรียกใช้โปรแกรมย่อย และมีคำสั่งในการ Push-Pop ข้อมูลใน Stack ได้

12.มีพอร์ตอินพุต-เอาต์พุต(Port I/O) ที่เป็นทั้งพอร์ตอนุกรม(Serial port) และพอร์ตขนาน(Parallel port) ทำให้สามารถติดต่อกับอุปกรณ์อนุกรม(Serial Device)ได้สะดวก ซึ่งสามารถให้ผู้ใช้เลือกในการรับส่งข้อมูลอนุกรมที่เป็นแบบ 8 บิต หรือ 16 บิต ก็ได้และยังสามารถใช้พอร์ตขนานในการรับส่งข้อมูลแบบขนานได้อีกด้วย

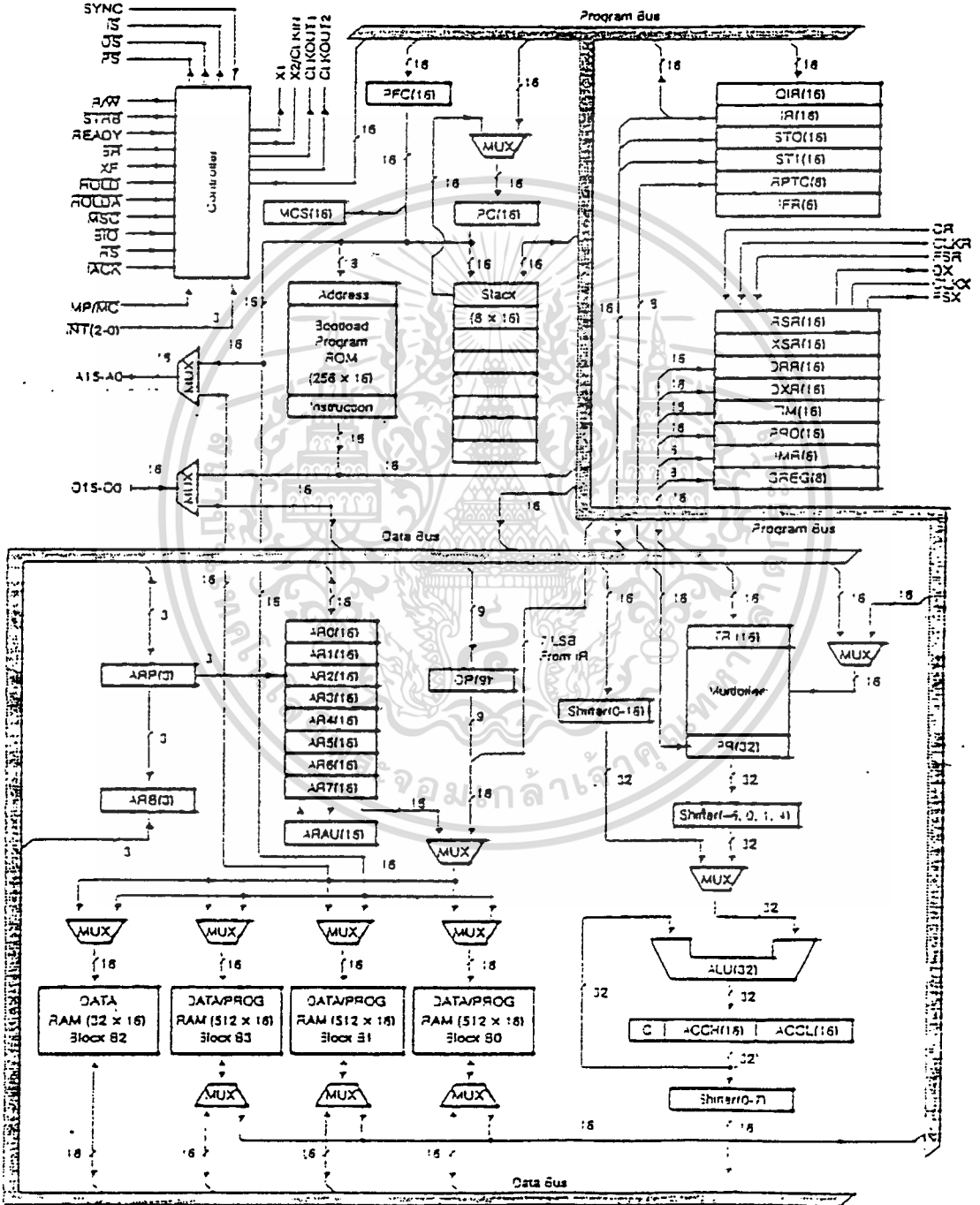
13.ในการติดต่อกับหน่วยความจำภายนอกที่มีความเร็วในการทำงานช้ากว่า TMS320c26 สามารถติดต่อกันได้ โดยTMS320c26 จะทำงานในสภาวะรอ(Wait-state)โดยการเพิ่มลูกคลื่น(cycle)ในการทำงานให้มากขึ้น เมื่ออุปกรณ์ภายนอกพร้อมแล้วก็จะทำการติดต่อด้วย

14.มีคำสั่งในการ Adaptive Filtering,FFT,and extended-precision arithmetic ซึ่งเหมาะกับการนำมาใช้ในการประมวลผลสัญญาณเพื่อทำการวิเคราะห์สเปกตรัมฟาสต์ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์ม(FFT) ตามจุดประสงค์ของโครงการนี้

15.มี Clock Generator ภายใน ใช้ในการกำเนิดสัญญาณควบคุมการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆภายใน TMS320c26

16.ใช้ไฟเลี้ยงขนาด 5 V

17.Device Packing ชนิด 68-lead PLCC(Plastic-leaded chip carrier)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 1 แสดงสถาปัตยกรรมภายในของ TMS320c26

ตารางแสดงลักษณะของอุปกรณ์ต่างๆภายใน ความหมายและหน้าที่ต่างๆของอุปกรณ์

Unit	Symbol	Function
Accumulator	ACC (31-0) ACCH (31-16) ACCL (15-0)	A 32-bit accumulator split in two halves: ACCH (accumulator high) and ACCL (accumulator low). Used for storage of ALU output.
Arithmetic Logic Unit	ALU	A 32-bit two-complement arithmetic logic unit having two 32-bit input ports and one 32-bit output port feeding the accumulator.
Auxiliary Register Arithmetic Unit	ARAU	A 16-bit unsigned arithmetic unit used to perform operations on auxiliary register data.
Auxiliary Register File	AR0-AR7 (15-0)	A register file containing eight 16-bit auxiliary registers (AR0-AR7), used for addressing data memory, temporary storage, or integer arithmetic processing through the ARAU.
Auxiliary Register File Bus	AFB(15-0)	A 16-bit bus that carries data from the AR pointed to by the ARP.
Auxiliary Register Pointer	ARP(2-0)	A 3-bit register used to select one of five or eight auxiliary registers.
Auxiliary Register Pointer Buffer	ARB(2-0)	A 3-bit register used to buffer the ARP. Each time the ARP is loaded, the old value is written to the ARB, except during an LST (load status register) instruction. When the ARB is loaded with an LST, the same value is also copied into ARP.
Central Arithmetic Logic Unit	CALU	The grouping of the ALU, multiplier, accumulator, and scaling shifter.
Data Bus	D(15-0)	A 16-bit bus used to route data.
Data Memory Address Bus	DAB(15-0)	A 16-bit bus that carries the data memory address.
Data Memory Page Pointer	DP(8-0)	A 9-bit register pointing to the address of the current page. Data pages are 128 words each, resulting in 512 pages of addressable data memory space (some locations are reserved).
Direct Data Memory Address Bus	DRB(15-0)	A 16-bit bus that carries the direct address for the data memory, which is the concatenation of the DP register with the seven LSbs of the instruction.
Global Memory Allocation Register	GMEM(7-0)	An 8-bit memory-mapped register for allocating the size of the global memory space.
Unit	Symbol	Function
Serial Port Receive Shift Register	RSR(15-0)	A 16-bit register used to shift in serial port data from the RX pin. RSR contents are sent to the DRR after a serial transfer is completed. RSR is not directly accessible through software.
Serial Port Transmit Shift Register	XSR(15-0)	A 16-bit register used to shift out serial port data onto the DX pin. XSR contents are loaded from OXR at the beginning of a serial port transmit operation. XSR is not directly accessible through software.
Shifters	—	Shifters are located at the ALU input, the accumulator output, and the product register output. Also, an in-place shifter is located within the accumulator.
Stack	Stack(15-0)	A 4 × 16 or 8 × 16 hardware stack used to store the PC during interrupts or calls. The ACCL and data memory values may also be pushed onto and copied from the stack.
Status Registers Temporary Register	ST0, ST1 (15-0)	Two 16-bit status registers that contain status and control bits. A 16-bit register that holds either an operand for the multiplier or a shift code for the scaling shifter.
Temporary Register	TR(15-0)	A 16-bit register that holds either an operand for the multiplier or a shift code for the scaling shifter.
Timer	TIM(15-0)	A 16-bit memory-mapped timer (counter) for timing control.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกตารางที่ 1 แสดงลักษณะของอุปกรณ์ต่างๆภายใน ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Unit	Symbol	Function
Instruction Register	IR(15-0)	A 16-bit register used to store the currently executing instruction.
Interrupt Flag Register	IFR(5-0)	A 6-bit flag register used to latch the active-low external user interrupts INT(2-0), the internal interrupts XINT/RINT (serial port transmit/receive), and TINT (timer) interrupts. The IFR is not accessible through software.
Interrupt Mask Register	IMR(5-0)	A 6-bit memory-mapped register used to mask interrupts.
Microcall Stack	MCS (15-0)	A single-word stack that temporarily stores the contents of the PFC while the PFC is being used to address data memory with the block move (BLKD/BLKP), multiply-accumulate (MAC/MACD), and table read/write (TBLR/TBLW) and table read/write (TBLR/TBLW) instruction.
Multplier	MULT	A 16 × 16-bit parallel multiplier.
Period Register	PRO (15-0)	A 16-bit memory-mapped register used to reload the timer.
Prefetch Counter	PFC (15-0)	A 16-bit counter used to prefetch program instructions. The PFC contains the address of the instruction currently being prefetched. It is updated when a new prefetch is initiated. The PFC is also used to address program memory when using the block move (BLKP), multiply-accumulate (MAC/MACD), and table read/write (TBLR/TBLW) instructions and to address data memory when using the block move (BLKD) instruction.
Product Register	PR(31-0)	A 32-bit product register used to hold the multiplier product. The PR can also be accessed as the most or least significant words by using the SPH/SPL (store P register high/low) instructions.
Program Bus	P(15-0)	A 16-bit bus used to route instructions (and data for the MAC and MACD instructions).
Program Counter	PC (15-0)	A 16-bit program counter used to address program memory. The PC always contains the address of the next instruction to be executed. The PC contents are updated following each instruction decode operation.
Program Memory Address Bus	PAB(15-0)	A 16-bit bus that carries the program memory address.
Queue Instruction Register	QIR(15-0)	A 16-bit register used to store prefetched instructions.
Random Access Memory (data or program)	RAM (80)	A RAM block with 256 × 16 locations configured as either data or program memory. (512 × 16 for TMS320C26)
Random Access Memory (data only)	RAM (81)	A data RAM block, organized as 256 × 16 locations. (512 × 16 can be configured as program or data for TMS320C26)
Random Access Memory (data only)	RAM (82)	A data RAM block, organized as 32 × 16 locations.
Random Access Memory (data or program)	RAM (83) (TMS320C25 only)	A RAM block with 512 × 16 locations configured as either data or program memory (TMS320C25 only).
Read Only Memory	ROM	A ROM block. 4096 × 16 (256 × 16 for TMS320C26; 3192 × 16 for TMS320C28).
Repeat Counter	RPTC (7-0)	An 8-bit counter to control the repeated execution of a single instruction.
Serial Port Data Receive Register	DRR(15-0)	A 16-bit memory-mapped serial port data receive register. Only the eight LSBs are used in the byte mode.
Serial Port Data Transmit Register	DXR(15-0)	A 16-bit memory-mapped serial port data transmit register. Only the eight LSBs are used in the byte mode.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกตำราที่ 1 แสดงลักษณะของอุปกรณ์ภายใน(ต่อ) ของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. สถาปัตยกรรมภายใน(Architecture)

TMS320c26 สร้างขึ้นมาเพื่อความเร็วในการทำงานและโครงสร้างที่ทำงานได้ด้วยขีดความสามารถที่สูงขึ้น และเพื่อการทำงานในการประมวลผลข้อมูลได้สูงสุดได้แยกBus ออกเป็น 2 ส่วนคือบัสโปรแกรม(program bus) และบัสข้อมูล(data bus) โดยบัสโปรแกรมจะเป็นทางเข้าออกของรหัสคำสั่งและโอเปอเรนด์(Operand)ของคำสั่ง ส่วนบัสข้อมูลใช้เชื่อมต่อโดยตรงกับวงจรการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆภายในเช่นหน่วยความจำข้อมูล,หน่วยประมวลผลกลาง(Central Arithmetic Logic Unit)และรีจิสเตอร์ที่เป็น File ในการเก็บข้อมูลย่อย AR0-AR7 เพื่อทำการโอนย้ายข้อมูลต่างๆภายใน

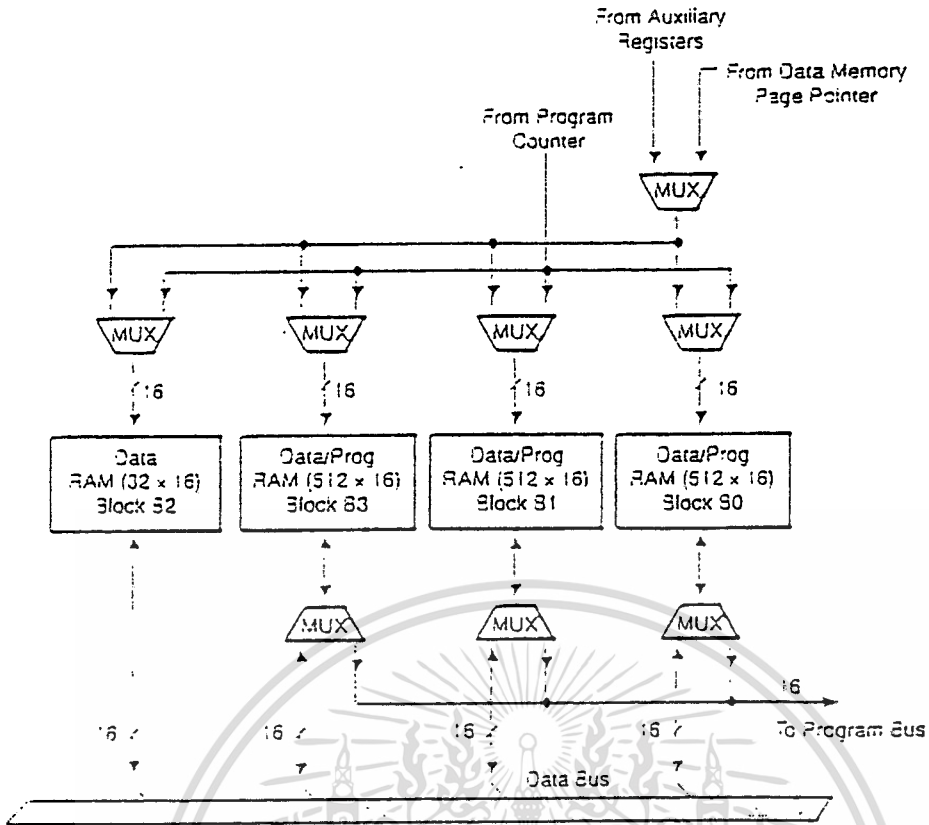
3. การจัดหน่วยความจำ(Memory Organization)

หน่วยความจำของ TMS320c26 มีการแบ่งหน่วยความจำออกเป็น 2 ส่วนคือ

3.1 หน่วยความจำข้อมูล(Data Memory)

มีหน่วยความจำข้อมูลภายในขนาด 1568 เวิร์ด โดยแบ่งออกเป็น 4 บล็อกคือ B0,B1,B2,B3 ซึ่ง Block B2 มีขนาด 32 เวิร์ด เป็นหน่วยความจำข้อมูลเท่านั้น ส่วนบล็อกที่เหลือมีขนาด 512 เวิร์ด เป็นชนิด หน่วยความจำข้อมูลหรือหน่วยความจำโปรแกรม(Data/Program Memory)ก็ได้แล้วแต่ผู้ใช้กำหนด โดยหน่วยความจำภายในนี้ถ้าเลือกให้เป็นหน่วยความจำโปรแกรม เราสามารถทำการโหลดโปรแกรมภายนอกมาเก็บภายในหน่วยความจำส่วนนี้ได้ ทำให้สามารถทำการปฏิบัติคำสั่งได้อย่างรวดเร็ว

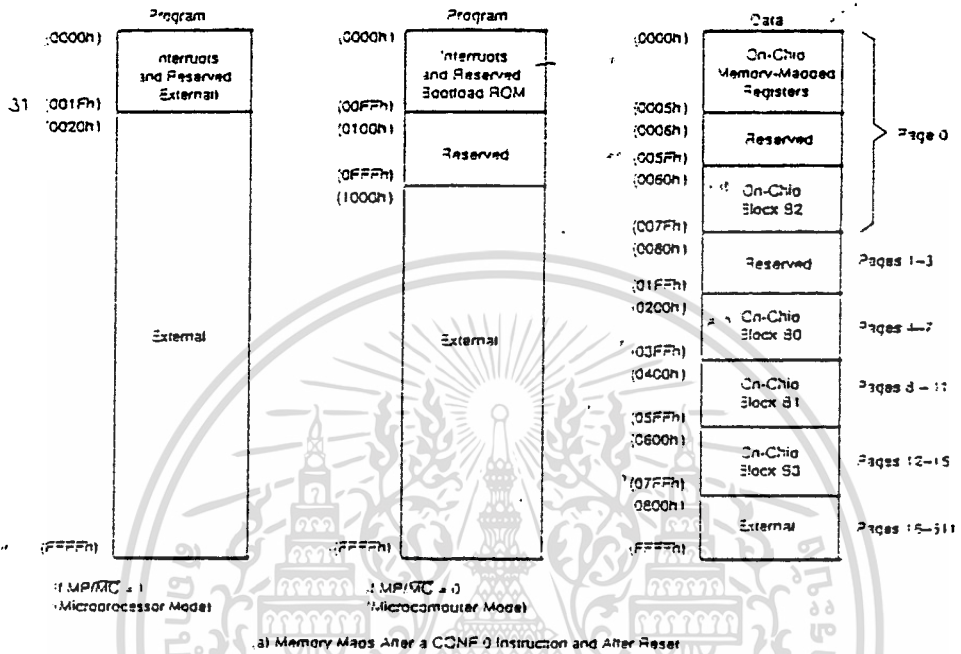
TMS320c26 สามารถอ้างอิงหน่วยความจำข้อมูลได้ทั้งหมด 64 k เวิร์ด ซึ่งหากเราใช้หน่วยความจำข้อมูลภายในชิพ ตำแหน่งของหน่วยความจำส่วนนี้จะถูก Map ลงในตำแหน่งที่ต่ำกว่า 1 k เวิร์ดของพื้นที่หน่วยความจำข้อมูล ซึ่งสามารถขยายหน่วยความจำภายนอกได้สูงถึง 64 k เวิร์ด โดยยังสามารถทำการอ้างอิงแอดเดรสได้โดยตรงและยังสามารถทำงานด้วยความเร็วสูงสุดเหมือนเดิม



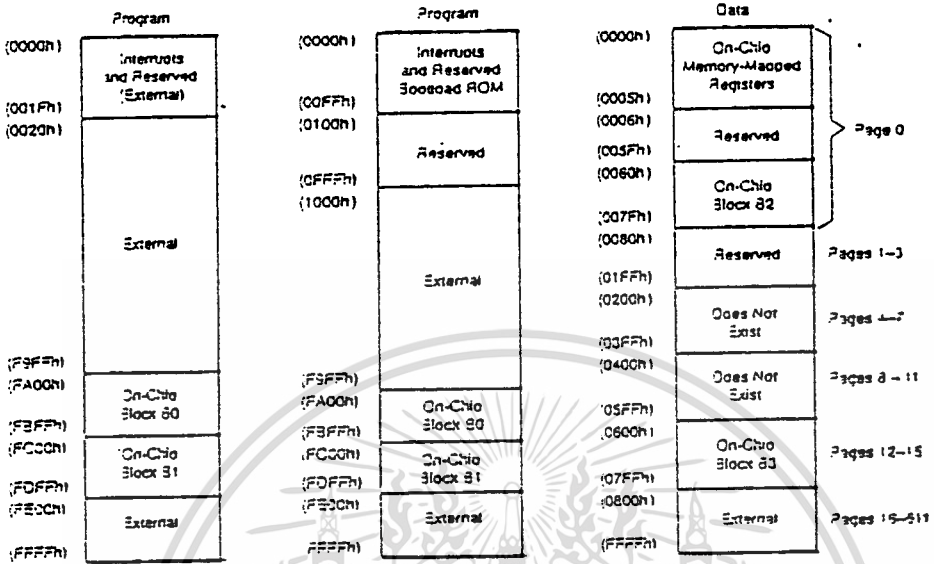
รูปที่ 2 แสดงหน่วยความจำข้อมูลภายในของ TMS320c26

3.2 หน่วยความจำโปรแกรม(Program Memory)

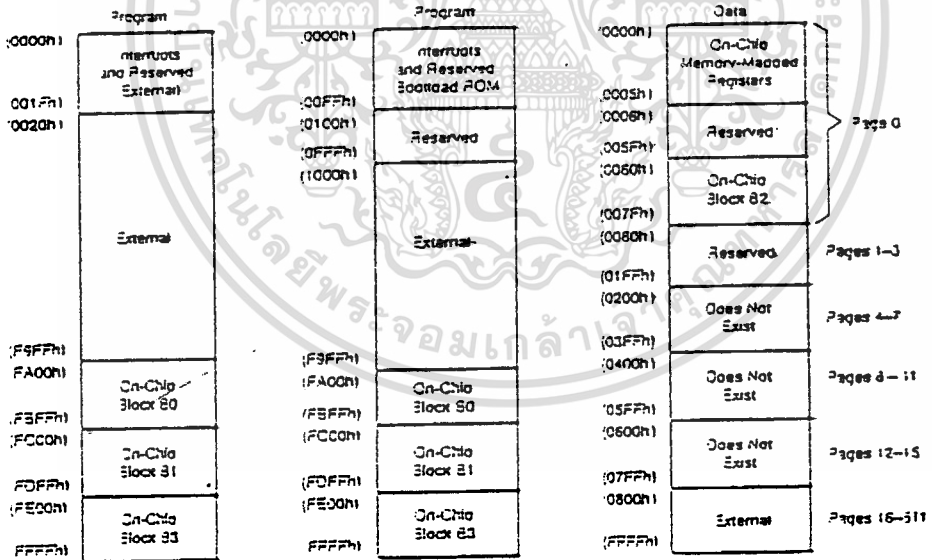
โปรแกรม RAM และ ROM บนชิพหรือหน่วยความจำภายนอกความเร็วสูงสามารถถูกใช้ด้วยความเร็วเต็มที่โดยไม่มีสภาวะรอ(wait-state)หรือมีฉนวน READY ก็สามารติดต่อกับ TMS320c26 ให้ซ้าลงหากใช้กับหน่วยความจำภายนอกที่ทำงานช้า TMS320c26 สามารถมีหน่วยความจำโปรแกรมได้ทั้งหมด 64 K เวิร์ด โดย RAM ภายใน(Block B0) สามารถกำหนดให้เป็นหน่วยความจำโปรแกรมได้ โดยใช้ซอฟต์แวร์ ซึ่งการเอ็กซ์คิวต์จ็วส์จากบล็อค B0 สามารถเริ่มได้เมื่อกำหนดพื้นที่หน่วยความจำ(Memory space) ใหม่แล้ว มีการไขเอด्रेसแยกกันระหว่างหน่วยความจำโปรแกรม,หน่วยความจำข้อมูลและอินพุต-เอาทพุตพอร์ต ทำให้เกิดความคล่องตัวในการทำงาน



รูปที่ 3 แสดงการจัดหน่วยความจำ(Memory-Mapped)

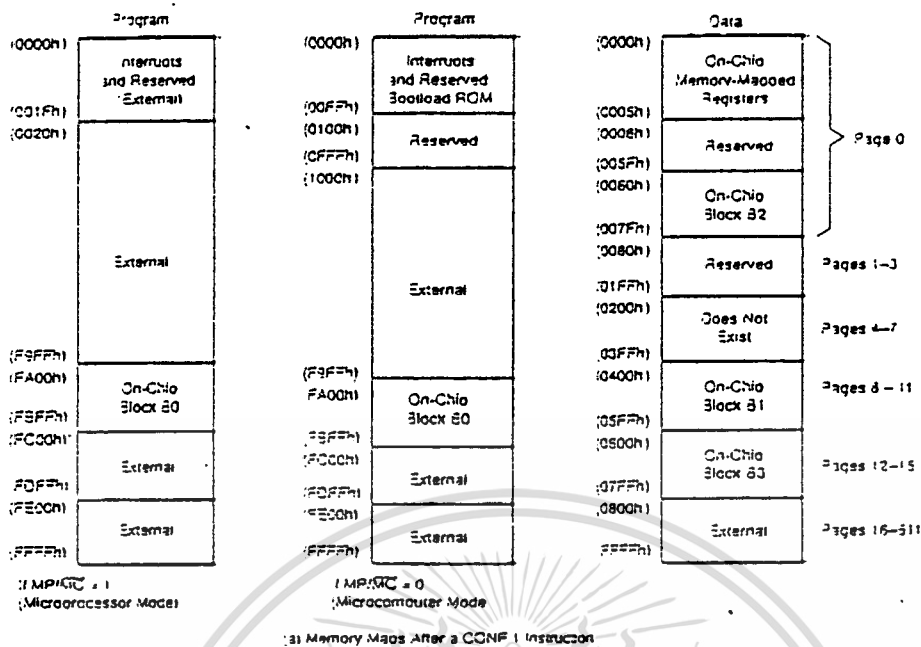


(c) Memory Map After a CONF 2 Instruction



(d) Memory Map After a CONF 3 Instruction

รูปที่ 3 แสดงการจัดหน่วยความจำ(ต่อ)



รูปที่ 3 แสดงการจัดหน่วยความจำ(ต่อ)

4. รีจิสเตอร์(Memory-Mapped Register)

เป็นส่วนหนึ่งของหน่วยความจำที่ใช้เป็นรีจิสเตอร์ ซึ่งสามารถเข้าถึงได้เหมือนกับการอ้างตำแหน่งหน่วยความจำข้อมูล ยกเว้นคำสั่งเพียงคำสั่ง block move from หน่วยความจำข้อมูลกับหน่วยความจำข้อมูล ซึ่งไม่สามารถกระทำกับหน่วยความจำส่วนนี้ได้ รีจิสเตอร์ชนิดนี้เป็นรีจิสเตอร์ที่ใช้สำหรับติดต่อกับอุปกรณ์ภายนอก(peripheral register)เช่นการส่งและรับข้อมูลแบบอนุกรม มีด้วยกัน 6 ตัวดังแสดงในตารางข้างล่างนี้

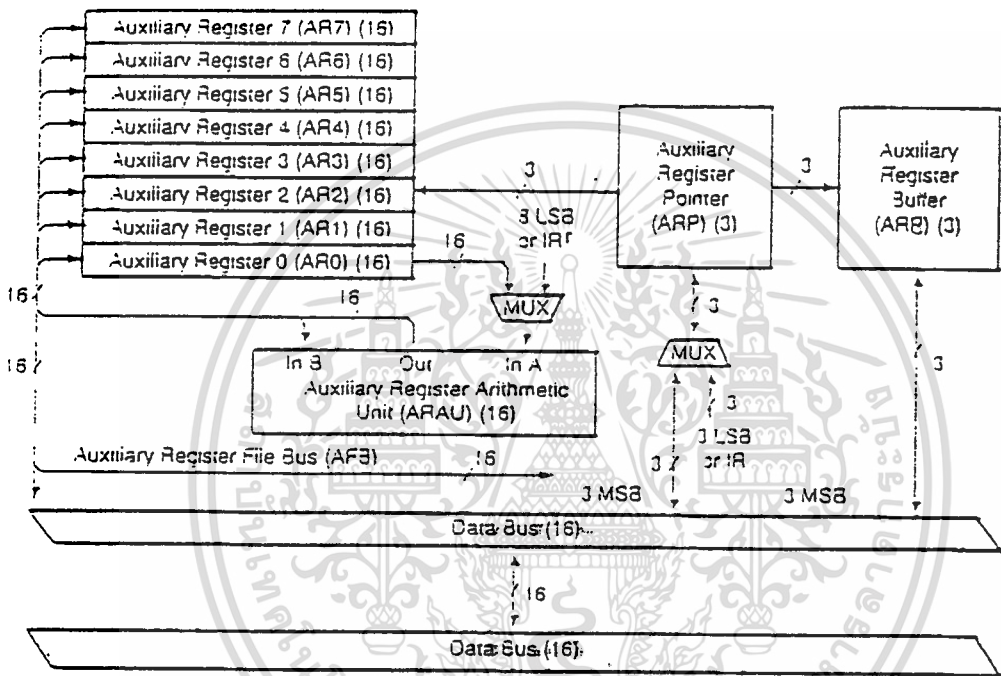
Register Name	Address Location	Definition
DRR(15-0)	0	Serial port data receive register
DXR(15-0)	1	Serial port data transmit register
TIM(15-0)	2	Timer register
PRD(15-0)	3	Period register
IMR(5-0)	4	Interrupt mask register
GMEMG(7-0)	5	Global memory allocation register

ตารางที่ 2 แสดงรีจิสเตอร์ในหน่วยความจำ(Memory-mapped Register)

5. รีจิสเตอร์ช่วย(Auxiliary Register)

TMS320c26 มีรีจิสเตอร์ช่วยภายในด้วยกัน 8 ตัวคือ AR0-AR7 โดย AR นี้จะใช้ในการอ้างอิงแอดเดรสแบบ Indirect addressing ซึ่งข้อมูลภายใน AR จะเป็นแอดเดรสของหน่วยความจำข้อมูลที่ต้องการเข้าถึง หรืออาจใช้ AR เก็บข้อมูลไว้ชั่วคราว ในกรณีที่ AR นั้นไม่ได้ใช้ในการอ้างอิงแอดเดรส ARตัวใดจะใช้ในการอ้างอิงแอดเดรสนั้นจะกำหนดจากค่าที่เก็บไว้ใน Auxiliary Register Pointer (ARP) ซึ่งมีขนาด 3 บิต ซึ่งมีค่าระหว่าง 0-7 ARจะเชื่อมโยงกับ Auxiliary

Register Arithmetic Unit (ARAU) เพื่อกระทำทางเลขคณิตกับข้อมูลภายในรีจิสเตอร์ตามชนิดของคำสั่งเช่นทำการ Increment ,Decrement เป็นต้น เมื่อมีการเรียกใช้ Subroutine call and interrupts ข้อมูลใน ARP จะถูกเก็บใน Auxiliary Register pointer Buffer (ARB) ซึ่งมีขนาด 3 บิต เช่นเดียวกับ ARP และเมื่อทำคำสั่งต่างๆในโปรแกรมย่อยเรียบร้อยแล้วจะทำการโอนย้ายข้อมูลไปเก็บไว้ใน ARP ตามเดิม

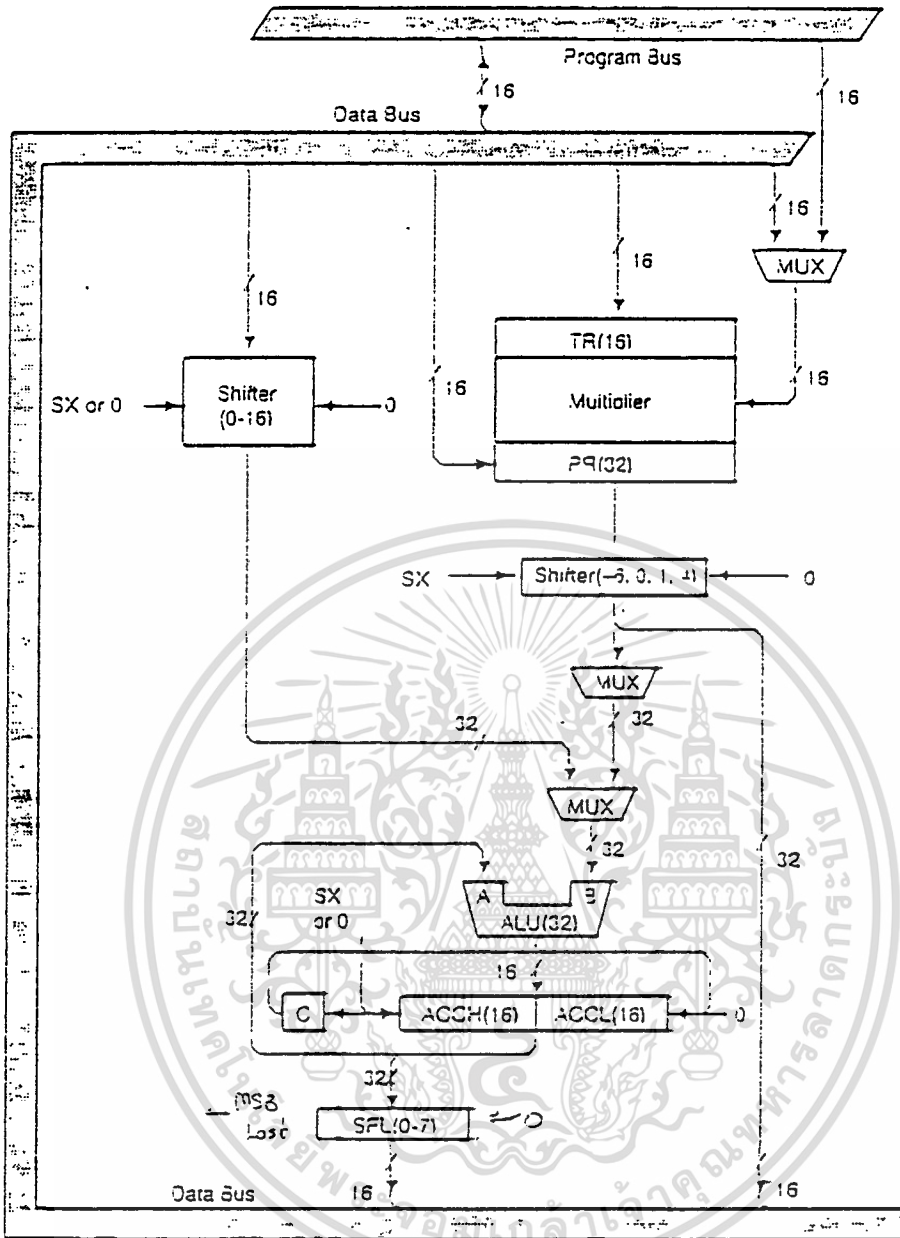


รูปที่ 4 แสดงรีจิสเตอร์ช่วย (Auxiliary Register File)

6. หน่วยคำนวณทางคณิตศาสตร์และลอจิกกลาง (CALU)

ประกอบด้วยส่วนที่สำคัญดังนี้

1. Scaling Shifter
2. Arithmetic Logic Unit (ALU) and Accumulator
3. Parallel Multiplier



รูปที่ 5 แสดงหน่วยประมวลผลกลาง(Central Arithmetic Logic Unit)

6.1 วงจรในการเลื่อนบิต(Scaling Shifter)

มีอินพุตขนาด 16 บิต ซึ่งคือกับบัสข้อมูล และ 32 บิต-เอาต์พุตซึ่งต่อกับ ALU โดยทำหน้าที่ในการเลื่อนข้อมูลข้อมูลที่ได้รับมาจากบัสข้อมูล เป็นการเลื่อนบิตไปทางซ้ายด้วยค่าระหว่าง 0-15 ตามชนิดของคำสั่ง ส่วนของ LSBs ของเอาต์พุตที่เลื่อนไปจะทำการเติมด้วย 0 ส่วนค่า MSBs จะเติม 0 หรือ sign-extended ขึ้นอยู่กับสถานะของบิต SXM ในรีจิสเตอร์สถานะ(status register (ST1))และ เอาต์พุตที่ได้จะมีขนาด 32 บิต จะทำการป้อนเป็นอินพุตให้กับ ALU ใช้ในการประมวลผลข้อมูลต่อไป

เอกสารนี้ออกจาก scaling shifter แล้วยังมี shifter อีก 2 ตัว ซึ่งต่อกับเอาต์พุตของ Multiplier และ Accumulator เพื่อทำการเลื่อนบิตตามคำสั่งแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.2 หน่วยประมวลผลทางคณิตศาสตร์และตรรก(ALU) และ แอคคิวมูเรเตอร์(ACC)

ALU มีหน้าที่ในการประมวลผลทางคณิตศาสตร์ สามารถประมวลผลข้อมูลขนาด 16 บิต โดยขนาดของ ALUนี้มีขนาด 32 บิต ทำให้การประมวลผลทำได้ด้วยความเร็วสูง และยังสามารถกระทำสมการ Boolean ได้อีกด้วย ผลที่คำนวณได้จะส่งให้ ACC ซึ่งมีขนาด 32 บิต ภายใน ACC นี้แบ่งออกเป็นสองส่วนด้วยกันคือ Accumulator High(ACCH) และ Accumulator Low (ACCL)ซึ่งมีคำสั่งในการเข้าถึงข้อมูลในสองส่วนนี้ได้ที่เอาต์พุตของ ACC จะมี Shifter ทำการเลื่อนบิตไปทางซ้ายก่อนที่จะนำข้อมูลที่ไปเก็บในหน่วยความจำข้อมูล

6.3 วงจรคูณ(Multiplier)

เป็นอุปกรณ์ฮาร์ดแวร์ที่สามารถในการคูณเลขขนาด 16*16 บิต โดยผู้ใช้สามารถกำหนดให้ผลคูณที่ได้มีเครื่องหมายหรือไม่ก็ได้ ผลคูณที่ได้จะมีขนาด 32 บิต โดยจะถูกเก็บใน Product Register (PR) ส่วนค่าโอเปอร์แลนของตัววงจรมคูณจะถูกเก็บในรีจิสเตอร์ชั่วคราว(Temporary Register(TR)) ซึ่งมีขนาด 16 บิต เอาต์พุตของ PR จะถูกเลื่อนบิตซึ่งมีด้วยกัน 4 แบบคือ

- ไม่มีการเลื่อนบิต
- เลื่อนบิตไปทางซ้าย 1 บิต
- เลื่อนบิตไปทางซ้าย 4 บิต
- เลื่อนบิตไปทางขวา 6 บิต

ในการเลื่อนบิตไปทางซ้ายนั้นในการหาร ส่วนในการเลื่อนบิตไปทางขวาเพื่อใช้ในการคูณเลข ในการกำหนดว่าจะทำการเลื่อนบิตในลักษณะใดจะกำหนดจากค่าของ PM ในรีจิสเตอร์สถานะ ดังตารางข้างล่างนี้

If PM Is:	Result
00	No shift
01	Left shift of 1 bit
10	Left shift of 4 bits
11	Right shift of 6 bits

ตารางที่ 3 แสดง PM Shift Modes

ในการคูณทำได้ทั้งแบบคิดเครื่องหมายและไม่คิดเครื่องหมาย คำสั่งที่น่าสนใจเช่น MAC-multiplier/accumulator เป็นคำสั่งที่คูณแล้วบวกสะสม หรือคำสั่ง MACD-multiplier/accumulate and data move ซึ่งเป็นการใช้คำสั่งเดียว แต่สามารถทำงานได้หลายอย่างและทำได้รวดเร็ว เพราะไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

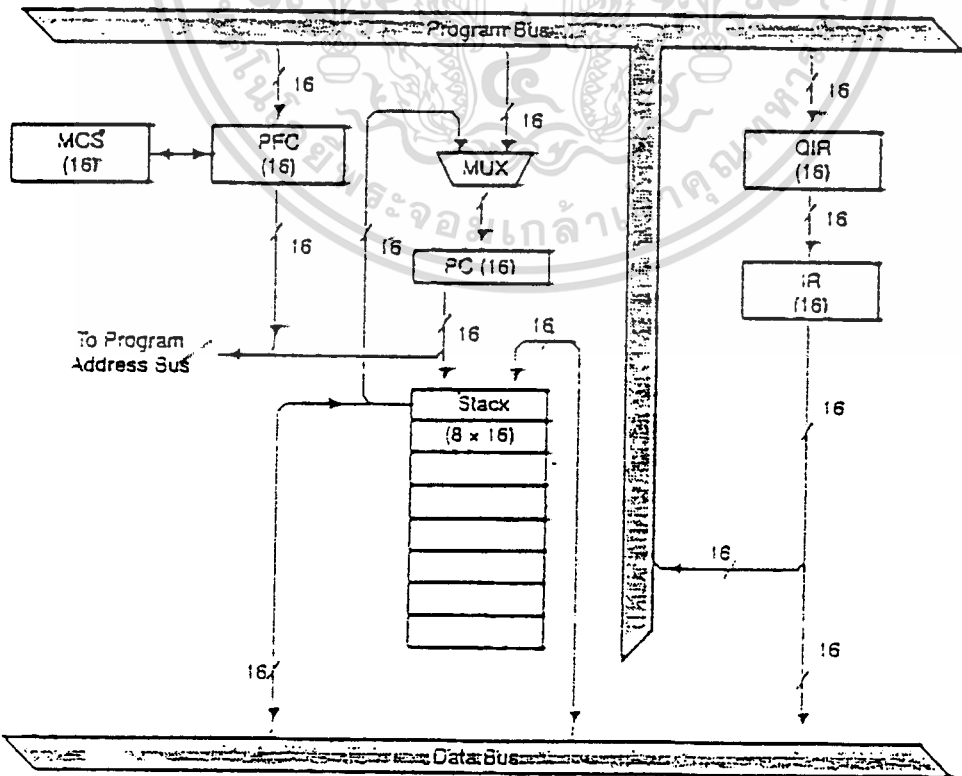
โครงสร้างเป็นแบบ pipelining ทั้งสองคำสั่งนี้จะใช้โอเปอร์แลน 2 เวอร์ด อาจจะนำมาจากหน่วยความจำโปรแกรมหรือจากหน่วยความจำข้อมูลก็ได้

7.โปรแกรมเคาท์เตอร์และสแตค(Program Counter and Stack)

TMS320c26 มีโปรแกรมเคาท์เตอร์ขนาด 16 บิต และฮาร์ดแวร์สแตค 8 ระดับซึ่งใช้ในการเก็บค่าของ PC PCจะใช้ในการเก็บตำแหน่งของหน่วยความจำที่จะทำการปฏิบัติต่อไป ส่วน stack จะใช้เก็บค่าของ PC ในขณะที่มีการเรียกใช้โปรแกรมย่อยหรือเมื่อมีการอินเตอร์รัปเกิดขึ้น

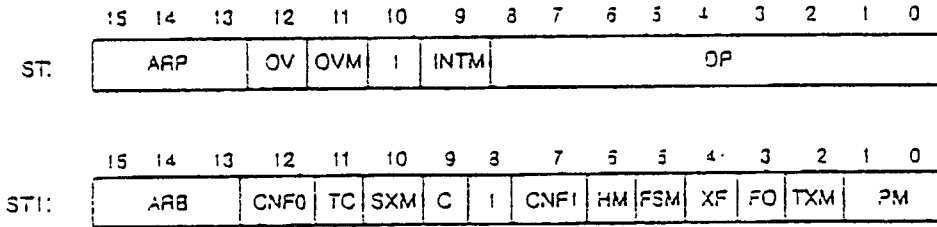
บัสที่ใช้ในเป็นโปรแกรมแอดเดรสของ PC เมื่อคำสั่งมีการเฟรชจากหน่วยความจำโปรแกรมและจะถูกนำไปเก็บใน Instruction Register (IR) เมื่อ IR เก็บข้อมูลเรียบร้อยแล้ว PC ก็พร้อมที่จะเริ่มทำการเฟรชคำสั่งถัดไปมาเก็บไว้ ในการอ้างอิงกับหน่วยความจำภายนอกนั้น PC จะใช้ แอดเดรสบัส A15-A0 และบัสข้อมูล ในการเข้าถึงคำสั่งที่จะมาทำการปฏิบัติต่อไป

ส่วนของสแตค มีขนาด 16 บิต จำนวน 8 ตัวในการอ่านหรือเขียนข้อมูลกับสแตค จะใช้คำสั่ง PUSH และ POP คำสั่ง PUSH จะทำการเก็บค่าข้อมูลใน PC ไว้ในสแตค เมื่อมีการเรียกใช้โปรแกรมย่อยหรือเกิดการอินเตอร์รัปขึ้น ส่วนคำสั่ง POP จะทำการโหลดข้อมูลตำแหน่งบนสุดของสแตคไปเก็บไว้ใน PC และข้อมูลที่อยู่ในตำแหน่งต่ำกว่าจะทำการเลื่อนขึ้นมาตามลำดับ



8. รีจิสเตอร์สถานะ(Status Register)

มีด้วยกัน 2 ตัวคือ STO และ ST1 ซึ่งเก็บค่าสถานะในการทำงานหรือเงื่อนไขในการทำงานต่างๆไว้ รวมทั้งโหมดในการทำงานด้วยรีจิสเตอร์สถานะจะเก็บอยู่ใน หน่วยความจำข้อมูล ซึ่งสามารถทำการกำหนดค่าในรีจิสเตอร์สถานะนี้ได้ตามต้องการ



รูปที่ 7 แสดงลักษณะของรีจิสเตอร์สถานะ

Field	Function
ARB	Auxiliary register pointer buffer. Whenever the ARP is loaded, the old ARP value is copied to the ARB except during an LST instruction. When the ARB is loaded via an LST1 instruction, the same value is also copied to the ARP.
ARP	Auxiliary register pointer. This three-bit field selects the AR to be used in indirect addressing. When ARP is loaded, the old ARP value is copied to the ARB register. ARP may be modified by memory-reference instructions when using indirect addressing, and by the LARP, MAR, and LST instructions. ARP is also loaded with the same value as ARB when an LST1 instruction is executed.
C	Carry bit. This bit is set to 1 if the result of an addition generates a carry, or reset to 0 if the result of a subtraction generates a borrow. Otherwise, it is reset after an addition or set after a subtraction, except if the instruction is ADDH or SUBH. ADDH can only set and SUBH only reset the carry bit, but cannot affect it otherwise. These instructions will also affect this bit: SC, RC, LST1, shift, and rotate. Two branch instructions, 3C and 8NC, have been provided to branch on the status of C. C is set to 1 on a reset.
CNF	On-chip ram configuration control bit. If set to 0, block 30 is configured as data memory; otherwise, block 30 is configured as program memory. The CNF may be modified by the CNFD, CNFP, and LST1 instructions. RS resets the CNF to 0.
DP	Data memory page pointer. The 9-bit DP register is concatenated with the 7 LSBs of an instruction word to form a direct memory address of 16 bits. DP may be modified by the LST, LDP, and LDPK instructions.
CNFX	X = 0 or 1; CNF0 and CNF1 are the on-chip RAM configuration control bits for the TMS320C25. Depending on the status of these 2 bits, one of the 4 configuration modes can be selected. RS resets both CNF0 and CNF1 to 0.
FO	Format bit. When set to 0, the serial port registers are configured as 16-bit registers. When set to 1, the port registers are configured to receive and transmit eight-bit bytes. FO may be modified by the FORT and LST1 instructions. FO is reset to 0.
FSM	Frame synchronization mode bit. This bit indicates whether the serial port operates with or without frame sync pulses. When FSM = 1, the serial port operation is initiated following a frame sync pulse on the FSX/FSR inputs. When FSM = 0, the FSX/FSR inputs are ignored and the serial port operates continuously with no frame sync pulses required. The bit is set to 1 by a reset.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ตำราที่ 4 แสดงลักษณะและหน้าที่ของรีจิสเตอร์สถานะชนิดต่างๆสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

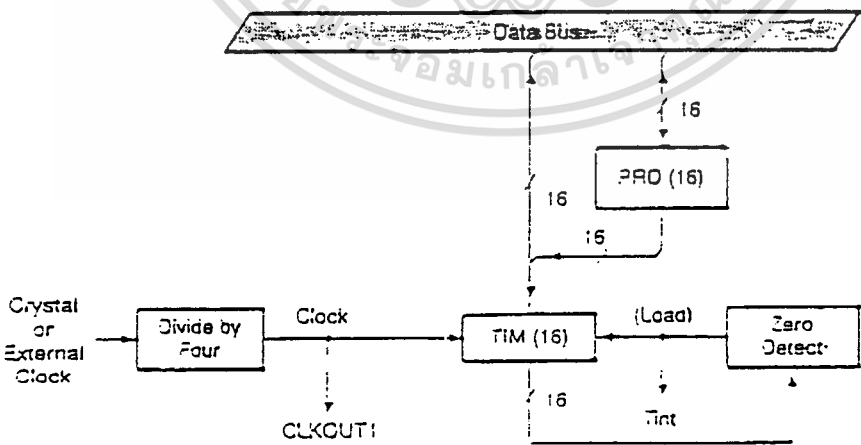
Field	Function
HM	Hold mode bit. When HM = 1, the processor halts internal execution when acknowledging an active HOLD. When HM = 0, the processor may continue execution out of internal program memory but puts its external interface in a high-impedance state. This bit is set to 1 by a reset.
INTM	Interrupt mode bit. When set to 0, all unmasked interrupts are enabled. When set to 1, all maskable interrupts are disabled. INTM is set and reset by the DINT and EiINT instructions. RS and IACK also set INTM. INTM has no effect on the unmaskable RS interrupt. Note that INTM is unaffected by the LST instruction.
OV	Overflow flag bit. As a latched overflow signal, OV is set to 1 when overflow occurs in the ALU. Once an overflow occurs, the OV remains set until a reset. BV, BNV, or LST instruction clears the OV.
OVM	Overflow mode bit. When set to 0, overflowed results overflow normally in the accumulator. When set to 1, the accumulator is set to either its most positive or its most negative value upon encountering an overflow. The SOVM and ROVM instructions set and reset this bit, respectively. LST may also be used to modify the OVM.
PM	Product shift mode. If these two bits are 00, the multiplier's 32-bit product is loaded into the ALU with no shift. If PM = 01, the PR output is left-shifted one place and loaded into the ALU, with the LSGs zero-filled. If PM = 10, the PR output is left-shifted by four bits and loaded into the ALU, with the LSGs zero-filled. PM = 11 produces a right shift of six bits, sign-extended. Note that the PR contents remain unchanged. The shift takes place when transferring the contents of the PR to the ALU. PM is loaded by the SPM and LST1 instructions. The PM bits are cleared by RS.
SXM	Sign-extension mode bit. SXM = 1 produces sign extension on data as it is passed into the accumulator through the scaling shifter. SXM = 0 suppresses sign extension. SXM does not affect the definition of certain instructions; for example, the ADDS instruction suppresses sign extension regardless of SXM. This bit is set and reset by the SSXM and RSXM instructions, and may also be loaded by LST1. SXM is set to 1 by RS.
TC	Test/control flag bit. The TC bit is affected by the BIT, BITT, CMPR, LST1, and NORM instructions. The TC bit is set to a 1 if a bit tested by BIT or BITT is a 1, if a compare condition tested by CMPR exists between AR0 and another AR pointed to by ARP, or if the exclusive-OR function of the two MSBs of the accumulator is true when tested by a NORM instruction. Two branch instructions, BBZ and BBNZ, provide branching on the status of the TC.
TXM	Transmit mode bit. TXM = 1 configures the serial port's FSX pin to be an output. In this mode, a pulse is produced on FSX when DXR is loaded. Transmission then starts on the DX pin. TXM = 0 configures the FSX pin to be an input. TXM is set and reset by the STXM and RTXM instructions and may also be loaded by LST1. RS resets TXM to 0.
XF	XF pin status bit. This status bit indicates the state of the XF pin, a general-purpose output pin. XF is set and reset by the SXF and RXF instructions or may be loaded by LST1. XF is set to 1 by RS.

9. การควบคุมการทำงาน(Timer Operation)

TMS320c26 มีส่วนการควบคุมการทำงานที่สำคัญภายใน ซึ่งได้แก่ Memory mapped 16 - bits Timer(TIM) และ 16-bits period register(PRD) วงจรนับเวลา(timer)เป็นรีจิสเตอร์ขนาด 16 บิต ซึ่งจะทำกรนับลงจากค่าที่ตั้งไว้โดยการนับสัญญาณนาฬิกาจาก CLKOUT1 ในทุกๆ CLKOUT1 ลูกคลื่น Timer register จะลดค่าลง 1 ค่าจากค่าเดิม

TIM เป็นส่วนหนึ่งของ หน่วยความจำข้อมูล ในตำแหน่งที่ 2 ส่วนPRD อยู่ในตำแหน่งที่ 3 ซึ่งใช้ในการเก็บค่าเริ่มต้นของวงจรถับเวลา เมื่อวงจรถับเวลาลดค่าลงจนเป็น 0 จะเกิดการ อินเตอร์รัปชั่นเรียกว่า Timer interrupt (TINT) ค่าเริ่มต้นในการนับครั้งต่อไปจะถูกโหลดมาจาก PRD ดังนั้นช่วงเวลาที่เกิดการอินเตอร์รัปแต่ละครั้งจึงเท่ากับ (PRD+1)CLKOUT1 ซึ่งทำให้เกิดประโยชน์ ในการกำหนดการ Synchronize กับอุปกรณ์ภายนอก

คำสั่งที่เป็นตัวกำหนดจำนวนวงรอบของการทำงานของวงจรถับเวลาคือ Repeat Counter(RPTC)instruction ซึ่งจะทำการเก็บค่าในการวนรอบใน Repeat Counter ขนาด 8 บิต โดยอาจจะนำค่ามาจากหน่วยความจำข้อมูลหรือจากคำสั่งโดยตรง การกำหนด RPTC จะทำให้คำสั่งได้รับการทำซ้ำค่าที่โหลดไว้บวก 1 หรือ N+1 ครั้งเมื่อ N คือค่าที่เก็บใน Repeat Counter ดังนั้นในการกำหนด RPTC จะทำให้คำสั่งได้รับการทำซ้ำได้สูงถึง 256 ครั้ง



10. การอินเทอร์รัปต์(interrupt)

TMS320c26 สามารถให้ผู้ใช้กำหนดการอินเทอร์รัปต์ได้ด้วยการ เป็นลักษณะของการอินเทอร์รัปต์จากภายนอกโดยผู้ใช้จำนวนด้วยกัน 3 แบบ เพื่อใช้ในการประมวลผลกับอุปกรณ์ภายนอก ส่วนการอินเทอร์รัปต์ภายใน จะสร้างขึ้นจากพอร์อนุกรม (RINT,XINT) และวงจรรีบเวลา(TINT) และการอินเทอร์รัปต์โดยการเขียนซอฟต์แวร์ TRAP instruction ในการอินเทอร์รัปต์นั้น Reset interrupt(RS) จะมีลำดับ(priority) สูงที่สุด ส่วนXINT จะมีลำดับต่ำสุด ในแต่ละอินเทอร์รัปต์ จะใช้เนื้อที่ขนาด 2 แอดเดรส

Interrupt Name	Memory Location	Priority	Function
RS	0h	1 (highest)	External reset signal
INT0	1h	2	External user interrupt #0
INT1	2h	3	External user interrupt #1
INT2	3h	4	External user interrupt #2
	3-17h		Reserved locations
TINT	18h	5	internal timer interrupt
RINT	1Ah	6	Serial port receive interrupt
XINT	1Ch	7 (lowest)	Serial port transmit interrupt
TRAP	1Eh	N/A	TRAP instruction address

ตารางที่ 6 แสดงตำแหน่งการอินเทอร์รัปต์และลำดับความสำคัญ

11. พอร์ตอนุกรม (Serial Port)

พอร์ตอนุกรม เป็นพอร์ตที่ใช้ในการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ภายนอกโดยการใช้อุปกรณ์แบบอนุกรม การเชื่อมโยงข้อมูลนี้อาจจะเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ A/D และ D/A โดยวงจรเชื่อมต่อภายนอกจะต้องเป็นอุปกรณ์ที่สามารถรับสัญญาณนี้ได้ ซึ่งภายในชิปนี้มี register 2 ตัวที่ทำหน้าที่ในการเก็บข้อมูล คือ Data transmit register(DXR) ซึ่งจะทำการเก็บค่าข้อมูลที่จะทำการส่งให้กับอุปกรณ์ภายนอก เมื่อมีสัญญาณจากขา CLKX ข้อมูลที่เก็บใน DXR จะถูกโหลดให้กับ Transmit Register(XSR)และเลื่อนบิตออกทางพอร์ตอนุกรม และ Data receive register(DRR)ซึ่งจะรับข้อมูลจาก Receive register(RSR) โดยที่ข้อมูลจากภายนอกจะผ่านเข้ามาทางพอร์ตอนุกรม และทำการเก็บใน RSR เมื่อมีสัญญาณ CLKX ข้อมูลจะถูกเลื่อนเข้าไปเก็บใน DRR

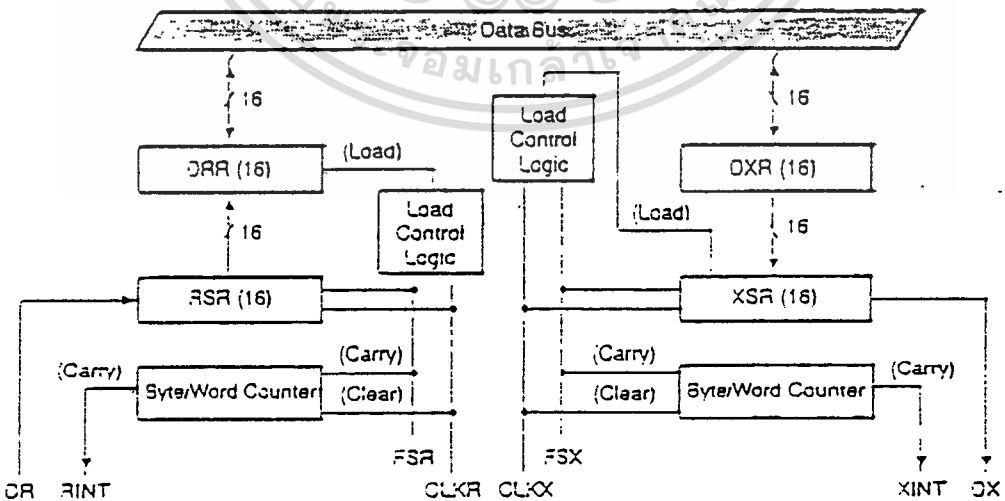
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการรับส่งข้อมูลนี้อาจจะกำหนดเป็นแบบ 8 บิต หรือ 16 บิต ก็ได้ซึ่งกำหนดได้จากโหมดการทำงาน ในการรับส่งข้อมูลนี้ได้รับการสร้างสัญญาณ Synchronize จากภายในซึ่งสามารถรับส่งข้อมูลได้สูงถึง 5 MHz

ข้อปรับปรุงของพอร์ตอนุกรมของ TMS320c26 ได้แก่การสร้างบัฟเฟอร์(Buffer)ของตัวรับและตัวส่ง นอกจากนี้ยังเพิ่มโหมดการทำงาน FSM(frame synchronize mode) เพื่อให้ใช้กับระบบโทรศัพท์แบบ PCM ตามมาตรฐาน AT&T T-1 และ OCITT G.711/712 จึงทำให้การประยุกต์ใช้งานในระบบโทรศัพท์ทำได้ง่าย

Serial Port Bits/Pins/Registers		TMS320C25
FO	Format bit	Yes
TXM	Transmit mode bit	Yes
FSM	Frame synchronization mode bit	Yes
CLKX	Transmit clock signal	Yes
CLKR	Receive clock signal	Yes
DX	Transmitted serial data signal	Yes
DR	Received serial data signal	Yes
FSX	Transmit framing synchronization signal	Yes
FSR	Receive framing synchronization signal	Yes
DXR	Data transmit register	Yes
DRR	Data receive register	Yes
XSR	Transmit shift register	Yes
RSR	Receive shift register	Yes

ตารางที่ 7 แสดงบิต,ขา,และรีจิสเตอร์ในพอร์ตอนุกรม



รูปที่ 9 แสดงบล็อกไดอะแกรมของพอร์ตอนุกรม

12. การเชื่อมต่อกับอินพุตและเอาต์พุต

TMS320c26 มีอินพุต-เอาต์พุต อย่างละ 16 พอร์ต แต่ละพอร์ตเป็นพอร์ตแบบขนาน 16 บิต โดยเชื่อมต่อกับบัสข้อมูล คำสั่งที่เกี่ยวข้องกับพอร์ตคือ IN และ OUT จะใช้เวลาในการทำงานเพียง 2 ลูกคลื่น แต่ถ้าให้ทำงานแบบซ้ำโดยการกำหนดค่าเข้าไปใน Repeat register แล้วการทำคำสั่งทั้งสองนี้จะใช้เวลาเพียง 1 ลูกคลื่นเท่านั้นในการเชื่อมโยง I/O จะแยกออกจากระบบเพราะไมโครโปรเซสเซอร์นี้มีช่องทางสำหรับโปรแกรมข้อมูล และ I/O นอกจากนี้ยังสามารถมอง I/O เหมือนเป็นหน่วยความจำได้อีกด้วย

บนตัวไอซีจะประกอบด้วย D0-D15 เป็นบัสข้อมูล และ A0-A15 เป็นบัสแอดเดรส และยังประกอบด้วยขาไอซี 3 ขา เพื่อเลือกว่าเป็นโปรแกรม ข้อมูล หรืออินพุต-เอาต์พุต (PS,DS,IS) การกำหนดทิศทางจะใช้ R/W และมีสัญญาณ STRB เป็นตัวควบคุมการรับส่งข้อมูล

TMS320c26 มีขา Hold เพื่อใช้ทำ DMA โดยเมื่อนี้แอคทีฟ(active) จะทำให้สถานะของแอดเดรสบัส บัสข้อมูลและสายสัญญาณควบคุมอยู่ในสถานะ High impedance เพื่อให้อุปกรณ์ภายนอกติดต่อกับ ROM และ RAM ได้

13. โหมดการอ้างอิงแอดเดรสของ TMS320c26(Memory Addressing Mode)

คำสั่งส่วนใหญ่ของ TMS320c26 เป็นคำสั่งที่ใช้รหัสคำสั่งขนาด 16 บิต เพื่อว่าการเฟรช และการเอ็ชชีควัสจะกระทำเพียง 1 ลูกคลื่น

ในการอ้างอิงแอดเดรส มีด้วยกัน 3 แบบคือ

- Direct แอดเดรสing mode
- Indirect แอดเดรสing mode
- Immediate แอดเดรสing mode

การอ้างอิงแอดเดรสแบบโดยตรง(direct)และโดยอ้อม(indirect) เป็นการติดต่อกับหน่วยความจำที่เก็บข้อมูลที่ต้องการนั้นอยู่ ส่วนการอ้างอิงแอดเดรสแบบ Immediate เป็นการนำเอา โอเปอร์แลนมาใช้โดยตรงในการเข้าถึงข้อมูล

การอ้างอิงแอดเดรสแบบโดยตรงจะใช้คำสั่ง 16 บิต โดยแยกออกเป็นออปโคด(Opcode) 9บิต อีก 7 บิตเป็นโอเปอร์แลน ในการทำงานจะใช้ 7 บิต LSBs จาก instruction register(IR) รวมกับ 9 บิต จาก Data Page pointer(DP) เพื่อรวมเป็น 16 บิต สำหรับอ้างอิงหน่วยความจำขนาด 64 k เวิร์ด ดังนั้นการจัดหน่วยความจำจึงแบ่งเป็นเพจจำนวน 512 เพจ โดยแต่ละเพจมีขนาด 128 เวิร์ด

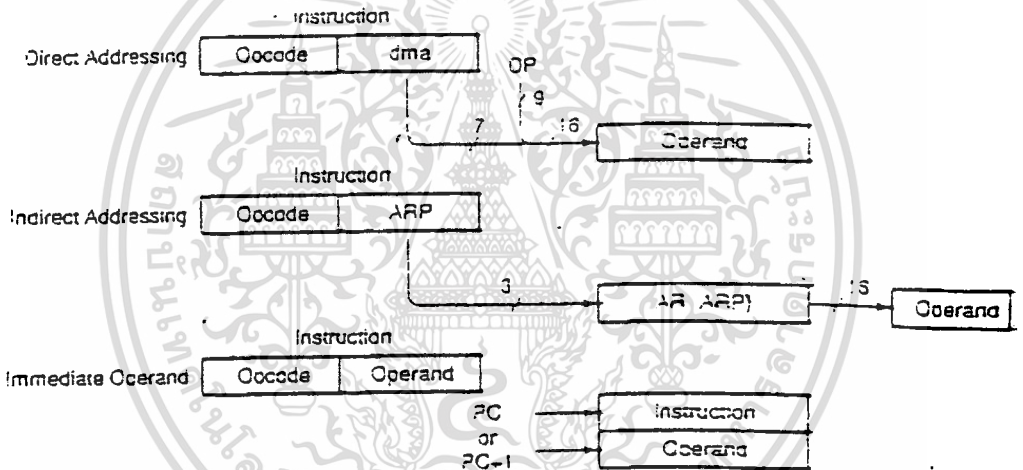
การอ้างอิงแอดเดรสแบบโดยอ้อมจะอ้างผ่านรีจิสเตอร์ช่วย (AR0-AR7) รีจิสเตอร์เหล่านี้เป็นรีจิสเตอร์สำหรับเก็บแอดเดรสของหน่วยความจำข้อมูลหรืออาจใช้เก็บข้อมูลแบบชั่วคราวก็ได้ ในการอ้างอิงแอดเดรสแบบโดยอ้อมนี้จะมีด้วยกัน 7 แบบคือ

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การชี้ตำแหน่งด้วยการเพิ่มค่า(Increment)
- การชี้ตำแหน่งด้วยการลดค่า(Decrement)
- การชี้ตำแหน่งโดยการบวกกับข้อมูลใน AR0
- การชี้ตำแหน่งโดยการลบกับข้อมูลใน AR0
- การชี้ตำแหน่งโดยการบวกกับข้อมูลใน AR0 สำหรับการทำให้ bit-reversing ใน Algorithm FFT
- การชี้ตำแหน่งโดยการลบกับข้อมูลใน AR0 สำหรับการทำให้ bit-reversing ใน Algorithm FFT

-ไม่มีการชี้ตำแหน่ง

ในการอ้างอิงแอดเดรสแบบ Immediate จะมีส่วนของโอเปอร์แลนประกอบอยู่ในคำสั่ง โดยค่าตัวเลขนี้จะเป็นไปได้ 2 ขนาดคือ แบบ 8 บิต หรือแบบ 13 บิต และสำหรับคำสั่งแบบที่มีขนาด 2 เวิร์ด จะมีขนาดของตัวเลขที่เป็นโอเปอร์แลน ขนาด 16 บิต



รูปที่ 10 แสดงโหมดการอ้างอิงแอดเดรส (Mode of instruction Operand Addressing)

Bits			Arithmetic Operation
5	3	4	
0	0	0	No operation on AR(ARP)
0	0	1	$AR(ARP) - 1 \rightarrow AR(ARP)$
0	1	0	$AR(ARP) + 1 \rightarrow AR(ARP)$
0	1	1	Reserved
1	0	0	$AR(ARP) - AR0 \rightarrow AR(ARP)$ (reverse carry propagation)
1	0	1	$AR(ARP) - AR0 \rightarrow AR(ARP)$
1	1	0	$AR(ARP) + AR0 \rightarrow AR(ARP)$
1	1	1	$AR(ARP) + AR0 \rightarrow AR(ARP)$ (reverse carry propagation)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าในรูปแบบใดก็ตาม การทำซ้ำหรือการเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตจะถือว่าผิดกฎหมาย

Instruction Field Bits 15 - 8 7 5 5 4 3 2 1 0	Notation	Operation
--Opcode--1 0 0 0 --Y--	*	No manipulation of ARs/ARP
--Opcode--1 0 0 0 1 --Y--	*Y	Y -- ARP
--Opcode--1 0 0 1 0 --Y--	*-	AR(ARP) -1 -- AR(ARP)
--Opcode--1 0 0 1 1 --Y--	*-,Y	AR(ARP) -1 -- AR(ARP) Y -- ARP
--Opcode--1 0 1 0 0 --Y--	*+	AR(ARP) +1 -- AR(ARP)
--Opcode--1 0 1 0 1 --Y--	*+,Y	AR(ARP) +1 -- AR(ARP) Y -- ARP
--Opcode--1 1 0 0 0 --Y--	*BR0-	AR(ARP) - rCAR0 -- AR(ARP)
--Opcode--1 1 0 0 1 --Y--	*BR0-,Y rcAR0	AR(ARP) - rCAR0 -- AR(ARP) Y -- ARP
--Opcode--1 1 0 1 0 --Y--	*-	AR(ARP) - AR0 -- AR(ARP)
--Opcode--1 1 0 1 1 --Y--	*-,Y rcAR0	AR(ARP) - AR0 -- AR(ARP) Y -- ARP
--Opcode--1 1 1 0 0 --Y--	*0+	AR(ARP) + AR0 -- AR(ARP)
--Opcode--1 1 1 0 1 --Y--	*0+,Y	AR(ARP) + AR0 -- AR(ARP) Y -- ARP
--Opcode--1 1 1 1 0 --Y--	*BR0+	AR(ARP) + rCAR0 -- AR(ARP)
--Opcode--1 1 1 1 1 --Y--	*BR0+,Y	AR(ARP) + rCAR0 -- AR(ARP) Y -- ARP

ตารางที่ 9 แสดงบิตสำหรับการอ้างอิงแอดเดรสแบบทางอ้อม

14. ชุดคำสั่ง (Instruction Set)

ตารางแสดงสัญลักษณ์ที่ใช้ในคำสั่ง

Symbol	Meaning
A	Port address
ACC	Accumulator
ARB	Auxiliary register pointer buffer
ARn	Auxiliary register n (AR0, AR1 assembler symbols equal to 0 or 1)
ARP	Auxiliary register pointer
B	4-bit field specifying a bit code
BIO	Branch control input
C	Carry bit
CM	2-bit field specifying compare mode
CNF	On-chip RAM configuration control bit
D	Data memory address field
DATn	Label assigned to data memory location n
dma	Data memory address
DP	Data page pointer
FO	Format status bit
FSM	Frame synchronization mode bit
HM	Hold mode bit
INTM	Interrupt mode flag bit
K	Immediate operand field
M	Addressing mode bit
MCS	Microcall stack
nnn	nnn = hexadecimal number (others are decimal values)
OV	Overflow mode flag bit
OVM	Overflow mode bit
P	Product register
PA	Port address (PA0—PA15 assembler symbols equal to 0 through 15)
PC	Program counter
PFC	Preferch counter
PM	2-bit field specifying P register output shift code
pma	Program memory address
PRGn	Label assigned to program memory location n
R	3-bit operand field specifying auxiliary register
RPTC	Repeat counter
S	4-bit left-shift code
STn	Status register n (ST0 or ST1)
SXM	Sign-extension mode bit
T	Temporary register
TC	Test control bit
TOS	Top of stack
TXM	Transmit mode bit
X	3-bit accumulator left-shift field
XF	XF pin status bit

สรุปชุดคำสั่ง (Instruction Set Summary)

ACCUMULATOR MEMORY REFERENCE INSTRUCTIONS

Mnemonic and Description		Words	16-Bit Opcode			
			MSB			LSB
ABS	Absolute value of accumulator	1	1100	1110	0001	1011
ADD	Add to accumulator with shift	1	0000	5555	M000	0000
ADDC	Add to accumulator with carry	1	0100	0011	M500	0000
ADDH	Add to high accumulator	1	0100	1000	M000	0000
ADDC	Add to accumulator short immediate	1	1100	1100	KXXX	KXXX
ADDS	Add to low accumulator with sign-extension suppressed	1	0100	1001	M000	0000
AODT	Add to accumulator with shift specified by T register	1	0100	1010	M000	0000
AOLK	Add to accumulator long immediate with shift	2	1101	5555	0000	0010
AND	AND with accumulator	1	0100	1110	M000	0000
ANOK	AND immediate with accumulator with shift	2	1101	5555	0000	0100
CMPL	Complement accumulator	1	1100	1110	0010	0111
LAC	Load accumulator with shift	1	0010	5555	M000	0000
LACK	Load accumulator short immediate	1	1100	1010	KXXX	KXXX
LACT	Load accumulator with shift specified by T register	1	0100	0010	M000	0000
LALK	Load accumulator long immediate with shift	2	1101	5555	0000	0001
NEG	Negate accumulator	1	1100	1110	0010	0011
NORM	Normalize contents of accumulator	1	1100	1110	1010	0010
OR	OR with accumulator	1	0100	1101	M000	0000
ORK	OR immediate with accumulator with shift	2	1101	5555	0000	0101
ROL	Rotate accumulator left	1	1100	1110	0011	0100
ROR	Rotate accumulator right	1	1100	1110	0011	0101
SAC	Store high accumulator with shift	1	0110	1XXX	M000	0000
SACL	Store low accumulator with shift	1	0110	0XXX	M000	0000
SBLK	Subtract from accumulator long immediate with shift	2	1101	5555	0000	0011
SFL	Shift accumulator left	1	1100	1110	0001	1000
SFR	Shift accumulator right	1	1100	1110	0001	1001
SUB	Subtract from accumulator with shift	1	0001	5555	M000	0000
SUBB	Subtract from accumulator with borrow	1	0100	1111	M000	0000
SUBC	Conditional subtract	1	0100	0111	M000	0000
SUBH	Subtract from high accumulator	1	0100	0100	M000	0000
SUBK	Subtract from accumulator short immediate	1	1100	1101	KXXX	KXXX
SUBS	Subtract from low accumulator with sign extension suppressed	1	0100	0101	M000	0000
SUBT	Subtract from accumulator with shift specified by T register	1	0100	0110	M000	0000
XOR	Exclusive-OR with accumulator	1	0100	1100	M000	0000
XORK	Exclusive-OR immediate with accumulator with shift	2	1101	5555	0000	0110
ZAC	Zero accumulator	1	1100	1010	0000	0000
ZALH	Zero low accumulator and load high accumulator	1	0100	0000	M000	0000
ZALR	Zero low accumulator and load high accumulator with rounding	1	0111	1011	M000	0000
ZALS	Zero accumulator and load low accumulator with sign extension suppressed	1	0100	0001	M000	0000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 11 แสดงชุดคำสั่งใน TMS320c26

BRANCH/CALL INSTRUCTIONS					
Mnemonic and Description		Words	16-bit Opcode		
			MSB	LSB	
I/O AND DATA MEMORY OPERATIONS					
B	Branch unconditionally	2	1111	1111	1000 0000
BACC	Branch to address specified by accumulator	1	1100	1110	0010 0101
BANZ	Branch on auxiliary register not zero	2	1111	1011	1000 0000
BBNZ	Branch if TC bit = 0	2	1111	1001	1000 0000
BBZ	Branch if TC bit = 0	2	1111	1000	1000 0000
BC	Branch on carry	2	0101	1110	1000 0000
BGEZ	Branch if accumulator ≥ 0	2	1111	0100	1000 0000
BGZ	Branch if accumulator > 0	2	1111	0001	1000 0000
BIOZ	Branch on I/O status = 0	2	1111	1010	1000 0000
BLEZ	Branch if accumulator ≤ 0	2	1111	0010	1000 0000
BLZ	Branch if accumulator < 0	2	1111	0011	1000 0000
BNC	Branch on no carry	2	0101	1111	1000 0000
BNV	Branch if no overflow	2	1111	0111	1000 0000
BNZ	Branch if accumulator = 0	2	1111	0101	1000 0000
BOV	Branch on overflow	2	1111	0000	1000 0000
BZ	Branch if accumulator = 0	2	1111	0110	1000 0000
CALA	Call subroutine indirect	1	1100	1110	0010 1100
CALL	Call subroutine	2	1111	1110	1000 0000
RET	Return from subroutine	1	1100	1110	0010 0110
TRAP	Software interrupt	1	1100	1110	0001 1110
I/O AND DATA MEMORY OPERATIONS					
Mnemonic and Description		Words	16-bit Opcode		
			MSB	LSB	
BLKD	Block move from data memory to data memory	2	1111	1101	1000 0000
BLKP	Block move from program memory to data memory	2	1111	1100	1000 0000
DMOV	Data move in data memory	1	0101	0110	1000 0000
FORT	Format serial port registers	1	1100	1110	0000 1111
IN	Input data from port	1	1000	1111	1000 0000
OUT	Output data to port	1	1110	1111	1000 0000
RFSM	Reset serial port frame synchronization mode	1	1100	1110	0011 0110
RTXM	Reset serial port transmit mode	1	1100	1110	0010 0000
RXF	Reset external flag	1	1100	1110	0000 1100
SFSM	Set serial port frame synchronization mode	1	1100	1110	0011 0111
STXM	Set serial port transmit mode	1	1100	1110	0010 0001
SXF	Set external flag	1	1100	1110	0000 1101
TBLR	Table read	1	0100	1000	1000 0000
TBLW	Table write	1	0101	1000	1000 0000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 ตารางที่ 11 แสดงชุดคำสั่งใน TMS320c26(ต่อ)

AUXILIARY REGISTERS AND DATA PAGE POINTER INSTRUCTIONS						
Mnemonic and Description		Words	16-Bit Opcode			
			MSB			LSB
AORR	Add to auxiliary register short immediate	1	0111	1110	KKKK	KKKK
CMPR	Compare auxiliary register with auxiliary register ARO	1	1100	1110	0101	00KK
LAR	Load auxiliary register	1	0011	0RRR	MD00	0000
LARK	Load auxiliary register short immediate	1	1100	0RRR	KKKK	KKKK
LARP	Load auxiliary register pointer	1	0101	0101	1000	1RRR
LDP	Load data memory page pointer	1	0101	0010	MD00	0000
LDPK	Load data memory page pointer immediate	1	1100	100K	KKKK	KKKK
LRLK	Load auxiliary register long immediate	2	1101	0RRR	0000	0000
MAR	Modify auxiliary register	1	0101	0101	MD00	0000
SAR	Store auxiliary register	1	0111	0RRR	MD00	0000
SBRK	Subtract from auxiliary register short immediate	1	0111	1111	KKKK	KKKK
T REGISTER, P REGISTER, AND MULTIPLY INSTRUCTIONS						
Mnemonic and Description		Words	16-Bit Opcode			
			MSB			LSB
APAC	Add P register to accumulator	1	1100	1110	0001	0101
LPH	Load high P register	1	0101	0011	MD00	0000
LT	Load T register	1	0011	1100	MD00	0000
LTA	Load T register and accumulate previous product	1	0011	1101	MD00	0000
LTD	Load T register; accumulate previous product and move data	1	0011	1111	MD00	0000
LTP	Load T register and store P register in accumulator	1	0011	1110	MD00	0000
LTS	Load T register and subtract previous product	1	0101	1011	MD00	0000
MAC	Multiply and accumulate	2	0101	1101	MD00	0000
MACD	Multiply and accumulate with data move	2	0101	1100	MD00	0000
MPY	Multiply (with T register; store product in P register)	1	0011	1000	MD00	0000
MPYA	Multiply and accumulate previous product	1	0011	1010	MD00	0000
MPYK	Multiply immediate	1	101K	KKKK	KKKK	KKKK
MPYS	Multiply and subtract previous product	1	0011	1011	MD00	0000
MPYU	Multiply unsigned	1	1100	1111	MD00	0000
PAC	Load accumulator with P register	1	1100	1110	0001	0100
SPAC	Subtract P register from accumulator	1	1100	1110	0001	0110
SPH	Store high P register	1	0111	1101	MD00	0000
SPL	Store low P register	1	0111	1100	MD00	0000
SPM	Set P register output shift mode	1	1100	1110	0000	10KK
SQRA	Square and accumulate	1	0011	1001	MD00	0000
SQRS	Square and subtract previous product	1	1101	1010	MD00	0000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
 ตารางที่ 11 แสดงชุดคำสั่งใน TMS320c26(ต่อ)

CONTROL INSTRUCTIONS						
Mnemonic and Description		Words	16-Bit Opcode			
			MSB			LSB
BIT	Test bit	1	1001	3888	0000	0000
BITT	Test bit specified by T register	1	0101	0111	0000	0000
CNFD ^r	Configure clock as data memory	1	1100	1110	0000	0100
CNFP ^r	Configure block as program memory	1	1100	1110	0000	0101
CONF ^t	Configure clock as data/program memory	1	1100	1110	0011	11XX
DINT	Disable interrupt	1	1100	1110	0000	0001
ENINT	Enable interrupt	1	1100	1110	0000	0000
IDLE	Idle until interrupt	1	1100	1110	0001	1111
LST	Load status register ST0	1	0101	0000	0000	0000
LST1	Load status register ST1	1	0101	0001	0000	0000
NOP	No operation	1	0101	0101	0000	0000
POP	Pop 100 of stack to low accumulator	1	1100	1110	0001	1101
PCPD	Pop 100 of stack to data memory	1	0111	1010	0000	0000
PSHD	Push data memory value onto stack	1	0101	0100	0000	0000
PUSH	Push low accumulator onto stack	1	1100	1110	0001	1100
RC	Reset carry bit	1	1100	1110	0011	0000
RHM	Reset hold mode	1	1100	1110	0011	1000
ROVM	Reset overflow mode	1	1100	1110	0000	0010
RPT	Repeat instruction as specified by data memory value	1	0100	1011	0000	0000
RPTK	Repeat instruction as specified by immediate value	1	1100	1011	XXXX	XXXX
RSXM	Reset sign-extension mode	1	1100	1110	0000	0110
RTC	Reset test/control flag	1	1100	1110	0011	0010
SC	Set carry bit	1	1100	1110	0011	0001
SHM	Set hold mode	1	1100	1110	0011	1001
SOVM	Set overflow mode	1	1100	1110	0000	0011
SST	Store status register ST0	1	0111	1000	0000	0000
SST1	Store status register ST1	1	0111	1001	0000	0000
SSXM	Set sign-extension mode	1	1100	1110	0000	0111
STC	Set test/control flag	1	1100	1110	0011	0011

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งตารางที่ 11 แสดงชุดคำสั่งใน TMS320c26(ต่อ) องค์กรเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

โปรแกรมภาษาแอสเซมบลีสำหรับคำนวณ FFT และ วิเคราะห์ฮาร์มอนิก
บน TMS320c26 ตามแผนภาพขั้นตอน(Flow chart)ในบทที่ 5

```

*****
; HARMONICS DETECTOR
; Adviser: Siriwat Pothiwatthakoon
; Arnantawat Kunakorn
; Advisee: Surasak Rodkaew code.35104499 4B
; Udom Wongsirinopphakhun code.35104562 4B
;
; KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG 2539
*****
;first you must select to display with oscilloscope or LCD MODULE
YES .set 1 ;
NO .set 0 ;
OSCILLOSCOPE .set YES ; select display output to Oscilloscope
LCDMODULE .set NO ; select display output to LCD MODULE
;-----
.if OSCILLOSCOPE ; if select oscilloscope mode will use
FFT_S .set 256 ; conf 1 and sampling point 256 point
FFT_S-1 .set 255 ; frequency sampling is 44 kz
FFT_S/2 .set 128 ;
(FFT_S/2)-1 .set 127 ;
.endif
.if LCDMODULE ; if selec LCDMODULE mode will use
FFT_S .set 64 ; conf 2 and sampling point 64 point
FFT_S-1 .set 63 ; frequencu sampling is 3215 kz
FFT_S/2 .set 32 ;
(FFT_S/2)-1 .set 31 ;
.endif
;-----
;set frequency sampling rate
.if OSCILLOSCOPE
AIC_1 .set 00c18h ;TB =TA = 6 0000110000011000 = 00c18h
AIC_2 .set 00205h ;TA '=TA' = 1 0000001000000101 = 00205h
AIC_3 .set 0264eh ;RB =TB =13h 0010011001001110 = 0264eh 44hz
AIC_CMD .set 00003h ;COMMAND 0000000001000011 = 00043h
.endif
.if LCDMODULE
AIC_1 .set 03e7ch ;TB =TA = 31 0011111001111100 = 03e7ch
AIC_2 .set 00205h ;TA '=TA' = 1 0000001000000101 = 00205h
AIC_3 .set 068d2h ;RB =TB = 52 0110100011010010 = 068d2h 3215hz
AIC_CMD .set 00003h ; COMMAND 0000000001000011 = 00043h
.endif
;-----
d loops .set 03Fh ; synch pulse delay loop
TEMPX .set 060h ; st0 STATUS storage
STAT1 .set 061h ; st1 STATUS storage
ACCU_lo .set 062h ;
ACCU_hi .set 063h ;
TEMP .set 064h ; location of TEMPorary storage
;-----
; SECONDARY VECTOR TABLE LOACTED IN B0 PROGRAM RAM
;-----
.include "mmregs.asm" ; > USERCODE SHOULD NOT OVERWRITE DSKD <
.ps 0fa00h ; > VECTORS. ON LOAD, INT2 IS RESTORED <
B start ;RS > BY DSKD, BUT TRAP IS NOT <
B start ;INT0
B start ;INT1
B start ;INT2 > DSKD LOAD IGNORES INT2 VECTOR
B start ;TINT
B RINT ;RINT Branch to receive interrupt routine
eint ;XINT XINT is only for timing, so just return

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

eint      ;XINT XINT is only for timing, so just return
ret      ;
; Begin TRAP/DSKD Kernal ;DSKD load does not restore this code!

```

APPLICATION CODE IS LOCATED ABOVE DSKD KERNAL

```

.ps      0FB00h      ;
.entry   ;
start:   ldpk      0      ; All direct addressing is to MMRs and B2
        fort      0      ; Serial port : 16 bit
        rtxm      ;
        sfsm      ;
        lack      080h   ; AIC reset by pulsing /BR (Global Data)
        sach      DXR    ; send 0 to DXR (AIC)
        sacl      GREG   ; 256 * 100 nS /BR pulse
        lrlk      ARO,0FFFFh ;
        rptk      255    ; read junk from address 0xFFFF
        lac       *,0,ARO ;

```

```

.if OSCILLOSCOPE      ; when enter debugger call dskd m1
        conf      1      ; B1,B3 as DRAM if direct bootload
.endif
.if LCDMODULE        ; when enter debugger call dskd m2
        conf      2      ; B1 as DRAM if direct bootload
.endif
        sovm      ; catch accumulator overflows

```

```

AIC_RS: lack      024h   ; Turn on XINT
        sacl      IMR    ;
        idle     ;
        lalk      AIC_1  ; Load each AIC configuration word
        call     AIC_2nd ; and load it into the AIC
        lalk      AIC_2  ;
        call     AIC_2nd ;
        lalk      AIC_3  ;
        call     AIC_2nd ;
        lalk      AIC_CMD ;
        call     AIC_2nd ;

```

```

        lark      AR7,0  ; Buffer initialy filled
        sxxm     ;
        lack      014h   ; AIC RINT
        sacl      IMR    ; where INTO indicates EOC (End Of Conv)

```

```

        lark      AR7,0  ; Buffer initialy filled
FFT:    lrlk      ARO,FFT_S/2 ;
        larp      ARO    ; start FFT with ARO=FFTSIZE
new_stg lrlk      AR1,_D_base ; AR1 is the TOP BFLY address
        lrlk      AR2,_D_base ; AR2 is the BOT BFLY address
        lrlk      AR3,_T_base+1 ; AR3 is the TWiddle pointer
        lrlk      AR4,FFT_S/2 ; AR4 counts DFT blocks
        b        n_DFT2,*,AR1 ;
DFT:    mar      *BR0+,AR5 ; complete circular buffer for TW's
        lark      AR5,1   ; set up DFT loop with *BR0+/BANZ
        mar      *BR0+,AR1 ; using 1 cuts *BR0+ loop in half!

```

```

; AR1=Top AR2=Bottom AR3=Twiddle
;
BFLY:   lac       *,14,AR2 ;(imag1+imag2)/4

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

add      *,14,AR1      ;
sach     **+,1,AR2     ;store TOP imag
sub      *,15          ;(imag1-imag2)/2
sach     **+,1,AR1     ;store BOT imag
lac      *,14,AR2     ;(real1+real2)/4
add      *,14,AR1     ;
sach     **+,1,AR2     ;store TOP real
sub      *,15          ;(real1-real2)/2
sach     *,1,AR5       ;store BOT real
banz     OK,*BR0+,AR3 ;If at DFT end quit early
;-----

```

```

mar      **+,AR2       ;clean up TW base (xxx0000+1)
mar      **+           ;modify BOTom DATA pointer
mar      *0+           ;
mar      *0+,AR1       ;
n_DFT2: mar      *0+       ;modify the TOP pointer
mar      *0+,AR4       ;
banz     DFT,*0-,AR3   ;dec DFT block count AR4 by OFFset
larp     ARO           ;
mar      *BR0+        ;
banz     new stg,*     ;if OFFset was 1, now cleared
b        endFFT       ;
;-----

```

```

OK      lt      *-,AR2       ;TREG=TWR      *NOTE* Twiddles are Q15
mpy     *-,AR2       ;PREG=REAL*TWR
ltp     **+,AR3       ;TREG=IMAG     ACCU=REAL*TWR
mpy     *,AR3         ;PREG=IMAG*TWI      AR2=R AR3=I
lts     **+,AR2       ;TREG=TWI     ACCU=REAL*TWR-IMAG*TWI
mpy     *,AR2         ;PREG=REAL*TWI
sach     *-,1,AR2     ;<<<<<<;
ltp     *,AR3         ;TREG=IMAG     ACCU=REAL*TWI
mpy     *BR0+,AR2    ;PREG=IMAG*TWR
apac    *             ;
sach     **+,1,AR2    ;<<<<<<;
b        BFLY,**+,AR1 ;
;-----

```

```

endFFT: larp     AR2       ;Transform REAL & IMAG to log magnitude
lrlk    AR2, D base     ;AR3=FFT data pointer
lrlk    AR3,FFT_S-1    ;AR5=FFT loop counter
more_MAG sqra    **       ;PREG=IMAG^2
ltp     *,AR3         ;TREG=REAL     ACCU=IMAG^2
;-----

```

```

.if OSCILLOSCOPE
mpy     *,AR1         ;PREG=REAL^2
apac    *             ;ACCU=REAL^2+IMAG^2
lark     AR1,31        ;Normalize the accumulator
rptk    30            ;
norm    *-,AR1        ;
bnz     sig_NZ,* ,AR2 ;if zero must return 0
sig_NZ: lark     AR1,0   ;
sach     *,2,AR2       ; clear explicit 1.0 from mantissa
zals    *             ; load into accumulator and
andk    OFF80h        ; clear LSB's for AIC
sar     AR1,*         ; append the exponent AR5
addh    *             ;
xork    020h,15       ; change to 2's compliment
rptk    3             ; jam result to top of ACCU
sfl     *             ;
sach     **+,7,AR3     ;
banz     more_MAG,*-,AR2 ;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

        .endif                                ; keep going until all done
;-----
        .if LCDMODULE                        ; Find square root data in accumulator
GUESS   .set      00                        ;0780h
ROOT    .set      01                        ;
ACCH    .set      02                        ;
ACCL    .set      03                        ;
;
;GET INPUT AT ACCUMULATOR TO CALCULATE SQROOT
        mpy      *,AR2                      ;
        apac
MAINROOT:ldpk      15                       ;
        sach     ACCH                       ; store accumulator in buffer
        sacl     ACCL                       ;
        lalk     0                           ;
LOOPS:  sacl     GUESS                       ; set guess that store result to zero
        zalh     ACCH                       ;
        adds     ACCL                       ; ACCU = data to find square root
        lt       GUESS                       ; TR = GUESS
        mpyu     GUESS                       ; PR = GUESS^2
        spac     ; ACCU = DATA - GUESS^2
        bgz      BURI                       ; if more go increase GUESS
        bz       MEONG                       ; if less subtract one
        lac      GUESS                       ;
        sblk     1                           ;
        sacl     GUESS                       ;
        b        MEONG                       ; go out
BURI:   lac      GUESS                       ;
        addk     1                           ;
        b        LOOPS                       ;
MEONG:  lac      GUESS                       ; store root in accumulator and store in REAL
        sacl     ++,0,AR3                   ; check loop
        banz     more_MAG,*--,AR2          ; keep going until all done
        ldpk     0                           ;
        .endif                                ;
;-----
BITREV: lrlk     AR0,FFT_S                   ;Now perform Output bit reversal
        lrlk     AR1,_D_base                 ;by moving the magnitude, which
        lrlk     AR2,_D_base+1              ;is in the REAL slots, into the
        lrlk     AR3,FFT_S-1               ;IMAG slots of the FFT data array
more_BR lac      ++                          ;load the magnitude
        mar      ++,AR1                     ;
        sacl     *BR0+,0,AR3                ;move it to an open IMAG slot
        banz     more_BR,*--,AR2          ;more data to move?
;-----
        .if LCDMODULE                        ;
        lrlk     AR3,6                       ;move harm and funda to page 15
        lrlk     AR2,7EBh                   ;destination
        lrlk     AR1,602h                  ;origin 600h
        larp     AR1                         ; 602h.....7EBh..fundamental
READ:   lac      ++                          ; 604h.....7ECh..harmonic 03
        adr      1                           ; 606h.....7EDh..harmonic 05
        larp     AR2                         ; 608h.....7EEh..harmonic 07
        sacl     ++,0,AR3                   ; 60ah.....7EFh..harmonic 09
        banz     READ,*--,AR1              ; 60ch.....7F0h..harmonic 11
        ; 60eh.....7F1h..harmonic 13
        call     DISPLAY                    ;display data to LCD MODULE
        ldpk     0                           ;
        .endif                                ;
;-----

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

MOVE_IO  larp      AR7          ;wait until buffer is full
        banz      MOVE_IO,* ,AR2 ;(AR7 is decremented by ISR)
        lrlk      AR3,_D_base    ;AR3=FFT data pointer
        lrlk      AR4,_B_base    ;AR4=BUFF data pointer
        lrlk      AR5,(FFT S/2)-1 ;AR5=FFT loop counter
        lrlk      AR6,_B_base    ;AR6=ISR BUFF data pointer
        lalk      08000h        ;send synch when BUFF is full
        sacl      DXR           ;
        lark      AR2,d_loops    ;
delay:   rptk      060h          ;
        nop                ;
        banz      delay,*-      ;
        lrlk      AR2, T_base+1  ;AR2=WIN data pointer
        lrlk      AR7,FFT_S-1    ;AR7=ISR BUFF loop counter
        ;-----
more_IO  lrlk      ARO,FFT_S/2    ; Use twiddle table for raised
        lalk      04000h,1       ; cosine window
        add       *BR0+,0,AR4    ;
        sfr                ;
        sacl      TEMP          ;
        lt        TEMP          ;TREG=WIN
        mpy       *,AR3         ;PREG=IN*WIN
        zals      *,AR4         ;ACCU=magnitude (put in Buffer)
        sacl      **+,0,AR3     ;
        sach      **+,0,AR3     ;<<<<<<;IMAG=0
        pac                ;
        sach      **+,1,AR5     ;REAL=IN (windowed buffer)
        eint                ;1st BUFF posn clr so enable INT's
        banz      more_IO,*-,AR2 ;
        lrlk      AR5,(FFT S/2)-1 ;AR5=FFT loop counter
more_IO2:lalk      04000h,1       ; cosine window
        add       *BR0-,0,AR4    ;
        sfr                ;
        sacl      TEMP          ;
        lt        TEMP          ;TREG=IN
        mpy       *,AR3         ;PREG=IN*WIN
        zals      *,AR4         ;ACCU=magnitude (put in Buffer)
        sacl      **+,0,AR3     ;
        sach      **+,0,AR3     ;<<<<<<;IMAG=0
        pac                ;
        sach      **+,1,AR5     ;REAL=IN (windowed buffer)
        banz      more_IO2,*-,AR2 ;
        b         FFT           ;
        ;-----
RINT:   ldpk      0              ;
        sst1      STAT1         ;Recover ARP from ARB by LST1 last
        larp      AR7          ;AR6 = current buffer position
        banz      more_buf,*-,AR6 ;if buffer is full RET w/o EINT
        lark      AR7,0         ;
        lst1      STAT1         ;
        ret                ;
more_buf:
        sacl      ACCU_lo       ;
        sach      ACCU_hi       ;
        zalh      *              ; ACCU = FREQ + OFFSET + HEIGHT
        adlk      06000h,15     ; using ACCU_hi for OVFLW protection
        sach      *              ;
        lac       *              ;
        andk      OFFFCh        ;clear LSB's
    
```

```

sac1    DXR                ;
;-----
lac     DRR                ;
bit     TEMPX,15           ;Inverting every other input aliases the
bbz     NO_NVRT            ;frequency domain, swapping DC and Nyquist!
neg
NO_NVRT
sac1    **                 ;<<< store DRR, and point to next
lac     TEMPX              ;
xork    1                  ;
sac1    TEMPX              ;
zalh    ACCU_hi            ;
adds    ACCU_lo            ;
lst1    STAT1              ;
eint
ret
;-----
AIC_2nd adlk    6,15        ;set ACCU_hi = 3 for secondary XMIT
idle
sach    DXR                ;
idle    ;ACCU_hi requests 2nd XMIT
sac1    DXR                ;
idle    ;ACCU_lo sets up registers
sac1    DXR,2              ;close command with LSB = 00
idle
eint
ret
;=====
.if OSCILLOSCOPE
.listoff
.ds     00400h
.include "twiddle.asm"
.liston
.endif
.if LCDMODULE
.include "display.asm" ; include display program
.listoff
.ds     00600h           ;NOTE: Twiddles are relocated to
.include "ttwiddle.asm" ; 0600h (B2) using CONF 2
.liston
.endif
;=====

```

```

-----
;display.asm                                DISPLAY SUBPROGRAM
-----
;LINE 1 DECLARE FOR LCD MODULE
ORDER11 .SET      68                      ;STORE n0 CHARACTER FOR DISPLAY
ORDER21 .SET      69                      ;STORE On CHARACTER FOR DISPLAY
INT21   .SET      73                      ;
INT11   .SET      74                      ;
POINT1  .SET      76                      ;
-----
;LINE 2 DECLARE FOR LCD MODULE
ORDER12 .SET      84                      ;STORE n0 CHARACTER FOR DISPLAY
ORDER22 .SET      85                      ;STORE On CHARACTER FOR DISPLAY
INT22   .SET      89                      ;
INT12   .SET      90                      ;
POINT2  .SET      92                      ;
-----
;set register for use in division subprogram
HARM-N  .SET      96                      ;STORE VALUE OF HARMONIC_ N FOR CALCULATION
SIGN    .SET      97                      ;STORE SIGN OF DIVISION
RESULT  .SET      98                      ;STORE RESULT OF A/B OF DIVISION SUBPROGRAM
A       .SET      99                      ;STORE NUMERATOR OF DIVISION SUBPROGRAM
B       .SET      100                     ;STORE DENOMINATOR OF DIVISION SUBPROGRAM
INTEGER .SET      101                     ;STORE INTERGER FOR CHANGE TO BASE 10
REMAINDER .SET    102                     ;STORE VALUE OF REMAINDER OF DIVISION
OVERFLOW .SET     103                     ;
LINECHECK .SET    104                     ;
TEMPXD   .SET     105                     ;
STAT1D   .SET     106                     ;
FUNDA    .SET     107                     ;STORE VALUE OF FUNDAMENTAL
HARM3    .SET     108                     ;STORE VALUE OF HARMONIC ORDER 3
HARM5    .SET     109                     ;STORE VALUE OF HARMONIC ORDER 5
HARM7    .SET     110                    ;STORE VALUE OF HARMONIC ORDER 7
HARM9    .SET     111                    ;STORE VALUE OF HARMONIC ORDER 9
HARM11   .SET     112                    ;STORE VALUE OF HARMONIC ORDER 11
HARM13   .SET     113                    ;STORE VALUE OF HARMONIC ORDER 13
STO31    .SET     26                      ;
STO32    .SET     27                      ;
STO33    .SET     28                      ;
STO51    .SET     29                      ;
STO52    .SET     30                      ;
STO53    .SET     31                      ;
STO71    .SET     32                      ;
STO72    .SET     33                      ;
STO73    .SET     34                      ;
STO91    .SET     35                      ;
STO92    .SET     36                      ;
STO93    .SET     37                      ;
STO111   .SET     38                      ;
STO112   .SET     39                      ;
STO113   .SET     40                      ;
STO131   .SET     41                      ;
STO132   .SET     42                      ;
STO133   .SET     43                      ;
COUNTER  .SET     44                      ;
-----
;***** DIVISION SUBPROGRA *****
;
DISPLAY:LDPK    15                      ;START DATA ADDRESS AT 780H
          RXXM

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

ORDER3: LALK      10
        SACL      COUNTER
        LAC       HARM3      ;LOAD HARM3 TO ACCUMULATOR
        SACL      HARM-N     ;STORE HARM3 TO HARM-N FOR CALCULATION
        LACK      30H
        SACL      ORDER11    ;STORE 0 FOR DISPLAY ORDER1
        LACK      33H
        SACL      ORDER21    ;STORE 3 FOR DISPLAY ORDER2
        LAC       1          ;SET LOOP FOR DISPLAY
        SACL      LINECHECK
        CALL      CALCULATION ;GO TO CALCULATION PERCENT HARMONIC 03
        LAC       INT21      ;BACK UP DATA FOR ERROR DISPLAY
        SACL      STO31
        LAC       INT11
        SACL      STO32
        LAC       POINT1
        SACL      STO33
    
```

```

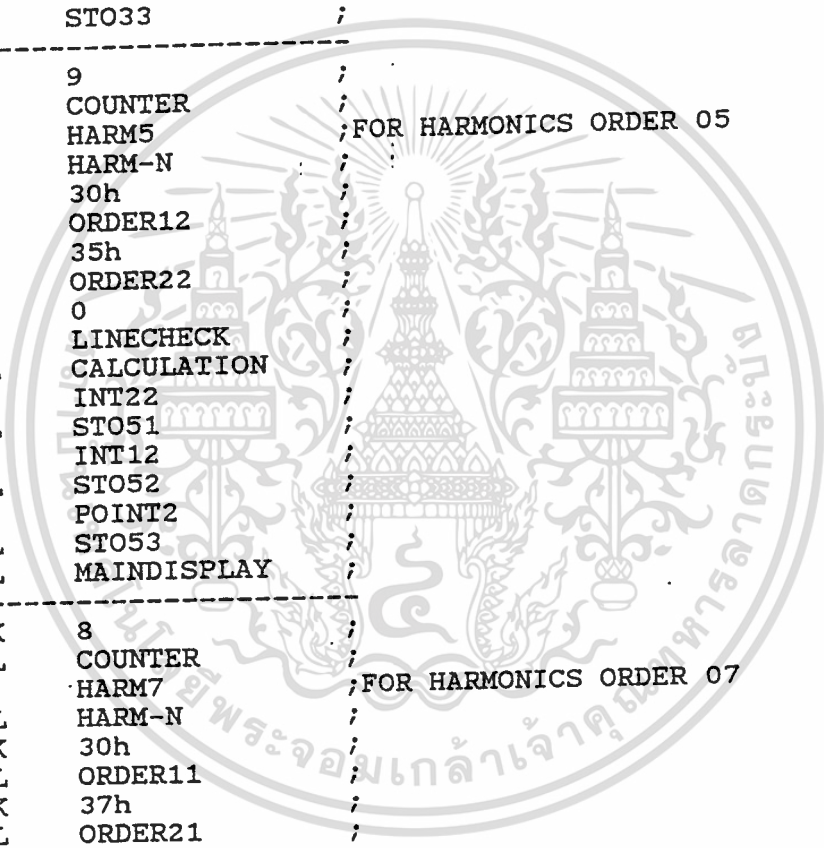
ORDER5: LALK      9
        SACL      COUNTER
        LAC       HARM5      ;FOR HARMONICS ORDER 05
        SACL      HARM-N
        LACK      30h
        SACL      ORDER12
        LACK      35h
        SACL      ORDER22
        LACK      0
        SACL      LINECHECK
        CALL      CALCULATION
        LAC       INT22
        SACL      STO51
        LAC       INT12
        SACL      STO52
        LAC       POINT2
        SACL      STO53
        CALL      MAINDISPLAY
    
```

```

ORDER7: LALK      8
        SACL      COUNTER
        LAC       HARM7      ;FOR HARMONICS ORDER 07
        SACL      HARM-N
        LACK      30h
        SACL      ORDER11
        LACK      37h
        SACL      ORDER21
        LAC       1
        SACL      LINECHECK
        CALL      CALCULATION
        LAC       INT21
        SACL      STO71
        LAC       INT11
        SACL      STO72
        LAC       POINT1
        SACL      STO73
    
```

```

ORDER9: LALK      7
        SACL      COUNTER
        LAC       HARM9      ;FOR HARMONICS ORDER 09
        SACL      HARM-N
    
```



```

LACK      30h      ;
SACL      ORDER12  ;
LACK      39h      ;
SACL      ORDER22  ;
LACK      0         ;
SACL      LINECHECK ;
CALL      CALCULATION ;
LAC       INT22     ;
SACL      STO91     ;
LAC       INT12     ;
SACL      STO92     ;
LAC       POINT2    ;
SACL      STO93     ;
CALL      MAINDISPLAY ;
-----
ORDER-11:LALK 6      ;
SACL      COUNTER   ;
LAC       HARM11    ;FOR HARMONICS ORDER 11
SACL      HARM-N    ;
LACK      31h      ;
SACL      ORDER11   ;
SACL      ORDER21   ;
LAC       31h      ;
SACL      LINECHECK ;
CALL      CALCULATION ;
LAC       INT21     ;
SACL      STO111    ;
LAC       INT11     ;
SACL      STO112    ;
LAC       POINT1   ;
SACL      STO113    ;
-----
ORDER13:LALK 5      ;
SACL      COUNTER   ;
LAC       HARM13    ;FOR HARMONICS ORDER 13
SACL      HARM-N    ;
LACK      31h      ;
SACL      ORDER12   ;
LACK      33h      ;
SACL      ORDER22   ;
LACK      0         ;
SACL      LINECHECK ;
CALL      CALCULATION ;
LAC       INT22     ;
SACL      STO131    ;
LAC       INT12     ;
SACL      STO132    ;
LAC       POINT2    ;
SACL      STO133    ;
CALL      MAINDISPLAY ;
ssxm     ;
ret      ;
-----
;MAIN HARMONICS CALCULATION ;
CALCULATION: ;
LAC       FUNDA     ;
SUB       HARM-N    ;
BGZ      DOG        ; IF FUNDA MORE THAN HARMONIC GO CONTINUE
B        FULLBACK   ; IF ERROR GO RETURN OLD VALUE
DOG:     LALK       1000 ; FOR DISPLAY 2 DIGIT AND 1 POINT

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

SACL RESULT ;
LT RESULT ;
MPYU HARM-N ;>>>>>;CHANGE TO BE PERCENT BY HARM-N*1000
PAC ;
LARP AR3 ;
LRLK AR3,0 ;
BATMAN: SUB FUNDA ; CHANGE TO PERCENT IN HEXADECIMAL
ADRK 1 ;
BGZ BATMAN ;
SBRK 1 ;RESULT OF DIVISION MAX = 999
SAR AR3,INTEGER ;
;-----
CHANGE1: LAC INTEGER ;LOAD INTEGER TO ACC FOR A
SBLK 10 ;CHANGE DATA TO DECIMAL
BLZ F00 ;
LAC INTEGER ;
SACL A ;
LALK 10 ;LOAD 10 TO ACC FOR B
SACL B ;
CALL DIVISION ;
SACL INTEGER ;
SACH REMAINDER ;
;-----
FPOINT: LAC LINECHECK ; FOR DISPLAY POINT
BNZ SOUP2 ;
LAC REMAINDER ;
ADLK 30h ;
SACL POINT2 ;
B FINT ;
SOUP2: LAC REMAINDER ;
ADLK 30h ;
SACL POINT1 ;
;-----
FINT: LAC INTEGER ; FOR DISPLAY INTEGER
SBLK 10 ;
BGZ FAA ;
BZ F10 ;
BLZ FOA ;
;-----
FOO: LAC LINECHECK ;
BNZ SUP00 ;
LAC REMAINDER ;
ADLK 30h ;
SACL POINT2 ;
LALK 30h ;
SACL INT12 ;
SACL INT22 ;
RET ;
SUP00: LAC REMAINDER ;
ADLK 30h ;
SACL POINT1 ;
LALK 30h ;
SACL INT11 ;
SACL INT21 ;
RET ;
;-----
FOA: LAC LINECHECK ;
BNZ SUPOA ;
LAC INTEGER ;
ADLK 30h ;

```

	SACL	INT12	;
	LALK	30h	;
	SACL	INT22	;
	RET		;
SUPOA:	LAC	INTEGER	;
	ADLK	30h	;
	SACL	INT11	;
	LALK	30h	;
	SACL	INT21	;
	RET		;

F10:	LAC	LINECHECK	;
	BNZ	SUP10	;
	ADLK	30h	;
	SACL	INT12	;
	LALK	31h	;
	SACL	INT22	;
	RET		;
SUP10:	SACL	INT21	;
	LALK	30h	;
	SACL	INT11	;
	RET		;

FAA:	LAC	INTEGER	;
	SACL	A	;
	LALK	10	;
	SACL	B	;
	CALL	DIVISION	;
	SACH	REMAINDER	;
	SACL	INTEGER	;
	LAC	LINECHECK	;
	BNZ	LINE1	;
LINE2:	LAC	INTEGER	;
	ADLK	30h	;
	SACL	INT22	;
	LAC	REMAINDER	;
	ADLK	30h	;
	SACL	INT12	;
	RET		;
LINE1:	LAC	INTEGER	;
	ADLK	30h	;
	SACL	INT21	;
	LAC	REMAINDER	;
	ADLK	30h	;
	SACL	INT11	;
	RET		;

FULLBACK:			;CHECK DATA WHAT ORDER TO ERROR
	LAC	COUNTER	;
	SBLK	10	;
	BZ	IT3	;
	LAC	COUNTER	;
	SBLK	9	;
	BZ	IT5	;
	LAC	COUNTER	;
	SBLK	8	;
	BZ	IT7	;
	LAC	COUNTER	;
	SBLK	7	;

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

BZ      IT9      ;
LAC     COUNTER  ;
SBLK    6        ;
BZ      IT11     ;
LAC     COUNTER  ;
SBLK    5        ;
BZ      IT13     ;
-----;
IT3:    LAC      STO31      ; RETURN DATA OF HARMONICS ORDER 03
        SACL     INT21     ;
        LAC      STO32     ;
        SACL     INT11     ;
        LAC      STO33     ;
        SACL     POINT1    ;
        RET      ;
-----;
IT5:    LAC      STO51      ; RETURN DATA OF HARMONICS ORDER 05
        SACL     INT22     ;
        LAC      STO52     ;
        SACL     INT12     ;
        LAC      STO53     ;
        SACL     POINT2    ;
        RET      ;
-----;
IT7:    LAC      STO71      ; RETURN DATA OF HARMONICS ORDER 07
        SACL     INT21     ;
        LAC      STO72     ;
        SACL     INT11     ;
        LAC      STO73     ;
        SACL     POINT1    ;
        RET      ;
-----;
IT9:    LAC      STO91      ; RETURN DATA OF HARMONICS ORDER 09
        SACL     INT22     ;
        LAC      STO92     ;
        SACL     INT12     ;
        LAC      STO93     ;
        SACL     POINT2    ;
        RET      ;
-----;
IT11:   LAC      STO111     ; RETURN DATA OF HARMONICS ORDER 11
        SACL     INT21     ;
        LAC      STO112    ;
        SACL     INT11     ;
        LAC      STO113    ;
        SACL     POINT1    ;
        RET      ;
-----;
IT13:   LAC      STO131     ; RETURN DATA OF HARMONICS ORDER 13
        SACL     INT22     ;
        LAC      STO132    ;
        SACL     INT12     ;
        LAC      STO133    ;
        SACL     POINT2    ;
        RET      ;
-----;
;DIVISION SUBPROGRAM
;IN =A,B
;A FOR NUMERATOR AND B IS DENOMINATOR FIND A/B
;ACCL=RESULT

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

;ACCH=REMAINDER
;WHEN YOU OUT FROM THIS ACC= REMAINDER AND RESULT OF DIVISION A/B
DIVISION:LT A ;LOAD A TO TR
MPY B ;PR = A*B
PAC ;ACC= PR
SACH SIGN ;STORE ACCH IN SIGN FOR RESULT OF DIVISION
LAC B ;LOAD ACC BY B
ABS ;GET ABSOLUTE
SACL B ;STORE ABSOLUTE OF B TO B
LAC A ;LOAD ACC BY A
ABS ;GET ABSOLUTE OF A
;DIVISION CAN START HERE
RPTK 15 ;
SUBC B ;DIVISION A BY B
SACL RESULT ;STORE QOUTIENT TO RESULT
SACH REMAINDER ;STORE REMAINDER OF DIVISION
LAC SIGN ;LOAD SIGN FOR CONDITION TO JUMP
BGEZ DONE ;IF SIGN >= 0 IS POSITIVE GO TO DONE
ZAC ;IF SIGN IS NEGATIVE CLEAR ACCUMULATOR
SUB RESULT ;MAKE 1'S COMPLEMENT RESULT
SACL RESULT ;STORE QOUTIENT TO RESULT
DONE: ZALH REMAINDER ;STORE REMAINDER TO ACCH AND CLEAR ACCL
ADD RESULT ;ADD RESULT TO ACCL TO COMPLETE ACCUMULATOR
RET

```

;***** LCD MODULE DISPLAY *****

```

MAINDISPLAY:
LDPK 256 ;ADDRESS 8000H
LALK 0EF0cH ;FIRST DELAY
CALL DELAY ;
;LCD INITIAL
LACK 01H ;CLEAR DISPLAY
CALL LCDWI ;
LACK 02H ;CURSOR AT HOME
CALL LCDWI ;
LACK 06H ;ENTRY MODE SET
CALL LCDWI ;
LACK 0EH ;DISPLAY ON OFF
CALL LCDWI ;
LACK 38H ;FUNCTION SET
CALL LCDWI ;

```

```

;-----
MODULE: LARP 2 ;SELECT AR2
LRLK AR2,7COH ;START BLOCK DATA AT 7COH FOR AR2
CALL LCDLD ;CALL WRITE DATA
LALK 000CH ;DELAY LOOP 4 micro-sec
CALL DELAY ;
LDPK 15 ;
RET ;OUT FROM LCD MODULE

```

```

;-----
;IN = ACCUMULATOR FOR COUNT LOOP
DELAY: RPTK 255 ;DELAY LOOP 0.000256 ms
NOP ;
SBLK 1 ;
BNZ DELAY ;END DELAY LOOP
RET ;

```

; LCD WRITE INSTRUCTION

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

;IN=ACCUMULATOR FOR FIRST INSTRUCTION THAT WRITE
LCDWI:  SACL  00H          ;STORE INSTRUCTION TO PORT IS 8000H ADDRESS
        ADLK  0400H       ;ADD E,R\W,RS TO CONTROL
        SACL  00H          ;SEND TO PORT
        LARP  AR4         ;SELECT AR4 FOR COUNT DELAY LOOP
        LRLK  AR4,000CH   ;
DELAYE:  RPTK  255        ;DELAY FOR ENABLE 4 micro-sec
        NOP
        SBRK  1           ;
        BANZ  DELAYE      ;END LOOP
        SBLK  0400H       ;LOGIC ENABLE TO ZERO
        SACL  00H          ;SENT TO PORT
        LALK  000CH       ;DELAY ALL TIME 4 micros FOR WRITE INSTRUCTION
DELAYWI: RPTK  255        ;DELAY IN LOOP 0.000256 mS
        NOP
        SBLK  1           ;
        BNZ   DELAYWI     ;
        RET

```

LCD WRITE DATA

```

;IN = ACCUMULATOR FOR GET DATA TO WRITE TO LCD MODULE
LCDWD:  ADLK  0100H       ;SET E=0,R/W=0,RS=1
        SACL  00H          ;STORE DATA AT PORT FOR WRITE TO DDRAM
        ADLK  0400H       ;SET ENABLE = 1
        SACL  00H          ;STORE DATA TO PORT
        LARP  AR4         ;SELECT AR4
        LRLK  AR4,000CH   ;DELAY LOOP 4 micro-sec
DELAYE1: RPTK  255        ;
        NOP
        SBRK  1           ;
        BANZ  DELAYE1     ;END DELAY LOOP
        SBLK  0400H       ;SET ENABLE = 0
        SACL  00H          ;STORE DATA TO PORT
        LALK  000CH       ;DELAY LOOP 4 micro-sec
DELAYWD: RPTK  255        ;
        NOP
        SBLK  1           ;
        BNZ   DELAYWD     ;END DELAY LOOP
        RET

```

LCD DATA TO LCD MODULE

```

;IN = AR2 USE TO BE START ADDRESS OF DATA
LCDLD:  LACK  080H        ;START ADDRESS OF LINE 1
        CALL  WRITEADD    ;
        LACK  0C0H        ;START ADDRESS OF LINE 2
        CALL  WRITEADD    ;
        RET
WRITEADD: CALL  LCDWI      ;WRITE START ADDRESS TO LCD
        LARK  AR3,15      ;AR3 FOR COUNT 16 CHARACTER
        LARP  AR2         ;SELECT AR2
GO_OUT:  LAC   **         ;LOAD DATA AT ADDRESS 7C0H TO ACC AND INC(AR2)
        CALL  LCDWD       ;WRITE DATA TO LCD
        LARP  3           ;SELECT AR3
        BANZ  GO_OUT,*,AR2 ;
        RET

```

```

.ds 07c0h ;INITIATE DATA FOR DISPLAY WITH LCD MODULE
.data

```



```

; ttwiddle.asm for 64 point FFT-
; This table contains a sine/cosine lookup table stored ;
; in bit-reversed addressing order. ;
;-----;

```

```

;-----;
; Complex FFT Data array allocation ;
;-----;

```

```

_D_base      .space 00010h ; 2*FFT_S word FFT data array
_D_base+1    ;
             .space 007F0h ;
;-----;

```

```

;-----;
; Bit reversed Twiddle lookup Table ;
;-----;

```

```

_T_base:
_T_base      .word 32767 ;Normaly 0! Used for raised
_T_base+1    .word -32768 ;cosine window from this table
             .word -32768 ; -90.00 -1.000000
             .word 0 ; 1 000000010 000000000 -0.000000
             .word -23170 ; -135.00 -0.707107
             .word -23170 ; 2 000000100 100000000 -0.707107
             .word -23170 ; -45.00 -0.707107
             .word 23170 ; 3 000000110 100000000 +0.707107
             .word -12539 ; -157.50 -0.382683
             .word -30273 ; 4 000001000 010000000 -0.923880
             .word -30273 ; -67.50 -0.923880
             .word 12539 ; 5 000001010 010000000 +0.382683
             .word -30273 ; -112.50 -0.923880
             .word -12539 ; 6 000001100 110000000 -0.382683
             .word -12539 ; -22.50 -0.382683
             .word 30273 ; 7 000001110 110000000 +0.923880
             .word -6392 ; -168.75 -0.195090
             .word -32138 ; 8 000010000 001000000 -0.980785
             .word -32138 ; -78.75 -0.980785
             .word 6392 ; 9 000010010 001000000 +0.195090
             .word -27245 ; -123.75 -0.831470
             .word -18204 ; 10 000010100 101000000 -0.555570
             .word -18204 ; -33.75 -0.555570
             .word 27245 ; 11 000010110 101000000 +0.831470
             .word -18204 ; -146.25 -0.555570
             .word -27245 ; 12 000011000 011000000 -0.831470
             .word -27245 ; -56.25 -0.831470
             .word 18204 ; 13 000011010 011000000 +0.555570
             .word -32138 ; -101.25 -0.980785
             .word +6392 ; 14 000011100 111000000 -0.195090
             .word -6392 ; -11.25 -0.195090
             .word 32138 ; 15 000011110 111000000 +0.980785
             .word -3211 ; -174.38 -0.098017
             .word -32610 ; 16 000100000 000100000 -0.995185
             .word -32610 ; -84.38 -0.995185
             .word 3211 ; 17 000100010 000100000 +0.098017
             .word -25330 ; -129.38 -0.773010
             .word -20787 ; 18 000100100 100100000 -0.634393
             .word -20787 ; -39.38 -0.634393
             .word 25330 ; 19 000100110 100100000 +0.773010
             .word -15446 ; -151.88 -0.471397
             .word -28898 ; 20 000101000 010100000 -0.881921
             .word -28898 ; -61.88 -0.881921
             .word 15446 ; 21 000101010 010100000 +0.471397

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



February 1985

LF351 Wide Bandwidth JFET Input Operational Amplifier

General Description

The LF351 is a low cost high speed JFET input operational amplifier with an internally trimmed input offset voltage (BI-FET II™ technology). The device requires a low supply current and yet maintains a large gain bandwidth product and a fast slew rate. In addition, well matched high voltage JFET input devices provide very low input bias and offset currents. The LF351 is pin compatible with the standard LM741 and uses the same offset voltage adjustment circuitry. This feature allows designers to immediately upgrade the overall performance of existing LM741 designs.

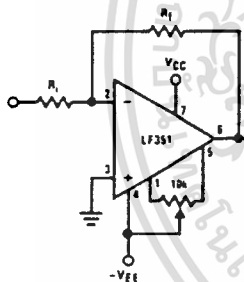
The LF351 may be used in applications such as high speed integrators, fast D/A converters, sample-and-hold circuits and many other circuits requiring low input offset voltage, low input bias current, high input impedance, high slew rate and wide bandwidth. The device has low noise and offset voltage drift, but for applications where these requirements are critical, the LF356 is recommended. If maximum supply

current is important, however, the LF351 is the better choice.

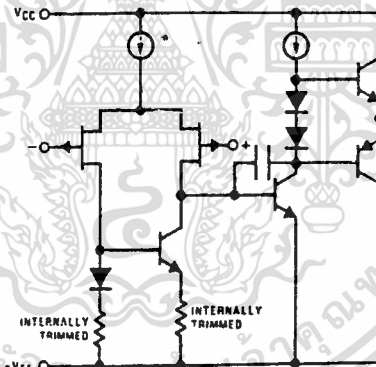
Features

- Internally trimmed offset voltage 10 mV
- Low input bias current 50 pA
- Low input noise voltage 16 nV/√Hz
- Low input noise current 0.01 pA/√Hz
- Wide gain bandwidth 4 MHz
- High slew rate 13 V/μs
- Low supply current 1.8 mA
- High input impedance 10¹²Ω
- Low total harmonic distortion A_v = 10, R_L = 10k, V_O = 20 Vp-p, BW = 20 Hz-20 kHz < 0.02%
- Low 1/f noise corner 50 Hz
- Fast settling time to 0.01% 2 μs

Typical Connection

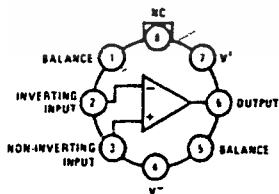


Simplified Schematic



Connection Diagrams (Top Views)

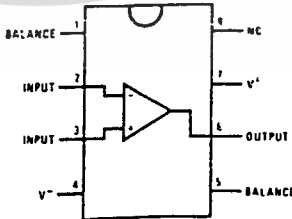
Metal Can Package



Note: Pin 4 connected to case

Order Number LF351H
See NS Package H08C

Dual-In-Line Package



Order Number LF351N
See NS Package N08E

TL/H/5648-1

LF351 Wide Bandwidth JFET Input Operational Amplifier

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Absolute Maximum Ratings

Supply Voltage	± 18V	Input Voltage Range (Note 2)	± 15V
Power Dissipation (Note 1)	500 mW	Output Short Circuit Duration	Continuous
Operating Temperature Range	0°C to + 70°C	Storage Temperature Range	-65°C to + 150°C
T _{J(MAX)}	115°C	Lead Temp. (Soldering, 10 seconds)	300°C
Differential Input Voltage	± 30V		

DC Electrical Characteristics (Note 3)

Symbol	Parameter	Conditions	LF351			Units
			Min	Typ	Max	
V _{OS}	Input Offset Voltage	R _S = 10 kΩ, T _A = 25°C Over Temperature		5	10 13	mV mV
ΔV _{OS} /ΔT	Average TC of Input Offset Voltage	R _S = 10 kΩ		10		μV/°C
I _{OS}	Input Offset Current	T _J = 25°C, (Notes 3, 4) T _J ≤ 70°C		25	100 4	pA nA
I _B	Input Bias Current	T _J = 25°C, (Notes 3, 4) T _J ≤ ± 70°C		50	200 8	pA nA
R _{IN}	Input Resistance	T _J = 25°C		10 ¹²		Ω
A _{VOL}	Large Signal Voltage Gain	V _S = ± 15V, T _A = 25°C V _O = ± 10V, R _L = 2 kΩ Over Temperature	25	100		V/mV
			15			V/mV
V _O	Output Voltage Swing	V _S = ± 15V, R _L = 10 kΩ	± 12	± 13.5		V
V _{CM}	Input Common-Mode Voltage Range	V _S = ± 15V	± 11	+ 15		V
				- 12		V
CMRR	Common-Mode Rejection Ratio	R _S ≤ 10 kΩ	70	100		dB
PSRR	Supply Voltage Rejection Ratio	(Note 5)	70	100		dB
I _S	Supply Current			1.8	3.4	mA

AC Electrical Characteristics (Note 3)

Symbol	Parameter	Conditions	LF351			Units
			Min	Typ	Max	
SR	Slew Rate	V _S = ± 15V, T _A = 25°C		13		V/μs
GBW	Gain Bandwidth Product	V _S = ± 15V, T _A = 25°C		4		MHz
e _n	Equivalent Input Noise Voltage	T _A = 25°C, R _S = 100Ω, f = 1000 Hz		16		nV/√Hz
i _n	Equivalent Input Noise Current	T _J = 25°C, f = 1000 Hz		0.01		pA/√Hz

Note 1: For operating at elevated temperature, the device must be derated based on a thermal resistance of 150°C/W junction to ambient or 45°C/W junction to case.

Note 2: Unless otherwise specified the absolute maximum negative input voltage is equal to the negative power supply voltage.

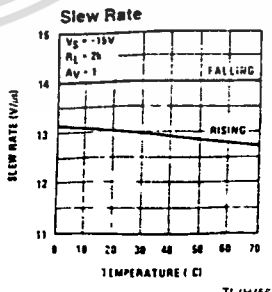
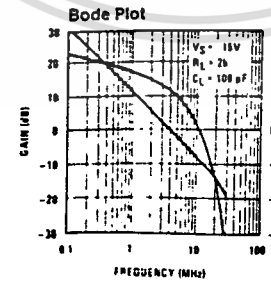
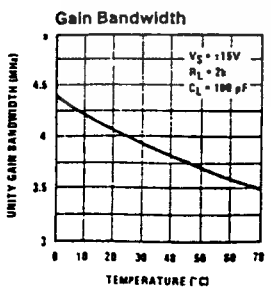
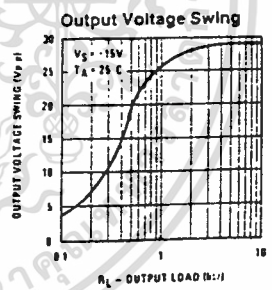
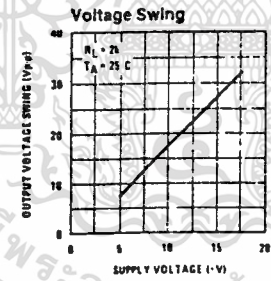
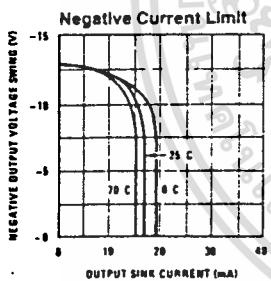
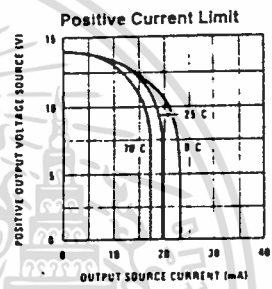
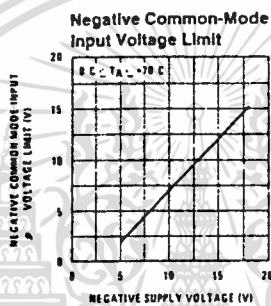
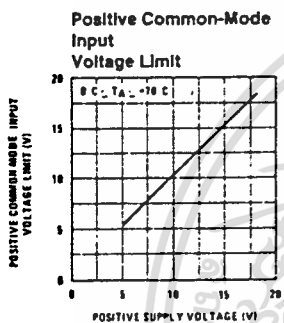
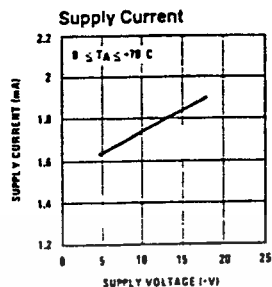
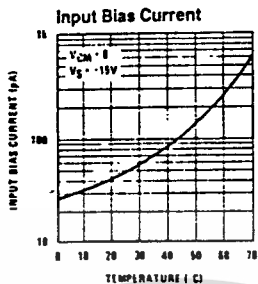
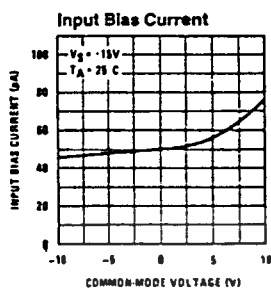
Note 3: These specifications apply for V_S = ± 15V and 0°C ≤ T_A ≤ + 70°C. V_{OS}, I_B and I_{OS} are measured at V_{CM} = 0.

Note 4: The input bias currents are junction leakage currents which approximately double for every 10°C increase in the junction temperature, T_J. Due to the 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 + θ_{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 5: Supply voltage rejection ratio is measured for both supply magnitudes increasing or decreasing simultaneously in accordance with common practice.

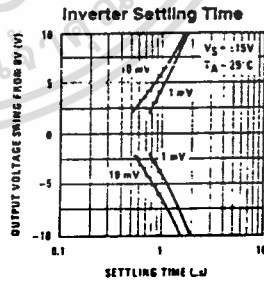
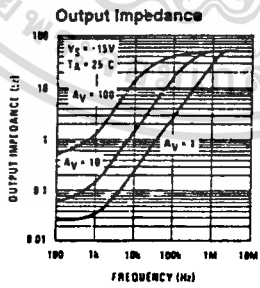
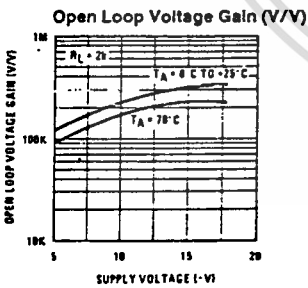
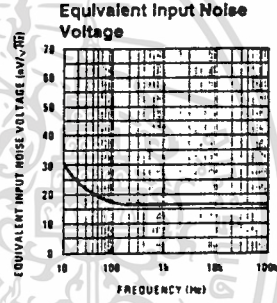
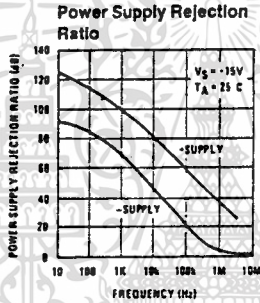
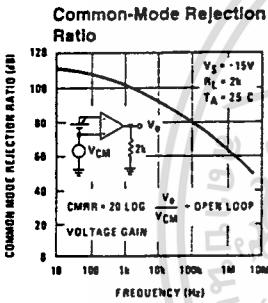
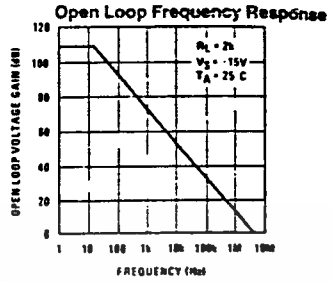
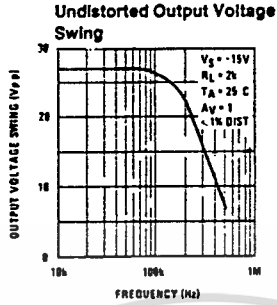
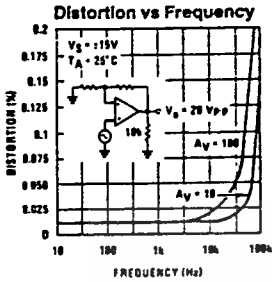
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Typical Performance Characteristics



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

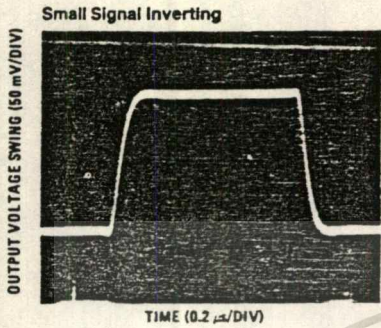
Typical Performance Characteristics (Continued)



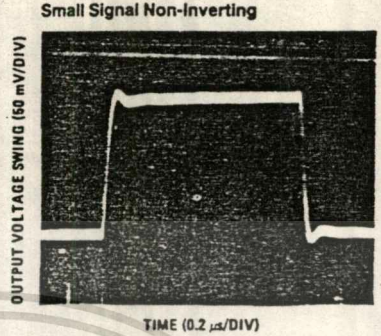
TL/H/5648-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

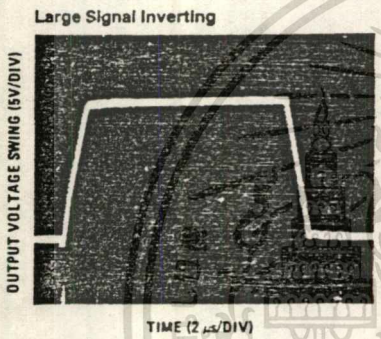
Pulse Response



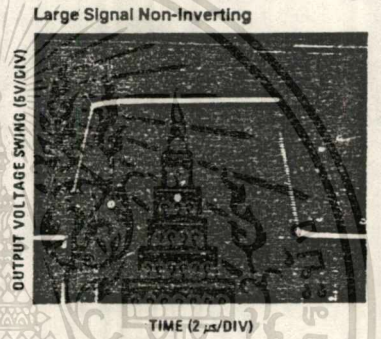
TL/H/5648-4



TL/H/5648-5

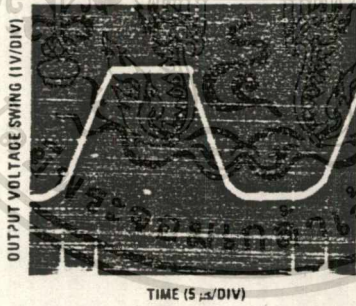


TL/H/5648-6



TL/H/5648-7

Current Limit ($R_L = 100\Omega$)



TL/H/5648-8

Application Hints

The LF351 is an op amp with an internally trimmed input offset voltage and JFET input devices (BI-FET II™). 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 cause a reversal of the phase to the output and force the amplifier output to the corresponding high or low state. Exceeding the negative common-mode limit on both inputs will force the amplifier output to a high state. In neither case

Application Hints (Continued)

does a latch occur since raising the input back within the common-mode range again puts the input stage and thus the amplifier in a normal operating mode.

Exceeding the positive common-mode limit on a single input will not change the phase of the output; however, if both inputs exceed the limit, the output of the amplifier will be forced to a high state.

The amplifier will operate with a common-mode input voltage equal to the positive supply; however, the gain bandwidth and slew rate may be decreased in this condition. When the negative common-mode voltage swings to within 3V of the negative supply, an increase in input offset voltage may occur.

The LF351 is biased by a zener reference which allows normal circuit operation on $\pm 4V$ power supplies. Supply voltages less than these may result in lower gain bandwidth and slew rate.

The LF351 will drive a 2 k Ω load resistance to $\pm 10V$ over the full temperature range of 0°C to +70°C. If the amplifier is forced to drive heavier load currents, however, an increase in input offset voltage may occur on the negative voltage swing and finally reach an active current limit on both positive and negative swings.

Precautions should be taken to ensure that the power supply for the integrated circuit never becomes reversed in polarity or that the unit is not inadvertently installed back-

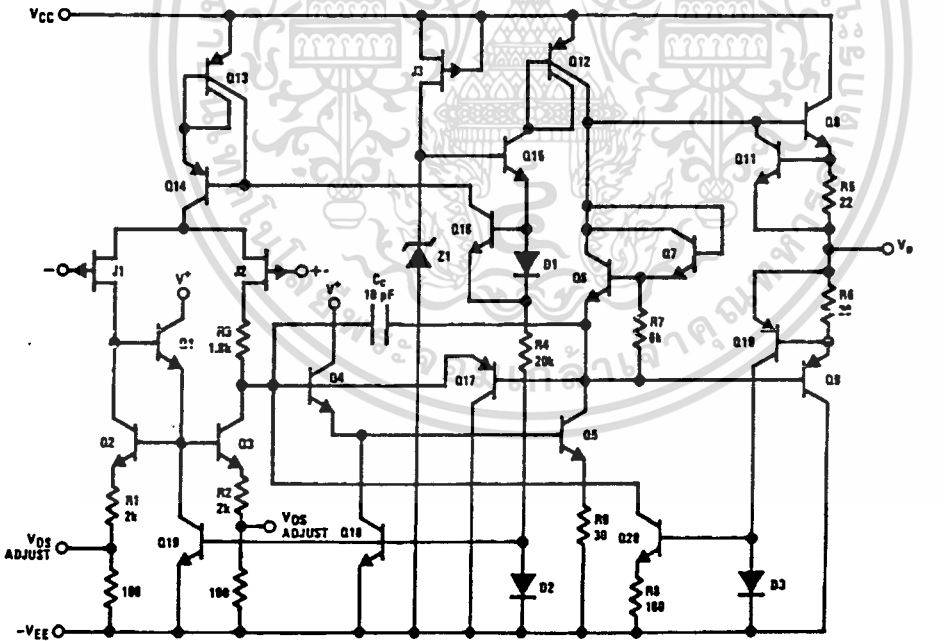
wards in a socket as an unlimited current surge through the resulting forward diode within the IC could cause fusing of the internal conductors and result in a destroyed unit.

Because these amplifiers are JFET rather than MOSFET input op amps they do not require special handling.

As with most amplifiers, care should be taken with lead dress, component placement and supply decoupling in order to ensure stability. For example, resistors from the output to an input should be placed with the body close to the input to minimize "pick-up" and maximize the frequency of the feedback pole by minimizing the capacitance from the input to ground.

A feedback pole is created when the feedback around any amplifier is resistive. The parallel resistance and capacitance from the input of the device (usually the inverting input) to AC ground 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 negligible effect on stability margin. However, if the feedback pole is less than approximately 6 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 and the resistance it parallels is greater than or equal to the original feedback pole time constant.

Detailed Schematic





Voltage Regulators

LM79XX Series 3-Terminal Negative Regulators

General Description

The LM79XX series of 3-terminal regulators is available with fixed output voltages of -5V, -12V, and -15V. These devices need only one external component—a compensation capacitor at the output. The LM79XX series is packaged in the TO-220 power package and is capable of supplying 1.5A of output current.

These regulators employ internal current limiting safe area protection and thermal shutdown for protection against virtually all overload conditions.

Low ground pin current of the LM79XX series allows output voltage to be easily boosted above the preset value with a resistor divider. The low quiescent current

drawn of these devices with a specified maximum change with line and load ensures good regulation in the voltage boosted mode.

For applications requiring other voltages, see LM137 data sheet.

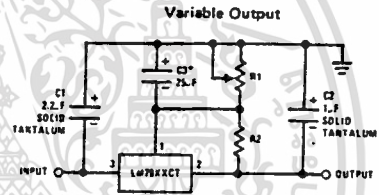
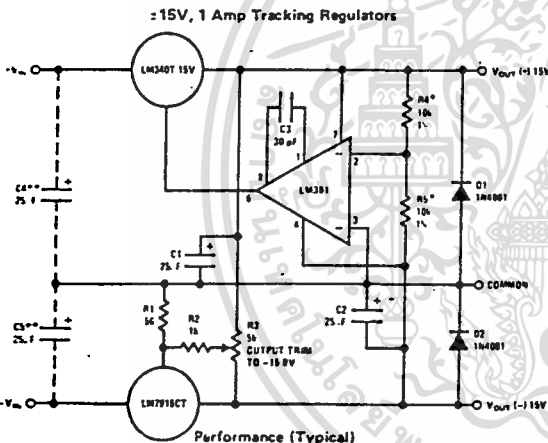
Features

- Thermal, short circuit and safe area protection
- High ripple rejection
- 1.5A output current
- 4% preset output voltage

LM79XX Series

1

Typical Applications



*Improves transient response and ripple rejection. Do not increase beyond 50µF.

$$V_{OUT} = V_{SET} \left(\frac{R1 + R2}{R2} \right)$$

Select R2 as follows

LM7905CT	300Ω
LM7912CT	750Ω
LM7915CT	1k

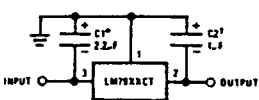
Performance (Typical)

	(-15)	(+15)
Load Regulation at $\Delta I_L = 1A$	40 mV	2 mV
Output Ripple, $C_{1N} = 3000\mu F$, $I_L = 1A$	100µVrms	100µVrms
Temperature Stability	50 mV	50 mV
Output Noise 10 Hz $\leq f \leq$ 10 kHz	150µVrms	150µVrms

Load Regulation at $\Delta I_L = 1A$
Output Ripple, $C_{1N} = 3000\mu F$, $I_L = 1A$
Temperature Stability
Output Noise 10 Hz $\leq f \leq$ 10 kHz

*Resistor tolerance of R4 and R5 determine matching of (+) and (-) outputs
**Necessary only if raw supply filter capacitors are more than 3" from regulators

Fixed Regulator

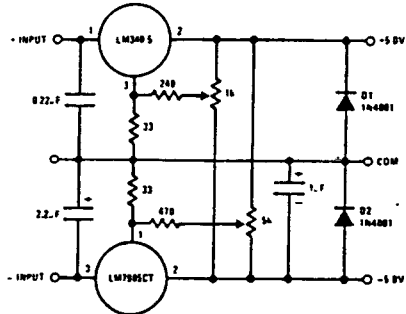


*Required if regulator is separated from filter capacitor by more than 3". For value given, capacitor must be solid tantalum. 25µF aluminum electrolytic may be substituted.

**Required for stability. For value given, capacitor must be solid tantalum. 25µF aluminum electrolytic may be substituted. Values given may be increased without limit.

For output capacitance in excess of 100µF, a high current diode from input to output (1N4001, etc.) will protect the regulator from momentary input shorts.

Dual Trimmed Supply



Absolute Maximum Ratings

Input Voltage ($V_o = 5V$)	-35V
($V_o = 12V$ and $15V$)	-40V
Input-Output Differential ($V_o = 5V$)	25V
($V_o = 12V$ and $15V$)	30V
Power Dissipation	Internally Limited
Operating Junction Temperature Range	0°C to +125°C
Storage Temperature Range	-65°C to +150°C
Lead Temperature (Soldering, 10 seconds)	230°C

Electrical Characteristics

Conditions unless otherwise noted: $I_{OUT} = 500\text{ mA}$, $C_{IN} = 2.2\mu\text{F}$, $C_{OUT} = 1\mu\text{F}$, $0^\circ\text{C} \leq T_J \leq +125^\circ\text{C}$, Power Dissipation $\leq 15\text{W}$.

PART NUMBER		LM7905C			UNITS
OUTPUT VOLTAGE		5V			
INPUT VOLTAGE (unless otherwise specified)		-10V			
PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	
V_O Output Voltage	$T_J = 25^\circ\text{C}$ $5\text{ mA} \leq I_{OUT} \leq 1\text{ A}$ $P \leq 15\text{ W}$	-4.8	-5.0	-5.2	V
		-4.75		-5.25	V
		(-20 $\leq V_{IN} \leq -7$)			V
ΔV_O Line Regulation	$T_J = 25^\circ\text{C}$, (Note 2)		8	50	mV
		(-25 $\leq V_{IN} \leq -7$)			V
			2	15	mV
(-12 $\leq V_{IN} \leq -8$)				V	
ΔV_O Load Regulation	$T_J = 25^\circ\text{C}$, (Note 2) $5\text{ mA} \leq I_{OUT} \leq 1.5\text{ A}$ $250\text{ mA} \leq I_{OUT} \leq 750\text{ mA}$		15	100	mV
			5	50	mV
					mV
I_Q Quiescent Current	$T_J = 25^\circ\text{C}$		1	2	mA
ΔI_Q Quiescent Current Change	With Line With Load, $5\text{ mA} \leq I_{OUT} \leq 1\text{ A}$			0.5	mA
		(-25 $\leq V_{IN} \leq -7$)			V
				0.5	mA
V_n Output Noise Voltage	$T_A = 25^\circ\text{C}$, 10 Hz $\leq f \leq 100$ Hz		125		μV
Ripple Rejection	$f = 120\text{ Hz}$	54	66		dB
		(-18 $\leq V_{IN} \leq -8$)			V
Dropout Voltage	$T_J = 25^\circ\text{C}$, $I_{OUT} = 1\text{ A}$		1.1		V
I_{OMAX} Peak Output Current	$T_J = 25^\circ\text{C}$		2.2		A
Average Temperature Coefficient of Output Voltage	$I_{OUT} = 5\text{ mA}$, 0 C $\leq T_J \leq 100$ C		0.4		mV/ C

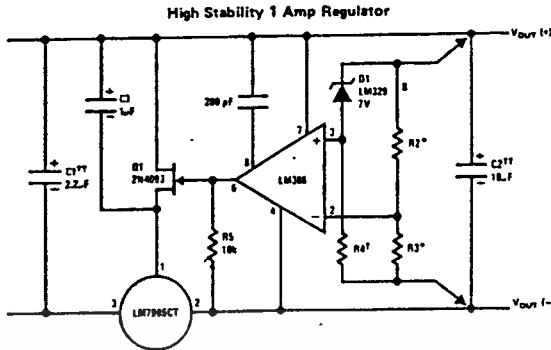
Electrical Characteristics (Continued) Conditions unless otherwise noted: $I_{OUT} = 500\text{ mA}$, $C_{IN} = 2.2\mu\text{F}$, $C_{OUT} = 1\mu\text{F}$, $0^\circ\text{C} \leq T_J \leq +125^\circ\text{C}$, Power Dissipation = 1.5W.

PART NUMBER		LM7912C			LM7915C			UNITS
OUTPUT VOLTAGE		12V			15V			
INPUT VOLTAGE (unless otherwise specified)		-19V			-23V			
PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX	
V_O Output Voltage	$T_J = 25^\circ\text{C}$	-11.5	-12.0	-12.5	-14.4	-15.0	-15.6	
	$5\text{ mA} \leq I_{OUT} \leq 1\text{ A}$	-11.4		-12.6	-14.25		-15.75	
	$P \leq 15\text{ W}$	(-27 $\leq V_{IN} \leq -14.5$)			(-30 $\leq V_{IN} \leq 17.5$)			
ΔV_O Line Regulation	$T_J = 25^\circ\text{C}$, (Note 2)		5	80		5	100	
			(-30 $\leq V_{IN} \leq -14.5$)			(-30 $\leq V_{IN} \leq -17.5$)		
			3	30		3	50	
			(-22 $\leq V_{IN} \leq -16$)			(-26 $\leq V_{IN} \leq -20$)		
ΔV_O Load Regulation	$T_J = 25^\circ\text{C}$, (Note 2)		15	200		15	200	
			5 mA $\leq I_{OUT} \leq 1.5\text{ A}$			15 200		
			250 mA $\leq I_{OUT} \leq 750\text{ mA}$			5 75		
I_Q Quiescent Current	$T_J = 25^\circ\text{C}$		1.5	3		1.5	3	
ΔI_Q Quiescent Current Change	With Line			0.5			0.5	
	With Load, $5\text{ mA} \leq I_{OUT} \leq 1\text{ A}$			0.5			0.5	
V_n Output Noise Voltage	$T_A = 25^\circ\text{C}$, $10\text{ Hz} \leq f \leq 100\text{ Hz}$		300			375	μV	
Ripple Rejection	$f = 120\text{ Hz}$		54	70		54	70	
			(-25 $\leq V_{IN} \leq -15$)			(-30 $\leq V_{IN} \leq -17.5$)		
Dropout Voltage	$T_J = 25^\circ\text{C}$, $I_{OUT} = 1\text{ A}$		1.1			1.1	V	
I_{OMAX} Peak Output Current	$T_J = 25^\circ\text{C}$		2.2			2.2	A	
Average Temperature Coefficient of Output Voltage	$I_{OUT} = 5\text{ mA}$, $0^\circ\text{C} \leq T_J \leq 100^\circ\text{C}$		-0.8			-1.0	$\text{mV}/^\circ\text{C}$	

Note 1: For calculations of junction temperature rise due to power dissipation, thermal resistance junction to ambient (θ_{JA}) is $50^\circ\text{C}/\text{W}$ (no heat sink) and $5^\circ\text{C}/\text{W}$ (infinite heat sink).

Note 2: Regulation is measured at a constant junction temperature by pulse testing with a low duty cycle. Changes in output voltage due to heating effects must be taken into account.

Typical Applications (Continued)

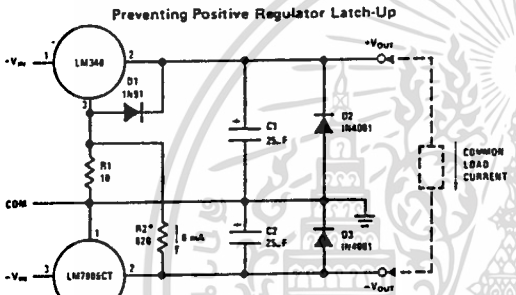


Load and line regulation < 0.01% temperature stability ≤ 0.2%

† Determines Zener current

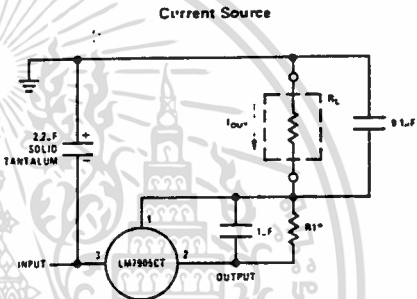
†† Solid tantalum

* Select resistors to set output voltage. 2 ppm/°C tracking suggested

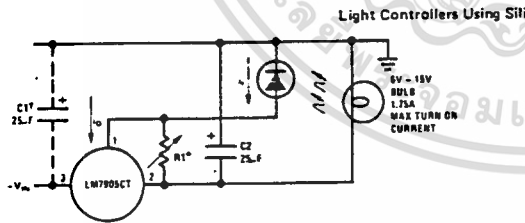


R1 and D1 allow the positive regulator to "start-up" when $-V_{IN}$ is delayed relative to $-V_{IN}$ and a heavy load is drawn between the outputs. Without R1 and D1, most three-terminal regulators will not start with heavy (0.1A-1A) load current flowing to the negative regulator, even though the positive output is clamped by D2.

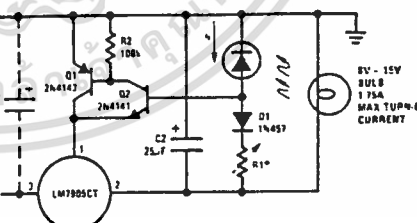
* R2 is optional. Ground pin current from the positive regulator flowing through R1 will increase $-V_{OUT} = 60$ mV if R2 is omitted.



$$I_{OUT} = 1 \text{ mA} + \frac{5V}{R1}$$

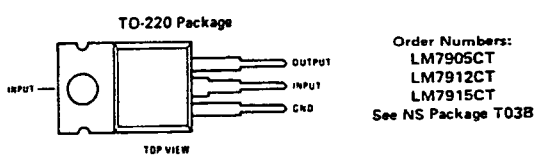
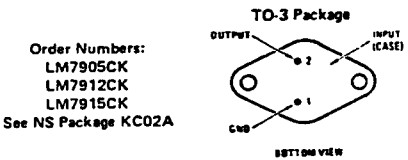


* Lamp brightness increases until $i_l = I_Q (\approx 1 \text{ mA}) + 5V/R1$.
† Necessary only if raw supply filter capacitor is more than 2" from LM7905CT



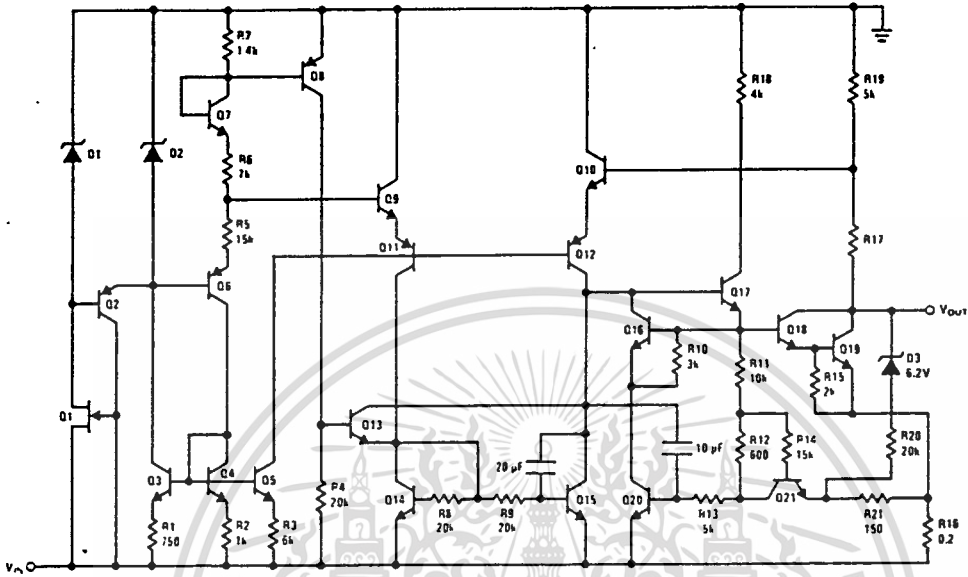
* Lamp brightness increases until $i_l = 5V/R1$ (i_l can be set as low as 1 μA)
† Necessary only if raw supply filter capacitor is more than 2" from LM7905CT

Connection Diagrams

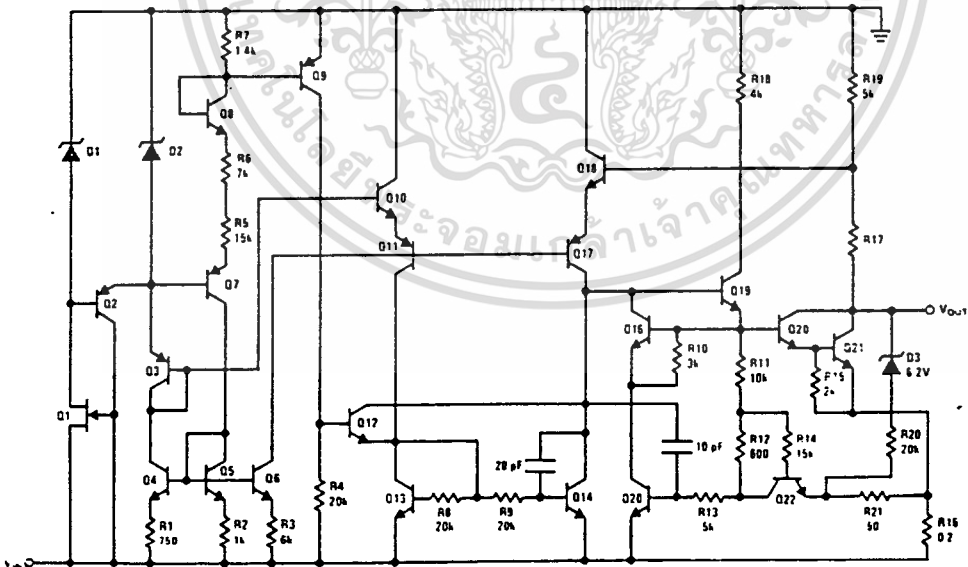


Schematic Diagrams

-5V



-12V and -15V



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



Voltage Regulators

LM78XX Series Voltage Regulators

General Description

The LM78XX series of three terminal regulators is available with several fixed output voltages making them useful in a wide range of applications. One of these is local on card regulation, eliminating the distribution problems associated with single point regulation. The voltages available allow these regulators to be used in logic systems, instrumentation, HiFi, and other solid state electronic equipment. Although designed primarily as fixed voltage regulators these devices can be used with external components to obtain adjustable voltages and currents.

The LM78XX series is available in an aluminum TO-3 package which will allow over 1.0A load current if adequate heat sinking is provided. Current limiting is included to limit the peak output current to a safe value. Safe area protection for the output transistor is provided to limit internal power dissipation. If internal power dissipation becomes too high for the heat sinking provided, the thermal shutdown circuit takes over preventing the IC from overheating.

Considerable effort was expended to make the LM78XX series of regulators easy to use and minimize the number

of external components. It is not necessary to bypass the output, although this does improve transient response. Input bypassing is needed only if the regulator is located far from the filter capacitor of the power supply.

For output voltage other than 5V, 12V and 15V the LM117 series provides an output voltage range from 1.2V to 57V.

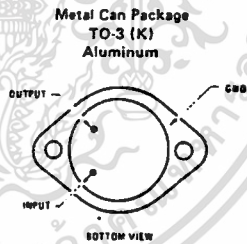
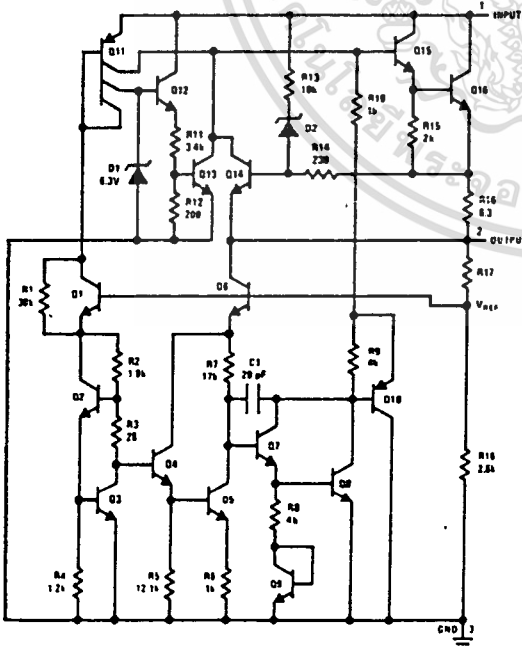
Features

- Output current in excess of 1A
- Internal thermal overload protection
- No external components required
- Output transistor safe area protection
- Internal short circuit current limit
- Available in the aluminum TO-3 package

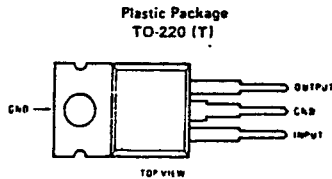
Voltage Range

LM7805C	5V
LM7812C	12V
LM7815C	15V

Schematic and Connection Diagrams



Order Numbers
 LM7805CK
 LM7812CK
 LM7815CK
 See Package KCO2A



Order Numbers:
 LM7805CT
 LM7812CT
 LM7815CT
 See Package T03B

Absolute Maximum Ratings

Input Voltage ($V_O = 5V, 12V$ and $15V$)	35V
Internal Power Dissipation (Note 1)	Internally Limited
Operating Temperature Range (T_A)	0°C to $+70^\circ\text{C}$
Maximum Junction Temperature	
(K Package)	150°C
(T Package)	125°C
Storage Temperature Range	-65°C to $+150^\circ\text{C}$
Lead Temperature (Soldering, 10 seconds)	
TO-3 Package K	300°C
TO-220 Package T	230°C

Electrical Characteristics LM78XXC (Note 2) $0^\circ\text{C} < T_J < 125^\circ\text{C}$ unless otherwise noted.

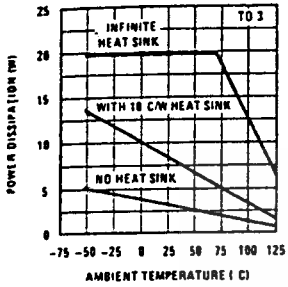
OUTPUT VOLTAGE		5V		12V		15V		UNITS				
INPUT VOLTAGE (unless otherwise noted)		10V		19V		23V						
PARAMETER	CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	MIN	TYP	MAX					
V_O Output Voltage	$T_J = 25^\circ\text{C}, 5\text{ mA} < I_O < 1\text{ A}$	4.8	5	5.2	11.5	12	12.5	14.4	15	15.6	V	
	$P_D < 15\text{ W}, 5\text{ mA} < I_O < 1\text{ A}$	4.75		5.25	11.4		12.6	14.25		15.75	V	
	$V_{\text{MIN}} < V_{\text{IN}} < V_{\text{MAX}}$	(7 < $V_{\text{IN}} < 20$)				(14.5 < $V_{\text{IN}} < 30$)			(17.5 < $V_{\text{IN}} < 30$)		V	
ΔV_O Line Regulation	$I_O = 500\text{ mA}$	$T_J = 25^\circ\text{C}$		3	50		4	120		4	150	mV
		ΔV_{IN}		(7 < $V_{\text{IN}} < 25$)		(14.5 < $V_{\text{IN}} < 30$)		(17.5 < $V_{\text{IN}} < 30$)				V
		$0^\circ\text{C} < T_J < +125^\circ\text{C}$			50		120		150			mV
	$I_O < 1\text{ A}$	ΔV_{IN}			(8 < $V_{\text{IN}} < 20$)		(15 < $V_{\text{IN}} < 27$)		(18.5 < $V_{\text{IN}} < 30$)			V
		$T_J = 25^\circ\text{C}$			50		120		150			mV
		ΔV_{IN}			(7.3 < $V_{\text{IN}} < 20$)		(14.6 < $V_{\text{IN}} < 27$)		(17.7 < $V_{\text{IN}} < 30$)			V
ΔV_O Load Regulation	$T_J = 25^\circ\text{C}$	$5\text{ mA} < I_O < 1.5\text{ A}$		10	50		12	120		12	150	mV
		$250\text{ mA} < I_O < 750\text{ mA}$			25		60		75			mV
	$5\text{ mA} < I_O < 1\text{ A}, 0^\circ\text{C} < T_J < +125^\circ\text{C}$			50		120		150			mV	
I_Q Quiescent Current	$I_O < 1\text{ A}$	$T_J = 25^\circ\text{C}$		8		8		8		8	mA	
		$0^\circ\text{C} < T_J < +125^\circ\text{C}$			8.5		8.5		8.5		8.5	mA
ΔI_Q Quiescent Current Change	$5\text{ mA} < I_O < 1\text{ A}$	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_O < 1\text{ A}$			0.5		0.5		0.5		mA	
		$V_{\text{MIN}} < V_{\text{IN}} < V_{\text{MAX}}$			(7.5 < $V_{\text{IN}} < 20$)		(14.8 < $V_{\text{IN}} < 27$)		(17.9 < $V_{\text{IN}} < 30$)		1.0	V
	$I_O < 500\text{ mA}, 0^\circ\text{C} < T_J < +125^\circ\text{C}$	ΔV_{IN}			1.0		1.0		1.0		1.0	mA
		$V_{\text{MIN}} < V_{\text{IN}} < V_{\text{MAX}}$			(7 < $V_{\text{IN}} < 25$)		(14.5 < $V_{\text{IN}} < 30$)		(17.5 < $V_{\text{IN}} < 30$)			V
V_N Output Noise Voltage	$T_A = 25^\circ\text{C}, 10\text{ Hz} < f < 100\text{ kHz}$			40		75		90			μV	
$\frac{\Delta V_{\text{IN}}}{\Delta V_{\text{OUT}}}$ Ripple Rejection	$f = 120\text{ Hz}$	$I_O < 1\text{ A}, T_J = 25^\circ\text{C}$ or $I_O < 500\text{ mA}$		62	80		55	72		54	70	dB
		$0^\circ\text{C} < T_J < +125^\circ\text{C}$			62		55		54			dB
		$V_{\text{MIN}} < V_{\text{IN}} < V_{\text{MAX}}$			(8 < $V_{\text{IN}} < 18$)		(15 < $V_{\text{IN}} < 25$)		(18.5 < $V_{\text{IN}} < 28.5$)			V
R_O Dropout Voltage Output Resistance Short-Circuit Current Peak Output Current Average TC of V_{OUT}	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_{\text{OUT}} = 1\text{ A}$			2.0		2.0		2.0			V	
	$f = 1\text{ kHz}$			8		18		19			m Ω	
	$T_J = 25^\circ\text{C}$			2.1		1.5		1.2			A	
	$T_J = 25^\circ\text{C}$			2.4		2.4		2.4			A	
	$0^\circ\text{C} < T_J < +125^\circ\text{C}, I_O = 5\text{ mA}$			0.6		1.5		1.8			mV/ $^\circ\text{C}$	
V_{IN} Input Voltage Required to Maintain Line Regulation	$T_J = 25^\circ\text{C}, I_O < 1\text{ A}$			7.3		14.6		17.7			V	

NOTE 1: Thermal resistance of the TO-3 package (K, KC) is typically $4^\circ\text{C}/\text{W}$ junction to case and $35^\circ\text{C}/\text{W}$ case to ambient. Thermal resistance of the TO-220 package (T) is typically $4^\circ\text{C}/\text{W}$ junction to case and $50^\circ\text{C}/\text{W}$ case to ambient.

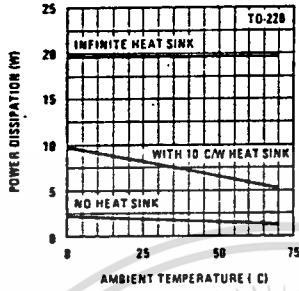
NOTE 2: All characteristics are measured with capacitor across the input of $0.22\ \mu\text{F}$, and a capacitor across the output of $0.1\ \mu\text{F}$. All characteristics except noise voltage and ripple rejection ratio are measured using pulse techniques ($t_w < 10\text{ ms}$, duty cycle $< 5\%$). Output voltage changes due to changes in internal temperature must be taken into account separately.

Typical Performance Characteristics

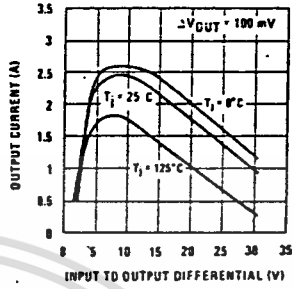
Maximum Average Power Dissipation



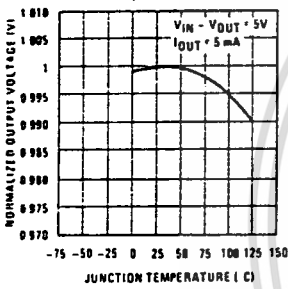
Maximum Average Power Dissipation



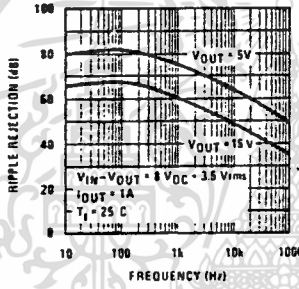
Peak Output Current



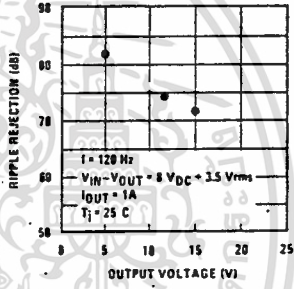
Output Voltage (Normalized to 1V at $T_j = 25^\circ\text{C}$)



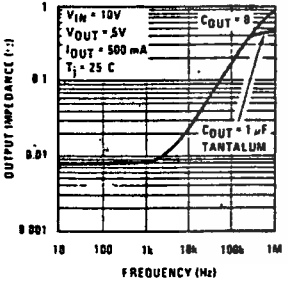
Ripple Rejection



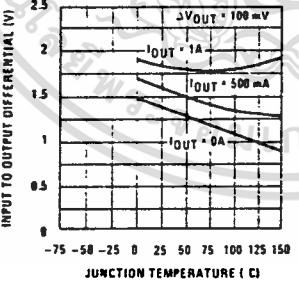
Ripple Rejection



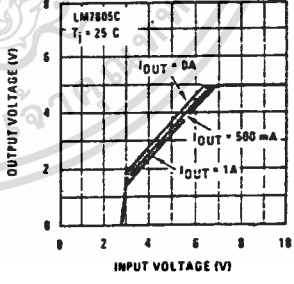
Output Impedance



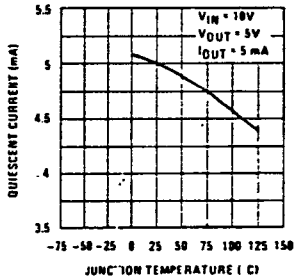
Dropout Voltage



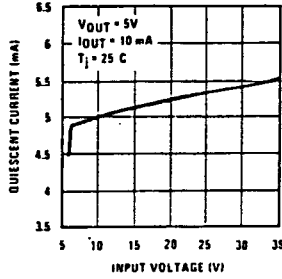
Dropout Characteristics



Quiescent Current



Quiescent Current



5404/7404 Hex Inverter

	Schottky TTL			High-Speed TTL			Low-Power Schottky TTL			Standard TTL			Low-Power TTL		
	Device Type	Package C P M CF		Device Type	Package C P M CF		Device Type	Package C P M CF		Device Type	Package C P M CF		Device Type	Package C P M CF	
T. L	SN54S04	J J	1W	SN54H04	J J	1W	SN54LS04	J J	1W	SN5404	J J	1A	SN54LS04	J J	1W
FAIRCHILD	SN74S04	J J	1W	SN74H04	J J	1W	SN74LS04	J J	1W	SN7404	J J	1A	SN74LS04	J J	1W
MOTOROLA	FC74S04/FC9S04	IC	1P	FC74H04/FC9H04	IC	1P	FC74LS04/FC9LS04	IC	1P	FM7404/FM9N04	IC	1P			
M. S. C.	DM74S04			DM74H04			DM74LS04			DM7404			DM74LS04		
PHILIPS	N74S04			N74H04			N74LS04			FJH241/7404					
SIGNETICS	SS4S04	F J	1W	SS4H04	F J	1W				SS404	F J	1A			
SIEMENS	N74S04	F J	1W	N74H04	F J	1W	N74LS04			N74C4	F J	1A			
FUJITSU							74LS04			MB418					
HITACHI	HD74S04						HD74LS04			HD7404/HD2522					
MITSUBISHI	M55004						M74LS04			M53204					
NEC	74S04						74LS04			uPB235					
TOSHIBA										TD3404A					

Electrical Characteristics SN54LS04/SN74LS04

absolute maximum ratings over operating free-air temperature range

Supply voltage V _{CC}	TV	Operating power	SN54LS	-55°C to +25°C
Input voltage	TV	temperature range	SN74LS	0°C to +70°C
		Storage temperature range		-65°C to +150°C

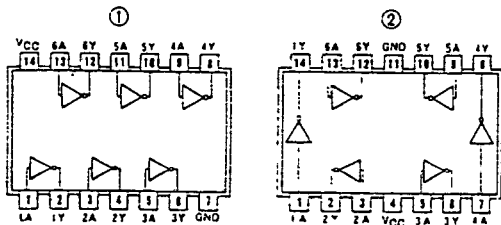
recommended operating conditions

	SN54LS04			SN74LS04			UNIT
	MIN	NOM	MAX	MIN	NOM	MAX	
Supply voltage, V _{CC}	4.5	5	5.5	4.75	5	5.25	V
Maximum output current, I _{OL}			-400			-400	mA
Maximum output current, I _{OH}			4			4	mA
Operating power, P _D	~15		125	9		70	mW

electrical characteristics over recommended operating free-air temperature range

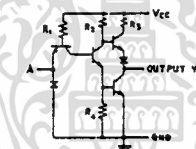
PARAMETER	TEST CONDITIONS*	MIN	TYP	MAX	UNIT
V _{IH}	High-level input voltage		2		V
V _{IL}	Low-level input voltage		0.8		V
V _I	Input clamp voltage	V _{CC} = MIN, I _I = -18 mA		-1.5	V
V _{OH}	High-level output voltage	V _{CC} = MIN, I _{OL} = MAX	2.7	3.4	V
V _{OL}	Low-level output voltage	V _{CC} = MIN, I _{OH} = 4 mA		0.4	V
I _I	Input current at maximum input voltage	V _{CC} = MAX, V _I = 7V		0.1	mA
I _{IH}	High-level input current	V _{CC} = MAX, V _{IH} = 2.7V		20	μA
I _{IL}	Low-level input current	V _{CC} = MAX, V _{IL} = 0.8V		-0.4	mA
I _{OS}	Short-circuit output current	V _{CC} = MAX	-20	-100	mA
I _{CCH}	Supply current	Total, outputs high	1.2	2.4	mA
I _{CCL}	Supply current	Total, outputs low	3.6	6.6	mA
I _{CC}	Supply current	Average per 318 (50% duty cycle)	0.4		mA
t _{PLH}	Propagation delay time, low-to-high-level output	V _{CC} = 5V, T _A = 25°C, C _L = 15PF, R _L = 2KΩ	9	15	ns
t _{PLL}	Propagation delay time, high-to-low-level output		10	15	ns

Pin Assignments (Top View)



positive logic:
Y = \bar{A}

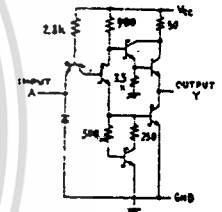
Schematics (each gate)



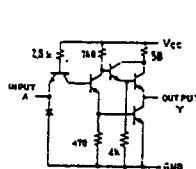
CIRCUIT	R ₁	R ₂	R ₃	R _L
'04	4k	1.5k	130	1k
'L04	40k	20k	100	12k

Input clamp diodes not on SN54L73M74L* circuits.

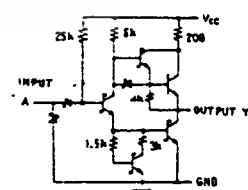
*'04, 'L04 CIRCUITS



'S04 CIRCUIT



'H04 CIRCUIT



'L04 CIRCUIT

Resistor values shown are nominal and in ohms.

* For conditions shown as MIN or MAX, use the appropriate value specified under recommended operating conditions.
 † All typical values are at V_{CC} = 5V, T_A = 25°C.
 * Not more than one output should be shorted at a time, and for SN54H/SN74H and SN54S/SN74S, duration of short-circuit should not exceed 1 second.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5402/7402 Quadruple 2-Input Positive-NOR Gate

	Schottky TTL			High-Speed TTL			Low-Power Schottky TTL			Standard TTL			Low-Power TTL		
	Device Type	Package		Device Type	Package		Device Type	Package		Device Type	Package		Device Type	Package	
T.I.	SN54S02	J D I P W					SN54LS02	J D I P W		SN5402	J D I P W		SN54LS02	J D I P W	
	SN74S02	J D I P W					SN74LS02	J D I P W		SN7402	J D I P W		SN74LS02	J D I P W	
FAIRCHILD	FMS402/FM7402	D I P W					FMS4LS02/FM74LS02	D I P W		FC7402/FCM902	D I P W				
	FC7402/FCM902	D I P W					FC74LS02/FCM9LS02	D I P W		FC7402/FCM902	D I P W				
MOTOROLA															
N.S.C.							SN74LS02	P D		MC5402	L D I P W				
							DMS4LS02			MC7402	L D I P W				
							DM74LS02			DM5402	J D I P W		DMS4LS02	J D I P W	
										DM7402	J D I P W		DM74LS02	J D I P W	
PHILIPS	N74S02	D					N74LS02	D		FJH221/7402	D				
SIGNETICS	N74S02	A D					N74LS02	A D		S5402	F D I A D				
										N7402	F D I A C				
SIEMENS										FLH191	D				
FUJITSU							74LS02	M D		MB417	D I M D				
HITACHI	HO74S02	P D					HO74LS02	P D		HO7402/HO2511	C I P D				
MITSUBISHI															
NEC										MS3202	P D				
										PB232	D I C D				
TOSHIBA										TD3402A	P D				

Electrical Characteristics SN54LS02/SN74LS02

absolute maximum ratings over operating free-air temperature range

Supply voltage, V _{CC}	7V	Operating free-air temperature range	SN54LS	-55°C to 125°C
Input voltage	7V		SN74LS	0°C to 70°C
		Storage temperature range		-55°C to 150°C

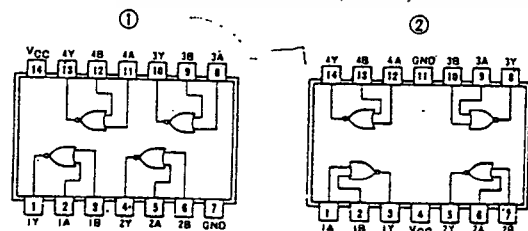
recommended operating conditions

	SN54LS02			SN74LS02			UNIT
	MIN	NOM	MAX	MIN	NOM	MAX	
Supply voltage, V _{CC}	4.5	5	5.5	4.75	5	5.25	V
High-level output current, I _{OH}			-400			-400	μA
Low-level output current, I _{OL}			4			4	mA
Operating free-air temperature, T _A	-55		125	0		70	°C

electrical characteristics over recommended operating free-air temperature range

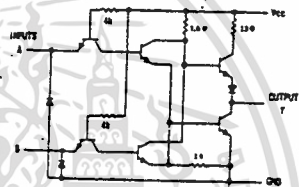
PARAMETER	TEST CONDITIONS†	MIN	TYP‡	MAX	UNIT
V _{IH}	High-level input voltage		2		V
V _{IL}	Low-level input voltage			0.8	V
V _I	Input clamp voltage	V _{CC} = MIN, I _I = -18 mA		-1.5	V
V _{OH}	High-level output voltage	V _{CC} = MIN, V _I L = V _{IL} MAX, I _{OH} = MAX	2.7	3.4	V
V _{OL}	Low-level output voltage	V _{CC} = MIN, V _I H = 2V, I _{OL} = 4 mA	0.25	0.4	V
I _I	Input current at maximum input voltage	V _{CC} = MAX, V _I = 7V		0.1	mA
I _{IH}	High-level input current	Data inputs, V _{CC} = MAX, V _I H = 2.7V		20	μA
I _{IL}	Low-level input current	Data inputs, V _{CC} = MAX, V _I L = 0.4V		0.4	mA
I _{OS}	Short-circuit output current†	V _{CC} = MAX, 54LS Family	-20	-100	mA
		74LS Family	-20	-100	mA
I _{CC} H	Supply current	V _{CC} = MAX, Total outputs high	1.6	3.2	mA
I _{CC} L	Supply current	V _{CC} = MAX, Total outputs low	2.8	5.4	mA
I _{CC}	Supply current	V _{CC} = 5V, Average per gate (50% duty cycle)	0.55		mA
t _{PLH}	Propagation delay time, low-to-high-level output	V _{CC} = 5V, T _A = 25°C	10	15	ns
t _{PHL}	Propagation delay time, high-to-low-level output	C _L = 150pF, R _L = 2kΩ	10	15	ns

Pin Assignments (Top View)

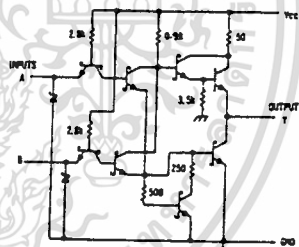


positive logic:
Y = A + B

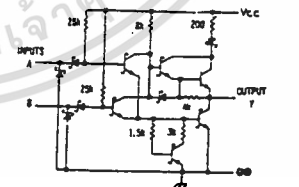
Schematics (each gate)



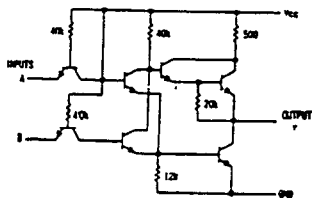
7402 CIRCUIT



5402 CIRCUIT



74LS02 CIRCUIT



LS02 CIRCUIT

Resistor values shown are nominal and in ohms.

† For conditions shown as MIN or MAX, use the appropriate value specified under recommended operating conditions.

‡ AB typical values are at V_{CC} = 5V, T_A = 25°C.

§ Not more than one output should be shorted at a time, and for SN54S/SN74S, duration of output short-circuit should not exceed one second.

54374/74374 Octal D-Type Transparent Latches and Edge-Triggered Flip-Flops

	Schottky TTL				High-Speed TTL				Low-Power Schottky TTL				Standard TTL				Low-Power TTL			
	Device Type		Package		Device Type		Package		Device Type		Package		Device Type		Package		Device Type		Package	
	C	P	M	CF	C	P	M	CF	C	P	M	CF	C	P	M	CF	C	P	M	CF
T.I.	SN54S374	J							SN54LS374	J										
FAIRCHILD	SN74S374	J	N						SN74LS374	J	N									
MOTOROLA																				
N.S.C.																				
PHILIPS																				
SIGNETICS																				
SIEMENS																				
FUJITSU																				
HITACHI																				
mitsubishi																				
NEC																				
TOSHIBA																				

Electrical Characteristics SN54LS374/SN74LS374

absolute maximum ratings over operating (free-air temperature range)

Supply voltage, V _{CC}	7V	Operating free-air temperature range	SN54LS	-55°C to 125°C
Input voltage	7V	temperature range	SN74LS	0°C to 70°C
		Storage temperature range	-65°C to 150°C	

recommended operating conditions

	SN54LS374			SN74LS374			UNIT
	MIN	NOM	MAX	MIN	NOM	MAX	
Supply voltage, V _{CC}	4.5	5	5.5	4.75	5	5.25	V
High-level output voltage, V _{OH}			-400			-400	μA
High-level output current, I _{OH}			16			16	mA
Width of clock enabling pulse, t _w	High	15		15			ns
	Low	15		15			ns
Data hold time, t _{hold}	0		0				ns
Setup time, t _{setup}	20		20				ns
Operating free-air temperature, T _A	-55		125	0		70	°C

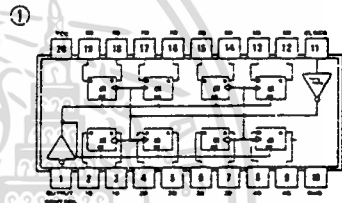
electrical characteristics over recommended operating free-air temperature range (unless otherwise noted)

PARAMETER	TEST CONDITIONS ‡	MIN	TYP †	MAX	UNIT	
V _{IH}	High-level input voltage		2		V	
V _{IL}	Low-level input voltage		0.8		V	
V _{IK}	Input clamp voltage	V _{CC} =MIN, I _I =-18mA		-1.5	V	
V _{OH}	High-level output voltage	V _{CC} =MAX, V _{IH} =2V, V _{IL} =V _{IL} max, I _{OH} =MAX	2.4	3.1	V	
V _{OL}	Low-level output voltage	V _{CC} =MIN, V _{IH} =2V, V _{IL} =V _{IL} max, I _{OL} =24mA	0.35	0.5	V	
I _{OZH}	Off-state output current, high-level voltage applied	V _{CC} =MAX, V _{IH} =2V, V _O =2.7V		20	μA	
I _{OZL}	Off-state output current, low-level voltage applied	V _{CC} =MAX, V _{IH} =2V, V _O =0.4V		-20	μA	
I _I	Input current at maximum input voltage	V _{CC} =MAX, V _I =7V		0.1	mA	
I _{IH}	High-level input current	V _{CC} =MAX, V _I =2.7V		20	μA	
I _{IL}	Low-level input current	V _{CC} =MAX, V _I =0.4V		-0.1	mA	
I _{OS}	Short-circuit output current ‡	V _{CC} =MAX		1-30	mA	
I _{CC}	Supply current	V _{CC} =MAX, Output control at LSV	LS374	27	40	μA

switching characteristics, V_{CC}=5V, T_A=25°C

PARAMETER	FROM (INPUT)	TO (OUTPUT)	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
t _{max}				35	50		MHz
t _{PLH}	Data	Any Q	C _L =45pF, R _L =647Ω, See Notes 2 and 3				
t _{PHL}				15	28		ns
t _{PLZ}	Clock or enable	Any Q		19	28		ns
t _{PZH}	Output Control	Any Q		20	28		ns
t _{PZL}	Output Control	Any Q		21	28		ns
t _{OLZ}	Output Control	Any Q	C _L =50f, R _L =647Ω, See Note 3	12	20		ns
t _{OLZ}	Output Control	Any Q		14	25		ns

Pin Assignment (Top View)



SN54LS374 (J) SN74LS374 (J, N)
SN64S374 (J) SN74S374 (J, N)

LS374, S374 FUNCTION TABLE

OUTPUT CONTROL	CLOCK	D	OUTPUT
L	↑	H	H
L	↑	L	L
L	L	X	Q ₀
H	X	X	Z

† For conditions shown as MIN or MAX, use the appropriate value specified under recommended operating conditions.

‡ All typical values are at V_{CC}=5V, T_A=25°C.

§ Not more than one output should be shorted at a time and duration of the short circuit should not exceed one second.

NOTES: 2. Maximum clock frequency is tested with all outputs loaded.

3. See load circuits and waveforms on page 3-11.

t_{max} = maximum clock frequency

t_{PLH} = propagation delay time, low-to-high-level output

t_{PHL} = propagation delay time, high-to-low-level output

t_{PZH} = output enable time to high level

t_{PZL} = output enable time to low level

t_{OLZ} = output disable time from high level

t_{OLZ} = output disable time from low level

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่ควรนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Definition

The «LEM Module LA 25-NP» is a multi-range current transducer. Based on the principle of magnetic compensation, it provides electronic measurement of DC, AC, pulsed currents and their combination with galvanic isolation.

Electrical data

Nominal current I_N	: 25 A.t rms	
Measuring range	: 0 to ± 36 A.t	
Measuring resistance	: R_M min.	R_M max.
with ± 15 V	at ± 25 A.t max.	: 100 ohm 320 ohm
	at ± 36 A.t max.	: 100 ohm 190 ohm
Nominal analog output current	: 25 mA	
Turns ratio	: 1-2-3-4-5/1000	
Typical accuracy at $+25^\circ\text{C}$: ± 0.5 % of I_N	
Supply voltage	: + and - 15 V (± 5 %)	
Isolation	: between primary and secondary : 2.5 kV rms/50 Hz/1 min.	

Accuracy - Dynamic performance

	: Typical	Max.
Zero offset current at $+25^\circ\text{C}$ *	: ± 0.05 mA	± 0.15 mA
Residual current ** after an overload of $3 \times I_N$: ± 0.05 mA	± 0.15 mA
Thermal drift of offset current (between 0°C to $+25^\circ\text{C}$)	: ± 0.06 mA	± 0.25 mA
(between $+25^\circ\text{C}$ to $+70^\circ\text{C}$)	: ± 0.1 mA	± 0.35 mA
Linearity	: better than ± 0.2 %	
Response time	: better than 1 μs	
Bandwidth	: DC to 150 kHz (-1dB)	

General data

Operating temperature	: 0°C to $+70^\circ\text{C}$
Storage temperature	: -25°C to $+85^\circ\text{C}$
Current consumption	: 10 mA + output current
Secondary internal resistance	: 110 ohm (at $+70^\circ\text{C}$)
Primary internal resistance	: < 1.25 mohm/turn
Isolation resistance	: > 1500 Mohm (at 500 V and $+25^\circ\text{C}$)
Weight	: 22 g.
Package	: potted in insulated self-extinguishing plastic case
Polarity markings	: a positive output current is obtained on terminal M, when the primary current flows from terminals 1, 2, 3, 4 and 5 to terminals 10, 9, 8, 7 and 6.

Note: This is a standard model; for different versions (e.g. supply voltages, turns ratios, mechanical dimensions, unidirectional measurements, etc.), please contact us.

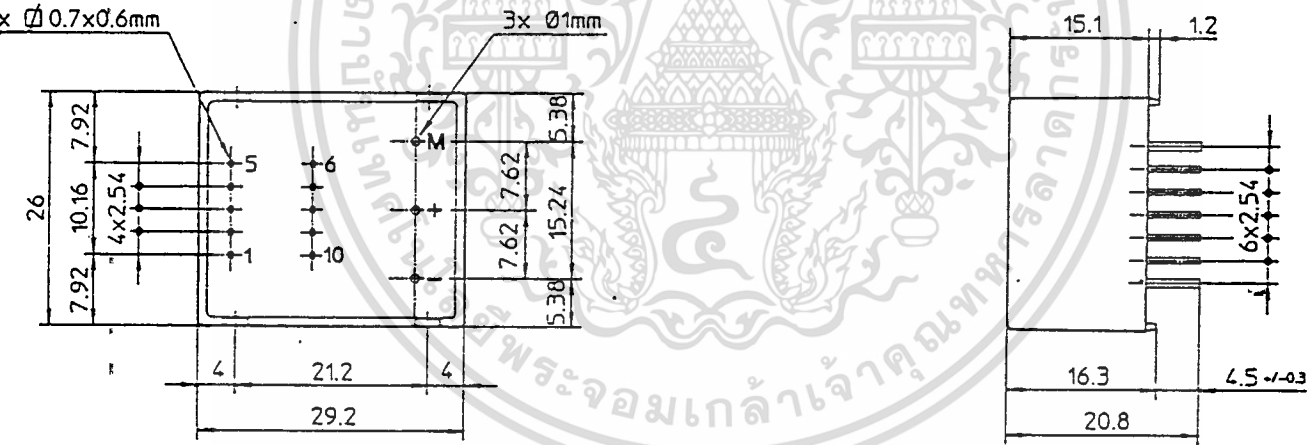
* The device is supplied with ± 15 V, measurement is then carried out after 15 minutes.

** Result of the coercive field of the magnetic circuit

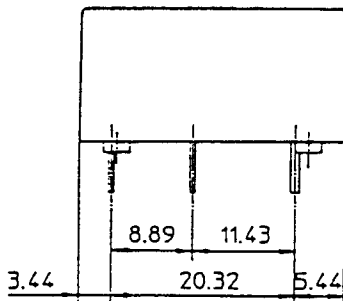
921204/3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

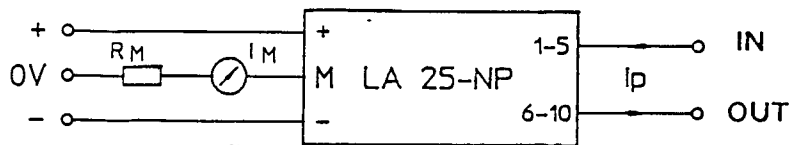
Number of primary turns	Primary current		Nominal output current I_s [mA]	Turn ratio	Primary resistance [mOhm]	Primary insertion inductance [μ H]	Recommended connections
	nominal I_v [A]	maximum I_p [A]					
1	25	36	25	1/1000	0.3	0.023	
2	12	18	24	2/1000	1.1	0.09	
3	8	12	24	3/1000	2.5	0.21	
4	6	9	24	4/1000	4.4	0.37	
5	5	7	25	5/1000	6.3	0.58	



Recommended PCB hole diam. : \varnothing 1.2 mm



Connection



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณทุกท่านที่มีส่วนให้ปริญญาบัตรเล่มนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี
คุณพ่อ คุณแม่ ที่กรุณาอบรมสั่งสอนและสนับสนุนการศึกษาตลอดมา

อาจารย์ ศิริวัฒน์ โทริเวชกุล อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ เทอดศักดิ์ ลีวาทอง ภาควิชาอิเล็กทรอนิกส์ อาจารย์ไกรสิน ภาควิชาโทรคมนาคม

อาจารย์ สมภพ ผลไม้ ที่กรุณาสละเวลาให้คำปรึกษา

ตลอดจนเพื่อนๆ ที่ให้กำลังใจและความช่วยเหลือ

ชุมชนอิเล็กทรอนิกส์ เอื้อเฟื้ออุปการณ์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Brigham,E.O., "The Fast Fourier Transforms",Prentice -Hall,Englewood Cliffs,N.T,1974
- [2] J.Arrillaga,D.A.Bradley,P.S,Bodges,"Power System Harmonics,"John Wiley & Sons,1985
- [3] IEEE,"IEEE standard Current Distortion System,"IEEE Standard 519-1991
- [4] IEC,"Disturbances in Supply Systems Caused by Household Appliances and Similar electrical Equipment,part2:Harmonics;"IEC Publication 555-2
- [5] Texas Instrument,"TMS320c2x User's Guide,"Texas Instrument Incorporated, 1993
- [6] Peled,A.,And B. Liu,"Digital Signal Processing.New York:Wiley,1976
- [7] วัลลภ สุรกำพลธร,ศ.คร., "การประมวลผลสัญญาณเชิงเลข Digital Signal Processing, "คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง,2533
- [8] ณัฐพงศ์ กมลรัตน์ ,สมนึก แซ่หทัย,สมโภชน์ อุทัยวิวัฒน์กุล,"การประยุกต์ Card DSP (การตัดตัวอักษรภาษาไทยออกจากหน้ากระดาษ),"ปริญญาทิพนธ์," คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2537