



ปีการศึกษา 2530

การประยุกต์ใช้พีดีบีบลิวเอ็มนไซน์เวฟอินเวอร์เตอร์ในแหล่งจ่ายไฟสำรอง

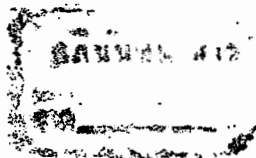
An Application of PWM Sine Wave Inverter in Standby Power Supply

โดย

นายธีระวัฒน์	ฉิมสแทน	27.1082
นายสมศักดิ์	บุญปาน	27.1268
นายเอกพันธ์	กรกรม	27.1295

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.วิริยะ พิเชษฐจำเริญ



๒๓๗,

๒๖๓

ปริญญาโท ประจำปีการศึกษา 253๑

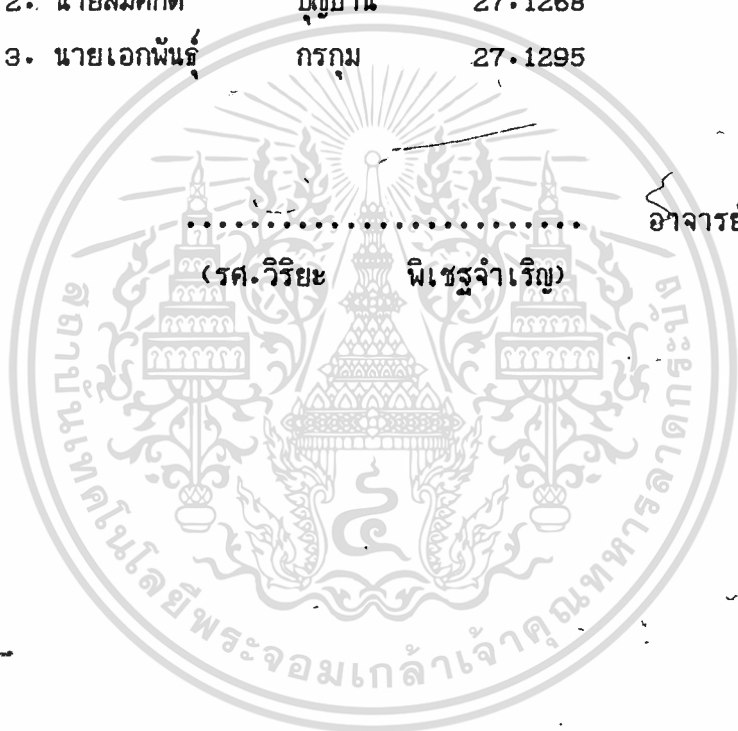
ภาควิชา ไฟฟ้ากำลัง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การประยุกต์ใช้พินิตบิลิวเอ็มไซน์เวอินเวอร์เตอร์ในแหล่งจ่ายไฟสำรอง

ผู้จัดทำ

1. นายธีระวัฒน์ จิมสุนทร 27.1082
2. นายสมศักดิ์ บุญปาน 27.1268
3. นายเอกพันธ์ กรกม 27.1295



อาจารย์ที่ปรึกษา

## การประยุกต์ใช้ชนิดบิลิวเอ็มไซน์เวอินเวอร์เตอร์ในแหล่งจ่ายไฟสำรอง

ธีระวัฒน์ นิยมสุนทร

สมศักดิ์ บุญปาน

เอกพันธ์ กรกุ่ม

รศ. วิริยะ พิเชษฐจำเริญ อาจารย์ที่ปรึกษา

ปีการศึกษา 253๐

### บทคัดย่อ

ปฏิญานินนธ์ฉบับนี้ได้เสนอวงจรอินเวอร์เตอร์แบบคลื่นไซน์ ซึ่งอาศัยหลักการมอดูเลตความกว้างของพัลส์เพื่อกำจัดฮาร์มอนิกอันดับต่ำ และใช้วงจรกรองความถี่ในการสร้างแรงดันขาออกให้มีลักษณะเป็นคลื่นไซน์ วงจรสามารถรักษาแรงดันให้คงที่ 220 โวลท์ ความถี่ 50 เฮิร์ต สำหรับภาวะที่เปลี่ยนแปลงตั้งแต่ไม่มีภาระจนถึง 500 วัตต์ โดยใช้วงจรควบคุมแบบพีไอ นอกจากนี้ยังได้เสนอการนำวงจรอินเวอร์เตอร์ไปประยุกต์ใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟสำรอง โดยการเพิ่มทรานซิสเตอร์เข้าไปเป็นส่วนทรานสเฟอรัลลิตซ์ สำหรับสวิตช์วงจรอินเวอร์เตอร์เข้าเป็นแหล่งจ่ายไฟให้แก่ภาระในกรณีที่แรงดันจากสายส่งผิดปกติหรือขาดหายไป และสวิตช์สายส่งเข้าสู่ภาระกรณีสายส่งมีแรงดันปกติ วงจรอินเวอร์เตอร์ใช้ทรานซิสเตอร์กำลังเป็นอุปกรณ์ในการสวิตช์ โดยมีเบตเตอร์ขนาด 12.5 โวลท์ 9๐ แอมป์ชั่วโมง จำนวน 8 ลูก เป็นแหล่งจ่ายไฟตรง นอกจากนี้ยังได้เสนอการวิเคราะห์องค์ประกอบฮาร์มอนิกของรูปคลื่นชนิดบิลิวเอ็มแบบต่างๆ โดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์

## An Application of PWM Sine Wave Inverter in Standby Power Supply

Theerawat Chimsoontorn

Somsak Boonpan

Agapan Gorngoom

Associate Professor Viriya Pichetjamroen Advisor

1987

### Abstract

This project proposes a sine wave inverter using a pulse width modulation technique to eliminate the low order harmonics and filter circuit to generate the sinusoidal output voltage. The circuit has the regulation of its output voltage constant at 220 volt, 50 Hz when the load varies from no load to 500 VA at unity power factor by using the PI controller. In application, using the thyristors as the transfer switch to select the inverter to load when the line voltage is error or select the line to load when the line has normal voltage. Eight batteries each 12.5 volt, 90 AH are used for a DC power supply to the transistorized PWM inverter. The harmonic content of the various PWM patterns are calculated by microcomputer programs.

## สารบัญ

บทคัดย่อ	page
สารบัญ	
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 วงจรอินเวอร์เตอร์	1
1.2 การประยุกต์ใช้งานของวงจรอินเวอร์เตอร์	3
บทที่ 2 ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับพัลส์วิดมอดูเลชัน	4
2.1 รูปคลื่นพีดับบลิวเอ็มแบบ 2 ระดับและแบบ 3 ระดับ	4
2.2 การสร้างรูปคลื่นพีดับบลิวเอ็ม	5
2.3 การสร้างรูปคลื่นพีดับบลิวเอ็มแบบเนเทอร์อลและแบบเรกูลาร์	6
บทที่ 3 การวิเคราะห์ห้่องค์ประกอบความถี่ของรูปคลื่นพีดับบลิวเอ็ม	9
3.1 การคำนวณมุมสวิทช์ของรูปคลื่นพีดับบลิวเอ็มแบบ 2 ระดับ	9
3.2 การคำนวณมุมสวิทช์ของรูปคลื่นพีดับบลิวเอ็มแบบ 3 ระดับ	12
3.3 องค์ประกอบฮาร์โมนิกส์ของรูปคลื่นพีดับบลิวเอ็ม	15
3.4 การวิเคราะห์ห้่องค์ประกอบฮาร์โมนิกส์ของรูปคลื่นพีดับบลิวเอ็มแบบ 2 ระดับ	15
3.5 การวิเคราะห์ห้่องค์ประกอบฮาร์โมนิกส์ของรูปคลื่นพีดับบลิวเอ็มแบบ 3 ระดับ	28
3.6 สรุปผลการวิเคราะห์ห้่องค์ประกอบฮาร์โมนิกส์	45
3.7 การวิเคราะห์ห้่องค์ประกอบฮาร์โมนิกส์ในกรณีโอเวอร์มอดูเลชัน	51
3.8 การคำนวณค่าอาร์เอ็มเอสของรูปคลื่นแบบเนเทอร์อลชนิด 3 ระดับ	53
บทที่ 4 วงจรพีดับบลิวเอ็มไซน์เวฟอินเวอร์เตอร์	56
4.1 บทนำ	56
4.2 แนวความคิดในการออกแบบวงจรสร้างสัญญาณทริกแบบพีดับบลิวเอ็ม	57
4.3 วงจรสร้างรูปคลื่นพีดับบลิวเอ็มแบบต่าง ๆ	60
4.4 ส่วนประกอบของวงจรพีดับบลิวเอ็มไซน์เวฟอินเวอร์เตอร์	64
4.5 วงจรสร้างรูปแบบสัญญาณพีดับบลิวเอ็ม	65
4.6 วงจรขับเบส	68
4.7 วงจรกำลัง	69
4.8 แหล่งจ่ายไฟตรง	74
บทที่ 5 วงจรกรองความถี่	76
5.1 บทนำ	76
5.2 แนวทางการสร้างวงจรกรองความถี่	77

บทที่ 6	หลักการและการออกแบบวงจรควบคุม	83
6.1	ชนิดของการควบคุม	84
6.2	หลักการควบคุมแรงดันไฟฟ้าขาออกโดยการควบคุมวงจรรายในอินเวอร์เตอร์	85
6.3	วงจรรวม	86
บทที่ 7	แหล่งจ่ายไฟฟ้าสํารอง	94
7.1	บทนํ้า	94
7.2	วงจรถวายสอบแรงดันผิดปกติ	96
7.3	การสร้างสัญญาณจุดชนวน	100
7.4	การใช้ไทรสเตอร์ทำงานเป็นสวิทช์ไฟฟ้้า	100
7.5	การทำงานแบบเสตนต์บาย	101
7.6	การกลับเข้าสู่ระบบจ่ายไฟปกติ	102
บทที่ 8	ผลการทดลอง	103
8.1	วงจรสํ้าสร้างสัญญาณเทริกและวงจรรับเบส	103
8.2	วงจรกํ้าลิ่งและวงจรรองความถี่	106
8.3	วงจรรวมลูปปิด	113
8.4	สรุปลผลการทดลอง	117
บทที่ 9	บทสรุปล	118
ภาคผนวก		119
-	การสร้างเตดใหม่	120
-	การทำงานในโหมดต่างๆของวงจรกํ้าลิ่ง	121
-	วงจรรอบแอมป์พื้นฐาน	124
-	ข้อมูลของอุปกรณ์ที่ใ้	127
กิตติกรรมประกาศ		134
เอกสารอ้างอิง		135

## บทที่ 1

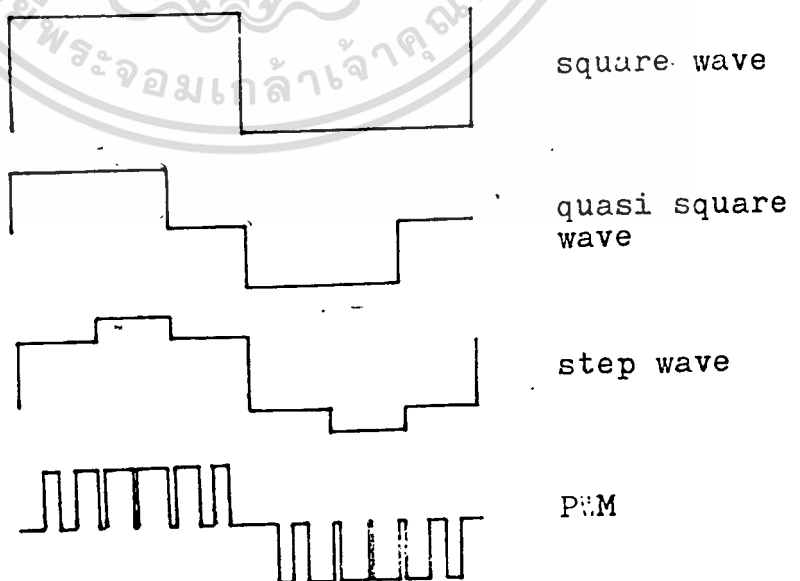
### บทนำ

" การเปลี่ยนกำลังไฟตรง (dc) จากแหล่งจ่าย ให้เป็นกำลังไฟสลับ (ac) ที่มีแรงดันและ ความถี่ ตามต้องการ โดยใช้อุปกรณ์สารกึ่งตัวนำกำลัง(power semiconductor device) " คือ นิยามของวงจรอินเวอร์เตอร์ แบบสแตติก ปริญญาพันธ์ ฉบับนี้ ได้กล่าวถึง วงจรพีดับ บลิวเอ็มไซน์เวฟ อินเวอร์เตอร์ ซึ่งเป็นอินเวอร์เตอร์ ที่สามารถสร้างไฟสลับที่มีลักษณะใกล้เคียง คลื่นไซน์มากที่สุด โดยอาศัยเทคนิคการมอดูเลท ความกว้าง ของพัลส์ รวมทั้งการนำไปใช้ในแหล่งจ่ายไฟสำรอง วงจรมีพิกัด 500 VA แรงดัน 220 โวลท์ ความถี่ 50 Hz

#### 1.1 วงจรอินเวอร์เตอร์

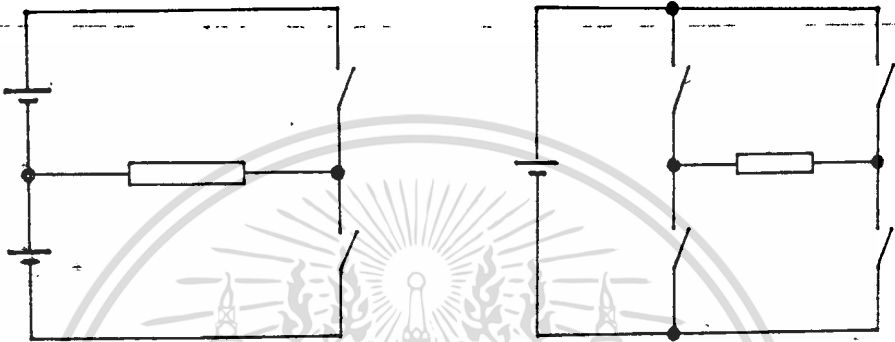
เมื่อกล่าวถึงวงจรเปลี่ยนกำลังไฟตรง เป็นกำลังไฟสลับ คนทั่วไป มักจะคิดว่าได้กำลังไฟ สลับ เป็นคลื่นไซน์ แต่ในทางปฏิบัติแล้ว รูปคลื่นที่ได้จวงจร อินเวอร์เตอร์แบบสแตติก ไม่มีโอกาสจะเป็นคลื่นไซน์ได้เลย ถ้าไม่มีการกรองความถี่ รูปคลื่นที่ได้จากวงจอินเวอร์เตอร์ จะ มีลักษณะที่ประกอบไปด้วย ผลรวมระหว่างคลื่นความถี่หลักมูล กับองค์ประกอบฮาร์โมนิกส์ ที่มี ความถี่เป็นจำนวนเท่า ของความถี่หลักมูล

วงจอินเวอร์เตอร์ เมื่อพิจารณาตามลักษณะรูปคลื่นเอาท์พุท จะมีอยู่ด้วยกันหลายแบบ ดังตัวอย่างในรูป 1.1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ รูปที่ 1.1 แสดงรูปคลื่นเอาท์พุทแบบต่างๆ ของอินเวอร์เตอร์

วงจรอินเวอร์เตอร์แบบ 1 เฟส เมื่อพิจารณาจากลักษณะวงจร จะมี 2 ประเภท ที่แพร่หลายคือ แบบที่ต้องอาศัยแหล่งจ่ายไฟตรงแบบที่มี แยกกลางซึ่งจะใช้อุปกรณ์สวิตช์ เพียง 2 ชุด และแบบฟูลบริดจ์ ซึ่งมีแหล่งจ่ายไฟตรง ไม่มีแยกกลาง แต่จะใช้อุปกรณ์สวิตช์ 4 ชุด ดังแสดงในรูป 1.2(ก) และ(ข) ตามลำดับ

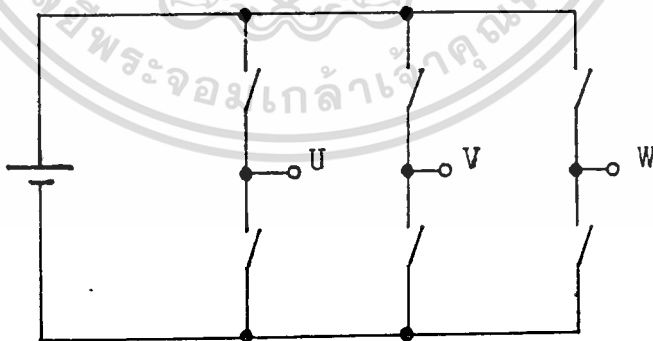


(ก)

(ข)

รูปที่ 1.2 แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์แบบ 1 เฟส

วงจรทั้งสองแบบ ในรูปที่ 1.2 สามารถควบคุมให้มีคลื่นเอาต์พุต ในรูป 1.1 แบบใดก็ได้ โดยการควบคุมการปิดเปิดของสวิตช์ วงจรอินเวอร์เตอร์แบบ 3 เฟสจะมีลักษณะแบบฟูลบริดจ์ แต่มีสวิตช์เพิ่มขึ้นเป็น 6 ชุด ดังแสดงในรูปที่ 1.3



รูปที่ 1.3 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบ 3 เฟส

วงจรอินเวอร์เตอร์แบบสแควร์เวฟเป็นวงจรแบบง่ายที่สุด แต่มีข้อเสียคือไม่สามารถปรับระดับแรงดันได้ จึงถูกพัฒนาเป็นแบบควอร์ซีสแควร์เวฟซึ่งสามารถควบคุมระดับแรงดันได้ โดยการปรับค่าดิวตีไซเคิล(Duty Cycle) แต่ทั้งสองแบบยังมีองค์ประกอบฮาร์มอนิกเกิดขึ้นสูง วงจรที่มีรูปคลื่นแบบซึ้นบันไดเป็นแบบ 6 สเต็ปหรือ 12 สเต็ปจะมีองค์ประกอบฮาร์มอนิกเกิดขึ้น แต่จะสิ้นเปลืองมากยกตัวอย่างเช่น คลื่นแบบ 6 สเต็ปจะต้องสร้างจากวงจรสแควร์เวฟถึง 3 วงจรมารวมกันโดยใช้หม้อแปลง

เมื่อได้มีการนำเทคนิคการมอดูเลตแบบต่างๆมาใช้กับวงจรรีเลย์เตอร์ ซึ่งจะกล่าวถึงในบทที่ 2 โดยการใช้วงจรรีเลย์เตอร์ในลักษณะเดิม แต่ควบคุมการสวิตช์ให้มีความถี่สูง ทำให้ได้รูปคลื่นเอาท์พุทเป็นพัลส์บิลิเอม จะสามารถกำจัดองค์ประกอบลำดับต่ำๆเช่น ลำดับที่ 3, 5 หรือ 7 ลงไปได้ ซึ่งสามารถคำนวณให้เป็นจริงได้ในบทที่ 3 รวมทั้งการออกแบบและการสร้างวงจรรีเลย์เตอร์ ซึ่งจะกล่าวถึงในบทที่ 4 บทที่ 5 เป็นการกล่าวถึงการกรองคลื่นพัลส์บิลิเอมให้เป็นคลื่นไซน์ในวงจรกรองความถี่ และบทที่ 6 เป็นการกล่าวถึงการควบคุมระดับแรงดันให้คงที่โดยวงจรควบคุมลูปปิด(Close Loop)

## 1.2 การประยุกต์ใช้งานวงจรรีเลย์เตอร์

วงจรรีเลย์เตอร์ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในงานหลายด้านเช่น ใช้ในงานยานพาหนะต่างๆที่ไม่มีแหล่งจ่ายไฟสลับ, ใช้เปลี่ยนพลังงานแสงอาทิตย์จากโซลาร์เซลล์ให้เป็นไฟสลับ และใช้ควบคุมมอเตอร์กระแสสลับโดยวงจรรีเลย์เตอร์ 3 เฟส ซึ่งมักจะใช้ไฟ 3 เฟสจากไลน์ที่มีแรงดันและความถี่คงที่ มาแปลงเป็นไฟตรงบ้อนให้วงจรรีเลย์เตอร์แบบ 3 เฟสที่สามารถเปลี่ยนแปลงแรงดันและความถี่ได้ เพื่อใช้ประโยชน์ในการควบคุมมอเตอร์ 3 เฟส

ปริศยานี้พบได้กล่าวถึงการนำวงจรรีเลย์เตอร์แบบบิลิเอมไซน์เวฟอินเวอร์เตอร์มาประยุกต์ใช้เป็นแหล่งจ่ายไฟสำรอง(Standby By Power Supply) ซึ่งเป็นแหล่งจ่ายไฟที่สามารถจ่ายไฟอย่างต่อเนื่องให้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต้องการพลังงานไฟฟ้าตลอดเวลาเช่น คอมพิวเตอร์, วงจรควบคุมอัตโนมัติ, อุปกรณ์สื่อสารโทรคมนาคม ในบทที่ 7 จะกล่าวถึงหลักการของแหล่งจ่ายไฟสำรอง และการนำวงจรรีเลย์เตอร์ให้เป็นแหล่งจ่ายไฟสำรองโดยการเพิ่มวงจรรีเลย์เตอร์สวิตช์สำหรับควบคุมการตัดต่อแหล่งจ่ายไฟให้แก่ภาระ

## บทที่ 2

### ความรู้พื้นฐานเกี่ยวกับพัลส์วิดมอดูเลชัน (PWM)

การมอดูเลตความกว้างของพัลส์ (Pulse Width Modulation, PWM) เป็นเทคนิคการแบ่งรูปคลื่นใน 1 ความ ออกเป็นพัลส์ย่อยๆหลายพัลส์ โดยที่แต่ละพัลส์อาจมีความกว้างของพัลส์ไม่เท่ากัน ในบทนี้จะกล่าวถึงรูปคลื่นพีดับบลิวเอ็มชนิดต่างๆ รวมทั้งเทคนิคในการสร้างรูปคลื่นพีดับบลิวเอ็มวิธีต่างๆ

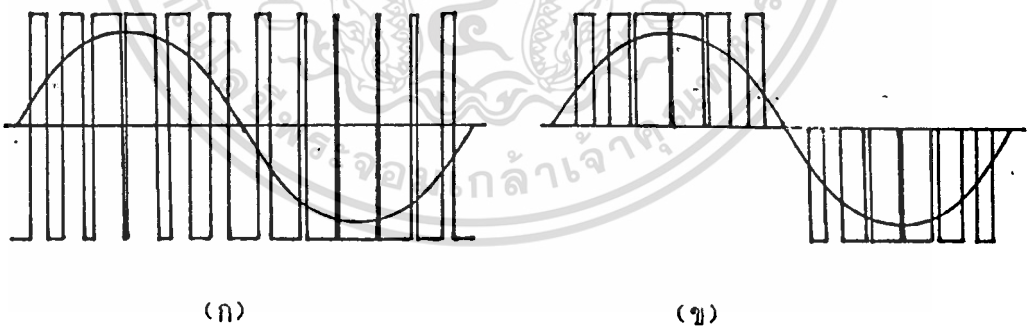
#### 2.1 รูปคลื่นพีดับบลิวเอ็มแบบ 2 ระดับ และ 3 ระดับ

รูปคลื่นพีดับบลิวเอ็มมีอยู่ด้วยกันหลายชนิดแต่ชนิดที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้มากที่สุดและเป็นชนิดพื้นฐานที่สุด ได้แก่แบบ 2 ระดับ (2 level PWM) และ แบบ 3 ระดับ (3 level PWM)

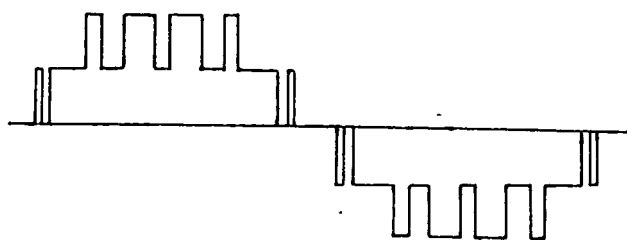
1) รูปคลื่นพีดับบลิวเอ็มแบบ 2 ระดับ เป็นรูปคลื่นที่มีการสวิตช์ระหว่างระดับอ้างอิง 2 ระดับ คือ  $+E$  และ  $-E$

2) รูปคลื่นพีดับบลิวเอ็มแบบ 3 ระดับ เป็นรูปคลื่นที่มีการสวิตช์ระหว่างระดับอ้างอิง 3 ระดับ คือ  $+E, 0$  และ  $-E$

รูปคลื่นทั้ง 2 แบบ มีลักษณะดังรูปที่ 2.1 โดยแสดงรูปคลื่นพีดับบลิวเอ็ม เปรียบเทียบกับคลื่นความถี่หลักมูล (fundamental) ของรูปคลื่นพีดับบลิวเอ็มนั้น ส่วนรูปที่ 2.2 เป็นตัวอย่างของรูปของคลื่นพีดับบลิวเอ็มอีกแบบหนึ่งซึ่งเป็นรูปคลื่นของวงจร 3 เฟสพีดับบลิวเอ็มอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 2.1 แสดงรูปคลื่นพีดับบลิวเอ็ม (ก) แบบ 2 ระดับ (ข) แบบ 3 ระดับ



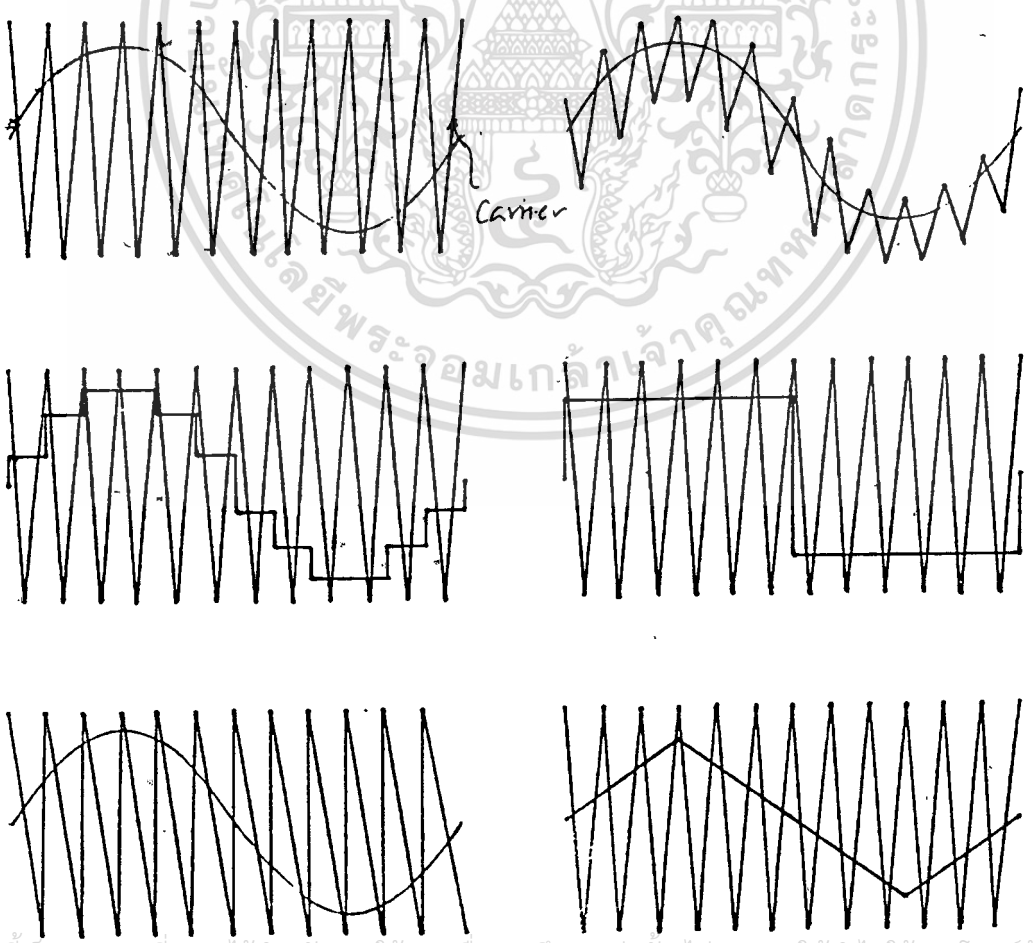
รูปที่ 2.2 แสดงรูปคลื่นพีดับบลิวเอ็มในวงจร 3 เฟสพีดับบลิวเอ็มอินเวอร์เตอร์ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.2 การสร้างรูปคลื่นพีคดับลิวเอ็ม

รูปคลื่นพีคดับลิวเอ็มสามารถสร้างขึ้นมาได้โดยวิธีต่างๆ ได้แก่

1) โดยการใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ ซึ่งสามารถกระทำได้โดยการโปรแกรมให้ไมโครโปรเซสเซอร์ส่งสัญญาณซึ่งสอดคล้องกับมุมสวิทช์ผ่านทางพอร์ตเอาต์พุต(output port) ซึ่งวิธีนี้จะต้องมีการคำนวณหรือกำหนดค่ามุมสวิทช์มุมต่างๆออกมาเสียก่อนแล้วจึงเก็บไว้ในหน่วยความจำ ไมโครโปรเซสเซอร์จะอาศัยข้อมูลจากหน่วยความจำนั้นเพื่อสร้างรูปแบบ(pattern) สัญญาณพีคดับลิวเอ็มขึ้นมาแล้วจึงส่งผ่านพอร์ตเอาต์พุตออกมา

2) โดยใช่วงจรอิเล็กทรอนิกส์ วิธีที่สะดวกที่สุดคือใช่วงจรเปรียบเทียบ(Comparator) เช่น ไอซีเบอร์ LM339, LM311 เป็นต้น ซึ่งสามารถกระทำได้โดยป้อนสัญญาณอินพุต 2 สัญญาณเข้าสู่วงจรเปรียบเทียบคือสัญญาณอ้างอิง(reference signal) ซึ่งจะมีความถี่เท่ากับรูปคลื่นพีคดับลิวเอ็มที่ต้องการกับสัญญาณแครี่เรียร์(carrier signal)ที่มีความถี่สูงกว่า มุมสวิทช์ของรูปคลื่นพีคดับลิวเอ็มก็คือจุดตัดของสัญญาณทั้งสอง การสร้างโดยอาศัยวงจรเปรียบเทียบนี้สามารถเลือกสัญญาณที่ใช้เปรียบเทียบได้หลายลักษณะดังตัวอย่างในรูปที่ 2.3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 2.3 ตัวอย่างการสร้างรูปคลื่นพีคดับลิวเอ็มโดยใช่วงจรเปรียบเทียบ

## 2.3 การสร้างรูปคลื่นพีดับบลิวเอ็มแบบเนเทอร์อลและแบบเรกูลาร์ $\star$

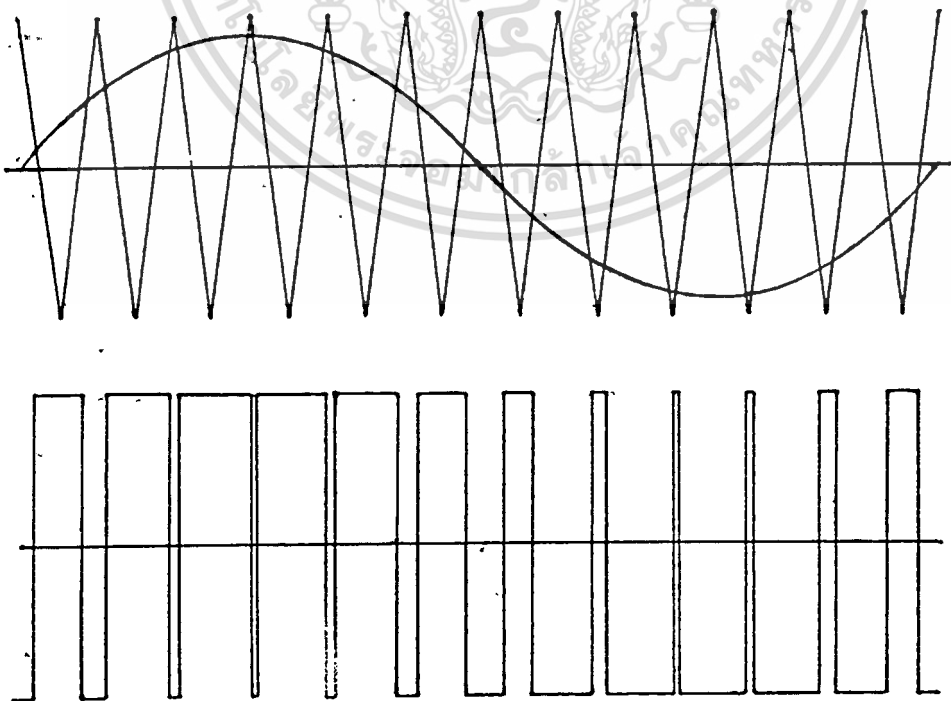
การสร้างรูปคลื่นพีดับบลิวเอ็มโดยการนำวงจรเปรียบเทียบจะมอดูเลตประกอบ 2 ประการที่จะเป็นตัวกำหนดลักษณะรูปคลื่นพีดับบลิวเอ็มได้แก่

- 1) อัตราส่วนความถี่ของสัญญาณแคเรียร์ต่อสัญญาณอ้างอิง (Frequency Ratio,  $N$ )
- 2) อัตราส่วนแอมพลิจูดของสัญญาณอ้างอิงต่อสัญญาณแคเรียร์หรืออัตราส่วนการมอดูเลชัน (Modulation Ratio,  $K$ )

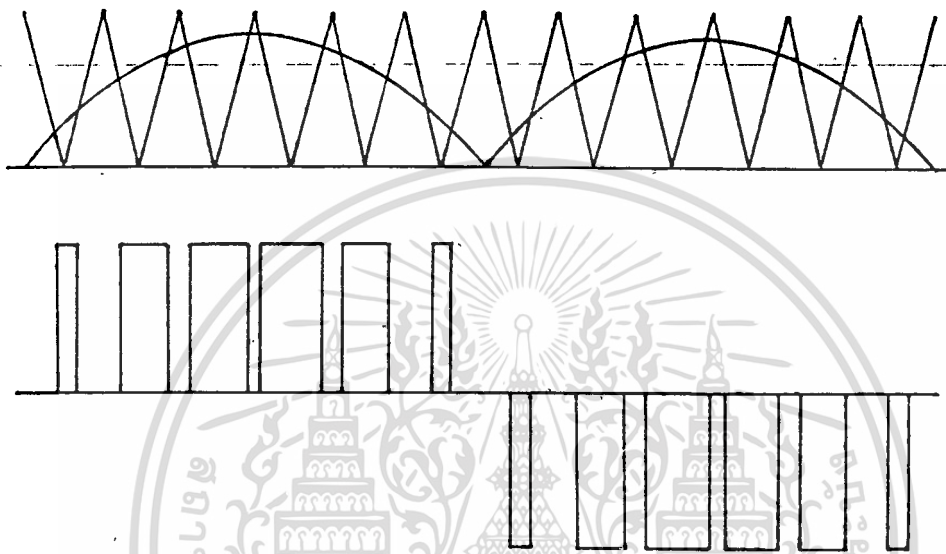
$\star$  โดยปกติค่าอัตราส่วนการมอดูเลชันจะใช้ค่าที่อยู่ในช่วงไม่เกิน 1 ค่านี้จะเป็นตัวกำหนดความกว้างของพัลส์แต่ละพัลส์โดยความกว้างของพัลส์จะยิ่งมากขึ้นเมื่อค่า  $K$  มีค่ามากขึ้น ส่วนค่าอัตราส่วนความถี่จะเป็นตัวกำหนดจำนวนพัลส์ให้มีจำนวนเท่ากับค่า  $N$  และจำนวนมุมสวิทช์จะมีจำนวน  $2N$  มุมทั้งนี้ต้องอยู่ในกรณีที่ค่า  $K$  ไม่เกิน 1

### 2.3.1 การสร้างรูปคลื่นแบบเนเทอร์อลแซมพลิง

การสร้างรูปคลื่นแบบเนเทอร์อลแซมพลิง (Natural Sampling) จะใช้คลื่นไซน์เป็นสัญญาณอ้างอิง และคลื่นสามเหลี่ยมเป็นสัญญาณแคเรียร์ โดยสามารถสร้างได้ทั้งแบบ 2 ระดับ และแบบ 3 ระดับ การสร้างแบบ 2 ระดับ จะใช้คลื่นไซน์และคลื่นสามเหลี่ยมแบบเต็มรูปคลื่น ช่วงที่คลื่นไซน์มากกว่าคลื่นสามเหลี่ยมการสวิทช์จะเป็นบวก และช่วงที่คลื่นไซน์ มีขนาดน้อยกว่าการสวิทช์จะเป็นลบ ดังแสดงในรูปที่ 2.4



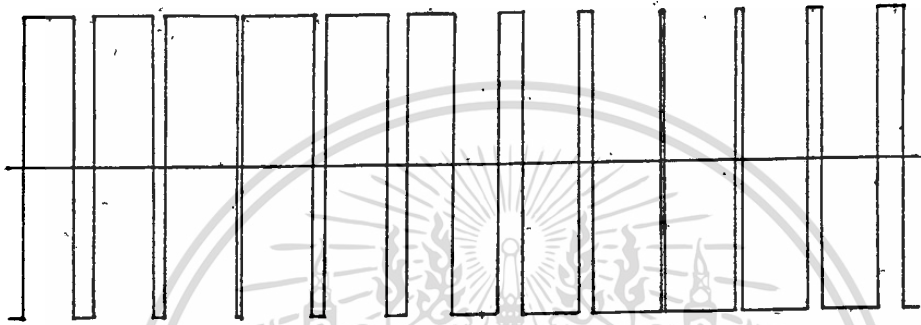
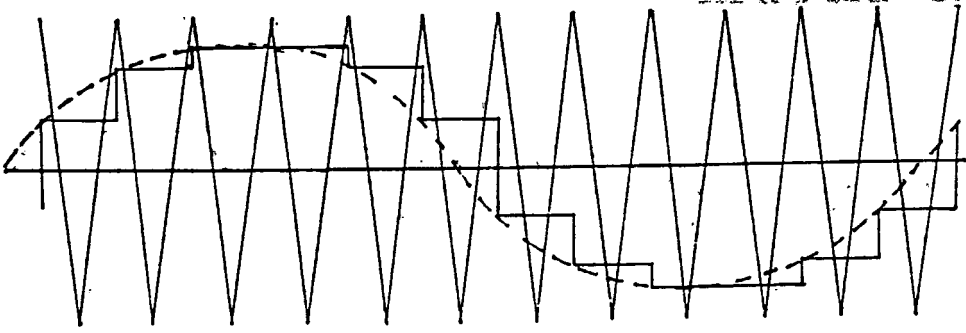
สำหรับการเปรียบเทียบแบบ 3 ระดับ จะใช้คลื่นไซน์ที่เรคตีไฟร์ขึ้นไปเป็นคลื่นพูลเวฟ (Full wave) เปรียบเทียบกับคลื่นสามเหลี่ยมที่ถูกยกระดับขึ้นไปเหนือเส้นกราวด์ (ground) ช่วงที่คลื่นพูลเวฟมีขนาดมากกว่าการสวิตช์จะมีค่าเป็นบวกในครึ่งคาบแรก และเป็นลบในครึ่งคาบหลัง ส่วนช่วงที่คลื่นพูลเวฟมีขนาดน้อยกว่าการสวิตช์จะเป็นศูนย์ ดังแสดงในรูปที่ 2.5



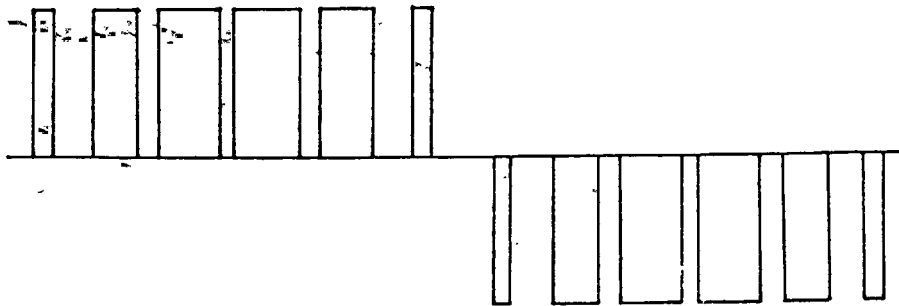
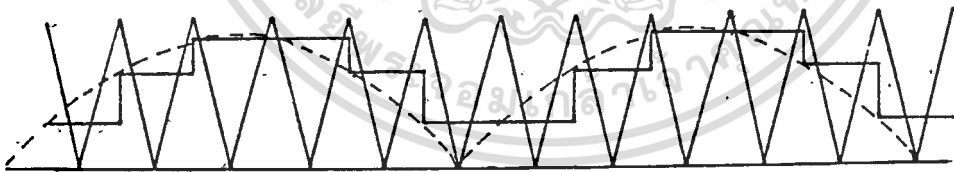
รูปที่ 2.5 การสร้างรูปคลื่นแบบเนเทอร์อลแซมพลิงชนิด 3 ระดับ

### 2.3.2 การสร้างรูปคลื่นแบบเรกูลาร์แซมพลิง

การสร้างรูปคลื่นแบบเรกูลาร์แซมพลิง (Regular Sampling) ใช้หลักการเช่นเดียวกับแบบเนเทอร์อล โดยตัดแปลงมาจากแบบเนเทอร์อล เนื่องจากการเปรียบเทียบแบบเนเทอร์อลนั้น ระหว่างการเปรียบเทียบแต่ละครั้งส่วนของคลื่นไซน์จะไม่เป็นเชิงเส้น (linear) การเปรียบเทียบแบบเรกูลาร์จะนำคลื่นไซน์ผ่านวงจรแซมเพิลและโฮลด์ (Sample and Hold) ที่มีความถี่การแซมเพิล (sample) เท่ากับความถี่ของคลื่นสามเหลี่ยม ได้ออกมาเป็นรูปคลื่นขั้นบันได (step) แล้วจึงนำไปเข้าวงจรเปรียบเทียบเพื่อเปรียบเทียบกับคลื่นสามเหลี่ยม ซึ่งจะเห็นว่าระหว่างการเปรียบเทียบแต่ละช่วงจะมีลักษณะเป็นเชิงเส้น การเปรียบเทียบแบบเรกูลาร์สามารถทำได้ทั้งแบบ 2 ระดับ และ 3 ระดับ เช่นเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 2.6 และ 2.7



รูปที่ 2.6 การสร้างรูปคลื่นแบบเรกูลาร์แชนเนลิ่งชนิด 2 ระดับ



รูปที่ 2.7 การสร้างรูปคลื่นแบบเรกูลาร์แชนเนลิ่งชนิด 3 ระดับ



### บทที่ 3

## การวิเคราะห์องค์ประกอบความถี่ของรูปคลื่นชนิดบลิวเอ็ม

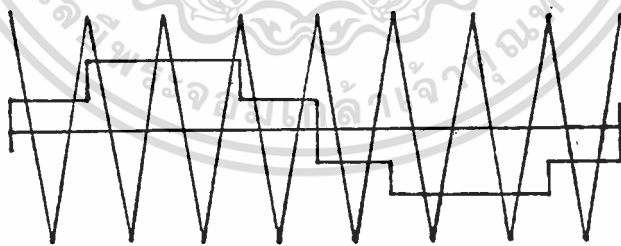
รูปคลื่นชนิดบลิวเอ็มนอกจากจะประกอบด้วยความถี่หลักมูล (Fundamental) แล้ว ยังประกอบไปด้วยองค์ประกอบฮาร์โมนิคความถี่สูง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องวิเคราะห์องค์ประกอบฮาร์โมนิคของรูปคลื่นชนิดบลิวเอ็มที่ได้สร้างขึ้นเพื่อเปรียบเทียบและหาข้อสรุปว่าควรจะใช้วิธีสร้างรูปคลื่นแบบใดจึงจะเหมาะสมที่สุดในการนำไปประยุกต์ใช้งาน

### 3.1 การคำนวณมุมสวิทช์ของรูปคลื่นชนิดบลิวเอ็มแบบ 2 ระดับ

รูปคลื่นชนิดบลิวเอ็มซึ่งสร้างขึ้นโดยการใช้งานจรเปรียบเทียบ จะเกิดมุมสวิทช์ตรงจุดตัดของสัญญาณอ้างอิงกับสัญญาณแคร์เรียร์ ซึ่งสามารถหาจุดตัดเหล่านั้นได้โดยใช้วิธีนิวเมอริคอล (numerical)



(ก)



(ข)

รูปที่ 3.1 การเปรียบเทียบแบบ 2 ระดับ (ก) เนเทอร์อล (ข) เรกูลาร์

ในการวิเคราะห์รูปคลื่นแบบเนเทอร์อลชนิดบลิวเอ็ม ชนิด 2 ระดับ จะใช้สภาวะเริ่มต้นที่คลื่นไซน์มีขนาดเท่ากับ ๑ และคลื่นสามเหลี่ยมมีขนาดสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกับวงจรที่ได้สร้างขึ้นมาจริง อย่างไรก็ตามไม่ว่าจะเลือกสภาวะเริ่มต้นลักษณะใด องค์ประกอบฮาร์โมนิคจะไม่แตกต่างกัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของลิขสิทธิ์ที่มีการนำไปใช้

024630

สมการเส้นตรงเส้นที่  $k$  ของคลื่นสามเหลี่ยมที่มีมุม  $x$  ใดๆ สามารถเขียนได้ว่า

$$Y(x) = (-1)^{k+1} m(x-kT/2) + (-1)^k$$

โดยที่  $k = 0, 1, 2, \dots, 2N-1$

$N$  = อัตราส่วนความถี่คลื่นสามเหลี่ยมต่อคลื่นไซน์

$T$  = คาบของคลื่นสามเหลี่ยม =  $2\pi/N$

$m$  = ความชัน (slope) ของคลื่นสามเหลี่ยม =  $4/T$

$x$  = มุมใดๆ มีค่า  $0 \leq x \leq 2\pi$

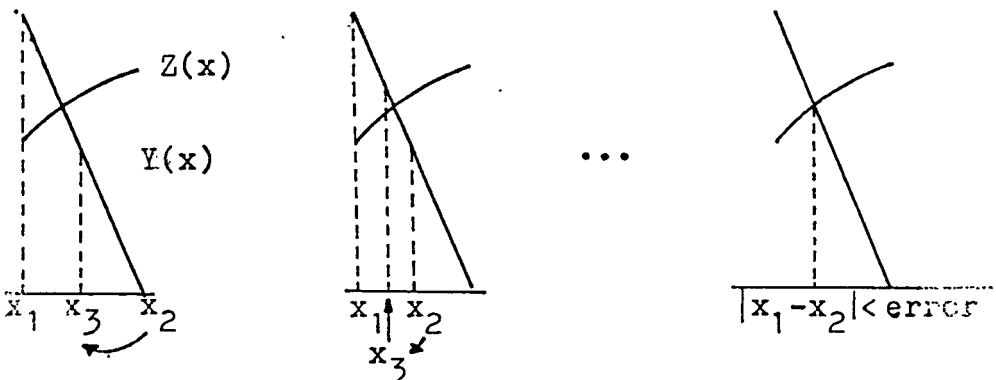
แอมพลิจูดของคลื่นสามเหลี่ยมจะกำหนดเป็น 1 หน่วย ส่วนคลื่นไซน์จะมีแอมพลิจูดเท่ากับค่าอัตราส่วนการมอดูเลชัน ( $K$ ) ซึ่งในโปรแกรมแทนด้วยตัวแปร  $A$  ดังนั้นจึงสามารถเขียนสมการของคลื่นไซน์ได้ดังนี้

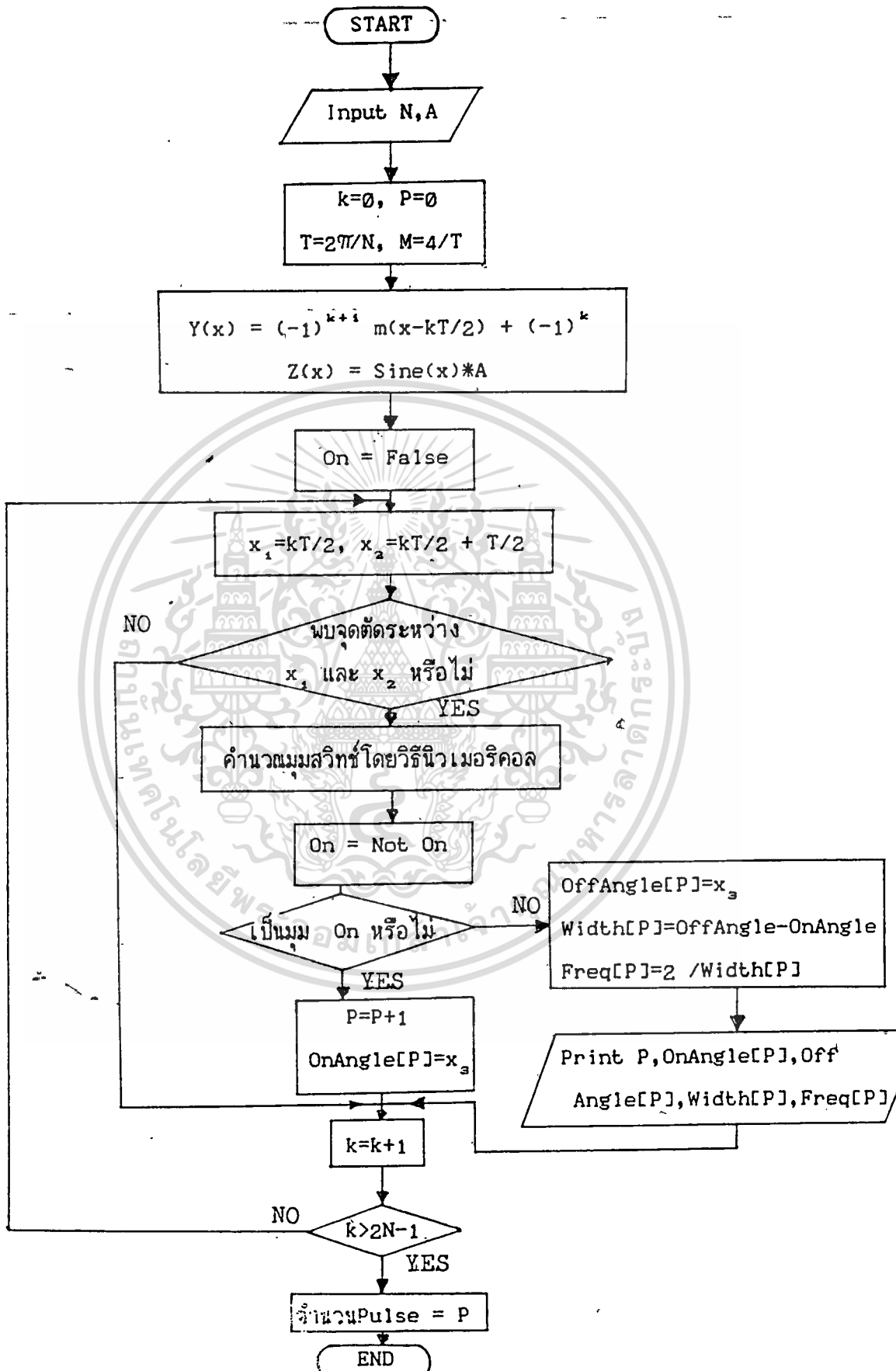
$$Z(x) = \text{Sine}(x) * A$$

สำหรับวิธีนิวเมอริคอลที่ใช้หาจุดตัดของคลื่นทั้งสอง จะมีขั้นตอนดังต่อไปนี้

- 1) กำหนดจุด  $x_1$  และจุด  $x_2$  ที่จุดต้นและปลายของคลื่นสามเหลี่ยมเส้นที่พิจารณา
- 2) พิจารณาระหว่างจุด  $x_1$  และจุด  $x_2$  ว่ามีจุดตัดหรือไม่ ถ้าไม่มีให้ข้ามไปพิจารณาสามเหลี่ยมเส้นต่อไป
- 3) กำหนด  $x_3 = (x_1 + x_2) / 2$
- 4) พิจารณาว่าจุดตัดอยู่ระหว่างจุด  $x_1$  และจุด  $x_3$  หรือไม่ (เครื่องหมายของ  $Y(x_1) - Z(x_1)$  ตรงข้ามกับเครื่องหมายของ  $Y(x_3) - Z(x_3)$ ) ถ้ามีให้  $x_2 = x_3$   
ถ้าไม่มี (เครื่องหมายของ  $Y(x_1) - Z(x_1)$  เหมือนกับเครื่องหมายของ  $Y(x_3) - Z(x_3)$ ) ให้  $x_1 = x_3$
- 5) กลับไปทำข้อ 3) ลงมาใหม่ จนค่าความแตกต่างระหว่าง  $x_1$  และจุด  $x_2$  น้อยกว่าค่าผิดพลาด (error) ที่ตั้งไว้และให้จุดตัดนั้น  $= x_3 = (x_1 + x_2) / 2$

สามารถเขียนโฟลว์ชาร์ท (Flowchart) ของการหามุมสวิทช์ได้ดังรูปที่ 3.3



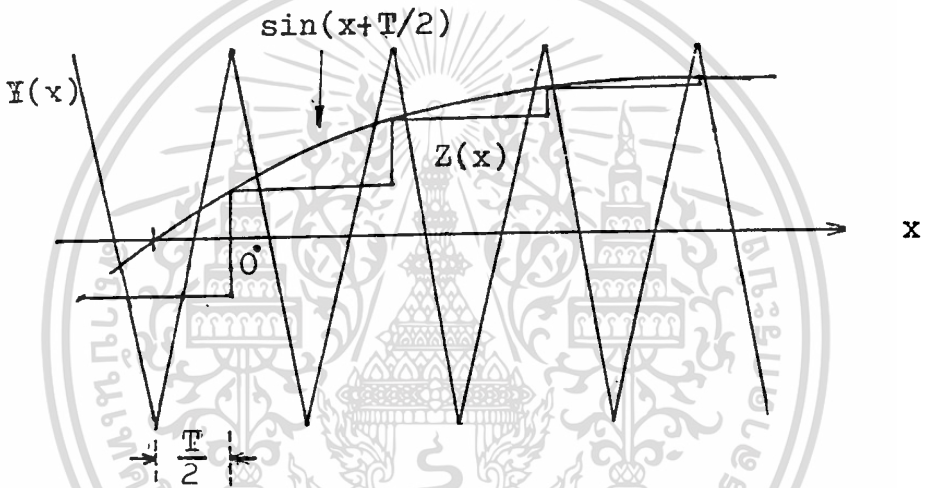


รูปที่ 3.3 โพลาร์ชาร์ทแสดงการคำนวณมุมสวิตช์ของรูปคลื่นในเทอร์อลชนิดบลิ้วเอ็มแบบ 2 ระดับ  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

OnAngle คือมุมที่มีการสวิตช์จาก  $-E$  ไป  $+E$ , OffAngle คือมุมที่มีการสวิตช์จาก  $+E$  ไป  $-E$ , P เป็นตัวแปรสำหรับนับจำนวนพัลส์, Freq เป็นตัวแปรที่บอกว่าพัลส์นั้นมีความถี่เป็นกี่เท่าของคลื่นไซน์ที่ใช้เป็นสัญญาณอ้างอิง

สำหรับรูปคลื่นแบบเรกูลาร์พีคดับลิวเอ็มจะใช้โพลัวซาร์กเช่นเดียวกับแบบเนเทอร์อล เพียงแต่เปลี่ยนฟังก์ชัน  $Z(x)$  เป็นฟังก์ชันของคลื่นซันบันไดซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 3.4

$$Z(x) = \text{Step}(k, T) \\ = \sin(bT + T/2) ; \quad b = \text{integer}(k/2)$$



รูปที่ 3.4 แสดงฟังก์ชันของคลื่นซันบันได

### 3.2 การคำนวณมุมสวิตช์ของรูปคลื่นพีคดับลิวเอ็มแบบ 3 ระดับ

มุมสวิตช์ของรูปคลื่นพีคดับลิวเอ็มแบบ 3 ระดับสามารถหาได้โดยวิธีนิวเมอริคอล เช่นเดียวกับแบบ 2 ระดับ จะแตกต่างกันที่สมการของคลื่นที่ใช้ในการเปรียบเทียบซึ่งสำหรับรูปคลื่นแบบเนเทอร์อล จะมีสมการของคลื่นที่ใช้เปรียบเทียบดังนี้

คลื่นสามเหลี่ยม  $Y(x) = (-1)^{k+1} m(x - kT/2) + 1/2 + (-1)^k / 2$

คลื่นไซน์  $Z(x) = |\text{Sine}(x)| * A$

โดยที่  $k = 0, 1, 2, \dots, 2N-1$

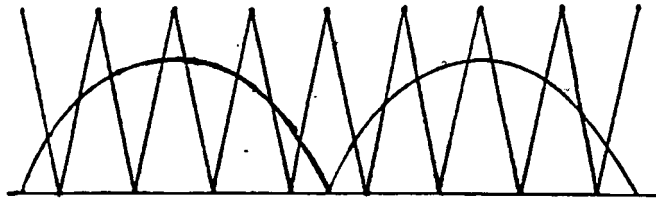
$N =$  อัตราส่วนความถี่คลื่นสามเหลี่ยมต่อคลื่นไซน์

$T =$  คาบของคลื่นสามเหลี่ยม  $= 2\pi/N$

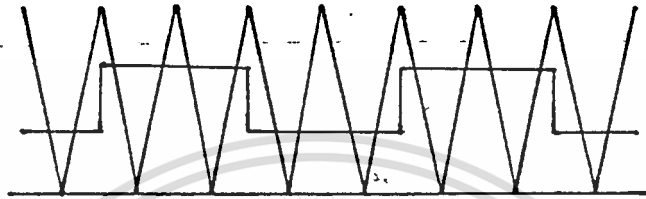
$m =$  ความชันของคลื่นสามเหลี่ยม  $= 2/T$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับดูงานเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



(ก)



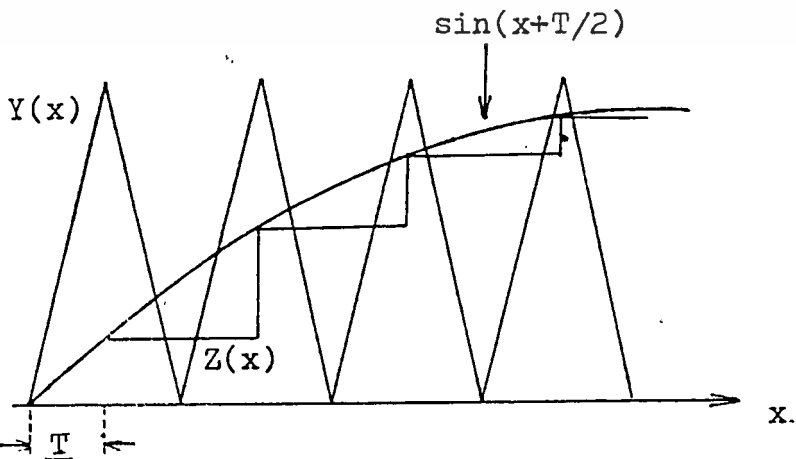
(ข)

รูปที่ 3.5 การเปรียบเทียบแบบ 3 ระดับ (ก) เนเทอร์อล (ข) เรกูลาร์

โพลาร์ซาร์ทของการคำนวณมุมสวิตช์แสดงได้ดังรูปที่ 3.7 OnAngle คือมุมที่มีการสวิตช์จาก 0 ไป +E และ OffAngle คือมุมที่มีการสวิตช์จาก +E ไป 0 ในครึ่งคาบแรก ส่วนในครึ่งคาบหลัง OnAngle คือมุมที่มีการสวิตช์จาก 0 ไป -E และ OffAngle คือมุมที่มีการสวิตช์จาก -E ไป 0

สำหรับรูปคลื่นแบบเรกูลาร์ชนิดบลิ้วเอ็มจะใช้โพลาร์ซาร์ทเช่นเดียวกับแบบเนเทอร์อล เพียงแต่เปลี่ยนฟังก์ชัน  $Z(x)$  เป็นฟังก์ชันของคลื่นซันแนมไดที่ถูกเรคตีไฟร์แทนคลื่นไซน์ฟูลเวฟ ฟังก์ชันของคลื่นซันแนมไดที่ถูกเรคตีไฟร์แสดงได้ดังรูปที่ 3.6

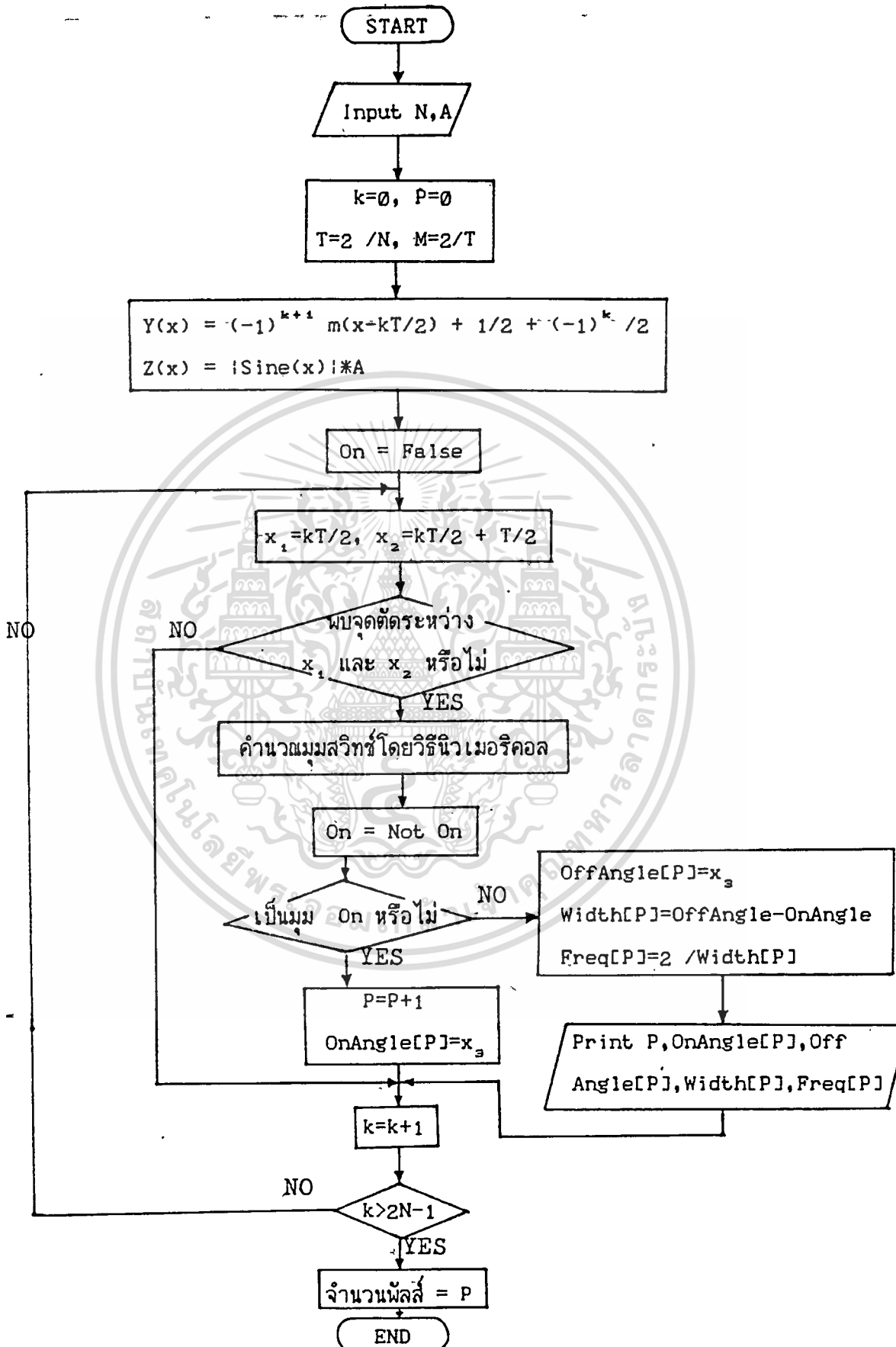
$$Z(x) = \text{Step}(k, T) = |\sin(bT + T/2)|; \quad b = \text{integer}(k/2)$$



รูปที่ 3.6 แสดงฟังก์ชันของคลื่นซันแนมไดที่ถูกเรคตีไฟร์สำหรับเรกูลาร์ชนิดบลิ้วเอ็มแบบ 3 ระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูผู้ใช้งาน เพื่อการสื่อสารเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้วยการค้า

ไม่รักกรรมใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.7 โพลาร์ชาร์ทแสดงการคำนวณมุมสวิทช์ของรูปคลื่นเนเทอรอลพีดับบลิวเอ็มแบบ 3 ระดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับครูใช้งานที่ถูกต้องตามกฎหมายเท่านั้น ไปสอนคนอื่นหรือใช้ในประโยชน์ด้วยการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.3 องค์ประกอบฮาร์มอนิกของรูปคลื่นสี่เหลี่ยม

รูปคลื่นสี่เหลี่ยมนอกจากจะประกอบไปด้วยความถี่หลักมูลแล้ว ยังประกอบไปด้วยองค์ประกอบฮาร์มอนิกต่างๆ ซึ่งเป็นคลื่นความถี่สูง ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงการหาขนาดองค์ประกอบฮาร์มอนิกต่างๆ และขนาดความถี่หลักมูลของคลื่นสี่เหลี่ยมที่สร้างขึ้นโดยวิธีเนเทอร์อลและเรกูลาร์ที่ค่าอัตราส่วนความถี่และอัตราส่วนการมอดูเลชันต่างๆ เพื่อประโยชน์ในการออกแบบวงจรกรองความถี่ (filter) เพื่อขจัดฮาร์มอนิกต่างๆออกไปเหลือแต่คลื่นไซน์ ของความถี่หลักมูลเพียงความถี่เดียวเท่านั้น -- รวมทั้งเป็นข้อมูลสำหรับกรออกแบบวงจรอินเวอร์เตอร์ว่าควรจะใช้ค่าอัตราส่วนความถี่เท่าใดจึงจะเหมาะสมและสามารถกำจัดฮาร์มอนิกต่างๆออกไปได้

จากทฤษฎีฟูเรียร์ได้กล่าวว่าสำหรับฟังก์ชันคาบ (periodic function)  $f(\theta)$  ใดๆจะสามารถกระจายให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันไซน์ และฟังก์ชันโคไซน์ เพื่อแทนฟังก์ชันคาบนั้นๆได้ดังนี้

$$f(\theta) = A_0/2 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos n\theta + B_n \sin n\theta)$$

$$\text{โดยที่ } A_0 = 2/T \int_0^T f(\theta) d\theta$$

$$A_n = 2/T \int_0^T f(\theta) \cos n\theta d\theta$$

$$B_n = 2/T \int_0^T f(\theta) \sin n\theta d\theta$$

เมื่อแทนค่าคาบด้วย  $T=2\pi$  จะได้ว่า

$$A_0 = 1/\pi \int_0^{2\pi} f(\theta) d\theta$$

$$A_n = 1/\pi \int_0^{2\pi} f(\theta) \cos n\theta d\theta$$

$$B_n = 1/\pi \int_0^{2\pi} f(\theta) \sin n\theta d\theta$$

ขนาดแอมพลิจูดขององค์ประกอบฮาร์มอนิกที่  $n$  หรือ  $C_n$  มีค่าเท่ากับ

$$C_n = A_0/2 + \sqrt{A_n^2 + B_n^2}$$

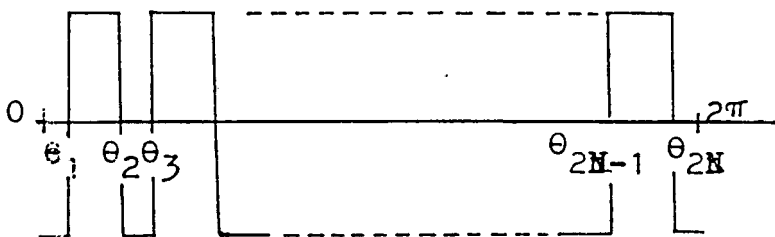
เมื่อ  $n =$  อันดับฮาร์มอนิกที่ต้องการคำนวณ

$$= 1, 2, 3, \dots$$

ค่า  $A_0$  ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมมีค่าเท่ากับ  $\theta$  เพราะเป็นรูปคลื่นที่มีลักษณะสมดุลง

### 3.4 การวิเคราะห์องค์ประกอบฮาร์มอนิกของรูปคลื่นสี่เหลี่ยม 2 ระดับ

พิจารณารูปคลื่นสี่เหลี่ยมแบบ 2 ระดับ ที่มีมุมสวิทช์  $2N$  มุม ใน 1 คาบ ดังรูปที่ 3.8



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
รูปที่ 3.8 แสดงมุมสวิทช์ของรูปคลื่นสี่เหลี่ยมแบบ 2 ระดับ  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งยังมีเหตุผลเบื้องหลังข้อหา และตบยั้งอย่างองคถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สามารถนิยามค่าฟังก์ชัน  $f(\theta)$  ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} f(\theta) &= 1 ; \theta_{2b-1} < \theta < \theta_{2b} ; b=1,2,3,\dots,N \\ &= -1 ; \theta_{2b} < \theta < \theta_{2b+1} ; b=1,2,3,\dots,N \end{aligned}$$

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\theta) \cos n\theta \, d\theta$$

เปลี่ยนคาบการอินทิเกรตเป็นจาก  $\theta_1$  ถึง  $\theta_{2N+1}$

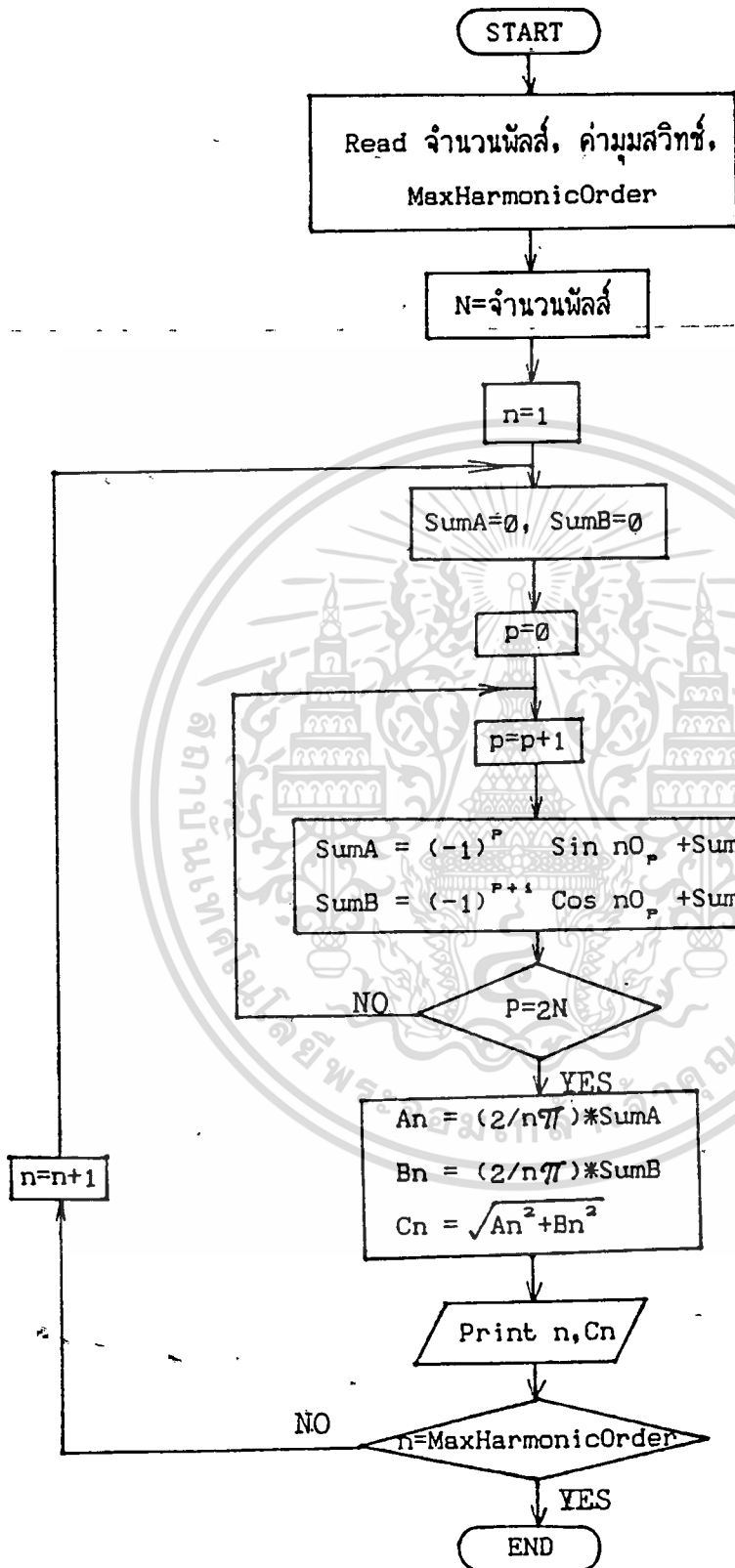
$$\begin{aligned} A_n &= \frac{1}{\pi} \int_0^{\theta_{2N+1}} f(\theta) \cos n\theta \, d\theta \\ &= \frac{1}{n\pi} \int_{\theta_1}^{2\pi+\theta_1} f(\theta) \cos n\theta \, d\theta \\ &= \frac{1}{n\pi} \left( f(\theta) \sin n\theta \Big|_{\theta_1}^{2\pi+\theta_1} \right) \\ &= \frac{1}{n\pi} \left( \sin n\theta \Big|_{\theta_1}^{\theta_2} - \sin n\theta \Big|_{\theta_2}^{\theta_3} + \dots + \sin n\theta \Big|_{\theta_{2N-1}}^{\theta_{2N}} - \sin n\theta \Big|_{\theta_{2N}}^{2\pi+\theta_1} \right) \\ &= \frac{1}{n\pi} \left( (-\sin n\theta_1 + \sin n\theta_2) - (-\sin n\theta_2 + \sin n\theta_3) + \dots \right. \\ &\quad \left. + (-\sin n\theta_{2N-1} + \sin n\theta_{2N}) - (-\sin n\theta_{2N} + \sin n\theta_1) \right) \\ &= \frac{2}{n\pi} (-\sin n\theta_1 + \sin n\theta_2 - \sin n\theta_3 + \dots - \sin n\theta_{2b-1} + \sin n\theta_{2b} ) \\ &= \frac{2}{n\pi} \left( \sum (-1)^p \sin n\theta_p \right) ; p=1,2,3,\dots,2N \end{aligned}$$

ในทำนองเดียวกัน

$$\begin{aligned} B_n &= \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\theta) \sin n\theta \, d\theta \\ &= \frac{1}{n\pi} \left( -f(\theta) \cos n\theta \Big|_{\theta_1}^{2\pi+\theta_1} \right) \\ &= \frac{2}{n\pi} (\cos n\theta_1 - \cos n\theta_2 + \cos n\theta_3 - \dots + \cos n\theta_{2N-1} - \cos n\theta_{2N} ) \\ &= \frac{2}{n\pi} \left( \sum (-1)^{p+1} \cos n\theta_p \right) ; p=1,2,3,\dots,2N \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



โปรแกรมที่ 3.1 โปรแกรมคำนวณองค์ประกอบฮาร์โมนิคของรูปคลื่นแบบเนเทอรอลชนิด 2 ระดับ  
 TURBO PASCAL Program Lister, Copyright 1983 Borland International Page 1  
 Listing of: HMNR2.PAS

```

1 Program Two_level_Natural_PWM_Harmonic_Analysis;
2 Var    N,I,J,P,H                : Integer;
3        X1,X2,X3,Z1,Z2,Z3,Y1,Y2,Y3,K,T,M,A,
4        SumA,SumB,An,Bn          : Real;
5        On                        : Boolean;
6        Answer                    : Char;
7        On_Angle,OffAngle,Width,Freq,Cn,Angle : Array [1..12,1..100] of Real;
8        Pulse                      : Array [1..12] of Integer;
9 Const  Pi = 3.141592654;
10       MinMod = 1;
11       MaxMod = 10;
12       Error = 0.0001;
13       MaxHarmonicOrder = 50;
14 Function NegOne(K:Real):Real;
15 Begin  If K/2 = int(K/2) then NegOne:=1
16        else NegOne:=-1;
17 End;
18 Function Tri(M,X,K,T:Real):Real;
19 begin  Tri:=NegOne(K+1)*M*(X-K*T/2) + NegOne(K);
20 End;
21 Function Sgn(a,b:Real):Real;
22 Begin  If a<b then Sgn:=(a-b)/Abs(a-b) else Sgn:=0;
23 End;
29 (* Main Program *)
30 Begin
31     Clrscr;
32     Writeln('2 Level Natural PWM Switching Angle');
33     Writeln('Frequency Ratio = '); Readln(N);
34     (*-----*)
35     (* Calculate Switching Angle *)
36     For J:=MinMod to MaxMod do
37     Begin
38         Writeln('Modulation ratio = ',J*0.1:3:1);
39         For I:=1 to 65 do Write('-'); Writeln;
40         Writeln(' Pulse No.  On Angle  Off Angle  Pulse Width  Frequency');
41         For I:=1 to 65 do Write('-'); Writeln;
42         A:=J*0.1;
43         T:=2*Pi/N; M:=4/T;
44         K:=0; P:=0;
45         On:=False;
46         Repeat  X1:=K*T/2;          X2:=X1+T/2;
47                 Y1:=Tri(M,X1,K,T); Z1:=Sin(X1)*A;
48                 Y2:=Tri(M,X2,K,T); Z2:=Sin(X2)*A;
49                 If ( Sgn(Y1,Z1) = Sgn(Y2,Z2) ) and ( A>1 ) then K:=K+1 else
50                 Begin

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สแกนโดยอัตโนมัติจากเว็บไซต์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
 ไม่มีการแก้ไขใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

TURBO PASCAL Program Lister, Copyright 1983 Borland International Page 2  
Listing of: HMNNR2.PAS

```

51      Repeat  X3:=(X1+X2)/2;
52              Y1:=Tri(M,X1,K,T);  Z1:=Sin(X1)*A;
53              Y2:=Tri(M,X2,K,T);  Z2:=Sin(X2)*A;
54              Y3:=Tri(M,X3,K,T);  Z3:=Sin(X3)*A;
55              If Sgn(Y1,Z1) = Sgn(Y3,Z3) then X1:=X3
56              else X2:=X3;
57  ----- Until Abs(X1-X2) < Error; -----
58      On:=Not On;
59      If On then Begin P:=P+1;
60                  On_Angle[J,P]:=(X1+X2)/2;
61                  End
62      else Begin OffAngle[J,P]:=(X1+X2)/2;
63              Width[J,P]:=OffAngle[J,P]-On_Angle[J,P];
64              Freq[J,P]:=(2*Pi/Width[J,P]);
65              Writeln(P:4,On_Angle[J,P]:16:4,
66                    OffAngle[J,P]:12:4,Width[J,P]:12:4,
67                    Freq[J,P]:13:4);
68                  End;
69      End;
70      K:=K+1;
71  Until K > 2*N-1;
72      Pulse[J]:=P;
73      For I:=1 to 65 do Writeln('-'); Writeln;
74  End;
75  (*-----*)
76  (* Calculate Harmonic *)
77      For J:=MinMod to MaxMod do
78          For P:=1 to Pulse[J] do
79              Begin Angle[J,2*P-1]:=On_Angle[J,P];
80                  Angle[J,2*P] :=OffAngle[J,P] End;
81          Writeln;Writeln;
82          Writeln('Harmonic Content of 2 Level Natural PWM Inverter');
83          Writeln('Frequency Ratio = ',N);
84          For I:=1 to 79 do Write('-'); Writeln;
85          Writeln('K':5);
86          For I:=MaxMod downto Minmod do Write(I/10:7:1); Writeln;
87          For I:=1 to 79 do Write('-'); Writeln;
88          Writeln('Harmonic');
89          For I:=1 to MaxHarmonicOrder do
90      Begin
91          For J:=MaxMod downto MinMod do
92      Begin
93          P:=0; SumA:=0; SumB:=0;
94          Repeat
95          P:=P+1;
96          SumA:=SumA+NegOne(P)*Sin(I*Angle[J,P]);
97          SumB:=SumB+NegOne(P+1)*Cos(I*Angle[J,P]);
98          Until P=Pulse[J]*2;
99          An:=2/(I*Pi)*SumA;
100         Bn:=2/(I*Pi)*SumB;
101         Cn[J,I]:=Sqrt( An*An+Bn*Bn )*100;

```

TURBO PASCAL Program Lister, Copyright 1983 Borland International Page 3  
 Listing of: HMNR2.PAS

```

102     End;
103     Write(I:5);
104     For J:=MaxMod downto MinMod do Write(Cn[J,I]:7:1); Writeln;
105     End;
106     For I:=1 to 79 do Write('-'); Writeln;
107     (*-----*)
108     (* Printing *)
109     For I:=1 to 4 do Writeln;
110     Write('Print to printer Y/N ');
111     Repeat Read(kbd,Answer);
112     Until Answer in ['N','n','Y','y'];
113     If Answer in ['Y','y'] then
114     Begin
115     Write(lst,#18);
116     Writeln(lst,' :10,'Harmonic Content of 2 Level Natural PHM Inverter');
117     Writeln(lst,' :10,'Frequency Ratio = ',N);
118     Write(lst,#15);
119     Write(lst,' :17); For I:=1 to 79 do Write(lst,'-'); Writeln(lst);
120     Write(lst,' :17,'K':5);
121     For I:=MaxMod downto Minmod do Write(lst,I/10:7:1); Writeln(lst);
122     Write(lst,' :17); For I:=1 to 79 do Write(lst,'-'); Writeln(lst);
123     Writeln(lst,' :17,'Harmonic');
124     For I:=1 to MaxHarmonicOrder do
125     Begin
126     Write(lst,' :17,I:5);
127     For J:=MaxMod downto MinMod do Write(lst,Cn[J,I]:7:1);
128     Writeln(lst);
129     If (I in [50,100,150,200] ) and (I <> MaxHarmonicOrder) then
130     Begin
131     Write(lst,' :17);For H:=1 to 79 do Write(lst,'-'); Writeln(lst);
132     Writeln('Change paper then press any key ');
133     Read(kbd,Answer);
134     Write(lst,#18);
135     Writeln(lst,' :10,'Frequency Ratio = ',N);
136     Write(lst,#15);
137     Write(lst,' :17);For H:=1 to 79 do Write(lst,'-'); Writeln(lst);
138     Write(lst,' :17,'K':5);
139     For H:=MaxMod downto Minmod do Write(lst,H/10:7:1); Writeln(lst);
140     Write(lst,' :17);For H:=1 to 79 do Write(lst,'-'); Writeln(lst);
141     Writeln(lst,' :17,'Harmonic');
142     End;
143     If I=MaxHarmonicOrder then
144     begin Write(lst,' :17);
145     For H:=1 to 79 do Write(lst,'-');
146     Writeln(lst); end;
147     End;
148     Write(lst,' :17);
149     For H:=1 to 79 do Write(lst,'-'); Writeln(lst);
150     Write(lst,#18);
151     End;
152 End.
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยอาศัยค่ามุมสวิทช์ที่คำนวณในหัวข้อ 3.1 นำมาเขียนโพลาร์สำหรับหาค่า  $A_n, B_n$  เพื่อนำมาหาขนาดองค์ประกอบฮาร์โมนิคอันดับต่างๆ (Cn) ได้ดังรูปที่ 3.9

จากโพลาร์ที่นำมาเขียนเป็นโปรแกรมได้ดังโปรแกรมที่ 3.1 สำหรับรูปคลื่นแบบเนเทอโรลซึ่งในโปรแกรมประกอบไปด้วย 3 ส่วน คือ การคำนวณมุมสวิทช์, การคำนวณหาขนาดองค์ประกอบฮาร์โมนิคอันดับต่างๆ, และส่วนนิมฟ์ผลการคำนวณลงเครื่องพิมพ์ (printer) แต่ละส่วนได้เพิ่มลูกการทำงานเข้าไปเพื่อทำการคำนวณจากค่า  $K = 0.1$  ถึง  $1.0$

ส่วนรูปคลื่นแบบเรกูลาร์นั้นจะต้องนำโปรแกรมที่ 3.1 มาเพิ่มเติมและเปลี่ยนแปลงในบรรทัดต่างๆดังแสดงในโปรแกรมที่ 3.2

โปรแกรมที่ 3.2 โปรแกรมคำนวณองค์ประกอบฮาร์โมนิคของรูปคลื่นเรกูลาร์พีดับบลิวเอ็มแบบ 2 ระดับ

TURBO PASCAL Program Lister, Copyright 1983 Borland International Page 1  
Listing of: HMNR62.THS

```

1      Program Two_Level_Regular_PWM_Harmonic_Analysis;
24     Function Step(K,T:Real):Real;
25     Var      B : Integer;
26     Begin   B:=Round(K) div 2;
27             Step:=Sin(B*T+T/2)
28     End;
32     WriteLn('2 Level Regular PWM Switching Angle');
47     Y1:=Tri(M,X1,K,T);  Z1:=Step(K,T)*A;
48     Y2:=Tri(M,X2,K,T);  Z2:=Step(K,T)*A;
52     Y1:=Tri(M,X1,K,T);  Z1:=Step(K,T)*A;
53     Y2:=Tri(M,X2,K,T);  Z2:=Step(K,T)*A;
54     Y3:=Tri(M,X3,K,T);  Z3:=Step(K,T)*A;
82     WriteLn('Harmonic Analysis of 2 Level Regular PWM Inverter ');
116    WriteLn(1st,' ':10,'Harmonic Content of 2 Level Regular PWM Inverter');
```

ตารางที่ 3.1 ผลการคำนวณองค์ประกอบฮาร์โมนิกของรูปคลื่นแบบเนเจอร์อลชนิด 2 ระดับ N=12

Harmonic Content of 2 Level Natural PWM Inverter  
Frequency Ratio = 12

K	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
Harmonic										
1	100.0	90.0	80.0	70.0	60.0	50.0	40.0	30.0	20.0	10.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	1.0	1.2	0.9	0.5	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	31.8	25.9	22.8	17.4	13.1	9.3	6.1	3.5	1.6	0.4
11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	60.1	71.2	81.8	91.7	100.6	108.4	115.1	120.4	124.2	126.5
13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	31.8	25.8	22.8	17.4	13.1	9.3	6.1	3.5	1.6	0.4
15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	1.0	1.2	0.9	0.5	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
17	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
19	3.3	1.1	1.3	0.7	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21	21.2	17.7	13.9	10.3	7.1	4.4	2.4	1.3	0.3	0.0
22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
23	18.1	25.5	31.4	35.4	37.0	36.1	32.6	25.8	19.0	9.9
24	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25	18.1	25.5	31.4	35.4	37.0	36.1	32.6	25.8	19.0	9.9
26	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
27	21.2	17.7	14.0	10.3	7.1	4.4	2.4	1.0	0.3	0.0
28	0.5	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
29	3.3	2.1	1.3	0.7	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
30	4.4	2.7	1.6	0.8	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
31	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
32	15.7	13.4	10.4	7.4	4.7	2.6	1.2	0.4	0.1	0.0
33	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
34	5.2	12.7	17.6	20.3	20.4	18.0	13.9	8.9	4.4	1.2
35	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
36	11.3	15.7	17.1	14.6	0.3	1.1	12.3	23.8	33.5	40.1
37	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
38	6.2	12.7	17.6	20.3	20.4	18.0	13.9	8.9	4.4	1.2
39	0.9	0.4	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
40	15.7	13.4	10.5	7.4	4.7	2.6	1.2	0.4	0.1	0.0
41	5.0	3.2	1.8	0.6	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
42	4.4	2.7	1.6	0.8	0.4	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
43	11.9	10.7	8.4	5.8	3.4	1.7	0.6	0.2	0.0	0.0
44	0.5	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
45	0.9	6.8	11.5	13.7	13.2	10.6	7.0	3.5	1.2	0.2
46	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
47	6.8	10.5	10.5	6.4	0.8	9.1	15.7	18.5	16.3	9.5
48	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
49	6.8	10.5	10.5	6.4	0.8	9.1	15.7	18.5	16.3	9.5
50	1.4	0.6	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.2 ผลการคำนวณองค์ประกอบฮาร์มอนิกของรูปคลื่นแบบเนเทอร์อลชนิด 2 ระดับ N=20  
 Harmonic Content of 2 Level Natural PWM Inverter  
 Frequency Ratio = 20

K	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
Harmonic										
1	100.0	98.0	80.0	70.0	60.0	50.0	40.0	30.0	20.0	10.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	1.6	1.2	0.7	0.4	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
17	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18	31.8	26.9	22.0	17.4	13.1	9.3	6.1	3.5	1.6	0.4
19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	60.1	71.2	81.8	91.7	100.6	108.4	115.1	120.3	124.2	126.5
21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
22	31.8	26.9	22.0	17.4	13.1	9.3	6.1	3.5	1.6	0.4
23	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
24	1.6	1.2	0.7	0.4	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
25	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
26	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
27	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
28	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
29	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
31	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
32	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
33	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
34	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
35	3.3	2.1	1.3	0.7	0.3	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
36	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
37	21.2	17.7	14.0	10.3	7.1	4.4	2.4	1.1	0.3	0.0
38	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
39	18.1	25.5	31.4	35.4	37.0	36.1	32.6	26.8	19.0	9.9
40	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
41	13.1	25.5	31.4	35.4	37.0	36.1	32.6	26.8	19.0	9.9
42	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
43	21.2	17.7	13.9	10.3	7.1	4.4	2.4	1.1	0.3	0.0
44	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
45	3.3	2.1	1.3	0.7	0.3	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0
46	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
47	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
48	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
49	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
50	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์หรือสงวนชื่อการค้าของบริษัทเอกชน ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ผลการคำนวณองค์ประกอบฮาร์มอนิกของรูปคลื่นแบบเนเทอร์อลชนิด 2 ระดับ N=30  
 Harmonic Content of 2 Level Natural PWM Inverter  
 Frequency Ratio = 30

$\gamma$	1.0	0.9	0.8	0.7	0.5	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
Harmonic										
1	100.0	90.0	80.0	70.0	50.0	50.0	40.0	30.0	-20.0	10.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
23	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
24	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
26	1.3	1.2	0.8	0.5	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
27	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
28	21.8	26.8	22.0	17.4	13.1	9.3	6.1	3.5	1.5	0.4
29	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30	50.1	71.2	81.8	91.7	100.6	108.4	115.1	120.4	124.2	126.5
31	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
32	31.8	26.8	22.0	17.4	13.1	9.3	6.1	3.5	1.5	0.4
33	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
34	1.3	1.2	0.8	0.5	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
35	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
36	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
37	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
38	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
39	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
40	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
41	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
42	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
43	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
44	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
45	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
46	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
47	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
48	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
49	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
50	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาดูงาน ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของลิขสิทธิ์ทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.4 ผลการคำนวณองค์ประกอบฮาร์มอนิกของรูปคลื่นแบบเรกูลาร์ชนิด 2 ระดับ N=12  
 Harmonic Content of 2 Level Regular PWM Inverter  
 Frequency Ratio = 12

K	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
Harmonic										
1	99.0	89.1	79.2	69.3	59.4	49.6	39.7	29.7	19.8	9.9
2	1.7	1.4	1.1	0.8	0.6	0.4	0.3	0.2	0.1	0.0
3	0.6	0.4	0.3	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	0.5	0.3	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	2.0	1.5	1.1	0.7	0.5	0.3	0.1	0.1	0.0	0.0
10	27.3	22.8	18.4	14.4	10.8	7.6	4.9	2.8	1.3	0.3
11	10.0	9.4	8.3	8.0	7.1	6.1	5.0	3.9	2.6	1.3
12	40.1	71.2	81.8	91.7	100.6	108.4	115.1	120.3	124.2	126.5
13	8.9	8.6	8.2	7.6	6.9	6.0	4.9	3.8	2.6	1.3
14	33.1	28.4	23.6	18.8	14.4	10.3	6.8	3.9	1.7	0.4
15	4.8	3.7	2.7	1.9	1.2	0.7	0.4	0.2	0.1	0.0
16	3.3	2.3	1.5	0.9	0.5	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0
17	3.7	0.4	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
19	1.3	0.8	0.5	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
20	3.3	2.3	1.5	0.7	0.5	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0
21	17.7	14.2	10.9	7.9	5.3	3.2	1.7	0.8	0.2	0.0
22	9.7	8.2	7.5	6.4	5.2	3.9	2.7	1.6	0.7	0.2
23	22.1	28.9	34.1	37.4	38.3	36.8	32.9	26.0	19.9	9.0
24	3.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25	14.0	21.8	29.2	32.3	35.1	34.7	31.8	26.3	19.9	9.0
26	7.1	7.4	7.2	6.5	5.5	4.3	3.0	1.8	0.8	0.2
27	20.5	17.8	14.5	11.1	7.8	4.9	2.7	1.2	0.4	0.1
28	6.2	4.7	3.3	2.2	1.5	0.7	0.3	0.1	0.0	0.0
29	5.0	3.3	2.0	1.1	0.6	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0
30	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
31	4.7	3.1	1.9	1.1	0.5	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0
32	12.5	10.1	7.5	5.1	3.1	1.7	0.7	0.2	0.0	0.0
33	7.7	7.5	6.8	5.6	4.1	2.8	1.6	0.7	0.2	0.0
34	10.1	15.7	19.5	21.1	20.2	17.4	13.1	8.3	4.0	1.1
35	1.4	0.6	0.4	1.5	2.4	3.1	3.3	3.1	2.3	1.3
36	11.3	15.7	17.1	14.6	8.3	1.0	12.3	23.7	33.5	40.1
37	1.6	1.0	0.1	1.0	2.0	2.8	3.1	3.0	2.3	1.3
38	2.1	8.7	14.3	17.9	18.9	17.3	13.6	9.9	4.4	1.2
39	5.3	6.3	6.5	5.9	4.8	3.4	2.0	1.0	0.3	0.0
40	12.4	11.8	10.0	7.5	5.0	2.8	1.3	0.5	0.1	0.0
41	8.7	6.4	4.3	2.6	1.4	0.6	0.2	0.1	0.0	0.0
42	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
43	12.1	9.2	6.4	3.9	2.1	1.0	0.4	0.1	0.0	0.0
44	5.9	6.5	6.1	4.9	3.4	2.0	1.0	0.3	0.1	0.0
45	5.2	9.8	12.8	13.6	12.3	9.4	6.0	3.0	1.0	0.1
46	2.2	0.8	0.9	2.6	3.8	4.2	3.7	2.6	1.4	0.4
47	7.8	10.9	10.2	5.6	1.9	10.3	10.3	10.8	16.3	9.4
48	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
49	5.4	9.7	10.5	7.0	0.2	8.0	14.0	17.9	16.0	9.4
50	2.6	1.8	0.3	1.5	3.3	3.8	3.6	2.7	1.5	0.4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.5 ผลการคำนวณองค์ประกอบฮาร์มอนิกของรูปคลื่นแบบเรกูลาร์ชนิด 2 ระดับ N=20

Harmonic Content of 2 Level Regular PWM Inverter  
Frequency Ratio = 20

K	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
Harmonic										
1	99.6	89.7	79.7	69.7	59.8	49.9	39.8	29.9	19.9	10.0
2	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0
3	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	0.9	0.4	0.4	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
17	1.5	1.2	0.9	0.6	0.4	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0
18	29.5	24.7	20.1	15.7	11.8	8.4	5.4	3.1	1.4	0.4
19	5.7	5.6	5.2	4.6	4.3	3.7	3.0	2.3	1.6	0.6
20	60.1	71.2	81.8	91.7	100.6	109.4	118.1	126.3	124.2	126.5
21	5.5	5.3	5.0	4.6	4.2	3.6	3.0	2.3	1.5	0.8
22	33.0	28.1	23.2	18.4	14.0	10.0	6.6	3.9	1.7	0.4
23	2.6	2.0	1.4	1.0	0.6	0.4	0.2	0.1	0.0	0.0
24	2.3	1.9	1.2	0.7	0.4	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0
25	0.3	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
26	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
27	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
28	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
29	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
31	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
32	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
33	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
34	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
35	2.0	1.3	0.7	0.4	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
36	2.4	1.7	1.1	0.7	0.4	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0
37	19.6	16.0	12.3	9.0	6.1	3.2	2.0	0.9	0.2	0.0
38	5.1	4.9	4.5	3.9	3.2	2.4	1.7	1.0	0.5	0.1
39	20.5	27.6	33.1	36.7	37.9	36.6	32.8	26.9	19.0	9.9
40	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
41	15.7	23.3	29.6	33.9	35.9	35.4	32.1	26.6	18.9	9.9
42	4.5	4.6	4.4	3.9	3.3	2.6	1.8	1.1	0.5	0.1
43	21.3	18.2	14.7	11.0	7.7	4.8	2.6	1.2	0.3	0.0
44	3.5	2.6	1.8	1.2	0.7	0.4	0.2	0.1	0.0	0.0
45	4.4	2.9	1.7	1.0	0.5	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0
46	0.7	0.4	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
47	0.4	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
48	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
49	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
50	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การเรียงพิมพ์เพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่หรือนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีกรนำไปใช้

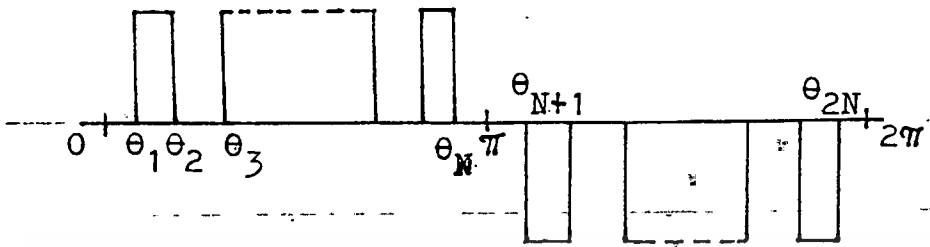
ตารางที่ 3.6 ผลการคำนวณองค์ประกอบฮาร์มอนิกของรูปคลื่นแบบเรกูลาร์ชนิด 2 ระดับ  $N=30$   
 Harmonic Content of 2 Level Regular PWM Inverter  
 Frequency Ratio = 30

$\lambda$	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
Harmonic										
1	99.8	39.3	79.9	59.9	59.9	49.9	39.9	30.0	20.0	10.0
2	0.3	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
23	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
24	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
26	1.2	0.8	0.5	0.3	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
27	1.1	0.9	0.6	0.4	0.3	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0
28	30.3	25.5	20.8	16.3	12.3	9.7	5.7	3.2	1.4	0.4
29	3.9	3.7	3.5	3.2	2.8	2.4	2.0	1.5	1.0	0.5
30	50.1	71.2	81.8	91.7	100.6	108.4	115.1	120.4	124.2	126.5
31	3.7	3.6	3.4	3.1	2.8	2.4	2.0	1.5	1.0	0.5
32	32.7	27.8	22.9	18.2	13.8	9.8	5.4	3.7	1.7	0.4
33	1.5	1.2	0.9	0.6	0.4	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0
34	2.5	1.6	1.1	0.6	0.4	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0
35	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
36	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
37	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
38	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
39	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
40	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
41	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
42	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
43	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
44	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
45	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
46	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
47	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
48	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
49	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
50	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานในการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกสิ่งนี้ซ้ำ และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.5 การวิเคราะห์องค์ประกอบฮาร์มอนิกของรูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยม 3 ระดับ

พิจารณารูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยม 3 ระดับ ที่มีมุมสวิทช์  $2N$  มุม ใน 1 คาบ ดังรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 แสดงมุมสวิทช์ของรูปคลื่นพัลส์สี่เหลี่ยม 3 ระดับ

จากรูป  $f(\theta) = 1 ; \theta_{2b-1} < \theta < \theta_{2b} ; b=1,2,3,\dots,N/2$   
 $= 0 ; \theta_{2b} < \theta < \theta_{2b+1} ; b=1,2,3,\dots,N$   
 $= -1 ; \theta_{2b-1} < \theta < \theta_{2b} ; b=N/2+1,N/2+2,\dots,N$

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\theta) \cos n\theta \, d\theta$$

$$= \frac{1}{n\pi} \int_0^{2\pi} f(\theta) \cos n\theta \, dn\theta$$

$$= \frac{1}{n\pi} \left( f(\theta) \sin n\theta \Big|_0^{2\pi} \right)$$

$$= \frac{1}{n\pi} \left( \sin n\theta \Big|_{\theta_1}^{\theta_2} + \sin n\theta \Big|_{\theta_2}^{\theta_3} + \sin n\theta \Big|_{\theta_3}^{\theta_N} + \dots + \sin n\theta \Big|_{\theta_{N-1}}^{\theta_N} \right.$$

$$\left. - \sin n\theta \Big|_{\theta_{N+1}}^{\theta_{N+2}} - \sin n\theta \Big|_{\theta_{N+2}}^{\theta_{N+3}} - \dots - \sin n\theta \Big|_{\theta_{2N-1}}^{\theta_{2N}} \right)$$

$$= \frac{1}{n\pi} [ (-\sin n\theta_1 + \sin n\theta_2 - \sin n\theta_3 + \dots + \sin n\theta_N) - (-\sin n\theta_{N+1} + \sin n\theta_{N+2} - \sin n\theta_{N+3} + \dots + \sin n\theta_{2N}) ]$$

$$= \frac{1}{n\pi} \left[ \sum_{p=1}^N (-1)^p \sin n\theta_p - \sum_{p=N+1}^{2N} (-1)^p \sin n\theta_p \right]$$

ในทำนองเดียวกัน

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\theta) \sin n\theta \, d\theta$$

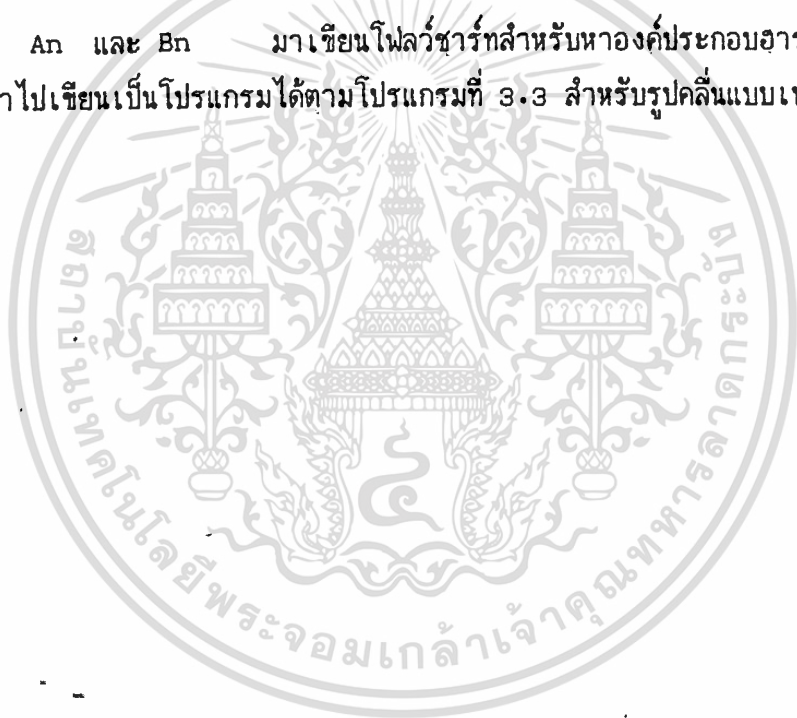
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

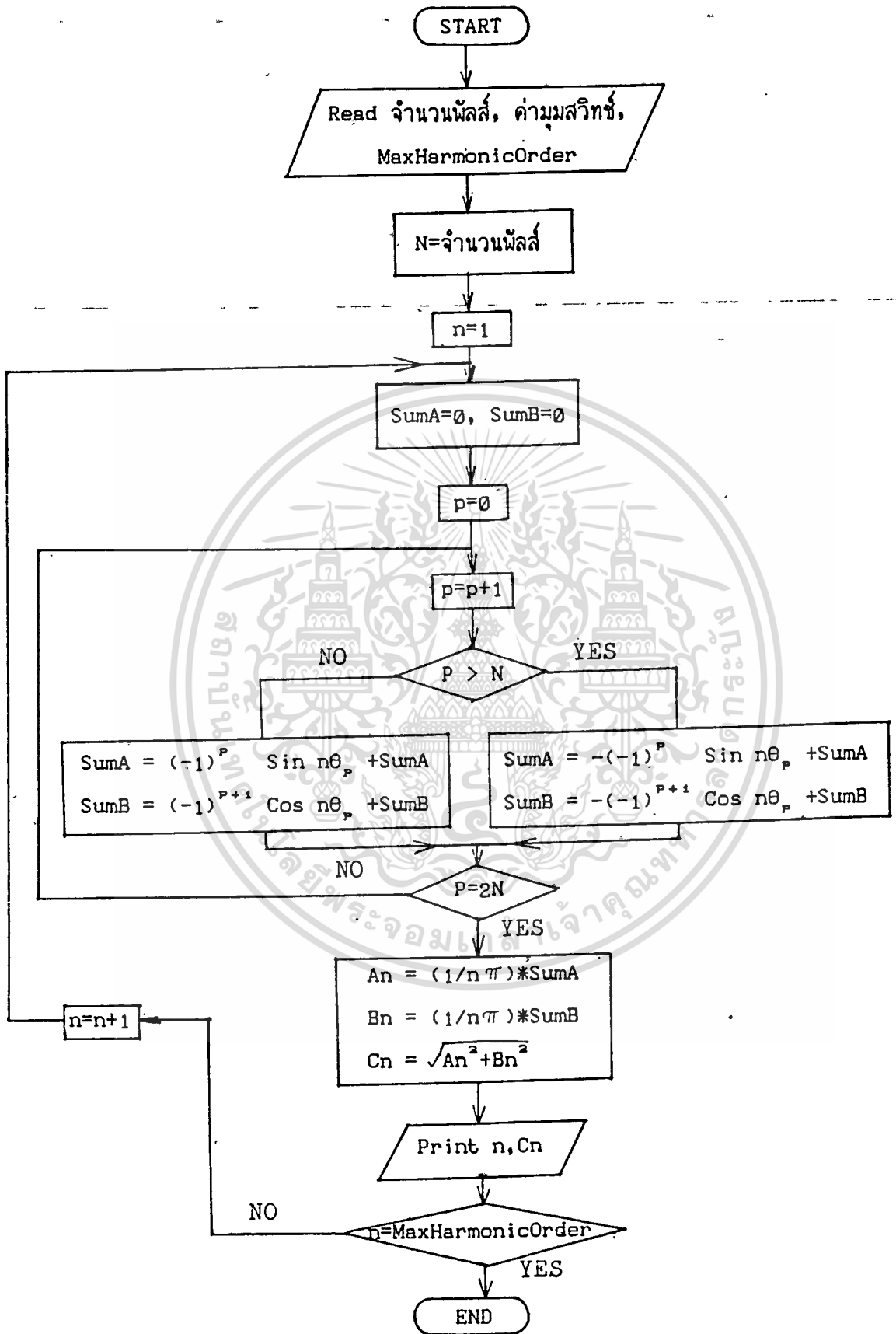
$$= \frac{1}{n\pi} \left( -\cos n\theta \begin{vmatrix} \theta_2 \\ \theta_1 \end{vmatrix} -\cos n\theta \begin{vmatrix} \theta_4 \\ \theta_3 \end{vmatrix} -\cos n\theta \begin{vmatrix} \theta_6 \\ \theta_5 \end{vmatrix} - \dots - \cos n\theta \begin{vmatrix} \theta_N \\ \theta_{N-1} \end{vmatrix} \right. \\ \left. + \cos n\theta \begin{vmatrix} \theta_{N+2} \\ \theta_{N+1} \end{vmatrix} + \cos n\theta \begin{vmatrix} \theta_{N+4} \\ \theta_{N+3} \end{vmatrix} + \cos n\theta \begin{vmatrix} \theta_{N+6} \\ \theta_{N+5} \end{vmatrix} + \dots + \cos n\theta \begin{vmatrix} \theta_{2N} \\ \theta_{2N-1} \end{vmatrix} \right)$$

$$= \frac{1}{n\pi} \left[ (\cos n\theta_1 - \cos n\theta_2 + \cos n\theta_3 - \dots - \cos n\theta_N) \right. \\ \left. - (\cos n\theta_{N+1} - \cos n\theta_{N+2} + \cos n\theta_{N+3} - \dots - \cos n\theta_{2N}) \right]$$

$$= \frac{1}{n\pi} \left[ \sum_{p=1}^N (-1)^{p+1} \cos n\theta_p - \sum_{p=N+1}^{2N} (-1)^{p+1} \cos n\theta_p \right]$$

นำค่า  $A_n$  และ  $B_n$  มาเขียนโพลาร์สำหรับหาค่าประกอบอาร์มอนิกได้ดังรูปที่ 3.11 และนำไปเขียนเป็นโปรแกรมได้ตามโปรแกรมที่ 3.3 สำหรับรูปคลื่นแบบเนเทอร์อล





## โปรแกรมที่ ๓.๓ โปรแกรมคำนวณองค์ประกอบฮาร์มอนิกของรูปคลื่นแบบเนเทอรอลชนิด ๓ ระดับ

TURBO PASCAL Program Lister, Copyright 1983 Borland International Page 1  
Listing of: HMNR3.PAS

```

1 Program Three_level_Natural_PWM_Harmonic_Analysis;
2 Var N,I,J,P,H,Sign : Integer;
3 X1,X2,X3,Z1,Z2,Z3,Y1,Y2,Y3,K,T,M,A,
4 SumA,SumB,An,Bn : Real;
5 On : Boolean;
6 Answer : Char;
7 On_Angle,OffAngle,Width,Freq,Cn,Angle : Array [1..12,1..100] of Real;
8 Pulse : Array [1..12] of Integer;
9 Const Pi = 3.141592654;
10 MinMod = 1;
11 MaxMod = 10;
12 Error = 0.0001;
13 MaxHarmonicOrder = 50;
14 Function NegOne(K:Real):Real;
15 Begin If K/2 = int(K/2) then NegOne:=1
16 else NegOne:=-1;
17 End;
18 Function Tri(M,X,K,T:Real):Real;
19 Begin Tri:=NegOne(K+1)*M*(X-K*T/2) + (1/2) + (NegOne(K)+1/2);
20 End;
21 Function Sgn(a,b:Real):Real;
22 Begin If a<>b then Sgn:=(a-b)/Abs(a-b) else Sgn:=0;
23 End;

29 (* Main Program *)
30 Begin
31 Clrscr;
32 Writeln('3 Level Natural PWM Switching Angle');
33 Write('Frequency Ratio = '); Readln(N);
34 (*-----*)
35 (* Calculate Switching Angle *)
36 For J:=MinMod to MaxMod do
37 Begin
38 Writeln('Modulation ratio = ',J*0.1:3:1);
39 For I:=1 to 65 do Write('-'); Writeln;
40 Writeln(' Pulse No. On Angle Off Angle Pulse Width Frequency');
41 For I:=1 to 65 do Write('-'); Writeln;
42 A:=J*0.1;
43 T:=2*Pi/N; M:=2/T;
44 K:=0; P:=0;
45 On:=False;
46 Repeat X1:=K*T/2; X2:=X1+T/2;
47 Y1:=Tri(M,X1,K,T); Z1:=Abs(Sin(X1))*A;
48 Y2:=Tri(M,X2,K,T); Z2:=Abs(Sin(X2))*A;
49 If (Sgn(Y1,Z1) = Sgn(Y2,Z2)) and (A>1) then K:=K+1 else
50 Begin

```

เอกรนี้เป็นเอกสารที่ If (Sgn(Y1,Z1) = Sgn(Y2,Z2)) and (A>1) then K:=K+1 else ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

51      Repeat  X3:=(X1+X2)/2;
52              Y1:=Tri(N,X1,K,T);  Z1:=Abs(Sin(X1))*A;
53              Y2:=Tri(N,X2,K,T);  Z2:=Abs(Sin(X2))*A;
54              Y3:=Tri(N,X3,K,T);  Z3:=Abs(Sin(X3))*A;
55              If Sgn(Y1,Z1) = Sgn(Y3,Z3) then X1:=X3
56              else X2:=X3;
57      Until Abs(X1-X2) < Error;
58      On:=Not On;
59      If On then Begin  P:=P+1;
60                      On_Angle[J,P]:=(X1+X2)/2
61                      End
62      else      Begin  OffAngle[J,P]:=(X1+X2)/2;
63                  Width[J,P]:=OffAngle[J,P]-On_Angle[J,P];
64                  Freq[J,P]:=(2*Pi/Width[J,P]);
65                  Writeln(P:4,On_Angle[J,P]:16:4,
66                          OffAngle[J,P]:12:4,Width[J,P]:12:4,
67                          Freq[J,P]:13:4);
68                  End;
69      End;
70      K:=K+1;
71      Until K > 2*N-1;
72      Pulse[J]:=P;
73      For I:=1 to 65 do Writeln('-'); Writeln; Writeln;
74      End;
75      (*-----*)
76      (* Calculate Harmonic *)
77      For J:=MinMod to MaxMod do
78          For P:=1 to Pulse[J] do
79              Begin  Angle[J,2*P-1]:=On_Angle[J,P];
80                  Angle[J,2*P] :=OffAngle[J,P]  End;
81          Writeln;Writeln;
82          Writeln('Harmonic Analysis of 3 Level Natural PWM Inverter ');
83          Writeln('Frequency Ratio = ',N);
84          For I:=1 to 79 do Write('-'); Writeln;
85          Write('K':5);
86          For I:=MaxMod downto MinMod do Write(I/10:7:1); Writeln;
87          For I:=1 to 79 do Write('-'); Writeln;
88          Writeln('Harmonic');
89          For I:=1 to MaxHarmonicOrder do
90      Begin
91          For J:=MaxMod downto MinMod do
92      Begin
93          P:=0; SumA:=0; SumB:=0;
94          Repeat
95          P:=P+1; If Angle[J,P] < Pi then Sign:= 1 else Sign:=-1;
96          SumA:=SumA+Sign*NegOne(P) *Sin(I*Angle[J,P]);
97          SumB:=SumB+Sign*NegOne(P+1)*Cos(I*Angle[J,P]);
98          Until P=Pulse[J]*2;
99          An:=1/(I*Pi)*SumA;
100         Bn:=1/(I*Pi)*SumB;
101         Cn[J,I]:=Sqrt(An*An+Bn*Bn)*100;

```

TURBO PASCAL Program Lister, Copyright 1983 Borland International Page 3  
 Listing of: HMNRR3.PAS

```

102     End;
103     Write(I:5);
104     For J:=MaxMod downto MinMod do Write(Cn[J,I]:7:1); Writeln;
105     End;
106     For I:=1 to 79 do Write('-'); Writeln;
107     (*-----*)
108     (* Printing *)
109     For I:=1 to 4 do Writeln;
110     Write(Print to printer Y/N ');
111     Repeat Read(kbd,Answer)
112     Until Answer in ['N','n','Y','y'];
113     If Answer in ['Y','y'] then
114     Begin
115     Writeln; Write(lst,#18);
116     Writeln(lst,' :10,'Harmonic Content of 3 Level Natural PWM Inverter');
117     Writeln(lst,' :10,'Frequency Ratio = ',N);
118     Write(lst,#15);
119     Write(lst,' :17); For I:=1 to 79 do Write(lst,'-'); Writeln(lst);
120     Write(lst,' :17,'K':5);
121     For I:=MaxMod downto Minmod do Write(lst,I/10:7:1); Writeln(lst);
122     Write(lst,' :17); For I:=1 to 79 do Write(lst,'-'); Writeln(lst);
123     Writeln(lst,' :17,'Harmonic');
124     For I:=1 to MaxHarmonicOrder do
125     Begin
126     Write(lst,' :17,I:5);
127     For J:=MaxMod downto MinMod do Write(lst,Cn[J,I]:7:1);
128     Writeln(lst);
129     If (I in [50,100,150,200] ) and (I <> MaxHarmonicOrder) then
130     Begin
131     Write(lst,' :17);For H:=1 to 79 do Write(lst,'-'); Writeln(lst);
132     Writeln('Change paper then press any key ');
133     Read(kbd,Answer);
134     Write(lst,#18);
135     Writeln(lst,' :10,'Frequency Ratio = ',N);
136     Write(lst,#15);
137     Write(lst,' :17);For H:=1 to 79 do Write(lst,'-'); Writeln(lst);
138     Write(lst,' :17,'K':5);
139     For H:=MaxMod downto Minmod do Write(lst,H/10:7:1); Writeln(lst);
140     Write(lst,' :17);For H:=1 to 79 do Write(lst,'-'); Writeln(lst);
141     Writeln(lst,' :17,'Harmonic');
142     End;
143     If I=MaxHarmonicOrder then
144     begin Write(lst,' :17);
145     For H:=1 to 79 do Write(lst,'-');
146     Writeln(lst); end;
147     End;
148     Write(lst,' :17);
149     For H:=1 to 79 do Write(lst,'-'); Writeln(lst);
150     Write(lst,#18);
151     End;
152     End;

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.7 ผลการคำนวณองค์ประกอบฮาร์มอนิกของรูปคลื่นแบบเนเทอวอลชนิด 3 ระดับ N=12

Harmonic Content of 3 Level Natural PWM Inverter  
Frequency Ratio = 12

K	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
Harmonic										
1	100.0	90.0	80.0	70.0	60.0	50.0	40.0	30.0	20.0	10.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	3.3	2.1	1.3	0.7	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	21.2	17.7	13.9	10.3	7.1	4.4	2.4	1.1	0.3	0.0
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	18.1	25.5	31.4	35.4	37.0	36.1	32.6	26.8	19.0	9.9
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	18.2	25.5	31.4	35.4	37.0	36.1	32.6	26.8	19.0	9.9
14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	22.2	19.1	14.1	10.4	7.1	4.4	2.4	1.1	0.3	0.0
16	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	8.3	5.3	3.0	1.5	0.7	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0
18	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
19	12.1	10.8	3.5	5.8	3.4	1.7	0.6	0.2	0.0	0.0
20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21	3.9	6.8	11.5	13.7	13.2	10.6	7.3	3.5	1.2	0.2
22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
23	7.1	10.6	10.5	6.4	0.8	7.1	15.7	18.5	16.3	9.5
24	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25	5.0	9.5	18.2	5.3	8.8	9.1	15.7	18.5	16.3	9.5
26	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
27	3.3	10.4	13.4	14.6	13.5	10.7	7.0	3.5	1.2	0.2
28	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
29	13.1	17.9	14.5	9.8	5.5	2.5	2.9	0.2	0.0	0.0
30	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
31	1.7	4.6	7.6	8.7	7.5	4.8	2.3	0.7	0.1	0.0
32	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
33	1.5	5.4	5.5	1.3	4.6	8.6	8.8	5.9	2.4	0.4
34	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
35	1.3	4.6	2.6	2.8	7.3	6.0	0.5	8.5	12.3	0.9
36	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
37	8.4	9.4	5.1	1.8	6.7	5.9	0.5	8.5	12.3	0.9
38	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
39	0.5	0.9	0.9	1.8	6.0	9.1	8.9	5.9	2.4	0.3
40	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
41	7.1	0.7	9.2	13.2	11.7	7.2	3.1	0.9	0.1	0.0
42	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
43	5.8	3.5	2.2	3.9	6.5	6.8	4.4	1.7	0.3	0.0
44	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
45	4.0	5.8	2.5	2.8	3.9	0.5	5.7	6.6	3.5	0.6
46	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
47	3.9	5.9	1.2	3.5	2.1	3.4	5.3	0.4	7.9	0.2
48	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
49	3.3	0.8	4.1	6.8	3.4	3.1	1.2	0.4	7.9	0.2
50	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้ใช้เฉพาะที่กรมการศึกษานานาชาติเท่านั้น ไม่ควรเผยแพร่หรือนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.8 ผลการคำนวณองค์ประกอบฮาร์มอนิกของรูปคลื่นแบบเนเทอร์อลชนิด 3 ระดับ N=20

Harmonic Content of 3-Level Natural PWM Inverter  
Frequency Ratio = 20

K	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
Harmonic										
1	20.0	90.0	83.0	78.0	69.0	59.0	48.0	38.0	29.0	19.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	21.2	17.7	13.9	10.3	7.1	4.4	2.4	1.1	0.3	0.0
18	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
19	18.1	25.5	31.4	35.4	37.0	36.1	32.6	26.8	19.3	9.9
20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21	18.1	25.5	31.4	35.4	37.0	36.1	32.6	26.8	19.3	9.9
22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
23	21.2	17.7	13.9	10.3	7.1	4.4	2.4	1.1	0.3	0.0
24	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
26	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
27	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
28	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
29	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
31	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
32	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
33	5.0	3.1	1.7	0.9	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
34	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
35	11.9	10.7	9.4	5.8	3.4	1.7	0.6	0.2	0.0	0.0
36	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
37	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
38	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
39	6.8	10.5	10.5	6.5	3.8	9.1	15.7	13.5	16.3	9.5
40	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
41	6.8	10.5	10.5	6.5	3.8	9.1	15.7	13.5	16.3	9.5
42	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
43	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
44	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
45	11.9	10.7	9.4	5.8	3.4	1.7	0.6	0.2	0.0	0.0
46	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
47	5.4	3.3	1.8	0.9	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
48	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
49	2.7	1.3	0.5	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
50	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.9 ผลการคำนวณองค์ประกอบฮาร์มอนิกของรูปคลื่นแบบเนเจอร์อลชนิด 3 ระดับ N=30  
 Harmonic Content of 3 Level Natural PWM Inverter.  
 Frequency Ratio = 30

Harmonic	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
1	100.0	90.0	80.0	70.0	60.0	50.0	40.0	30.0	20.0	10.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
23	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
24	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
26	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
27	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
28	21.2	17.7	13.9	10.3	7.1	4.4	2.4	1.1	0.3	0.0
29	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30	18.1	25.5	31.4	35.4	37.0	35.1	32.6	26.8	19.0	9.9
31	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
32	18.1	25.5	31.4	35.4	37.0	35.1	32.6	26.8	19.0	9.9
33	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
34	21.2	17.7	13.9	10.3	7.1	4.4	2.4	1.0	0.3	0.0
35	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
36	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
37	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
38	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
39	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
40	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
41	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
42	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
43	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
44	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
45	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
46	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
47	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
48	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
49	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
50	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษายเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆก็ตาม ถือว่าท่านมีให้คำปรึกษาหารือ และขออภัยในกรณีที่ท่านนำเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการคำนวณองค์ประกอบฮาร์มอนิกของรูปคลื่น ทรูกลาร์ พัดดับลิวเอ็ม แบบ 3 ระดับ สามารถกระทำได้โดยการเพิ่มเติมและดัดแปลงโปรแกรมในบรรทัดต่างๆดังโปรแกรมที่ 3.4

โปรแกรมที่ 3.4 โปรแกรมคำนวณองค์ประกอบฮาร์มอนิกของรูปคลื่น ทรูกลาร์ พัดดับลิวเอ็ม แบบ 3 ระดับ

TURBO PASCAL Program Lister, Copyright 1983 Borland International Page 1  
Listing of: HMNR63.THS

```

1      Program Three_level_Rergular_PWM_Harmonic_Analysis;
24     Function Step(K,T:Real):Real;
25     Var      B : Integer;
26     Begin   B:=Round(K) div 2;
27             Step:=Abs(Sin(B*T+T/2))
28     End;
32     Writeln('3 Level Regular PWM Switching Angle');
47     Y1:=Tri(M,X1,K,T);  Z1:=Step(K,T)*A;
48     Y2:=Tri(M,X2,K,T);  Z2:=Step(K,T)*A;
52     Y1:=Tri(M,X1,K,T);  Z1:=Step(K,T)*A;
53     Y2:=Tri(M,X2,K,T);  Z2:=Step(K,T)*A;
54     Y3:=Tri(M,X3,K,T);  Z3:=Step(K,T)*A;
82     Writeln('Harmonic Analysis of 3 Level Regular PWM Inverter ');
116    Writeln(1st,' ':10,'Harmonic Content of 3 Level Regular PWM Inverter');
```

ตารางที่ 3.10 ผลการคำนวณองค์ประกอบฮาร์มอนิกของรูปคลื่นแบบเรกูลาร์ชนิด 3 ระดับ N=12

Harmonic Content of 3 Level Regular PWM Inverter  
Frequency Ratio = 12

K	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
Harmonic										
1	99.2	89.4	79.6	69.7	59.8	49.9	39.9	30.0	20.0	10.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	2.5	1.8	1.3	0.7	0.6	0.3	0.2	0.1	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.5	0.3	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	16.1	12.6	9.4	5.7	4.4	2.7	1.4	0.6	0.2	0.0
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	26.6	32.9	37.4	40.0	40.2	39.1	33.7	27.3	19.2	9.9
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	10.4	10.5	15.5	20.0	23.7	24.2	21.4	26.3	18.9	9.9
14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	21.0	19.9	17.0	13.4	9.7	6.3	3.5	1.6	0.5	0.1
16	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	7.7	6.7	4.2	2.4	1.2	0.5	0.2	0.1	0.0	0.0
18	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
19	12.5	9.9	5.8	3.4	1.8	0.6	0.3	0.1	0.0	0.0
20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21	9.7	13.0	15.7	15.4	13.1	7.6	5.9	2.9	0.9	0.1
22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
23	9.0	11.4	10.0	4.8	3.0	11.1	17.2	19.5	16.6	9.6
24	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25	4.2	9.0	10.5	7.7	1.1	7.1	14.2	17.7	16.0	9.5
26	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
27	3.4	1.1	6.5	10.7	12.3	11.1	7.9	4.2	1.5	0.2
28	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
29	14.7	15.2	13.2	9.6	6.2	3.2	1.3	0.4	0.1	0.0
30	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
31	12.0	14.2	13.6	10.0	7.2	3.0	1.6	0.4	0.1	0.0
32	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
33	1.5	4.1	2.1	2.0	7.0	10.1	6.8	5.4	2.1	0.3
34	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
35	6.1	6.3	2.2	3.8	7.4	5.5	1.5	9.3	12.7	9.0
36	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
37	4.1	6.4	4.3	1.3	6.4	6.3	2.4	7.7	12.0	6.9
38	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
39	7.9	1.0	2.7	2.6	2.0	6.9	0.5	6.3	2.7	0.4
40	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
41	3.4	1.5	7.1	10.5	10.2	7.1	3.6	1.2	0.2	0.0
42	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
43	4.4	0.9	4.0	9.3	10.2	7.7	4.0	1.3	0.2	0.0
44	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
45	7.6	0.2	2.6	2.3	2.0	2.0	7.0	6.6	3.2	0.5
46	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
47	0.0	0.0	2.7	5.1	1.9	3.7	5.2	0.9	0.2	0.0
48	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
49	0.2	1.3	1.3	4.7	3.1	2.7	5.3	0.1	7.5	0.1
50	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้ภายในเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.11 ผลการคำนวณองค์ประกอบฮาร์มอนิกของรูปคลื่นแบบเรกูลาร์ชนิด 3 ระดับ N=20  
 Harmonic Content of 3 Level Regular PWM Inverter  
 Frequency Ratio = 20

K	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
Harmonic										
1	99.7	89.8	79.8	69.9	59.9	50.0	40.0	30.0	20.0	10.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.9	0.7	0.5	0.3	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	1.3	0.8	0.5	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	10.6	14.9	11.3	8.1	5.4	3.3	1.9	0.9	0.2	0.0
18	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
19	23.1	29.9	35.0	38.2	39.8	37.3	33.3	27.1	19.1	9.9
20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21	13.4	21.3	27.7	32.6	35.0	34.6	31.9	26.5	18.9	9.9
22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
23	22.1	19.4	16.0	12.3	8.7	5.5	3.0	1.4	0.4	0.0
24	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25	0.0	4.3	2.5	1.5	0.8	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0
26	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
27	1.0	0.5	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
28	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
29	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
30	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
31	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
32	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
33	0.5	1.4	0.7	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
34	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
35	11.7	7.3	6.6	4.2	2.3	1.1	0.4	0.1	0.0	0.0
36	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
37	5.9	11.0	14.2	14.9	13.3	12.1	6.3	3.1	1.0	0.1
38	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
39	0.2	11.1	10.3	5.5	2.1	10.3	16.6	19.0	15.5	7.5
40	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
41	5.3	9.7	10.6	7.2	0.4	7.9	14.6	18.0	16.1	9.5
42	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
43	3.1	2.7	0.3	12.0	12.0	11.0	7.5	3.9	1.4	0.2
44	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
45	9.7	10.6	9.5	7.2	4.6	2.4	0.9	0.3	0.0	0.0
46	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
47	7.4	5.3	3.3	1.7	0.7	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0
48	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
49	3.2	1.6	0.7	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
50	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่ควรเอาไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

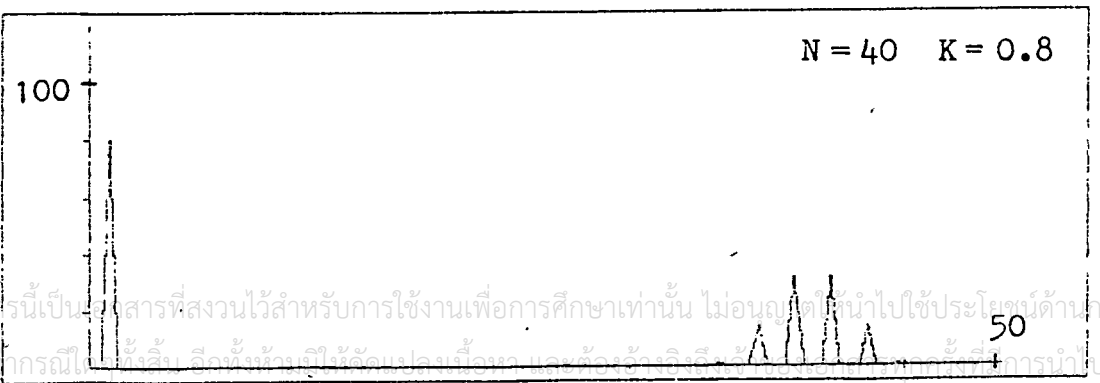
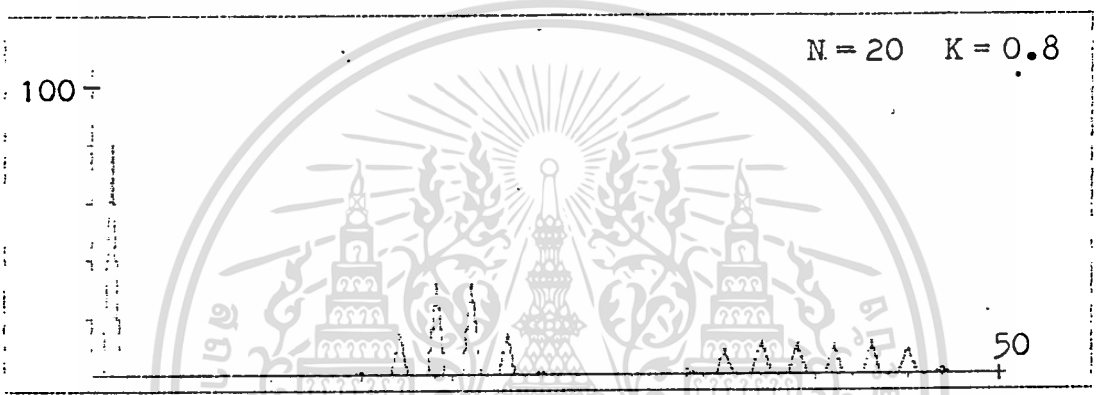
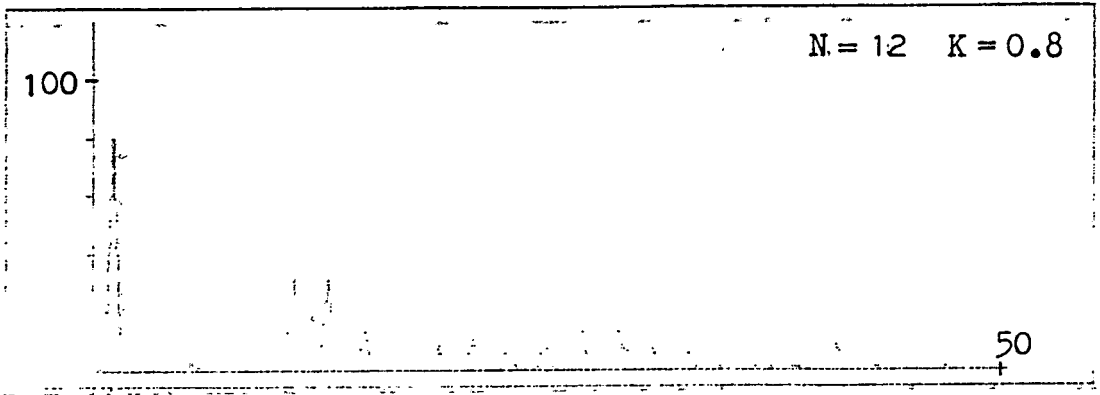
ตารางที่ 3.12 ผลการคำนวณองค์ประกอบฮาร์โมนิกของรูปคลื่นแบบเรกูลาร์ชนิด 3 ระดับ N=30  
 Harmonic Content of 3-Level Regular PWM Inverter  
 Frequency Ratio = 30

K	1.0	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1
Harmonic										
1	79.9	89.9	79.9	70.0	60.0	50.0	40.0	30.0	20.0	10.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.4	0.3	0.2	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
16	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
18	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
19	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
21	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
22	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
23	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
24	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
25	1.8	1.1	0.7	0.4	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
26	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
27	19.6	15.9	12.3	8.9	6.0	3.7	2.0	0.9	0.3	0.0
28	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
29	21.4	28.4	33.8	37.2	38.3	36.9	33.1	27.0	19.1	9.9
30	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
31	15.0	22.7	29.1	33.6	35.7	35.2	32.1	26.6	19.0	9.9
32	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
33	22.0	19.0	15.4	11.7	8.1	5.1	2.8	1.3	0.4	0.1
34	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
35	5.2	3.5	2.1	1.2	0.6	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0
36	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
37	0.7	0.3	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
38	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
39	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
40	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
41	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
42	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
43	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
44	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
45	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
46	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
47	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
48	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
49	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
50	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่คำนวณไว้สำหรับการใช้เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

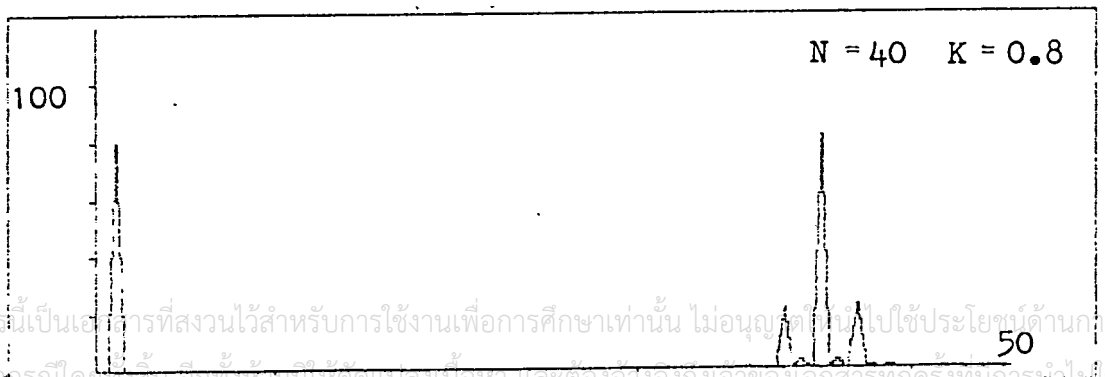
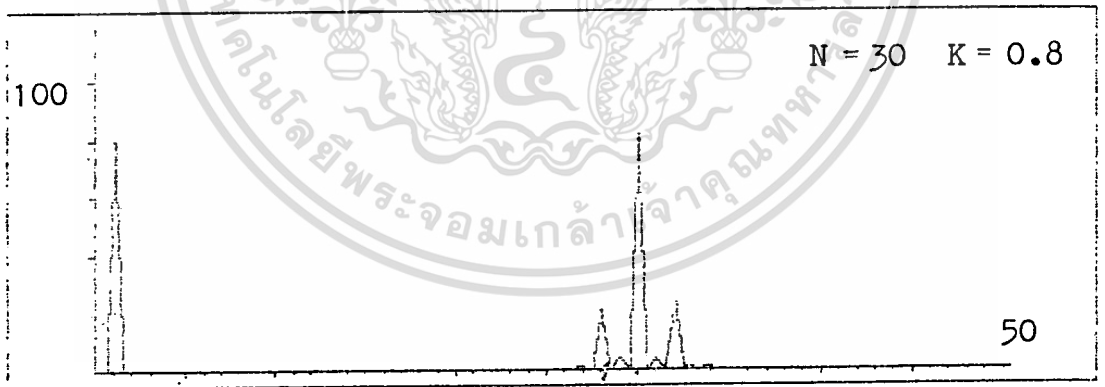
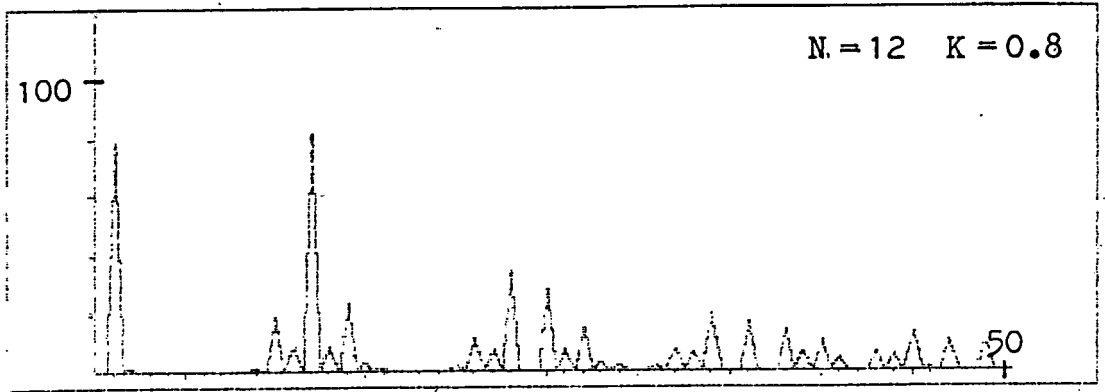
ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์อื่นใดโดยไม่ได้รับอนุญาตจากเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





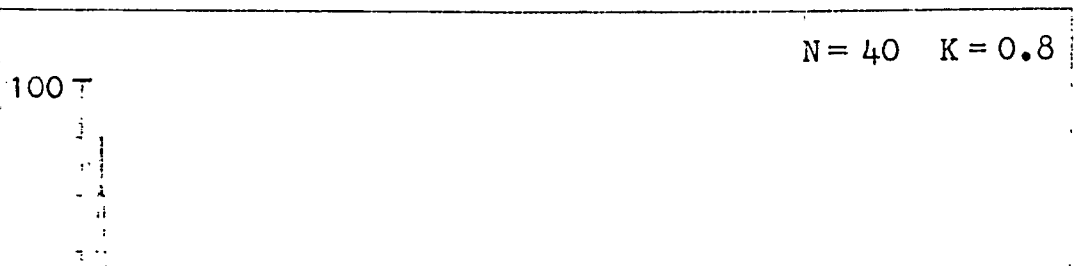
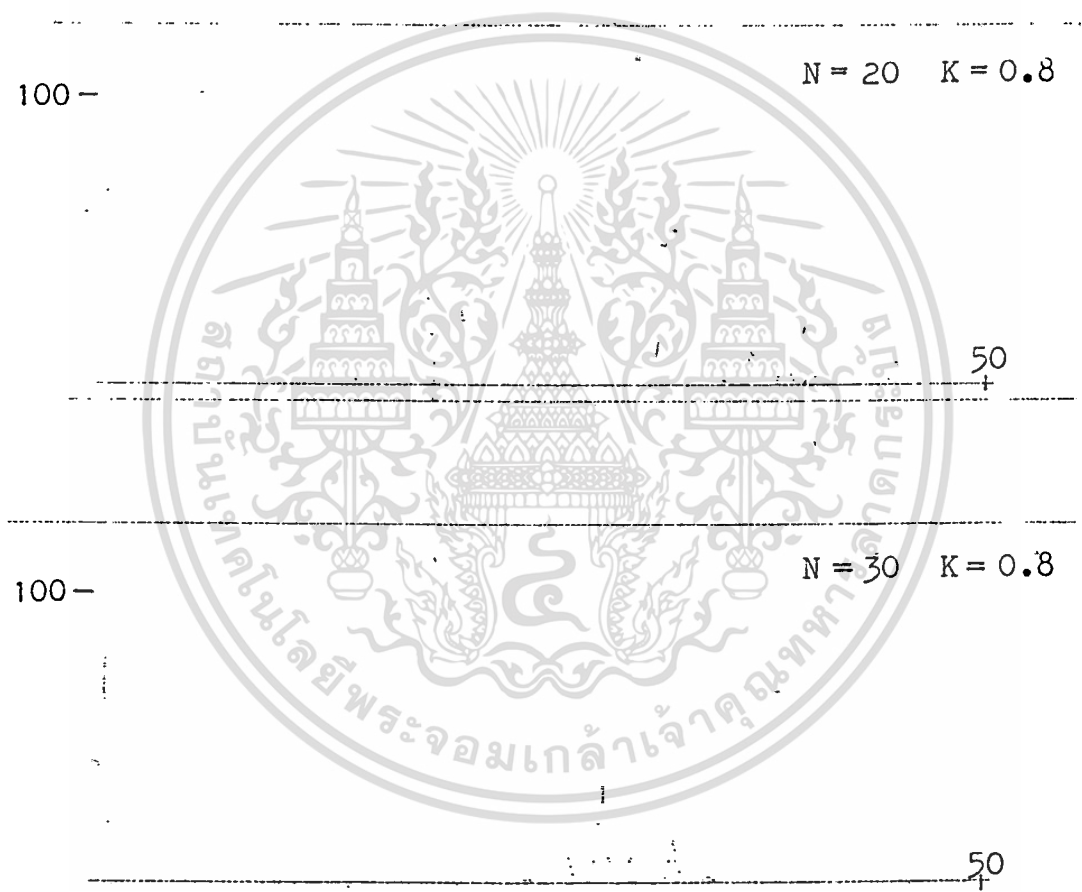
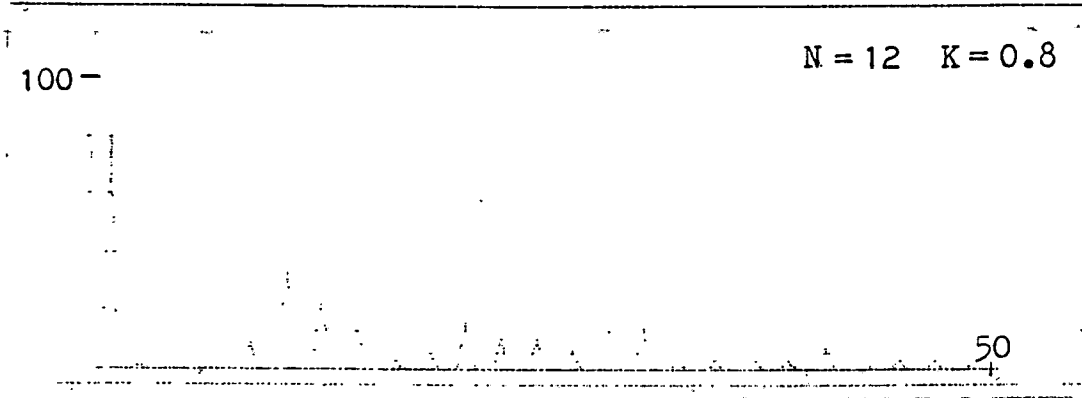
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ทำกรณีใด ๆ ที่เกี่ยวข้องหรือมีข้อสงสัย กรุณาติดต่อฝ่ายวิชาการที่เบอร์โทรศัพท์ 036-253131

รูปที่ 3.13 กราฟแสดงองค์ประกอบอาร์มอนิกของรูปคลื่นแบบเนเทอร์อลชนิด 3 ระดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใด ๆ ทั้งสิ้น หากมีข้อสงสัยหรือต้องการข้อมูลเพิ่มเติม กรุณาติดต่อฝ่ายวิชาการ

รูปที่ 3.14 กราฟแสดงองค์ประกอบอาร์มอดิกของรูปคลื่นแบบเรกูลาร์ชนิด 2 ระดับ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่าจะในรูปแบบใดๆ ทั้งสิ้น หากพบการละเมิดลิขสิทธิ์ โปรดแจ้งให้ทางผู้จัดทำทราบ

รูปที่ 3.15 กราฟแสดงองค์ประกอบอาร์มอิกของรูปคลื่นแบบเรกูลาร์ชนิด 3 ระดับ

### 3.6 สรุปผลการวิเคราะห์องค์ประกอบฮาร์มอนิก

จากการวิเคราะห์หาขนาดองค์ประกอบฮาร์มอนิกในหัวข้อ 4.4 และ 4.5 สามารถสรุปผลได้ดังนี้

#### 3.6.1 รูปคลื่นแบบเนเทอร์อลชนิด 2 ระดับ

1) ขนาดของความถี่หลักมูลจะแปรตามค่าอัตราส่วนการมอดูเลต ( $K$ ) โดยขนาดแอมพลิจูดของความถี่หลักมูลจะมีค่าเท่ากับ  $KE$  เมื่อ  $E$  คือค่าความสูงของรูปคลื่นนิคียบลิเวอริเอมหรือในทางปฏิบัติคือค่าแรงดันของแรงจ่ายไฟตรงในวงจรอินเวอร์เตอร์ ขนาดของความถี่หลักมูลจะไม่แปรตามความถี่

2) องค์ประกอบฮาร์มอนิกจะเกิดเป็นกลุ่มๆ แต่ละกลุ่มจะมีจุดศูนย์กลางที่อันดับฮาร์มอนิกที่มีค่าเป็นจำนวนเท่าของอัตราส่วนความถี่ และโดยเฉลี่ยแล้วขนาดของฮาร์มอนิกในกลุ่มแรกจะมีขนาดสูงกว่ากลุ่มอื่น

3) มีทั้งองค์ประกอบฮาร์มอนิกอันดับคี่และคู่

4) องค์ประกอบฮาร์มอนิกที่มีขนาดสูงสุดคือ องค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับที่เท่ากับค่าอัตราส่วนความถี่คือลำดับที่  $N$  เป็นจุดศูนย์กลางของกลุ่มแรก โดยจะมีค่าลดลงเมื่อค่า  $K$  เพิ่มขึ้น ในขณะที่ฮาร์มอนิกอื่นในกลุ่มมีขนาดเพิ่มขึ้น

5) แต่ละกลุ่มของฮาร์มอนิกจะสมมาตรกันระหว่างซิกซายและซิกซวา กลุ่มแรกจะเกิดเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับคี่ ส่วนในกลุ่มต่อไปจะเกิดทั้งอันดับคี่และคู่

#### 3.6.2 รูปคลื่นแบบเนเทอร์อลชนิด 3 ระดับ

1) ขนาดแอมพลิจูดของความถี่หลักมูลมีค่าเท่ากับ  $KE$

2) องค์ประกอบฮาร์มอนิกจะเกิดเป็นกลุ่มๆ แต่ละกลุ่มจะมีจุดศูนย์กลางที่อันดับฮาร์มอนิกที่มีค่าเป็นจำนวนเท่าของค่า  $N$  โดยเฉลี่ยแล้วฮาร์มอนิกในกลุ่มแรกจะมีขนาดสูงกว่ากลุ่มอื่น

3) ฮาร์มอนิกแต่ละกลุ่มจะมีลักษณะสมมาตรกันระหว่างซิกซายและซิกซวา และเกิดขึ้นเฉพาะฮาร์มอนิกอันดับคี่เท่านั้น

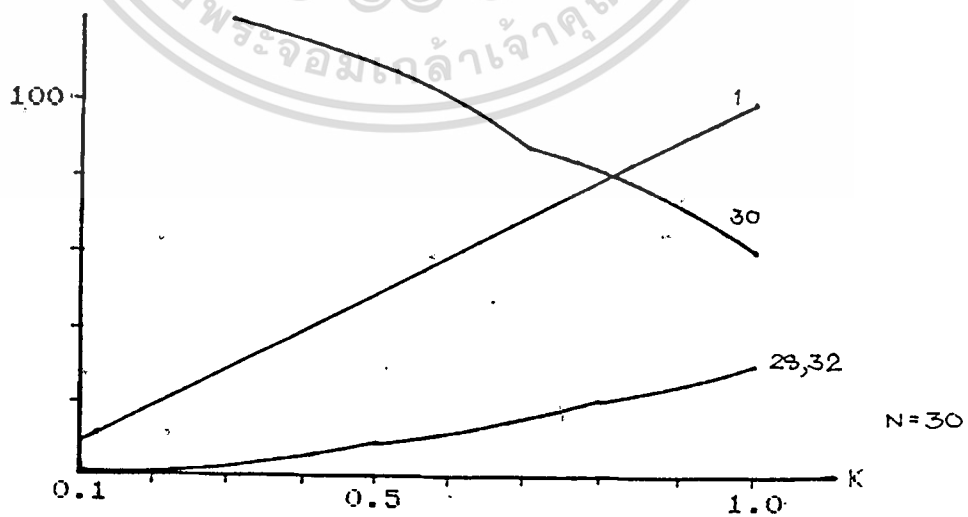
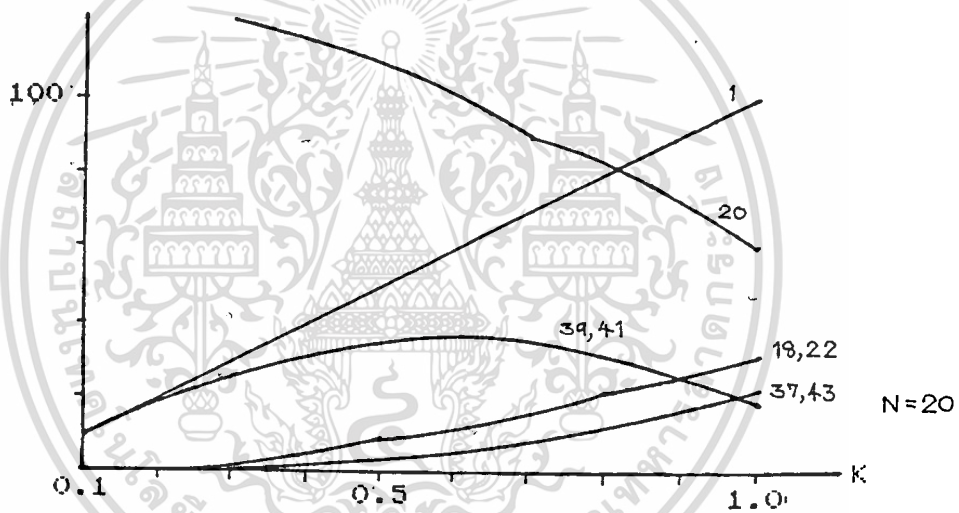
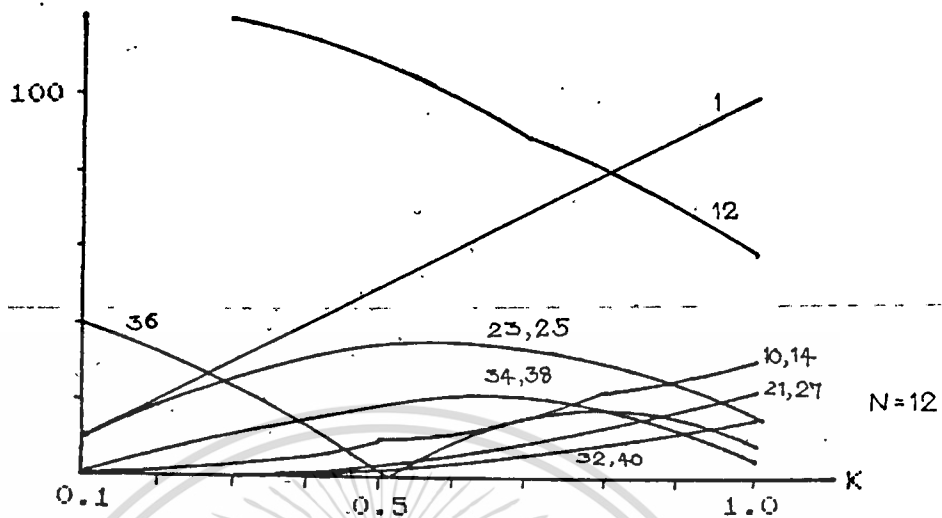
4) ฮาร์มอนิกที่มีขนาดสูงสุดคือจะมี 2 อันดับที่มีขนาดเท่ากันคืออันดับที่  $N-1$  และ  $N+1$  ในช่วงค่า  $K$  น้อยๆ เมื่อค่า  $K$  มากขึ้นจะมีขนาดลดลงในขณะที่ฮาร์มอนิกอื่นในกลุ่มเดียวกันมีขนาดสูงขึ้น จนเมื่อค่า  $K$  เข้าใกล้ 1 ฮาร์มอนิกที่  $N-3$  และ  $N+3$  จะกลายเป็นฮาร์มอนิกที่มีขนาดสูงสุด

#### 3.6.3 รูปคลื่นแบบเรกูลาร์ชนิด 2 ระดับ

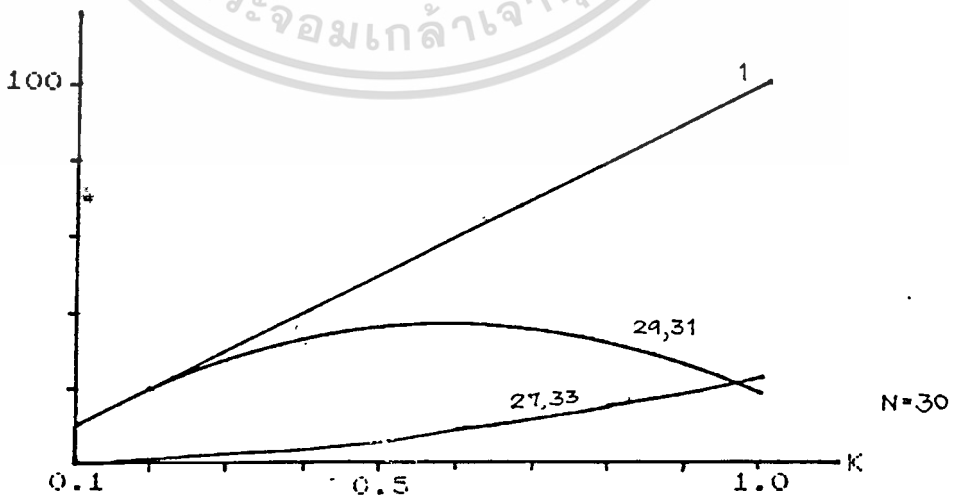
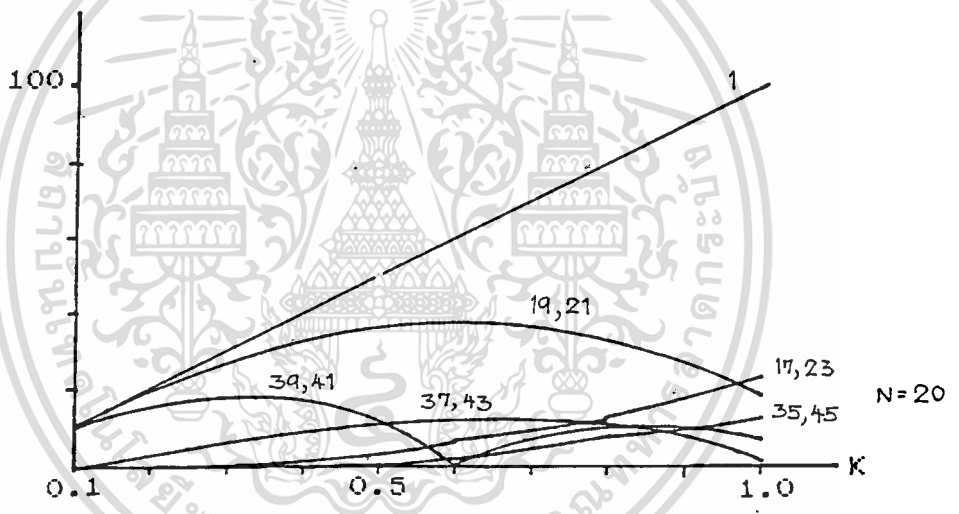
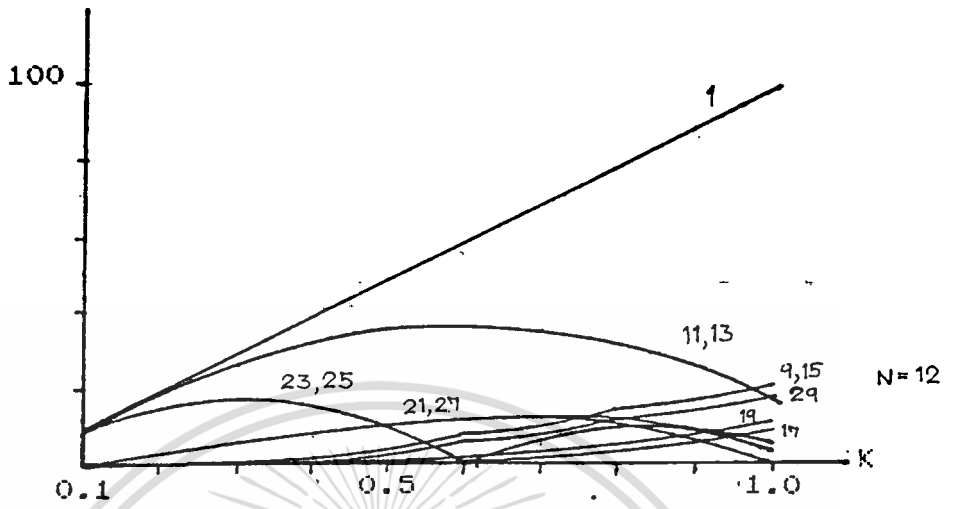
1) ขนาดแอมพลิจูดของความถี่หลักมูลมีค่าโดยประมาณเท่ากับ  $KE$

2) จะเกิดฮาร์มอนิกเป็นกลุ่มๆ แต่ละกลุ่มจะมีจุดศูนย์กลางที่อันดับฮาร์มอนิกที่เป็นจำนวนเท่าของ  $N$  โดยเฉลี่ยกลุ่มแรกจะเป็นกลุ่มที่มีขนาดสูงสุด

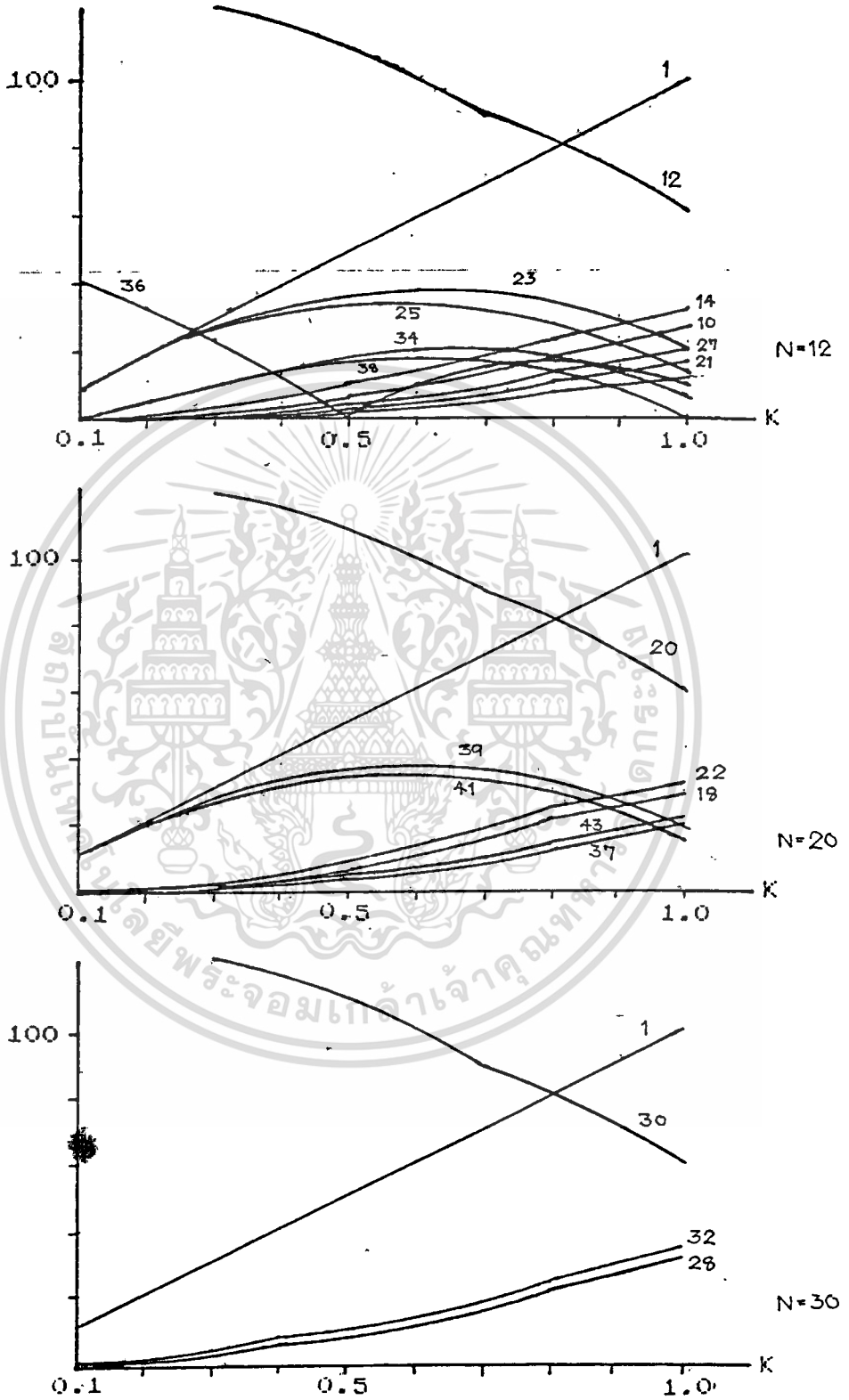
3) ในแต่ละกลุ่มจะเกิดทั้งฮาร์มอนิกอันดับคี่และคู่ แต่ในแต่ละกลุ่มจะไม่สมมาตรกันระหว่างซิกซายและซิกซวา



รูปที่ 3-16 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงขนาดอาร์มอติกที่ค่า  $K$  ต่างๆของรูปคลื่นแบบเนเทอร์ลอชนิด 2 ระดับ เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



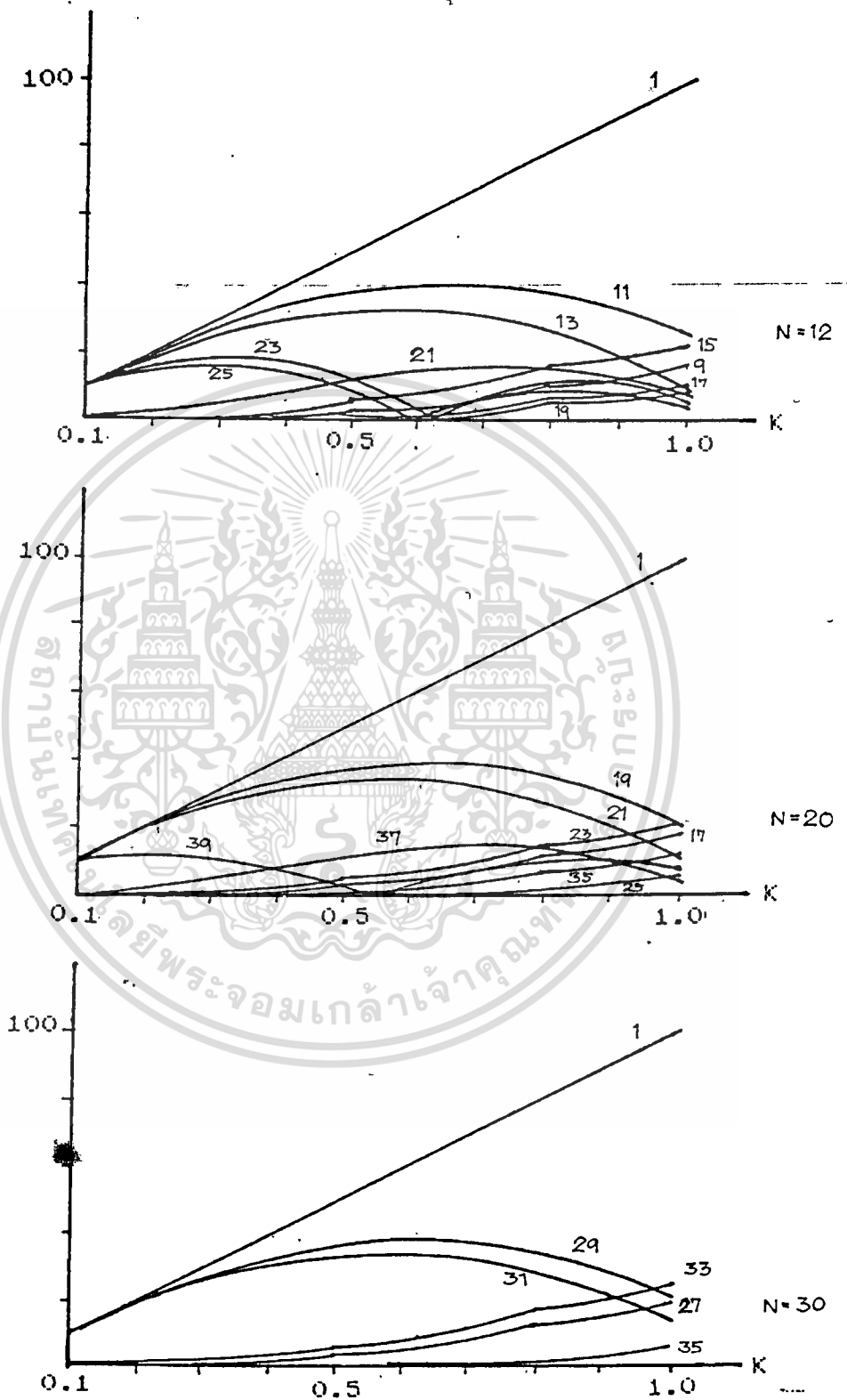
รูปที่ 3.17 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงขนาดอาร์มอนิกที่ค่า K ต่างๆของรูปคลื่นแบบเนเทอร์ลอชนิด 3 ระดับ  
 เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นับว่าผูกพันไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.18 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงขนาดอาร์มอดิกที่ค่า K ต่างๆของรูปคลื่นแบบเรกลาร์ชนิด 2 ระดับ

อีกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปเผยแพร่ภายนอกอาคาร

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.19 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงขนาดอาร์มอริกที่ค่า  $K$  ต่างๆของรูปคลื่นแบบเรกูลาร์ชนิด 3 ระดับ  
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปเผยแพร่บนเว็บไซต์ทางการฯ

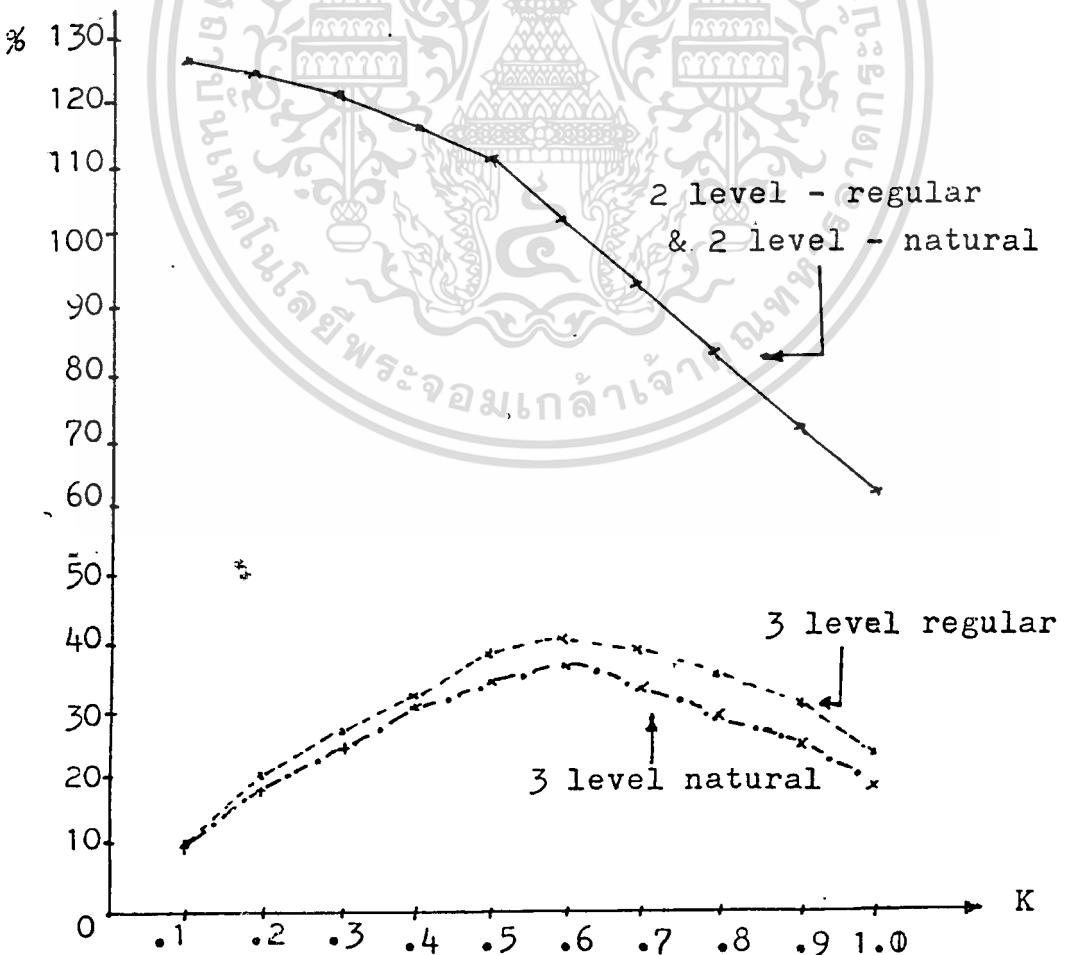
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) ฮาร์โมนิกที่มีขนาดสูงสุดคือฮาร์โมนิกอันดับที่  $N$  ซึ่งจะมีค่าลดลงเมื่อค่า  $K$  มากขึ้น ในขณะที่ฮาร์โมนิกอื่นในกลุ่มมีค่าเพิ่มขึ้น

3.6.4 รูปคลื่นแบบเรกูลาร์ชนิด 3 ระดับ

- 1) ขนาดแอมพลิจูดของความถี่หลักมูลมีค่าโดยประมาณเท่ากับ  $KE$
- 2) จะเกิดฮาร์โมนิกเป็นกลุ่มๆ มีศูนย์กลางของแต่ละกลุ่มที่อันดับฮาร์โมนิกที่มีค่าเป็นจำนวนเท่าของค่า  $N$  และเกิดเฉพาะฮาร์โมนิกอันดับที่เท่านั้น โดยเฉลี่ยกลุ่มแรกจะมีขนาดมากที่สุด
- 3) แต่ละกลุ่มจะไม่สมมาตรระหว่างซีกซ้ายและซีกขวา ฮาร์โมนิกที่  $N$ -จะมีขนาดมากที่สุด

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบฮาร์โมนิกของคลื่นพิดับบลิว เอ็มแต่ละแบบจะมีลักษณะคล้ายคลึงกันที่ขนาดของความถี่หลักมูล, การเกิดฮาร์โมนิกเป็นกลุ่มและความสามารถในการกำจัดฮาร์โมนิกอันดับต่ำไปได้มากเมื่อ  $N$  มีค่าสูง แต่จะมีผลเสียในทางปฏิบัติคือเกิดการสูญเสียในการสวิตช์ (Switching Loss) มาก รูปคลื่นแบบ 3 ระดับจะเด่นกว่าแบบ 2 ระดับตรงที่เกิดเฉพาะฮาร์โมนิกอันดับที่  $N$  และฮาร์โมนิกที่มีขนาดสูงสุดมีขนาดต่ำกว่าแบบ 2 ระดับ

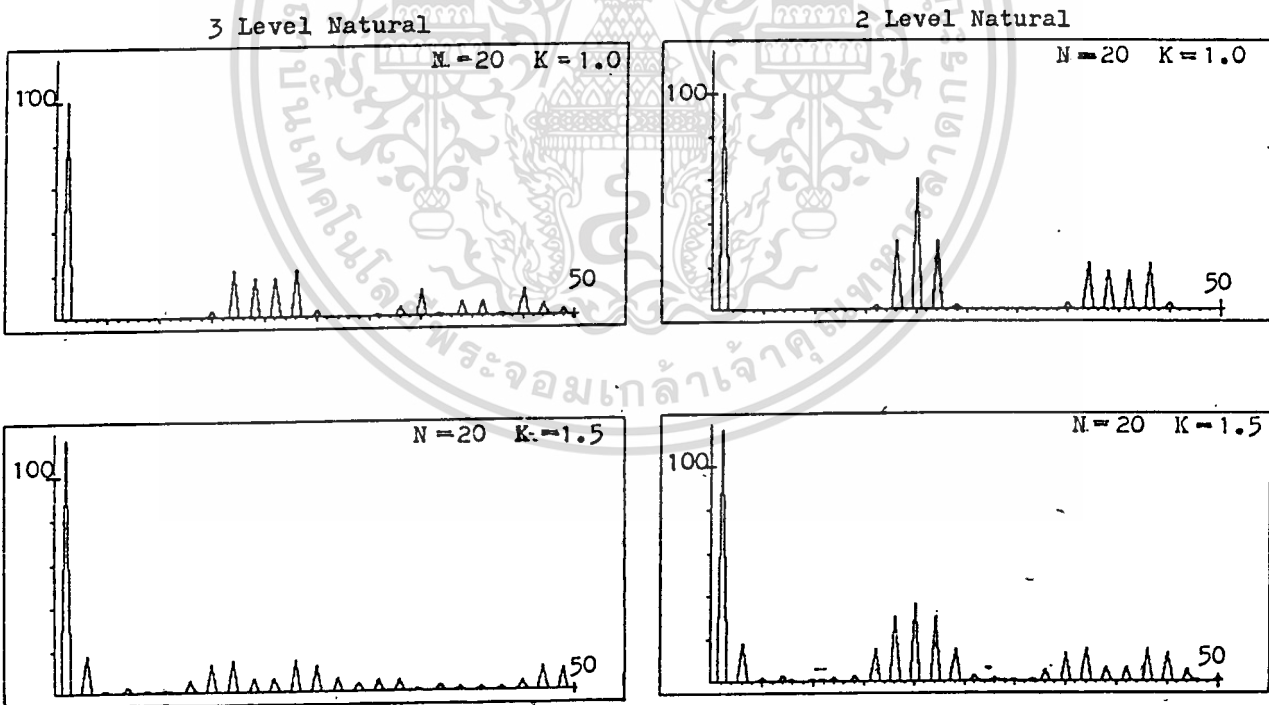


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อวัตถุประสงค์เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 รูปที่ 3.20 กราฟแสดงขนาดของฮาร์โมนิกที่มีขนาดสูงสุดในรูปคลื่นแต่ละแบบที่ค่า  $N=20$   
 ไม่ว่าจะเห็นแต่เพียงส่วน อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.7 การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในกรณีโอเวอร์มอดูเลชัน

การวิเคราะห์องค์ประกอบในหัวข้อที่ผ่านมาเป็นการวิเคราะห์ในกรณีปกติคือ ในช่วง  $K$  ไม่เกิน 1.0 ในกรณีที่ค่า  $K$  มากกว่า 1.0 คือการที่สัญญาณอ้างอิงมีแอมพลิจูดสูงกว่าสัญญาณแครีเรียร์ (Over Modulation) ผลที่ได้จะแตกต่างกันออกไป ผลที่เห็นได้ชัดคือจำนวนพัลส์ใน 1 คาบจะมีน้อยลง ทางด้านองค์ประกอบฮาร์มอนิกสามารถใช้โปรแกรมที่ 3.1-3.4 วิเคราะห์ได้ผลดังตารางที่ 3.13 และ 3.14 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า

- 1) อัตราการเพิ่มขนาดความถี่หลักมูลจะน้อยลง ยิ่งในกรณีค่า  $K$  มากกว่าขนาดของความถี่หลักมูลจะเพิ่มขึ้นน้อยมาก
- 2) จะเกิดฮาร์มอนิกลำดับต่ำขึ้นมาโดยเฉพาะฮาร์มอนิกที่ 3



รูปที่ 3.21 กราฟแสดงองค์ประกอบฮาร์มอนิกในกรณีค่า  $K=1.0$  เทียบกับกรณีโอเวอร์มอดูเลชัน  $K=1.5$

ตารางที่ 3-13 แสดงองค์ประกอบฮาร์มอนิกของคลื่นแบบเนเทอร์อล

กรณีค่า  $K=1.0$  เทียบกับกรณีโอเวอร์มอดเลชั่น

Harmonic Content of 2 Level Natural PWM Inverter  
Frequency Ratio = 20

K	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0
Harmonic						
1	117.1	115.6	113.2	110.4	106.4	100.0
2	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0
3	17.5	14.7	11.0	7.2	3.1	0.0
4	0.3	0.8	0.0	0.3	0.1	0.0
5	1.9	3.3	3.7	3.6	2.2	0.0
6	0.4	0.0	0.4	0.3	0.3	0.0
7	2.8	2.1	0.6	0.7	1.2	0.0
8	0.7	1.1	0.3	0.3	0.3	0.0
9	0.3	1.2	1.2	0.7	0.4	0.0
10	0.8	0.0	0.7	0.8	0.1	0.0
11	1.0	0.9	0.1	0.6	0.2	0.0
12	1.9	2.2	1.4	0.3	0.8	0.0
13	0.1	0.7	0.4	0.0	0.3	0.0
14	2.7	1.0	0.7	1.8	1.7	0.0
15	0.5	0.6	0.2	0.4	0.2	0.0
16	15.1	14.0	11.6	8.9	5.2	1.8
17	0.1	0.5	0.1	0.1	0.0	0.0
18	29.7	30.9	32.1	33.0	33.4	31.8
19	0.2	0.5	0.1	0.2	0.2	0.0
20	36.2	38.9	42.6	46.8	52.3	60.1

Harmonic Content of 3 Level Natural PWM Inverter  
Frequency Ratio = 20

K	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0
Harmonic						
1	116.9	115.1	113.3	110.6	106.2	100.0
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	17.4	14.1	10.9	7.3	3.1	0.0
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	1.4	2.7	3.9	4.0	2.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	2.7	1.4	0.2	0.7	0.9	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	0.8	0.2	1.3	1.4	0.2	0.0
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	1.1	0.2	1.3	1.4	0.2	0.0
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	5.8	3.7	1.7	0.2	0.5	0.2
14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	12.7	12.5	12.1	10.5	6.8	3.3
16	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	14.7	16.5	18.0	19.5	21.2	21.2
18	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
19	6.6	7.8	8.8	10.5	13.6	18.1
20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

ตารางที่ 3-14 แสดงองค์ประกอบฮาร์มอนิกของคลื่นแบบเรกูลาร์

กรณีค่า  $K=1.0$  เทียบกับกรณีโอเวอร์มอดเลชั่น

Harmonic Content of 3 Level Regular PWM Inverter  
Frequency Ratio = 20

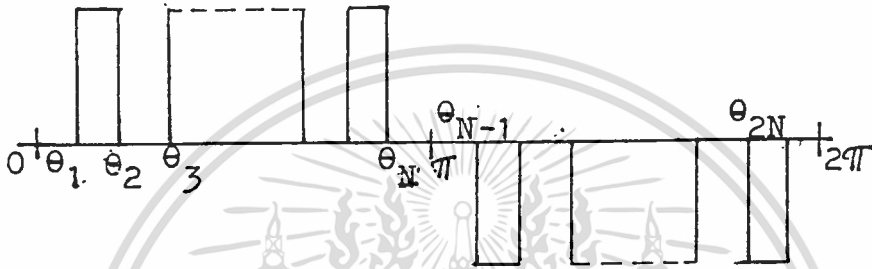
K	1.5	1.4	1.3	1.2	1.1	1.0
Harmonic						
1	120.4	115.8	114.0	112.2	106.6	99.7
2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
3	23.8	15.4	12.1	8.7	3.7	0.9
4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.3	2.1	3.6	5.1	1.6	0.0
6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
7	6.8	1.4	0.3	0.8	0.9	0.0
8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
9	4.9	0.4	1.6	2.7	0.4	0.0
10	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
11	1.5	0.7	1.4	2.1	0.5	0.0
12	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
13	8.3	1.4	0.3	1.9	1.0	0.0
14	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
15	12.1	9.4	9.0	8.7	3.8	1.3
16	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
17	11.4	16.3	17.6	18.6	19.7	18.6
18	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
19	6.7	12.6	13.4	13.8	18.3	23.1
20	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์การใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.8 การหาค่าอาร์เอ็มเอสของรูปคลื่นพีคดับลิวเอ็มแบบเนเทอร์ชนิด 3 ระดับ

เนื่องจากจะมีการนำเอาวิธีการเปรียบเทียบแบบเนเทอร์ชนิด 3 ระดับไปใช้ในวงจรอินเวอร์เตอร์ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลักของแหล่งจ่ายไฟสำรอง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการคำนวณค่าแรงดันกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square, rms) ของรูปคลื่น เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบหม้อแปลงเพิ่มแรงดันในวงจรอินเวอร์เตอร์



รูปที่ 3.22 แสดงรูปคลื่นพีคดับลิวเอ็มชนิด 3 ระดับ

พิจารณารูปคลื่นพีคดับลิวเอ็มชนิด 3 ระดับที่มีมุมสวิทช์  $2N$  มุมใน 1 คาบ ดังแสดงในรูปที่ 3.22 ซึ่งจะเห็นว่ามิลักษณะสมตลยระหว่างครึ่งคาบแรกกับครึ่งคาบหลัง โดยมีมุมสวิทช์  $\theta_1 = \theta_{N+1}$ ,  $\theta_2 = \theta_{N+2}$ , ...,  $\theta_{N-1} = \theta_{2N}$  ดังนั้นในการคำนวณจะคำนวณเพียงครึ่งคาบ ค่าอาร์เอ็มเอสของรูปคลื่นจะมีค่าเป็น  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  เท่าของค่าที่คำนวณได้จากครึ่งคาบ จากนิยามของค่าอาร์เอ็มเอสจะได้

$$V_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} E^2 d\theta}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{2 \cdot E}{\pi} \left[ \int_{\theta_1}^{\theta_2} d\theta + \int_{\theta_3}^{\theta_4} d\theta + \dots + \int_{\theta_{N-1}}^{\theta_N} d\theta \right]}$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{2 \cdot E}{\pi} \times \text{ผลรวมของความกว้างพัลส์ทุกพัลส์ในครึ่งคาบแรก}}$$

เมื่อนำไปเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์โดยเพิ่มการหาขนาดของความถี่หลักมูลเข้าไป (คือ การคำนวณหาอาร์โมนิกที่ 1 ในโปรแกรมที่ 3.1) จะได้ผลการคำนวณดังตารางที่ 3.15

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการแข่งขันเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

สำหรับค่าอัตราส่วนความถี่  $N = 12, 20$  และ  $30$  ตามลำดับ

ไม่ว่าการแก้ไขทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.15 ตารางเปรียบเทียบค่าอาร์เอ็มเอสของคลื่นที่ทับลิวเอ็มและของความถี่หลักมูล  
Natural PWM Rms value when DC supply = 100 V  
Frequency ratio = 12

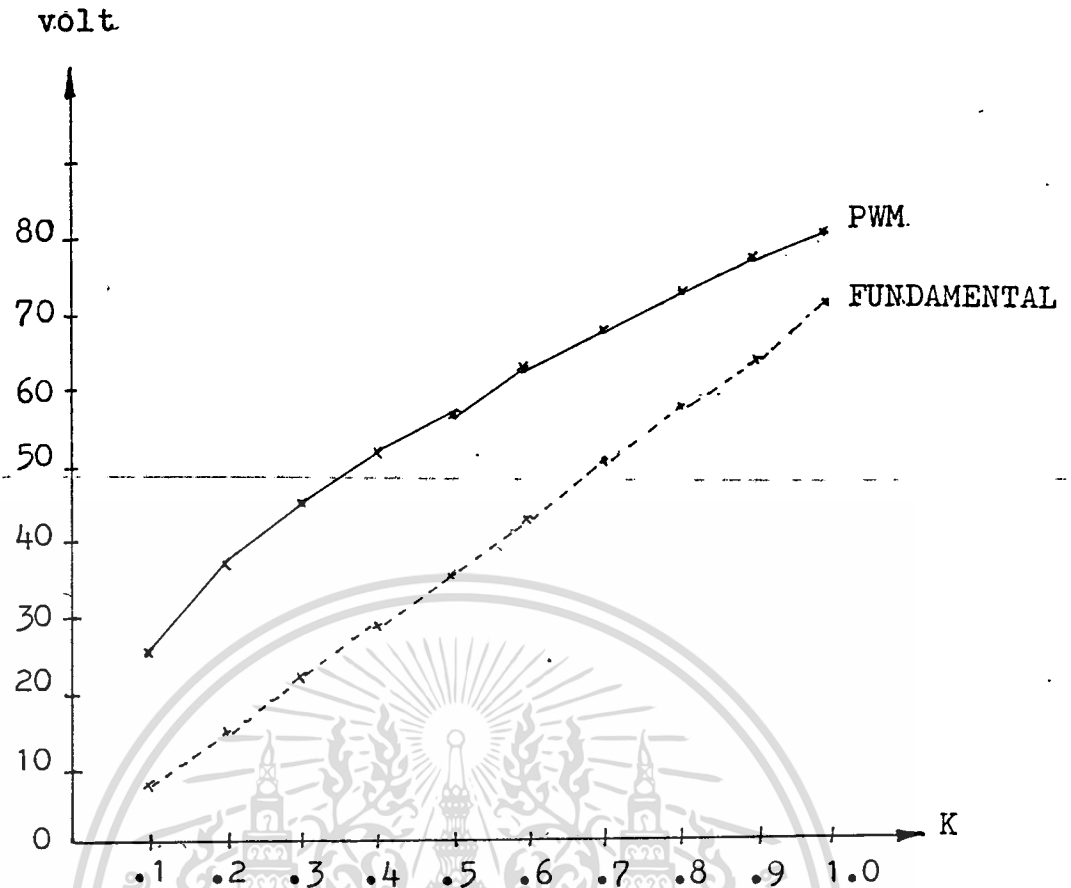
K	PWM Rms	Fundamental rms	%Fundamental	%Harmonic
0.10	25.38	7.07	27.87	72.13
0.20	35.89	14.15	39.41	60.59
0.30	43.96	21.22	48.26	51.74
0.40	50.76	28.28	55.73	44.27
0.50	56.75	35.36	62.30	37.70
0.60	62.16	42.42	68.24	31.76
0.70	67.15	49.49	73.71	26.29
0.80	71.80	56.57	78.79	21.21
0.90	76.16	63.64	83.57	16.43
1.00	80.28	70.71	88.08	11.92

Natural PWM Rms value when DC supply = 100 V  
Frequency ratio = 20

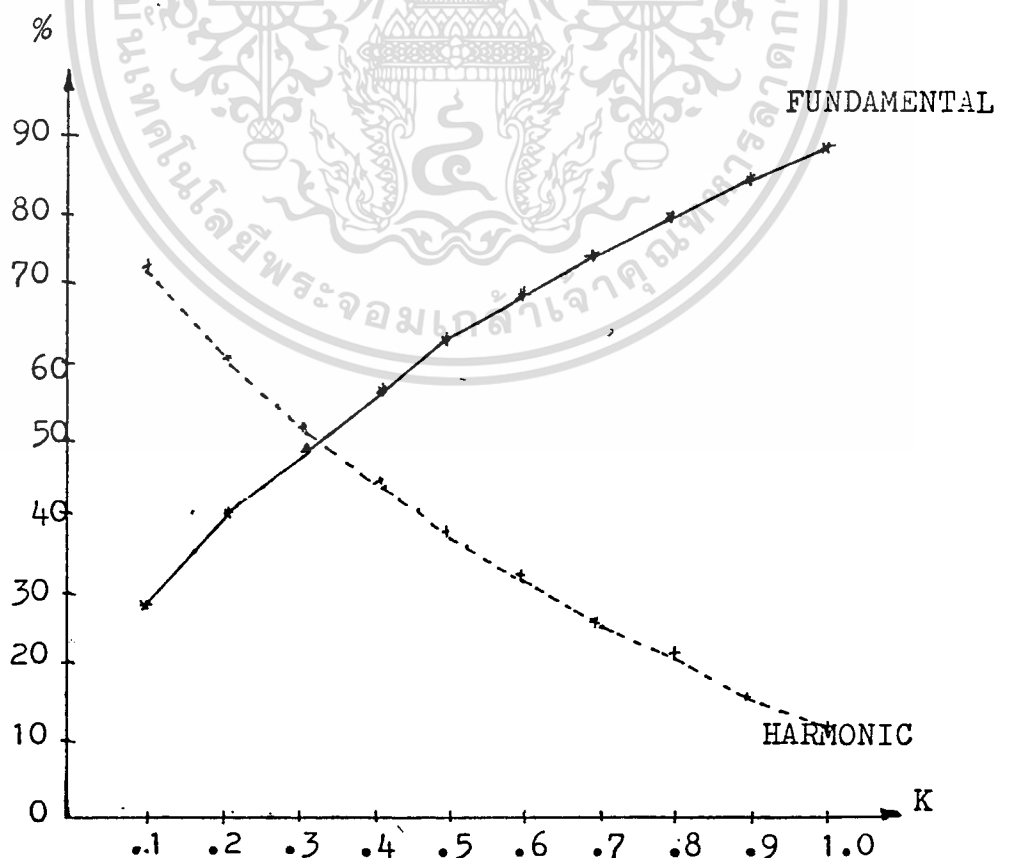
K	PWM Rms	Fundamental rms	%Fundamental	%Harmonic
0.10	25.28	7.07	27.96	72.04
0.20	35.77	14.15	39.56	60.44
0.30	43.79	21.21	48.44	51.56
0.40	50.57	28.29	55.94	44.06
0.50	56.54	35.35	62.54	37.46
0.60	61.93	42.43	68.51	31.49
0.70	66.90	49.51	74.00	26.00
0.80	71.51	56.57	79.10	20.90
0.90	75.85	63.63	83.89	16.11
1.00	79.96	70.72	88.44	11.56

Natural PWM Rms value when DC supply = 100 V  
Frequency ratio = 30

K	PWM Rms	Fundamental rms	%Fundamental	%Harmonic
0.10	25.24	7.06	27.98	72.02
0.20	35.71	14.14	39.60	60.40
0.30	43.74	21.21	48.49	51.51
0.40	50.51	28.28	56.00	44.00
0.50	56.47	35.35	62.61	37.39
0.60	61.86	42.42	68.58	31.42
0.70	66.82	49.50	74.08	25.92
0.80	71.43	56.57	79.19	20.81
0.90	75.77	63.64	84.00	16.00
1.00	79.86	70.71	88.54	11.46



รูปที่ 3.23 กราฟแสดงค่าอาร์เอ็มเอสของคลื่นพีดีบีเอ็มกับค่าความถี่หลักมูลที่ค่า  $N=20$



รูปที่ 3.24 กราฟอัตราส่วนของขนาดความถี่หลักมูลกับขนาดผลรวมของฮาร์โมนิก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานในเชิงพาณิชย์เท่านั้น ไม่สามารถนำเอกสารนี้ไปใช้ในการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้เผยแพร่เอกสารนี้แก่บุคคลอื่นโดยไม่ได้รับอนุญาตจากทางผู้จัดทำเอกสารนำไปใช้