



ปีการศึกษา 2533

พีคับลิวเอ็ม จีทีโอ เอชทีซีคอนเวอร์เตอร์ชนิดเคลื่อนเพลิงกระแสเอชไอเอ็น  
กับการประยุกต์ใช้งานชุดระบบเทอร์โมคอนเวอร์เตอร์



ปก.  
๑๓๗  
๒๕๓๓

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

028760

พีดับบลิวเอ็ม จีทีโอ เอชทีซีคอนเวอร์เตอร์ชนิดเลื่อนเฟสกระแสเอซีไลน์  
กับการประยุกต์ใช้งานชดเชยเพาเวอร์แฟกเตอร์

AC LINE CURRENT PHASE-SHIFT CONTROLLED PWM AC-TO-DC CONVERTER  
AND ITS APPLICATION FOR FACTOR COMPENSATION



วิทยานิพนธ์สำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า  
คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหาร ลาดกระบัง  
ปีการศึกษา 2533

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

012876

ปริญญานิพนธ์ปีการศึกษา 2533

ภาควิชา วิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า เจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
เรื่อง พื้ตบลิวเอ็ม จีทีโอ เอชทูตีสีคอนเวอร์เตอร์ชนิดเล็อนเพสกระแสเอชไอไลน์  
กั้บการประกยูกต์ำใช้งานชดเชยเพาเวอร์แฟกเตอร์

ผู้จัดทำ

1. นาย อนุวัฒน์ จางวนิชเลิศ 30-1342
2. นาย อนันต์ ชำนาญโหลหะวานิช 30-1345
3. นาย เอกชัย ชีวังกร 30-1368
4. นาย เอกชัย สิริธรรมสาร 30-1369



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พีดับบลิวเอ็ม จีทีโอ เอชทูดีซี คอนเวอร์เตอร์ ชนิดเคลื่อนเฟสกระแสเอซีไลน์  
กับการประยุกต์ใช้งานชุดเซยค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์

นายอนุวัฒน์ จางวานิชเลิศ  
นายอนันต์ ชำนาญโหลหะวานิช  
นายเอกชัย ชีวังกูร  
นายเอกชัย สิริธรรมสาร  
รศ.ดร. วิริยะ พิเชษฐจำเริญ  
(อาจารย์ที่ปรึกษา)  
ปีการศึกษา 2533

บทคัดย่อ

โครงการฉบับนี้ ได้ทำการวิเคราะห์พีดับบลิวเอ็มคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งสามารถเคลื่อนเฟสกระแสเอซีไลน์ได้ และมีวงจรที่สามารถแก้ไขเพสพลังงานอันเกิดขึ้นจากการคอมมิวเตท อีกทั้งยังได้วิเคราะห์ และคำนวณสมการทั่วไปขององค์ประกอบฮาร์โมนิคในกระแสอินพุทเอซีไลน์ และแรงดันเฉลี่ยทางด้านเอาต์พุตสำหรับในกรณีของจำนวนพัลส์ค่าต่างๆ ซึ่งสามารถแสดงให้เห็นจริงจากการทดลองและการคำนวณในส่วนที่เพิ่มเข้ามาของโครงการนี้ก็คือ ความสามารถในการควบคุมขนาดของกระแสที่ทางด้านเอาต์พุท และขนาดของกระแสเอซีไลน์ทางด้านอินพุทให้มีค่าคงที่เมื่อเกิดการเคลื่อนเฟสขึ้น โดยการควบคุมขนาดความกว้างพัลส์ของกระแสพีดับบลิวเอ็มทางด้านอินพุทของกระแสเอซีไลน์ ดังนั้น จากผลสมบัตินี้กล่าวมาจึงสามารถนำคอนเวอร์เตอร์ชนิดนี้ไปใช้ในการชดเชยค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ในระบบไฟฟ้ากำลังได้ ซึ่งได้ทำการทดลองและวิเคราะห์ผลในบทสุดท้ายของโครงการฉบับนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

AC LINE CURRENT PHASE-SHIFT CONTROLLED PWM AC-TO-DC CONVERTER  
AND ITS APPLICATION FOR POWER FACTOR COMPENSATION

ANUWAT JANGWANITLERT

ANAN CHAMNANLOHAWANICH

EKACHAI CHEEWANGGURA

EKACHAI SIRITHAMMASARN

ASSOCIATE PROFESSOR

VIRIYA PICHETJAMROEN

(ADVISOR)

1990

ABSTRACT

A GTO AC-to-DC power converter capable of processing commutation energy is proposed and analyzed. The converter is operated in a proposed PWM mode. The harmonic contents of AC line input current and DC output voltage characteristics, in various pulse number, are analyzed and verified by experiment. In addition, the amplitude of DC output current and AC line input current can be controlled by PWM pulsewidth of the AC line input current when phase-shifted. It is shown that this converter has two independent control functions which are phase-shift control of PWM AC line input current and mean output voltage. From this point of view, this converter can be applied as a power factor compensator in a power system. This characteristic can be analyzed and verified by experiment.

## สารบัญ

บทคัดย่อ		1
ABSTRACT		2
สารบัญ		
บทที่ 1	บทนำ	3
	1.1 การจ่ายวาร์ชันคอมพิวเตชันแบรค่าได้	3
	1.2 ลักษณะสวิตช์คาปาซิเตอร์	4
	1.3 ลักษณะอินตคเตอร์ที่ถูกควบคุม	6
	1.4 การจ่ายวาร์ชโดยใช้นแหล่งจ่ายกระแส	6
บทที่ 2	วงจรกำลัง และวงจรช่วย	7
	2.1 วงจรกำลังหลัก	8
	2.2 วงจรช่วย	8
บทที่ 3	การวิเคราะห์ห้วงคัพระกอบฮาร์โมนิกในกระแสสลับในทุบเอชไอไลต์	10
	3.1 การวิเคราะห์กระแสสลับเอชไอไลต์อินพุทแบบพีดีบีลิวเอิม	10
	3.2 รูปแบบกระแสสลับด้วยลิวเอิมแบบ N-พัลส์ กับค่าตั้งประกอบความกว้างพัลส์ทั้งหมดจะสม	13
บทที่ 4	หลักการป้อนกลับของลิวเอิม	21
	4.1 การควบคุมแบบดีคิตอล	21
	4.2 การควบคุมแบบ PROPORTIONAL	24
	4.3 โทมคอินเทกรัล	27
	4.4 PROPORTIONAL-INTEGRAL CONTROL MODE	28
	4.5 โพลีชาร์ตการทางคัพระกอบโปรแกรมลิวเอิมป้อนกลับ	28
บทที่ 5	วงจรควบคุมแบบดีคิตอล	30
	5.1 การทำงานของวงจรควบคุม	36
	5.2 วงจรวัดคัพระกอบระหว่างแรงดันกับกระแส	36
	5.3 วงจรส่วนป้อนกลับ	38
บทที่ 6	การวิเคราะห์แรงดันทางด้านเอาท์พุทเมื่อมีการเลือนเฟส	38
	6.1 กรณีที่ไม่มีช่วงเวลาคายประจุ ( $\tau=0$ )	40
	6.2 กรณีที่มีช่วงเวลาคายประจุ ( $\tau>0$ )	45
	6.3 สมการนอร์มัลไลซ์เดลี่ยของแรงดันทางด้านเอาท์พุทที่ N-พัลส์	58
บทที่ 7	วิเคราะห์ผลการทดลอง	58
	7.1 กราฟแสดงคัพระกอบของแรงดันเดลี่ยทางด้านเอาท์พุทกับมุมเลือนเฟส	58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

7.2 ผลกระทบของจำนวนพัลส์ต่อองค์ประกอบฮาร์โมนิก ของกระแสที่ดับลิวเอ็ม	58
7.3 ผลของ FEEDBACK ที่มีต่อขนาดกระแสอินพุทที่ดับลิวเอ็ม	58
7.4 การประยุกต์ใช้คอนเวอร์เตอร์ในงานชุดเซย์ค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์	59
กิตติกรรมประกาศ	93
หนังสืออ้างอิง	94



# บทที่ 1

## บทนำ

ปัจจุบันความต้องการในการเพิ่มแหล่งจ่ายกำลังในโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อการชดเชยโหลดที่เกิดสภาวะล้าหลังมากขึ้น สามารถควบคุมได้โดยการกำหนดเป็นสลับ ความถี่ทางเทคนิคในปัจจุบันก้าวหน้ามาก ทำให้มีการใช้แหล่งจ่ายกำลังโดยใช้ทางต้านไทรสเตอร์กำลังสูงและวงจรทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ ในการชดเชยอาร์และเพาเวอร์แฟคเตอร์ ปัญญาประดิษฐ์นี้จะบอกถึงการจ่ายกำลังที่มีการควบคุมโดยการใช้ไทรสเตอร์

### 1.1 การจ่ายกำลังชนิดที่อิมพีแดนซ์แปรค่าได้ (Variable Impedance Type Var Generator)

โดยพิจารณาลักษณะเพียง 2 ข้อ คือ

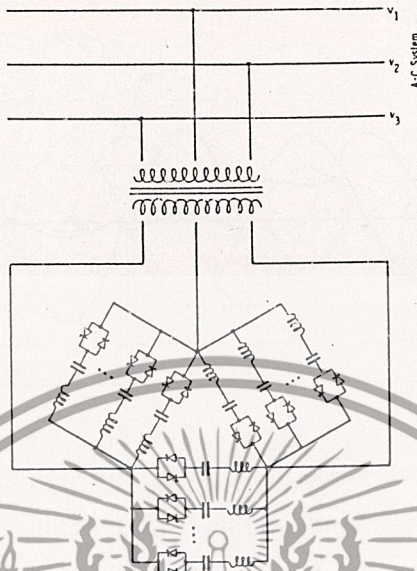
1. การควบคุมการจ่ายกำลังให้สภาวะนำหน้าโดยใช้คาปาซิเตอร์ต่อเข้าไปในไลน์
2. ใช้คาปาซิเตอร์ชนิดที่ต่อขานเข้ากับ อินดักเตอร์ ที่มีการปรับค่าโดยมีการควบคุมด้วยไทรสเตอร์ (Thyristor-controlled variable inductor)

### 1.2 ลักษณะสวิตช์คาปาซิเตอร์ (Switched Capacitor Scheme)

การทำงานของคาปาซิเตอร์แบงด์ที่ถูกสวิตช์ จะถูกสวิตช์เข้าไป เมื่อแรงดันตัวมันมีค่าเท่ากับแรงดันที่จ่ายให้ ดังนั้นจะมีเวลาในการตอบสนอง ในหนึ่งไซเคิล สำหรับการสวิตช์เข้า (switching in) และครึ่งไซเคิลสำหรับการสวิตช์ออก (switching out)

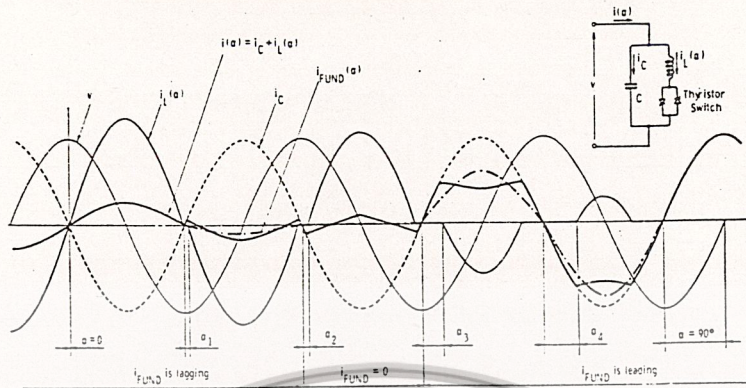
ในระบบ 3 เฟสของคาปาซิเตอร์แบงด์ที่ถูกควบคุมด้วยไทรสเตอร์ ปกติแล้วจะมีการต่อแบบเดลต้า ดังรูปที่ 1.1 การต่อในลักษณะนี้เป็นประโยชน์เพื่อป้องกันแอกติฟเพาเวอร์ในกรณีที่ไม่สมดุลขึ้น ในทางปฏิบัติต้องต่ออินดักเตอร์อนุกรมเข้าไปยังคาปาซิเตอร์แต่ละตัว เพื่อการจำกัดกระแสในไทรสเตอร์ เนื่องจากอาจเกิดความแตกต่างระหว่างไลน์และแรงดันคาปาซิเตอร์ที่มีการสวิตช์ทันทีทันใด และ เพื่อลดการเสี่ยงต่อการสร้างริซิกแทนท์ด้วยอิมพีแดนซ์ของระบบไฟเอซีสำหรับที่ความถี่ต่างๆ

ในการสวิตช์คาปาซิเตอร์นั้นมีข้อเสียเช่นกันคือ การชดเชยอาร์ไม่ต่อเนื่อง คาปาซิเตอร์แบงด์แต่ละตัวจำเป็นต้องแยกไทรสเตอร์สวิตช์ และไม่เป็นการประหยัดสำหรับการใช้แรงดันไฟสูงๆถ้าปราศจากหม้อแปลงสลับดาวนั้น แรงดันไฟที่อยู่ในสภาวะคงตัวจะตกคร่อมไทรสเตอร์สวิตช์มีค่าสูงถึง 2 เท่าของพีคแรงดันซัพพลายแล้วไทรสเตอร์ก็ยังคงไม่นำกระแสและสำหรับการใช้ไทรสเตอร์ที่พีคจะต้องมีการป้องกัน เพื่อป้องกันแรงดันทรานเซียนในไลน์และกระแสฟลลท์ที่เกิดขึ้นได้



รูปที่ 1.1 ลักษณะการจ่ายอาร์แบบสแต็คที่ใช้ไทรสเตอร์สวิตช์คาปาซิเตอร์แบบค  
 1.3 ลักษณะอินดักเตอร์ที่ถูกควบคุมด้วยไทรสเตอร์และคาปาซิเตอร์ค่าคงที่  
 (Fixed-Capacitor Thyristor-Controlled Inductor Scheme)

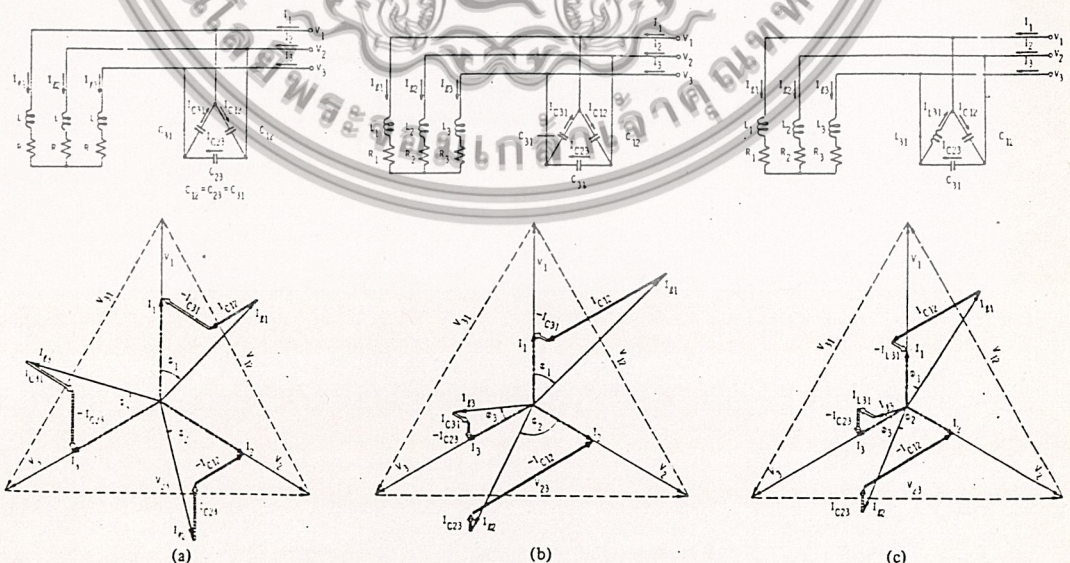
การใช้คาปาซิเตอร์ค่าคงที่ซึ่งต่อขนานกับอินดักเตอร์ที่ควบคุมด้วยไทรสเตอร์ ดังรูปที่ 1.2 เราจะทำให้แอดแดนซ์ เปลี่ยนค่าได้ กระแสที่ถูกควบคุมให้ไหลผ่านอินดักเตอร์ก็จะมีค่า เปลี่ยนไปเนื่องจาก อิมพีแดนซ์ สิ่งนี้เองเป็นการหน่วง เวลาการเปิดของไทรสเตอร์สวิตช์โดยมุม  $\alpha$  ในแต่ละครึ่งไซเคิลของ แรงดันไฟคเพื่อควบคุมช่วงการนำกระแส กระบวนการควบคุมแสดงดังรูปที่ 1.2 กระแสอินดักเตอร์ที่ถูก ควบคุม  $i_L(\alpha)$  , กระแสคาปาซิเตอร์ค่าคงที่  $i_C$  และกระแสทั้งหมด  $i(\alpha)$  พร้อมด้วยกระแสพื้นเดเมน ทอล  $i_{fund}(\alpha)$  ได้แสดงไว้ด้วยกันกับแรงดัน  $v$  ในขณะที่ช่วงการนำกระแสของไทรสเตอร์สวิตช์มีค่า ลดลงจากค่ามากที่สุดไปยัง 0 ( $\alpha$  เริ่มจาก  $0^\circ$  ถึง  $90^\circ$ ) ในตัวอย่างนี้  $\omega L$  กำหนดให้น้อยกว่า  $1/\omega C$  นั่นคือค่าของอินดักเตอร์จะถูกกำหนดให้มีค่าสูงกว่าคาปาซิเตอร์ เพื่อให้แอดแดนซ์มีช่วงการควบคุมทั้งอิน ดักต์ตีฟและคาปาซิตีฟ จากหลักการทำงาน ผลของค่าอิมพีแดนซ์และกระแสพื้นเดเมนทอลในคาปาซิเตอร์ ค่าคงที่ ซึ่งถือว่าเป็นการชดเชยค่าที่แปรค่าได้อย่างต่อเนื่อง ค่าที่อยู่ระหว่างพิคตคาปาซิเตอร์และอินดัก ตอร์ที่มากที่สุด เป็นค่าที่ยอมรับได้ อีกอย่างหนึ่งผลของการเปลี่ยนแปลงอิมพีแดนซ์และกระแสชดเชยจะ เกิดขึ้นที่เวลาติลคริต เท่านั้นนั่นคือ การเปลี่ยนค่าไม่สามารถทำได้บ่อยครั้งในแต่ละครึ่งไซเคิล อย่าง ไรก็ตาม ภายานหนึ่งไซเคิลกระแสสามารถที่จะ เปลี่ยนจากสภาวะที่ล้าหลังมากที่สุดไปยังสภาวะที่นำหน้า มากที่สุด หรือกลับกัน ในระบบโพลสามเฟสอินดักเตอร์ที่ถูกควบคุมด้วยไทรสเตอร์บักติจะต่อแบบเดลต้า คาปาซิเตอร์อาจต่อแบบเดลต้า หรือสตาร์



รูปที่ 1.2 การจ่ายจาร์ชนิดอินดิคเตอร์ควบคุมโดยไทรสเตอร์

และคาปาซิเตอร์ชนิดคงที่และรูปคลื่น

การชดเชยทางกลอธิบายด้วยโหลด 3 เฟสที่แตกต่างกัน 3 กรณี โดยใช้เวลาเตอร์โตะแกรมแสดงให้ไว้ในรูปที่ 1.3 (a) ในรูปที่ 1.3(a) เป็นการชดเชยโหลดที่อยู่ในสภาวะที่ล่าหลัง อธิบายได้ว่า ส่วนประกอบรีแอคทีฟของกระแสโหลด  $I_{L1}, I_{L2}$  และ  $I_{L3}$  ถูกส่งออกได้เพื่อให้ได้กระแสไลน์จริง ๆ  $I_1, I_2$  และ  $I_3$  ในรูปที่ 1.3(b) กระแสโหลดที่ไม่สมดุลย์เฟส ( $I_{L1}, I_{L2}$  และ  $I_{L3}$ ) จะถูกทำให้เกิดการสมดุลย์เฟสเพื่อให้ได้กระแสไลน์จริง ๆ ( $I_1, I_2, I_3$ ) โดยการต่อชดเชยแบบเดลต้าด้วยกระแสคาปาซิตีฟ ( $I_{C12}, I_{C23}, I_{C31}$ ) ในรูปที่ 1.3(c) การเชื่อมค่ากระแสโหลดที่สมดุลย์เฟสจะถูกเปลี่ยนรูปเป็นกระแสไลน์จริง ๆ ที่มีการสมดุลย์เฟสได้โดยการต่อตัวชดเชยระหว่างเฟส 1 และ 3 ซึ่งก็คือตัวอินดัคตีฟ



รูปที่ 1.3 แสดงเวกเตอร์โตะแกรมของโหลดที่มีเฟสสมดุลย์และไม่สมดุลย์ 3 เฟส

โดยการต่อรีแอคเตอร์ เป็น 3 สักขณะแบบเดลต้า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.4 การจ่ายวาร์โดยซีแหล่งจ่ายกระแส

### (Current Source Type Var Generators)

การจ่ายวาร์โดยซีแหล่งจ่ายกระแสจะใช้เอซีทูตีซีคอนเวอร์เตอร์เป็นแหล่งจ่าย ซึ่งคอนเวอร์เตอร์จะใช้เป็นตัวควบคุมเฟาเวอร์แพคเตอร์และให้มีการชดเชยโหลดที่เฟสอยู่ในลักษณะสมคลย์ คอนเวอร์เตอร์อาจมีการใช้การคอมมิวเตทแบบโวลัน (ธรรมชาติ) หรือแบบบังคับ โดยลักษณะโวลันคอมมิวเตทจะมีการทำงานเป็นนลักษณะที่ไทรสเตอร์ทำงานเป็นคู่แล้วสลับคู่กัน โดยที่เฟสกระแสเอซีไลน์จะล้าหลังแรงดันด้วยมุมจุดชนวน แสดงว่าเป็นการจ่ายวาร์ที่อยู่ในสภาวะที่ล้าหลัง ดังในรูปที่ 1.4(a) แสดงถึง กระแสอินพุทเอซีของคอนเวอร์เตอร์ล้าหลัง แรงดันอยู่  $90^\circ$

ส่วนลักษณะการคอมมิวเตทแบบบังคับนั้นสามารถทำให้กระแสไลน์อยู่ในสภาวะที่นำหน้าหรือล้าหลัง โดยที่มุมจุดชนวนจะมีค่าอยู่ระหว่าง  $0^\circ-360^\circ$  คอนเวอร์เตอร์จะทำหน้าที่เป็นคาปาซิเตอร์และอินดักเตอร์ที่มีเฟสสมคลย์ ในรูปที่ 1.4(b) จะเป็นการแสดงให้เห็นถึงกระแสอินพุทของคอนเวอร์เตอร์นำหน้าแรงดันอินพุทอยู่  $90^\circ$



รูปที่ 1.4 การสร้างวาร์ชนิดแหล่งจ่ายกระแส โดยซีทูตีซีคอนเวอร์เตอร์

1.4(a) รูปคลื่นการคอมมิวเตทแบบธรรมชาติโดยจ่ายวาร์ในสภาวะที่ล้าหลัง

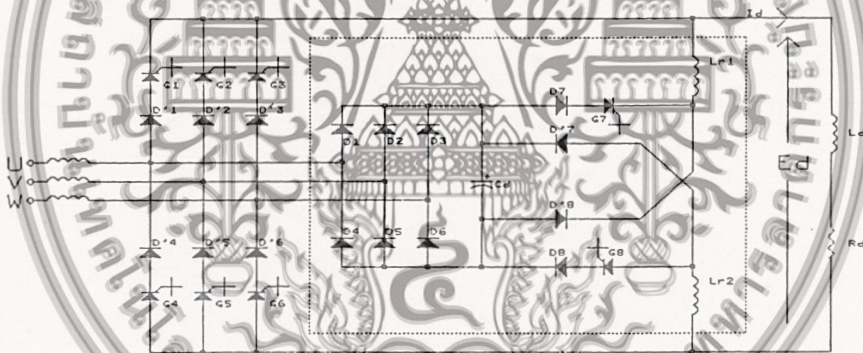
1.4(b) รูปคลื่นการคอมมิวเตทแบบบังคับโดยจ่ายวาร์ในสภาวะที่นำหน้า

## บทที่ 2

### วงจรกำลัง และวงจรช่วย

#### 2.1 วงจรกำลังหลัก

ในรูปที่ 2.1 เป็นวงจรที่ประกอบด้วยเรกติฟาย์ที่ควบคุมแบบพีดับบลิวเอ็ม 3 เฟส วงจรช่วย แสดงอยู่ในเส้นประ ในส่วนเรกติฟาย์ประกอบด้วยจีทีโอ 6 ตัว ( $G_1$  ถึง  $G_6$ ) มีขีดความสามารถทนต่อแรงดันย้อนกลับ โดยใช้สัญญาณเกณฑ์ในการควบคุมการทำงาน รูปแบบพีดับบลิวเอ็มทางด้านอินพุทจะแปรเปลี่ยนตามความกว้างของพัลส์ และตัวรีแอกเตอร์ทางด้านโวลต์จี้จะเป็นตัวช่วยทำให้เรียบขึ้นจากรูปที่ 2.2 (a) และ (b) แสดงถึงความสัมพันธ์ของแรงดันโวลท์โวลท์ที่คร่อมทางด้านโวลต์จี้เทียบกับสัญญาณเกณฑ์และรูปแบบแรงดันเอาท์พุท  $E_a$  กับรูปแบบกระแสอินพุท  $I_u, I_v, I_w$  แสดงในรูปที่ 2.2 (c) ถึง (f) ตามลำดับ ในทางปฏิบัติแล้วผลของสวิตช์แอกแทนซ์ของแหล่งจ่ายไฟเอซี ที่เกิดขึ้นจะทำให้เกิดแรงดัน สไปคส์ที่มีค่าสูง ซึ่งส่งผลให้ขณะที่เกิดการคอมมิวเตทของจีทีโอแต่ละตัวในขณะนั้น อาจทำให้จีทีโอเบรคความได้ เพื่อแก้ปัญหานี้ จึงมีการออกแบบวงจรช่วยที่แสดงในกรอบเส้นประ



รูปที่ 2.1 แสดงวงจรกำลังหลัก และวงจรช่วย

จีทีโอบางชนิดต้องต่ออนุกรมกับตัวไดโอด เนื่องจากตัวมันเองไม่มีขีดในการทนแรงดันย้อนกลับ ในการทำงานตามความเป็นจริง ถ้าต่อไดโอดอนุกรมกับตัวจีทีโอแล้วจะ เป็นการเพิ่มพิกัดอัตราการทนแรงดันทั้งทางด้านฟอร์เวิร์ด และรีเวอร์สได้สูงขึ้น

การนำและหยุดนำกระแสของจีทีโอควบคุมที่สัญญาณเกณฑ์โดยตรง ดังนั้น การคอมมิวเตทของวงจรจะเป็นแบบเชิงบังคับที่สามารถควบคุมได้ ในวงจรสับเบอรั  $R_s, C_s, D_s$  คร่อมตัวจีทีโอเป็นตัวช่วยลดค่าอัตราการเพิ่มแรงดัน ( $dv/dt$ ) และจำกัดค่าแรงดันสไปคส์สูงสุดซึ่งเกิดจากผลของสเตรย์อินดักแตนซ์ในจุดต่อของขาวาโนด และคาโอด

## 2.2 วงจรช้วย

นางวงจรช้วยที่ประกอบด้วยไดโอด 3 เฟส (D<sub>1</sub> ถึง D<sub>6</sub>), Ca , G<sub>7</sub> , G<sub>8</sub> และวงจรถ่วงกัน (Lr<sub>1</sub> , Lr<sub>2</sub> , D<sub>7</sub> , D<sub>8</sub>) ตัวไดโอดทั้งหกนางวงจรจะต่อระหว่างคู่สายของไฟเอชไอไลน์มายัง Ca เมื่อใดก็ตามที่เกิดสลิปด์ ระดับของแรงดันไลน์ที่ไลน์มีค่ามากกว่าระดับแรงดันที่ตกคร่อม Ca (E<sub>CD</sub>) คาปาซิเตอร์ Ca จะเป็นตัวเก็บพลังงานคอมมิวเตทที่เกิดขึ้นในสลิคเกจรีแอกแตนซ์ของแหล่งจ่ายไฟเอชไอ โดยจะมีการคายพลังงานไปทางโพลติดีซีด้วยการควบคุม G<sub>7</sub> , G<sub>8</sub> ให้นำกระแสพร้อมกันในช่วงเวลาสั้นๆ  $\tau$  ซึ่งสามารถรับได้ในหน่วย  $\mu$ S หลังจากเสร็จสิ้นการคอมมิวเตทนางวงจรหลัก ขณะที่ G<sub>7</sub> และ G<sub>8</sub> หยุดนำกระแส Lr<sub>1</sub> , Lr<sub>2</sub> และ D<sub>7</sub>,D<sub>8</sub> นางวงจรช้วยจะคายพลังงานที่สะสมอยู่ใน Lr<sub>1</sub> , Lr<sub>2</sub> มาเก็บไว้ใน Ca โดยผ่านฟรี้วีลลิ่งลูป (Lr<sub>2</sub>-D<sub>7</sub>-Ca-D<sub>8</sub>-Lr<sub>1</sub>-load)จะทำให้กระแสทางด้านโพลติดีซี (Ra) นั้นเรียบ

อุปกรณ์ที่ต้องระบุค่าไว้ นางวงจรหลักมีดังนี้

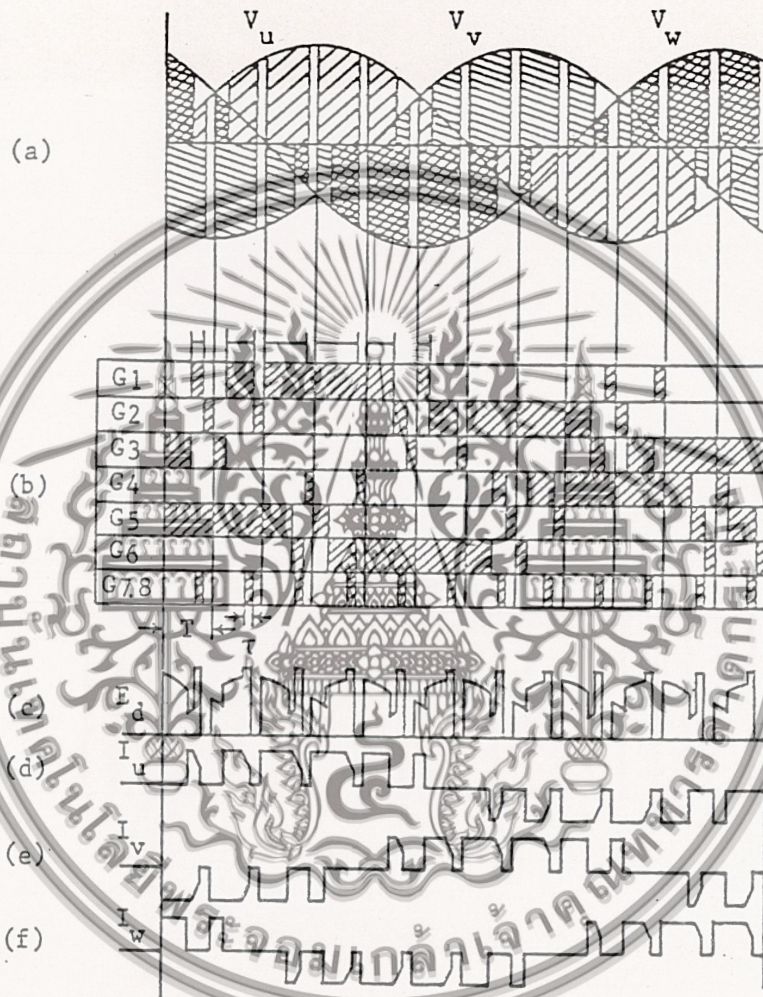
$$\begin{aligned} Lr_1 &= Lr_2 = 5 \text{ mH} \\ L_d &= 400 \text{ mH} \\ C_d &= 100 \text{ } \mu\text{F} \\ R_s &= 74 \text{ โอห์ม} \\ C_s &= 0.47 \text{ } \mu\text{F} \end{aligned}$$

นางวงจรหลักที่เป็นระบบควบคุมแบบอนาลอก จะมีจำนวนครั้งของการคอมมิวเตท เท่ากับ 12 ครั้งในหนึ่งไซเคิลของความเร็ว ซึ่งจะเกิดขึ้นสลับกันระหว่างอุปกรณ์แรงคิตฟายส่วนบน และล่าง และในการควบคุมแบบดิจิตอลไม่ว่าจะเป็นแบบ 12 , 18 , 24 หรือ 30 พัลส์ การคอมมิวเตทของวงจรมีค่าเท่ากับจำนวนพัลส์ในหนึ่งไซเคิลของแหล่งจ่ายไฟ ซึ่งจะเกิดขึ้นสลับกัน ระหว่างอุปกรณ์จีโอส่วนบนและส่วนล่าง ขณะที่จีโอตัวหนึ่งนำกระแสในส่วนล่าง (หรือบน) ของวงจรถ่วง 3 เฟส จีโอที่โานส่วนบน (หรือล่าง) นางจรถ่วงเดียวกัน จะคอมมิวเตทไปยังจีโออีกตัวหนึ่งในส่วนบนเหมือนกัน เพื่อที่จะลดฮาร์โมนิคลำดับต่ำในกระแสเอชไอไลน์ และปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังอินพุทของคอนเวอร์เตอร์ จะต้องให้กระแสอินพุทเอชไอไลน์ทำงานในรูปแบบพีดับบลิวเอ็ม รูปแบบกระแสพีดับบลิวเอ็ม ที่ใช้ในคอนเวอร์เตอร์นี้สามารถเปลี่ยนแปลงจำนวนพัลส์ได้เป็น 6, 9, 12 หรือ 15 พัลส์ได้ โดยมีตัวประกอบความกว้างพัลส์ที่หาจากการคำนวณและเงื่อนไขที่กำหนดคิให้ว่าขนาดของฮาร์โมนิคลำดับต่ำ ขึ้นอยู่กับจำนวนพัลส์ที่พิจารณาถูกจำกัดในระดับต่ำ กระแสพีดับบลิวเอ็มยังสามารถควบคุมการเลื่อนเฟสได้ทั้งนำหน้าและล่าหลัง ซึ่งเป็นลักษณะที่สำคัญของการใช้คอนเวอร์เตอร์นี้ในการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังของระบบ

การสร้างและควบคุมรูปกระแสพีดับบลิวเอ็ม สามารถทำได้ทั้งแบบอนาลอก และแบบดิจิตอล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในกรณีนี้สร้างจากวงจรถอดลอก ค่าความกว้างของฟิล์มทั้งหกในครึ่งไซเคิลจะมีอัตราส่วนคงที่ ดังนี้คือ 1:2:3:3:2:1 ขนาดของกระแสที่ระดับลิวเอียมนี้ ควบคุมโดยตรงได้จากค่าไหลต  $R_d$  ในวงจรถอดหรือ โดยการควบคุมตามความกว้างฟิล์มในวงจรถอดคุม ส่วนในวงจรถอดคุมแบบดิจิทัลนั้นสามารถควบคุมขนาดและความกว้างของกระแสที่ระดับลิวเอียม , จำนวนฟิล์ม และมุมเลื่อนเฟสของกระแสที่ระดับลิวเอียม



รูปที่ 2.2 การกำเนิดของรูปแบบกระแสที่ระดับลิวเอียม

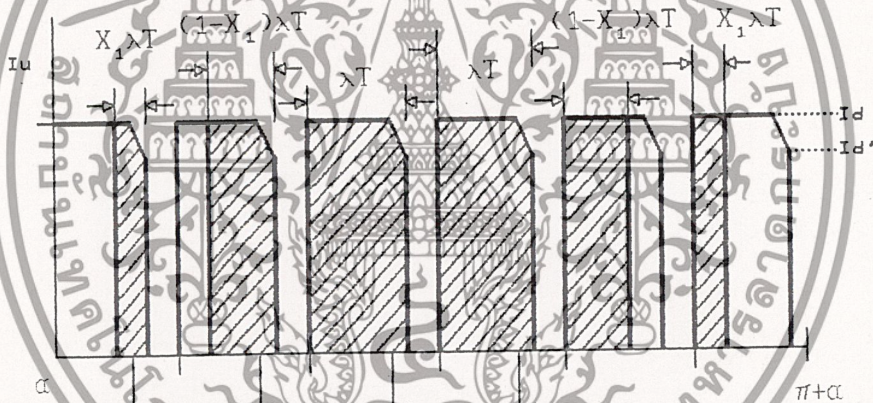
- (a) แหล่งจ่ายแรงดัน 3 เฟส ( $V_u$ ,  $V_v$  และ  $V_w$ )
- (b) รูปแบบสัญญาณเกต ( $G_1$  ถึง  $G_8$ )
- (c) แรงดันทางด้านเอาน์พุท ( $E_d$ )
- (d)-(f) กระแสเอซีไลน์แบบที่ระดับลิวเอียม ทางด้านอินพุท ที่ 6-ฟิล์ม ( $I_u$ ,  $I_v$  และ  $I_w$ )

### บทที่ 3

## การวิเคราะห์องค์ประกอบฮาร์โมนิคในกระแสอินพุทเอซีไลน์

### 3.1 การวิเคราะห์กระแสเอซีไลน์อินพุทแบบพีคดับลิวเอ็ม

ในการที่จะลดกระแสฮาร์โมนิคอันดับต่ำๆ และการปรับปรุงค่าอินพุทเพาเวอร์แฟกเตอร์ของคอนเวอร์เตอร์ จะต้องทำให้รูปแบบกระแสอินพุทจาก แหล่งจ่ายไฟเอซี เป็นพีคดับลิวเอ็มให้ได้ และวิธีการที่นำเสนอเหล่านี้มีทั้งข้อดีและข้อเสีย แต่รูปแบบพีคดับลิวเอ็มที่นำเสนอในบทความนี้ จะใช้เฉพาะเจาะจงกับคอนเวอร์เตอร์ชนิด Phase-shift Control โดยมีการปรับปรุงรูปแบบกระแสอีกเล็กน้อย รูปแบบนี้จะมีทั้งหมด 6 พัลส์ในครึ่งไซเคิลของความถี่ของแหล่งจ่ายไฟ ซึ่งแสดงไว้ในพื้นที่แรงแจงในรูปที่ 3.1 พร้อมทั้งองค์ประกอบของฮาร์โมนิคอันดับต่ำๆ ก็ถูกกำจัดออกไปด้วย ดังนั้น คอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ จีทีโอ ชนิดนี้สามารถที่จะ เลื่อนมุมของกระแสเฟสได้โดยไม่ต้องทำให้เกิดกระแสที่ฮาร์โมนิคอันดับต่ำๆ



รูปที่ 3.1 กระแสอินพุทเอซีไลน์ชนิดพีคดับลิวเอ็มในครึ่ง ไซเคิลบวก

รูปแบบกระแสในแต่ละ เฟสจะถูกควบคุมให้เป็นแบบพีคดับลิวเอ็มที่มี 6 พัลส์ ในครึ่ง ไซเคิลของไฟกระแสสลับ ขนาดของแต่ละพัลส์จะเท่ากับกระแสเอาต์พุตที่เป็นค่า DC ( $I_d$ ) ค่า อัตราส่วนความกว้างของพัลส์ (Pulse Width ratio) จากพัลส์ลูกแรกจนถึงลูกสุดท้ายจะมีรูปแบบดังนี้

$$X_1 \lambda T : (1-X_1) \lambda T : \lambda T : \lambda T : (1-X_1) \lambda T : X_1 \lambda T \quad (\text{ดูรูปที่ 3.1})$$

ซึ่ง  $\lambda$  คือ ค่าของมอดูเลชันแฟกเตอร์ (Modulation factor) ของพัลส์พีคดับลิวเอ็ม และยังสามารถที่จะปรับค่าได้ตั้งแต่ 0 ถึง 1

$T$  คือ ค่า  $1/12$  เท่าของคาบเวลาของแรงจ่ายไฟหรือเท่ากับ  $\pi/6$  (ในกรณีของรูปแบบ 6 พัลส์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$X_1$  คือ ค่าตัวแปรซึ่งขึ้นอยู่กับค่าตัวประกอบมอดูละชั้น ( $\lambda$ ) ตามวิธีการที่เสนอนี้  $X_1$  จะถูกควบคุมโดยค่า  $\lambda$  โดยอัตโนมัติ โดยที่จะต้องทำให้ค่าฮาร์โมนิคอันดับที่ 5 และ 7 มีค่าน้อยที่สุด ( $\sqrt{(I^2_5+I^2_7)}/I_{11}$ )

ค่าอัตราส่วนของความกว้างพัลส์ที่กล่าวมาแล้วนั้น ใช้สำหรับวิเคราะห์ที่ความกว้างของ  $\tau$  พัลส์มีค่าเป็นศูนย์ หมายความว่าช่วง เวลาการถ่ายเทกระแสจาก Cd ไปยังด้านโพลิตีซี โดยผ่านทางจีทีโอ G7 และ G8 ในวงจรช่วยนั้น มีค่าน้อยมากจนสามารถละทิ้งได้ (เราจะพิจารณาให้มีค่าใกล้เคียงกับศูนย์) แต่ในทางปฏิบัติจริง ๆ นั้น ค่าความกว้างของพัลส์มีค่าไม่เท่ากับศูนย์ แต่สามารถที่จะปรับได้ ตั้งแต่  $10\mu s$  จนถึง  $X_1\lambda T$  ( $\mu s$ ) ณ ช่วงสุดท้ายของทุก ๆ 4 พัลส์แรก ทั้งทางด้านบวก และลบของกระแสทางด้านเอซีอินพุต ดังนั้นถ้าเราพิจารณาว่ามีค่า  $\tau$  เกิดขึ้น รูปแบบของกระแส พีคดับลิวเอ็ม จะมีรูปร่างเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 2 ในส่วนที่แรกเงาไว้ ขนาดของพัลส์กระแสทั้ง 6 พัลส์ซึ่งแก้ไขแล้วในลำดับตั้งแต่พัลส์แรกจนถึงพัลส์สุดท้าย (ขณะที่  $\alpha=0$ )

พัลส์แรก

$$I_d : (1-X_1)\lambda T \ll t \ll \lambda T - \tau$$

$$I_1 : \lambda T - \tau \ll t \ll \lambda T$$

พัลส์ที่สอง

$$I_d : T + X_1\lambda T \ll t \ll T + \lambda T - \tau$$

$$I_2 : T + \lambda T - \tau \ll t \ll T + \lambda T$$

พัลส์ที่สาม

$$I_d : 2T \ll t \ll 2T + \lambda T - \tau$$

$$I_3 : 2T + \lambda T - \tau \ll t \ll 2T + \lambda T$$

พัลส์ที่สี่

$$I_d : 3T \ll t \ll 3T + \lambda T - \tau$$

$$I_4 : 3T + \lambda T - \tau \ll t \ll 3T + \lambda T$$

พัลส์ที่ห้า

$$I_d : 4T \ll t \ll 4T + (1-X_1)\lambda T$$

พัลส์ที่หก

$$I_d : 5T \ll t \ll 5T + X_1\lambda T$$

โดยที่

$$I_1 = (I_d' - I_d)t/\tau + I_d' + (I_d - I_d')\lambda T/\tau$$

$$I_2 = (I_d' - I_d)t/\tau + I_d' + (I_d - I_d')\lambda T/\tau - (I_d' - I_d)T/\tau$$

$$I_3 = (I_d' - I_d)t/\tau + I_d' + (I_d - I_d')\lambda T/\tau - 2(I_d' - I_d)T/\tau$$

$$I_4 = (I_d' - I_d)t/\tau + I_d' + (I_d - I_d')\lambda T/\tau - 3(I_d' - I_d)T/\tau$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ

$$I_1 = (Id' - Id)t/\tau + \lambda T Id/\tau + (1 - \lambda T/\tau) Id'$$

$$I_2 = (Id' - Id)t/\tau + (T + \lambda T) Id/\tau + (1 - \lambda T/\tau - T/\tau) Id'$$

$$I_3 = (Id' - Id)t/\tau + (2T/\tau + \lambda T/\tau) Id + (1 - \lambda T/\tau - 2T/\tau) Id'$$

$$I_4 = (Id' - Id)t/\tau + (3T/\tau + \lambda T/\tau) Id + (1 - \lambda T/\tau - 3T/\tau) Id'$$

เมื่อมีการควบคุมการเลื่อนเฟส รูปแบบกระแสก็ยังคงเหมือนเดิมเพียงแต่มุมของเฟสจะเปลี่ยนไปตามค่ามุม  $\alpha$  ดังนั้น รูปแบบกระแสที่ดับบลิวเอ็มในกรณีนี้สามารถที่จะแสดงได้ตามสมการต่อไปนี้แทนมุมของมุม  $\alpha$  (Phase-shift Angle) ซึ่งแสดงไว้ดังนี้

ฟิลส์แรก

$$Id : (1 - X_1)\lambda T + \alpha/\omega \leq t \leq \lambda T - \tau + \alpha/\omega$$

$$I_1 : \lambda T - \tau + \alpha/\omega \leq t \leq \lambda T + \alpha/\omega$$

ฟิลส์ที่สอง

$$Id : T + X_1 \lambda T + \alpha/\omega \leq t \leq T + \lambda T - \tau + \alpha/\omega$$

$$I_2 : T + \lambda T - \tau + \alpha/\omega \leq t \leq T + \lambda T + \alpha/\omega$$

ฟิลส์ที่สาม

$$Id : 2T + \alpha/\omega \leq t \leq 2T + \lambda T - \tau + \alpha/\omega$$

$$I_3 : 2T + \lambda T - \tau + \alpha/\omega \leq t \leq 2T + \lambda T + \alpha/\omega$$

ฟิลส์ที่สี่

$$Id : 3T + \alpha/\omega \leq t \leq 3T + \lambda T - \tau + \alpha/\omega$$

$$I_4 : 3T + \lambda T - \tau + \alpha/\omega \leq t \leq 3T + \lambda T + \alpha/\omega$$

ฟิลส์ที่ห้า

$$Id : 4T + \alpha/\omega \leq t \leq 4T + (1 - X_1)\lambda T + \alpha/\omega$$

ฟิลส์ที่หก

$$Id : 5T + \alpha/\omega \leq t \leq 5T + X_1 \lambda T + \alpha/\omega$$

ซึ่ง

$$I_1 = (Id' - Id)t/\tau + Id' + (Id - Id')( \lambda T + \alpha/\omega )/\tau$$

$$I_2 = (Id' - Id)t/\tau + Id' + (Id - Id')( \lambda T + \alpha/\omega )/\tau - (Id' - Id)T/\tau$$

$$I_3 = (Id' - Id)t/\tau + Id' + (Id - Id')( \lambda T + \alpha/\omega )/\tau - 2(Id' - Id)T/\tau$$

$$I_4 = (Id' - Id)t/\tau + Id' + (Id - Id')( \lambda T + \alpha/\omega )/\tau - 3(Id' - Id)T/\tau$$

หรือ

$$I_1 = (Id' - Id)t/\tau + (\lambda T + \alpha/\omega) Id/\tau + (1 - \lambda T/\tau - \alpha/\omega\tau) Id'$$

$$I_2 = (Id' - Id)t/\tau + (T + \lambda T + \alpha/\omega) Id/\tau + (1 - \lambda T/\tau - \alpha/\omega\tau - T/\tau) Id'$$

$$I_3 = (Id' - Id)t/\tau + (2T/\tau + \lambda T/\tau + \alpha/\omega\tau) Id$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานที่ 12 การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$+ (1-\lambda T/\tau-\alpha/\omega\tau-2T/\tau)Id'$$

$$I_4 = (Id'-Id)t/\tau + (3T/\tau+\lambda T/\tau+\alpha/\omega\tau)Id$$

$$+ (1-\lambda T/\tau-\alpha/\omega\tau-3T/\tau)Id'$$

รูปแบบกระแสที่กล่าวไว้นี้ ส่งผลให้เกิดการคอมมิวเตชันในวงจรหลักเป็นจำนวน 12 ครั้ง ใน 1 ไซเคิลของแหล่งจ่ายไฟ และกระแสฮาร์มอนิกอันดับต่ำ ๆ สามารถที่จะถูกจำกัดได้เป็นอย่างดี ซึ่งจะแสดงการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

### 3.2 รูปแบบกระแสที่ดับลิวเอ็มแบบ N พัลส์กับค่าตัวประกอบความกว้างพัลส์ที่เหมาะสม

เป็นที่ทราบกันดีโดยทั่วไปว่า คุณลักษณะทางด้านอินพุต เช่นว่าองค์ประกอบฮาร์มอนิกของกระแสเอชไอไลน์ และค่าอินพุตเพาเวอร์แฟคเตอร์ มีผลกระทบโดยตรงกับการทำงานของตัวคอนเวอร์เตอร์ ดังนั้นการที่จะเพิ่มขีดความสามารถของตัวคอนเวอร์เตอร์ จะต้องทำให้องค์ประกอบฮาร์มอนิกของกระแสเอชไอไลน์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งองค์ประกอบลำดับต่ำๆ มีค่าน้อย หรือถูกทำให้หมดไป และจะต้องทำให้ค่าอินพุตเพาเวอร์แฟคเตอร์มีค่าสูง ด้วยเหตุนี้เองตัวคอนเวอร์เตอร์ จะต้องทำงานอยู่ในโหมดดับลิวเอ็ม นั่นคือกระแสเอชไอไลน์จะถูกควบคุมในรูปแบบดับลิวเอ็ม ซึ่งแสดงไว้ในรูปที่ 3.2 ถึง 3.5 ในบทนี้จะพิจารณาถึงองค์ประกอบฮาร์มอนิกของกระแสเอชไอไลน์ทางด้านอินพุตและค่าอินพุตเพาเวอร์แฟคเตอร์มีฐาน โดยใช่วิธีการวิเคราะห์แบบอนุกรมฟูเรียร์ ซึ่งในการวิเคราะห์ เราจะพิจารณาถึงผลกระทบจำนวนพัลส์ (6-, 9-, 12- และ 15-พัลส์) ที่มีต่อองค์ประกอบฮาร์มอนิกของกระแสเอชไอไลน์ โดยที่จะวิเคราะห์องค์ประกอบฮาร์มอนิกของกระแสที่ดับลิวเอ็มแบบ 6-พัลส์ ซึ่งมีค่าอัตราส่วนความกว้างของพัลส์คงที่เปรียบเทียบกับอัตราส่วนความกว้างของพัลส์ที่เหมาะสม (optimum)

จากรูปที่ 3.2 ถึง 3.5 จะเห็นได้ว่าค่าตัวประกอบความกว้างพัลส์  $X_1$  และ  $X_2$  มีค่าไม่คงที่ แต่จะแปรเปลี่ยนไปตามค่าองค์ประกอบฮาร์มอนิกลำดับต่ำๆ ของช่วงหนึ่งๆ ที่มีค่าน้อยที่สุดระหว่างที่เกิดการเปลี่ยนค่าของตัวประกอบมอดดูเลชัน ( $\lambda$ ) จาก 0 ถึง 1 อีกทั้งคาบเวลาการคายประจุ  $\tau$  ของรูปกระแสเหล่านี้ ก็ยังแปรเปลี่ยนกับจำนวนพัลส์ และตัวประกอบมอดดูเลชัน  $\lambda$  อีกด้วย เงื่อนไขของการควบคุมการเปลี่ยนแปลงค่าของ  $X_1, X_2$  และ  $\tau$  สามารถแสดงได้ด้วยทางคณิตศาสตร์ดังนี้

1) สำหรับ 6-พัลส์

$$I_t = \sqrt{I_5^2 + I_7^2} = \text{ค่าต่ำสุด} \quad (3.1)$$

2) สำหรับ 9-พัลส์

$$I_t = \sqrt{I_5^2 + I_7^2 + I_{11}^2 + I_{13}^2} = \text{ค่าต่ำสุด} \quad (3.2)$$

3) สำหรับ 12-พัลส์

$$I_t = \sqrt{I_5^2 + I_7^2 + I_{11}^2 + I_{13}^2 + I_{17}^2 + I_{19}^2} = \text{ค่าต่ำสุด} \quad (3.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งาน 13 การศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4) สำหรับ 15-พัลส์

$$I_t = \sqrt{I_5^2 + I_7^2 + I_{11}^2 + I_{13}^2 + I_{17}^2 + I_{19}^2 + I_{23}^2 + I_{25}^2} = \text{ค่าต่ำสุด} \quad (3.4)$$

ทั้งแบบ 6-, 9-, 12- และ 15-พัลส์นั้น ค่าคาบเวลาการคายประจุคิดจากสมการ

$$\tau = X_1 \lambda T / 2m \quad (3.5)$$

โดยที่ค่า  $m$  คือจำนวนพัลส์  $T$  ที่กว้างที่สุดของกระแสฟันดาเมนทอล ในช่วงเวลา  $\pi/3$  เรเดียนดังในรูปที่ 3.2 จะได้  $m=2$  ดังนั้น สำหรับรูปแบบกระแสที่ดับลิวเอ็ม 6-, 9-, 12- และ 15-พัลส์นั้น จำนวนพัลส์ที่กว้างที่สุดคือ  $m=2, 3, 4$  และ 5 ตามลำดับ

คอนเวอร์เตอร์แบบที่ดับลิวเอ็มนี้สามารถที่จะเลื่อนเฟสของกระแสได้ทั้งนำหน้าและล่าหลัง ซึ่งในการเลื่อนเฟสนั้นจะควบคุมให้รูปแบบกระแสสามารถเลื่อนเฟสได้โดยเทียบกับแหล่งจ่ายแรงดัน 3 เฟส โดยการเลื่อนเฟสของรูปสัญญาณเกิด ดังนั้นในการพิจารณารูปคลื่นกระแสที่ดับลิวเอ็มแบบ 6-, 9-, 12- และ 15-พัลส์ในครึ่งไซเคิลโดยเริ่มจาก 0 จนถึง  $\pi$  ดังแสดงในรูปที่ 3.1 ถึง 3.4 จะเห็นว่ารูปคลื่นสมมาตรกับแกน  $x=0$  ทั้งนี้เนื่องจากว่า  $i(\omega t - \alpha)$  มีค่าเท่ากับ  $-i(\omega t - \alpha + \pi)$  ดังนั้น องค์ประกอบฮาร์โมนิกลำดับคี่จะไม่เกิดขึ้น แต่จะเกิดองค์ประกอบฮาร์โมนิกลำดับคู่ขึ้น เราสามารถที่จะทำการคำนวณขนาดองค์ประกอบฮาร์โมนิกเหล่านี้ โดยวิธีการวิเคราะห์แบบอนุกรมฟูเรียร์ซึ่งจะได้ว่ากระแสรวมของกระแสเอชไอไลน์ทางด้านอินพุท  $I_u$  (เฟส U) องค์ประกอบกระแสฮาร์โมนิกลำดับคู่คือ  $I_{\lambda_n}$  และค่าอินพุทเพาเวอร์แฟคเตอร์มูลฐาน PF1 จะแสดงไว้ในเทอมของสัมประสิทธิ์ฟูเรียร์ดังสมการที่ (3.6), (3.7), (3.8) ตามลำดับ

$$I_u = \sum_{n(\text{odd})=1}^{\infty} [ a_{\lambda n} \cos n\omega t + b_{\lambda n} \sin n\omega t ] \quad (3.6)$$

$$I_{\lambda n} = (a_{\lambda n}^2 + b_{\lambda n}^2)^{1/2} \quad (3.7)$$

$$\text{PF1} = \cos[\tan^{-1}(a_{\lambda 1}/b_{\lambda 1})] \quad (3.8)$$

โดยที่

$$a_{\lambda n} = (2/\pi) \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} i(\omega t) \cos(n\omega t) d\omega t \quad (3.9)$$

$$b_{\lambda n} = (2/\pi) \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} i(\omega t) \sin(n\omega t) d\omega t \quad (3.10)$$

$$a_{\lambda 1} = (2/\pi) \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} i(\omega t) \cos(\omega t) d\omega t \quad (3.11)$$

$$b_{\lambda_1} = (2/\pi) \int_{\alpha}^{\pi+\alpha} i(\omega t) \text{SIN}(\omega t) d\omega t \quad (3.12)$$

เพื่อที่จะหาค่าองค์ประกอบฮาร์โมนิกลำดับที่  $n$  นั้นฟังก์ชันที่แปรเปลี่ยนตามเวลาของกระแสที่ดับลิวดิเอ็มในทุกาพัลส์ (6-, 9-, 12- และ 15พัลส์) ในครึ่งไซเคิลบวกจะต้องนำมาแทนค่าในสมการ (3.9) และ (3.10) เสียก่อนเพื่อที่จะหาสัมประสิทธิ์ฟูเรียร์  $a_{\lambda n}$  และ  $b_{\lambda n}$  จากนั้นจึงนำสัมประสิทธิ์ทั้ง 2 ตัวมาแทนลงในสมการที่ (3.7) ซึ่งเราจะได้องค์ประกอบฮาร์โมนิกอันดับที่  $n$  ออกมา ซึ่งในบทนี้จะแสดงถึงผลการคำนวณขั้นสุดท้ายของสัมประสิทธิ์ฟูเรียร์  $a_n, b_n$  สำหรับ 6-, 9-, 12- และ 15-พัลส์ดังสมการข้างล่างนี้

กรณีรูปแบบกระแสที่ดับลิวดิเอ็ม 6-พัลส์

$$a_{\lambda n} = \frac{8 \cdot \text{COS } n\omega T \cdot \text{COS } n\omega T \cdot [ 2 \cdot \frac{\text{SIN } n\omega\tau}{n\omega\tau} \cdot \frac{\text{SIN } n\{(3+\lambda)\omega T - \omega\tau + \alpha\}}{2} - \text{SIN } n\{7\omega T + \alpha\} ] \cdot I_a + \frac{8 \cdot \text{SIN } 2n\omega T \cdot \text{COS } n\{(5+\lambda)\omega T + \alpha\}}{2} \cdot \text{COS } n\{(1+(2X_1-1)\lambda)\omega T\} \cdot I_a + \frac{8 \cdot \text{COS } n\omega T \cdot \text{COS } n\omega T \cdot [\text{SIN } n\{(3+\lambda)\omega T + \alpha\} - 2 \cdot \frac{\text{SIN } n\omega\tau}{n\omega\tau} \cdot \frac{\text{SIN } n\{(3+\lambda)\omega T - \omega\tau + \alpha\}}{2}] \cdot I_a'}{2} \quad (3.13)$$

$$b_{\lambda n} = \frac{8 \cdot \text{COS } n\omega T \cdot \text{COS } n\omega T \cdot [\text{COS } n\{7\omega T + \alpha\} - 2 \cdot \frac{\text{SIN } n\omega\tau}{n\omega\tau} \cdot \frac{\text{SIN } n\{(3+\lambda)\omega T - \omega\tau + \alpha\}}{2}] \cdot I_a + \frac{8 \cdot \text{SIN } 2n\omega T \cdot \text{SIN } n\{(5+\lambda)\omega T + \alpha\}}{2} \cdot \text{COS } n\{(1+(2X_1-1)\lambda)\omega T\} \cdot I_a + \frac{8 \cdot \text{COS } n\omega T \cdot \text{COS } n\omega T \cdot [\frac{2}{n\omega\tau} \cdot \text{SIN } n\omega\tau \cdot \text{COS } n\{(3+\lambda)\omega T - \omega\tau + \alpha\} - \text{COS } n\{(3+\lambda)\omega T + \alpha\}]}{2}] \cdot I_a'}{2} \quad (3.14)$$

กรณีรูปแบบกระแสที่ดับลิวาเอ็ม 9-พัลส์

$$\begin{aligned}
 a_{\lambda n} = & \frac{8 \cdot \cos \frac{3n\omega T}{2} \cdot (\cos n\omega T + 0.5) \cdot \left[ \frac{2 \cdot \sin \frac{n\omega \tau}{2}}{n\omega \tau} \right]}{n\pi} \\
 & \frac{\sin \frac{n\{(5+\lambda)\omega T - \omega \tau + \alpha\}}{2} - \sin \frac{n(11\omega T + \alpha)}{2}}{2} \cdot I_a + \frac{8 \cdot \sin \frac{3n\omega T}{2}}{n\pi} \\
 & \cdot \frac{\cos \frac{n\{(4+\lambda)\omega T + \alpha\}}{2} \cdot \left[ \cos \frac{n\{2\omega T + (2X_1 - 1)\lambda\omega T\} + 0.5}{2} \right]}{2} \cdot I_a \\
 & + \frac{8 \cdot \cos \frac{3n\omega T}{2} \cdot (\cos n\omega T + 0.5) \cdot \left[ \frac{\sin \frac{n\{(5+\lambda)\omega T + \alpha\}}{2}}{2} \right]}{n\pi} \\
 & - \frac{2 \cdot \sin \frac{n\omega \tau}{2} \cdot \sin \frac{n\{(5+\lambda)\omega T - \omega \tau + \alpha\}}{2}}{n\omega \tau} \cdot I_a' \quad (3.15)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 b_{\lambda n} = & \frac{8 \cdot \cos \frac{3n\omega T}{2} \cdot (\cos n\omega T + 0.5) \cdot \left[ \frac{\cos \frac{n(11\omega T + \alpha)}{2}}{2} \right]}{n\pi} \\
 & - \frac{2 \cdot \sin \frac{n\omega \tau}{2} \cdot \cos \frac{n\{(5+\lambda)\omega T - \omega \tau + \alpha\}}{2}}{n\omega \tau} \cdot I_a + \frac{8 \cdot \sin \frac{3n\omega T}{2}}{n\pi} \\
 & \cdot \frac{\sin \frac{n\{(4+\lambda)\omega T + \alpha\}}{2} \cdot \left[ \cos \frac{n\{2\omega T + (2X_1 - 1)\lambda\omega T\} + 0.5}{2} \right]}{2} \cdot I_a \\
 & + \frac{8 \cdot \cos \frac{3n\omega T}{2} \cdot (\cos n\omega T + 0.5) \cdot \left[ \frac{2 \cdot \sin \frac{n\omega \tau}{2}}{n\omega \tau} \right]}{n\pi} \\
 & \cdot \frac{\cos \frac{n\{(5+\lambda)\omega T - \omega \tau + \alpha\}}{2} - \cos \frac{n\{(5+\lambda)\omega T + \alpha\}}{2}}{2} \cdot I_a' \quad (3.16)
 \end{aligned}$$

กรณีรูปแบบกระแสที่ดับลิวาเอ็ม 12-พัลส์

$$\begin{aligned}
 a_{\lambda n} = & \frac{16 \cdot \cos 2n\omega T \cdot \cos \frac{n\omega T}{2} \cdot \cos \frac{n\omega T}{2} \cdot \left[ \frac{2 \cdot \sin \frac{n\omega \tau}{2}}{n\omega \tau} \right]}{n\pi} \\
 & \frac{\sin \frac{n\{(7+\lambda)\omega T - \omega \tau + \alpha\}}{2} - \sin \frac{n(15\omega T + \alpha)}{2}}{2} \cdot I_a + \frac{16 \cdot \sin \frac{4n\omega T}{2}}{n\pi} \\
 & \frac{\cos \frac{n\{(11+\lambda)\omega T + \alpha\}}{2} \cdot \cos \frac{n\{2\omega T + (X_1 + X_2 - 1)\lambda\omega T\}}{2}}{2} \\
 & \frac{\cos \frac{n\{\omega T + (X_1 - X_2)\lambda\omega T\}}{2} \cdot I_a + \frac{16 \cdot \cos 2n\omega T \cdot \cos \frac{n\omega T}{2} \cdot \cos \frac{n\omega T}{2}}{n\pi}}{2}
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\left[ \frac{\text{SIN } n\{(7+\lambda)\omega T+\alpha\}}{2} - \frac{2}{n\omega\tau} \cdot \frac{\text{SIN } n\omega\tau}{2} \cdot \frac{\text{SIN } n\{(7+\lambda)\omega T-\omega\tau+\alpha\}}{2} \right] \cdot I_a' \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned} b_{\lambda n} = & \frac{16 \cdot \text{COS } 2n\omega T \cdot \text{COS } n\omega T \cdot \text{COS } \frac{n\omega T}{2} \cdot \left[ \frac{\text{COS } n(15\omega T+\alpha)}{2} - \frac{2}{n\omega\tau} \cdot \right. \\ & \left. \frac{\text{SIN } n\omega\tau}{2} \cdot \frac{\text{COS } n\{(7+\lambda)\omega T-\omega\tau+\alpha\}}{2} \right] \cdot I_a + 16 \cdot \frac{\text{SIN } 4n\omega T}{n\pi} \cdot \\ & \frac{\text{SIN } n\{(11+\lambda)\omega T+\alpha\}}{2} \cdot \frac{\text{COS } n\{2\omega T+(X_1+X_2-1)\lambda\omega T\}}{2} \cdot \\ & \frac{\text{COS } n\{\omega T+(X_1-X_2)\lambda\omega T\}}{2} \cdot I_a + 16 \cdot \frac{\text{COS } 2n\omega T \cdot \text{COS } n\omega T}{n\pi} \\ & \cdot \frac{\text{COS } n\omega T}{2} \cdot \left[ \frac{2}{n\omega\tau} \cdot \frac{\text{SIN } n\omega\tau}{2} \cdot \frac{\text{COS } n\{(7+\lambda)\omega T-\omega\tau+\alpha\}}{2} \right. \\ & \left. - \frac{\text{COS } n\{(7+\lambda)\omega T+\alpha\}}{2} \right] \cdot I_a' \quad (3.18) \end{aligned}$$

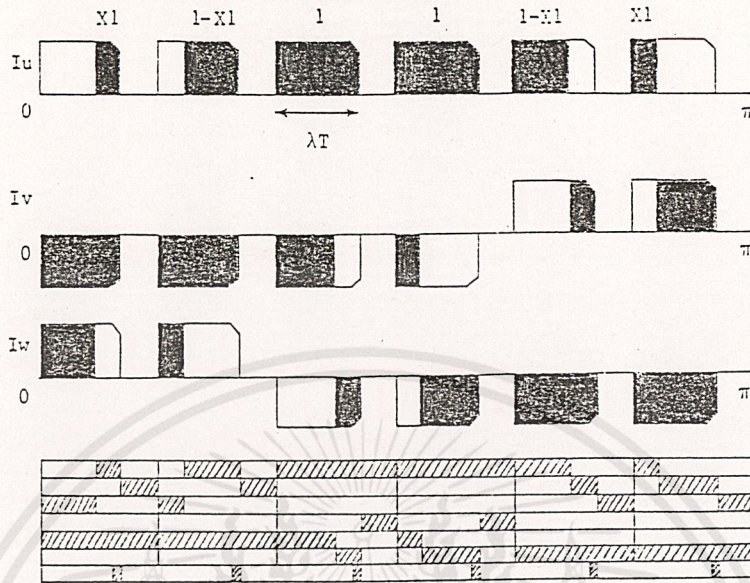
กรณีรูปแบบกระแสที่ดับลิ้าเอ็ม 15-พัลส์

$$\begin{aligned} a_{\lambda n} = & \frac{16 \cdot \text{COS } 5n\omega T \cdot (\text{COS } \frac{3n\omega T}{2} \cdot \text{COS } \frac{n\omega T+0.25}{2}) \cdot \left[ \frac{2}{n\omega\tau} \cdot \frac{\text{SIN } n\omega\tau}{2} \right. \\ & \left. \cdot \frac{\text{SIN } n\{(9+\lambda)\omega T-\omega\tau+\alpha\}}{2} - \frac{\text{SIN } n(19\omega T+\alpha)}{2} \right] \cdot I_a + 16 \cdot \frac{\text{SIN } 5n\omega T}{n\pi} \\ & \cdot \frac{\text{COS } n\{(7+\lambda)\omega T+\alpha\}}{2} \cdot \left[ \frac{\text{COS } n\{3\omega T+(X_1+X_2-1)\lambda\omega T\}}{2} \cdot \right. \\ & \left. \frac{\text{COS } n\{\omega T+(X_1-X_2)\lambda\omega T\}+0.25}{2} \right] \cdot I_a + 16 \cdot \frac{\text{COS } 5n\omega T}{n\pi} \cdot \frac{\text{COS } \frac{3n\omega T}{2}}{2} \\ & \cdot \frac{\text{COS } n\omega T+0.25}{2} \cdot \left[ \frac{\text{SIN } n\{(9+\lambda)\omega T+\alpha\}}{2} - \frac{2}{n\omega\tau} \cdot \frac{\text{SIN } n\omega\tau}{2} \right. \\ & \left. \cdot \frac{\text{SIN } n\{(9+\lambda)\omega T-\omega\tau+\alpha\}}{2} \right] \cdot I_a' \quad (3.19) \end{aligned}$$

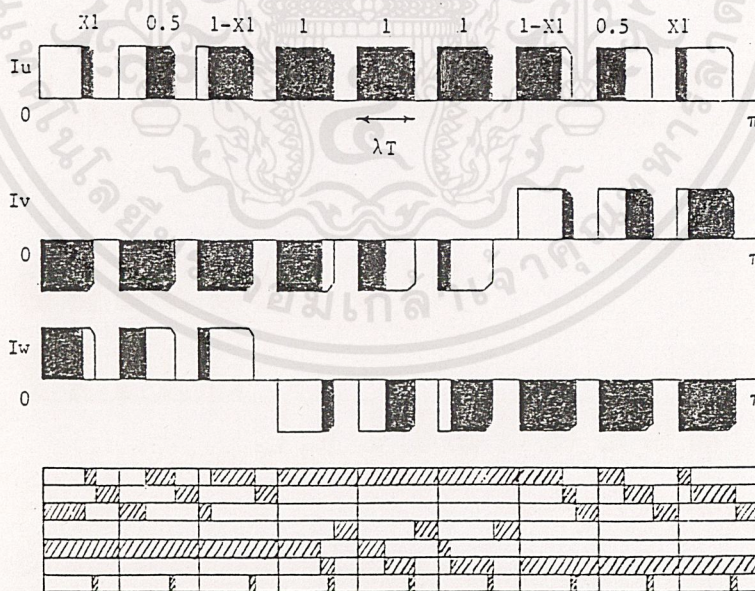
$$b_{\lambda n} = \frac{16 \cdot \text{COS } 5n\omega T \cdot (\text{COS } \frac{3n\omega T}{2} \cdot \text{COS } \frac{n\omega T+0.25}{2}) \cdot \left[ \frac{\text{COS } n(19\omega T+\alpha)}{2} \right.$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{2}{n\omega\tau} \cdot \frac{\text{SIN } \frac{n\omega\tau}{2} \cdot \text{COS } \frac{n\xi(9+\lambda)\omega T - \omega\tau + \alpha_3}{2}}{2} \cdot I_a + 16 \cdot \frac{\text{SIN } 5n\omega T}{n\pi} \cdot \\
& \frac{\text{SIN } \frac{n\xi(7+\lambda)\omega T + \alpha_3}{2} \cdot [\text{COS } \frac{n\xi 3\omega T + (\lambda_1 + \lambda_2 - 1)\lambda\omega T_3}{2}]}{2} \cdot \\
& \text{COS } \frac{n\xi\omega T + (\lambda_1 - \lambda_2)\lambda\omega T_3 + 0.25}{2} \cdot I_a + 16 \cdot \frac{\text{COS } 5n\omega T}{n\pi} \cdot \frac{(\text{COS } 3n\omega T)}{2} \\
& \cdot \frac{\text{COS } \frac{n\omega T + 0.25}{2}}{2} \cdot \left[ \frac{2}{n\omega\tau} \cdot \frac{\text{SIN } \frac{n\omega\tau}{2} \cdot \text{COS } \frac{n\xi(9+\lambda)\omega T - \omega\tau + \alpha_3}{2}}{2} \right. \\
& \left. - \text{COS } \frac{n\xi(9+\lambda)\omega T + \alpha_3}{2} \right] \cdot I_a' \tag{3.20}
\end{aligned}$$

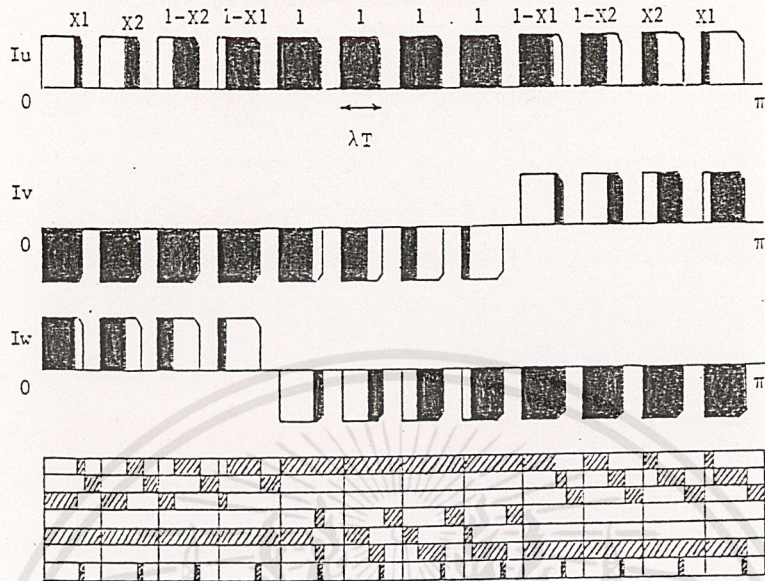




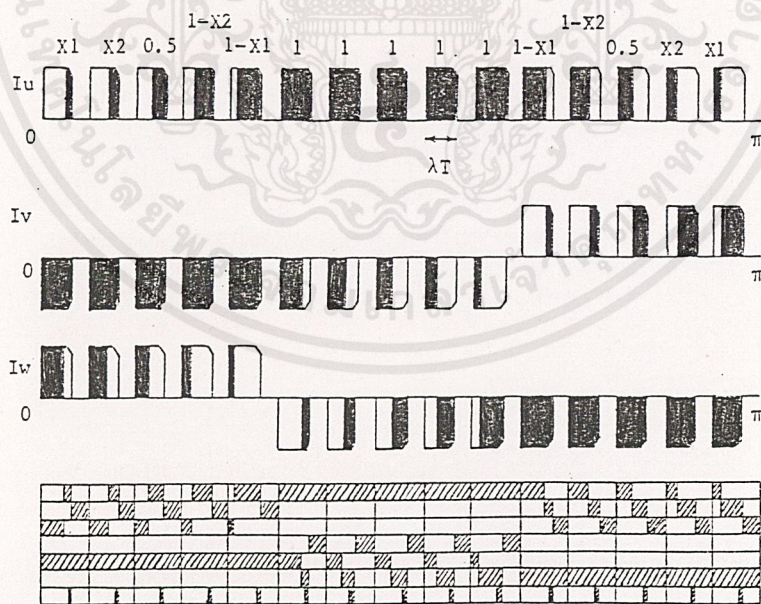
รูปที่ 3.2 รูปแบบกระแสที่ระดับลิวเอ็มครึ่งไซเคิล ชนิด 6-พัลส์  
 ขณะที่ค่าอัตราส่วนความกว้างพัลส์มีค่าเหมาะสมที่สุด ( $\lambda=0.7$ )



รูปที่ 3.3 รูปแบบกระแสที่ระดับลิวเอ็มครึ่งไซเคิล ชนิด 9-พัลส์  
 ขณะที่ค่าอัตราส่วนความกว้างพัลส์มีค่าเหมาะสมที่สุด ( $\lambda=0.7$ )



รูปที่ 3.4 รูปแบบกระแสที่ระดับลิวเอ็มครึ่งไซเคิล ชนิด 12-บิต  
 ขณะที่ค่าอัตราส่วนความกว้างพัลส์มีค่าเหมาะสมที่สุด ( $\lambda=0.7$ )



รูปที่ 3.5 รูปแบบกระแสที่ระดับลิวเอ็มครึ่งไซเคิล ชนิด 15-บิต  
 ขณะที่ค่าอัตราส่วนความกว้างพัลส์มีค่าเหมาะสมที่สุด ( $\lambda=0.7$ )

## บทที่ 4

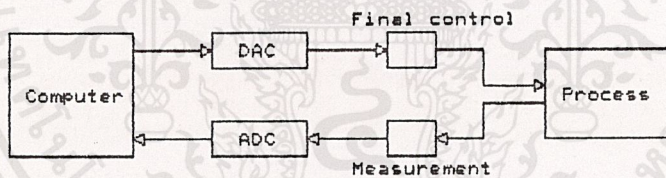
### หลักการป้อนกลับของสัญญาณ

#### 4.1 การควบคุมแบบดิจิทัล

ในการใช้งานคอมพิวเตอร์เพื่อการควบคุมตัวแปรต่าง ๆ นั้น เราเรียกวิธีการเช่นนี้ว่า การควบคุมโดยตรงแบบดิจิทัล หรือ DIRECT DIGITAL CONTROL (DDC) โดยทั่วไปแล้วนั้นการควบคุมแบบดิจิทัลจะทำได้โดยใช้คอมพิวเตอร์ ดังนั้นเราเรียกอีกว่าเป็นวิธีการควบคุมโดยตรง โดยใช้คอมพิวเตอร์ หรือ คอมพิวเตอร์โปรเซสคอนโทรล

จากรูป 4.1 แสดงถึงวงรอบการทำงานของวงจรควบคุมที่ใช้ใน DDC สังเกตว่าเราจะใช้ ADC และ DAC ในการแปลงข้อมูลกลับไปมาระหว่างสัญญาณอนาลอกกับสัญญาณดิจิทัล ซึ่งในส่วนใหญ่แล้วฟังก์ชันการทำงานของส่วนอ่านค่า (MEASUREMENT) และส่วนควบคุมขั้นสุดท้าย (FINAL CONTROL OPERATION) นั้นยังคงเป็นไปในรูปอนาลอกอยู่ ส่วนตัวตรวจจับความผิดพลาด และตัวคอนโทรลเลอร์จะรวบรวมไว้อยู่ในส่วนซอฟต์แวร์ของคอมพิวเตอร์

ในปัจจุบันนี้ขั้นตอนของการควบคุมตัวแปรสามารถทำได้โดยโปรแกรมทางด้านคอมพิวเตอร์ ซึ่งมีทั้งแบบพอร์ทิพชั่นนอล และ เดรีฟเวตีฟ แทนที่จะใช้วิธีของทางอิเล็กทรอนิกส์หรือระบบทางนิวเมติก



รูปที่ 4.1 การควบคุมแบบ DDC โดยใช้คอมพิวเตอร์

#### 4.2 การควบคุมแบบ PROPORTIONAL

ในโหมตนี้ เอาท์พุทของตัวคอนโทรลเลอร์มีความสัมพันธ์แบบเป็นสัดส่วนกับค่าความผิดพลาด โดยที่ค่าความผิดพลาดมีค่ามาก ทำให้การปรับค่าของส่วนป้อนกลับมีค่ามาก และถ้าค่าความผิดพลาดมีค่าน้อย การปรับค่าของส่วนป้อนกลับก็จะมีค่าน้อย ความเกี่ยวข้องกันของสองอย่างนี้จะถูกพิจารณาโดยค่าคงที่ตัวหนึ่งที่เรียกว่า "อัตราขยายแบบพอร์ทิพชั่นนอล" (PROPORTIONAL GAIN) รูปแบบการทำงานในโหมตนี้คือ

$$C_p = K_p e_p + c_0 \quad (4.1)$$

โดยที่  $C_p$  = เอาท์พุทของตัวคอนโทรลเลอร์ในหน่วยเปอร์เซ็นต์

$K_p$  = ค่าอัตราขยายแบบพอร์ทิพชั่นนอลของ เปอร์เซ็นต์เอาท์พุทของค่าความผิดพลาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

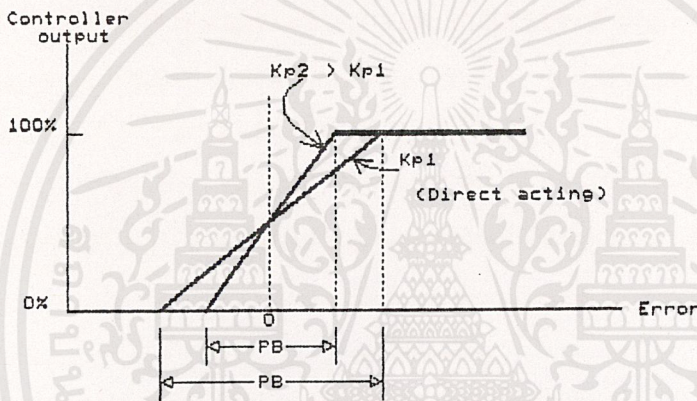
$e_p$  = ค่าความผิดพลาดเป็นเปอร์เซ็นต์ของช่วงการทำงาน

$$e_p = 100 \times (v - v_{sp}) / (v_{max} - v_{min})$$

ที่  $v_{max}$  คือค่าสูงสุดของตัวแปรควบคุม และ  $v_{min}$  เป็นค่าต่ำสุดและ  $v_{sp}$  คือค่าที่ต้องการควบคุม (SET POINT) ของตัวแปรควบคุม

$c_0$  = ค่าเอาต์พุตขณะที่ความผิดพลาดเป็นศูนย์

กราฟการทำงานของโหนดนี้ แสดงไว้ในรูปที่ 4.2 โดยมีค่าอัตราขยาย (GAIN) แยกต่างหาก 2 ค่า จะเห็นว่าเมื่อเอาต์พุตมีค่าถึง 100% จะเกิดค่าอิมิตัวของความผิดพลาดขึ้น อีกทั้งการเพิ่มของความผิดพลาดไม่ก่อให้เกิดการเพิ่มขึ้นของเอาต์พุต ซึ่งจะมีลักษณะเดียวกับกับกรณีที่เอาต์พุตมีค่าเป็น 0% ช่วงกว้างของความผิดพลาด (Error BAND) ซึ่งมีค่าเอาต์พุตระหว่าง 0% จนถึง 100% นั้น เราเรียกว่า "พรอพอร์ชันนอลแบนด์" ซึ่งค่าความกว้างนี้จะมีสัดส่วนกลับกับค่าอัตราขยาย



รูปที่ 4.2 ในโหนดพรอพอร์ชันนอล ค่าเอาต์พุต จะแปรเปลี่ยนในช่วงหนึ่งๆ โดยขึ้นอยู่กับขนาดของ Error และค่าอัตราขยายมีค่ามาก หมายความว่า ช่วงของการ แปรเปลี่ยนจะแคบ

จากสมการ  $c_p = K_p e_p + c_0$  การควบคุมโดยใช้ไมโครโปรเซสเซอร์ จะใช้อัลกอริทึมที่เหมาะสมดังนี้

$$DCP = (K_p \times DFE \times ROUT) + DCO \quad (4.2)$$

โดยที่ DCP = เอาต์พุตคอนโทรลเลอร์แบบดิจิตอล

$K_p$  = อัตราขยายดิจิตอลแบบพรอพอร์ชันนอล (DIGITAL PROPORTIONAL GAIN)

DFE = ค่า Error ชนิดดิจิตอลซึ่งเป็นสัดส่วนของช่วงการทำงาน

DCO = ค่าเอาต์พุตขณะที่ไม่เกิดค่า Error (ZERO Error Controller Output)

ROUT = ช่วงของเอาต์พุต (Output Range)

ถ้าตัวแปรควบคุมทางด้านอินพุตมีค่าเท่ากับค่าที่ต้องการควบคุมทำให้ค่า Error มีค่าเป็นศูนย์ ค่าเอาต์พุตคอนโทรลเลอร์จะเป็น DCO ค่า Error ทางดิจิตอลจะเขียนอยู่ในรูปสมการดังนี้

$$DFE = DE / RIN \quad (4.3)$$

$RIN$  = ช่วงของตัวแปรทางด้านอินพุต =  $DMAX - DMIN$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ เอาท์พุทคอนโทรลเลอร์จะแปรตามช่วงของ ROUT KP จะระบุเป็นเศษส่วนของการเปลี่ยนแปลงของช่วง เอาท์พุทต่อค่าความผิดพลาดที่เขียนอยู่ในรูปเศษส่วนของช่วงอินพุท ผลคูณของ KP×DFE จะเป็นเศษส่วนของค่าเปลี่ยนแปลงของ เอาท์พุทที่ระบุอยู่รอบของ Error ซึ่งค่านี้จะถูกคูณด้วยช่วงของ เอาท์พุท, ROUT, เพื่อที่จะได้ค่าจริงๆของ เอาท์พุทที่เปลี่ยนแปลง สมการนี้สามารถเขียนอยู่ในอีกรูปหนึ่งคือ

$$DCP = KP \times DE \times (ROUT/RIN) + DCO \quad (4.4)$$

จากสมการจะเห็นว่า มีเหตุผลที่ต้องทำให้ช่วงของอินพุทและ เอาท์พุทมีค่าเท่ากัน ดังนั้นถ้าให้  $ROUT=RIN$  แล้ว จะได้ว่า สมการของโหมตพรอพิชชั่นนอล จะมีเพียงค่าอัตราขยาย, ค่าตัวแปรควบคุม Error และค่า DCO ดังสมการข้างล่างนี้

$$DCP = (KP \times DE) + DCO \quad (4.5)$$

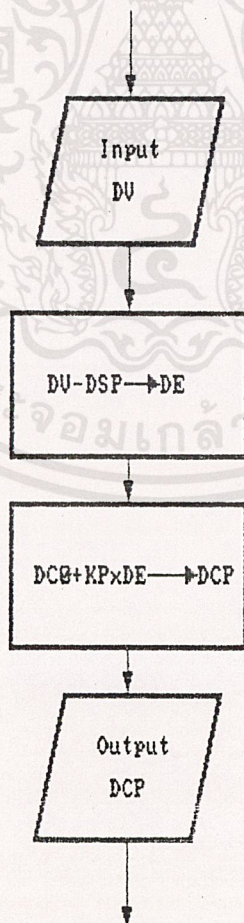
โดยที่ DCP = เอาท์พุทของตัวคอนโทรลเลอร์

DE = DV-DSP = Controlled Variable Error

DCO = เอาท์พุทของตัวคอนโทรลเลอร์ ขณะที่ไม่เกิดค่า Error

KP = อัตราขยายแบบโหมตพรอพิชชั่นนอล

จากสมการที่(4.5) จะเห็นว่า มีข้อดีคือ ไม่มีการหารเกิดขึ้น และอีกข้อหนึ่งคือค่า อัตราขยาย KP เป็นค่าตัวเลขเดียวกันกับ ค่าที่ได้จากการออกแบบในวงจรคอนโทรลแบบอนาลอก



รูปที่ 4.3 อัลกอริทึมโพลีชาร์ตของโหมตพรอพิชชั่นนอล

### 4.3 โหมดอินทิกรัล

เป็นโหมดการทำงานซึ่งใช้กันมากในระบบควบคุม ซึ่งมีหลักการที่เกี่ยวข้องกับความเป็นไปตั้งแต่เริ่ม (HISTORY) ของค่าความผิดพลาด ที่เกิดจากตัวแปรที่ถูกควบคุม ซึ่งเราเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าการรีเซ็ต มีความแตกต่างกันคือโหมดพรอพิซันนอล ซึ่งจะอยู่กับค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นขณะนั้นๆ แต่โหมดอินทิกรัลจะพิจารณาการบ่อนกลับซึ่งขึ้นกับความเป็นไปของค่าความผิดพลาด (HISTORY OF Error) ในขณะที่มีค่า Error เป็นศูนย์ แต่ตัวคอนโทรลเลอร์ยังคงส่งค่าบ่อนกลับ เนื่องจากยังเกิดค่าความเป็นไปได้ของค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นตั้งแต่เริ่มการทำงาน

การคำนวณหาเทอมที่เป็นอินทิกรัลโดยการคำนวณพื้นที่สุทธิ (net area) ตั้งแต่เริ่มจนถึงขณะที่ทำการส่งสัญญาณบ่อนกลับของกราฟระหว่างค่าความผิดพลาดกับเวลา ค่าเอาต์พุตของตัวคอนโทรลเลอร์ที่เกิดขึ้นจริงๆหาได้จาก การคูณพื้นที่นี้กับค่าคงที่ค่าหนึ่งซึ่งเรียกว่า "อัตราขยายของโหมดอินทิกรัล" (INTEGRAL GAIN) ดังนั้นจะได้ว่า

$$c_i(t) = K_i A_e(t) + c_i(0) \quad (4.6)$$

โดยที่

$c_i(t)$  = เอาต์พุตของคอนโทรลเลอร์สำหรับอินทิกรัลโหมด (%) ระยะเวลา  $t$

$K_i$  = ค่าอัตราขยายของอินทิกรัลโหมด [% PER (%-TIME)]

$A_e(t)$  = ค่าพื้นที่สุทธิของ Error กับเวลา (%-TIME) โดยคำนวณที่เวลา  $t$

โดยเริ่มจาก  $t=0$

$c_i(0)$  = ค่าเอาต์พุตของคอนโทรลเลอร์ที่เวลา  $t=0$

time = หน่วยของเวลา (วินาที, นาที, ชั่วโมง)

#### 4.3.1 RESET ACTION

ผลของอินทิกรัลโหมดทำให้ค่าเอาต์พุตของคอนโทรลเลอร์ เป็นฟังก์ชันของค่า Error ดังนั้นค่าของเอาต์พุตคอนโทรลเลอร์ (ขณะที่ค่า Error = 0) จะขึ้นอยู่กับความเป็นไปของค่า Error ที่เกิดขึ้นในขบวนการ หมายความว่า โหมดอินทิกรัลสามารถรีเซ็ตค่า  $c_0$  ได้อย่างอัตโนมัติ โดยเป็นไปตามค่าการเปลี่ยนแปลงของโพลด์ ดังนั้นการรีเซ็ตนี้จะแก้ปัญหาของค่าความผิดพลาดเนื่องจากค่าออฟเซต (OFFSET Error) ที่เกิดขึ้นเมื่อใช้โหมด พรอพิซันนอล เพียงอย่างเดียว

#### 4.3.2 คอมโพสิต โหมด

ในการออกแบบตัวคอนโทรลเลอร์ส่วนใหญ่จะเป็นการรวมกันหลายๆโหมด ซึ่งในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เราจะใช้ PI คอมโพสิต โหมด ซึ่งมีสมการดังนี้

$$C_{PI} = K_{pep} + K_p K_i A_e \quad (4.7)$$

การทำงานของโหมดนี้ การตอบสนองของตัวคอนโทรลเลอร์จะขึ้นอยู่กับ HISTORY OF Error โดยที่ค่า HISTORY OF Error นี้จะคิดโดยการคำนวณพื้นที่สุทธิของกราฟ Error กับเวลา ตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงเวลาขณะนั้นๆ ถ้ามองตามหลักคณิตศาสตร์คือการอินทิเกรตของค่า Error และ เนื่องจากการที่มันสามารถปรับค่าความผิดพลาดเนื่องจากค่าออฟเซต ที่เกิดขึ้นในโหมดพรอพิซันนอล ได้โดยการเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อ 24 ศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปรับค่า Dco เราจึงเรียกโหมดนี้ว่า รีเซตโหมด

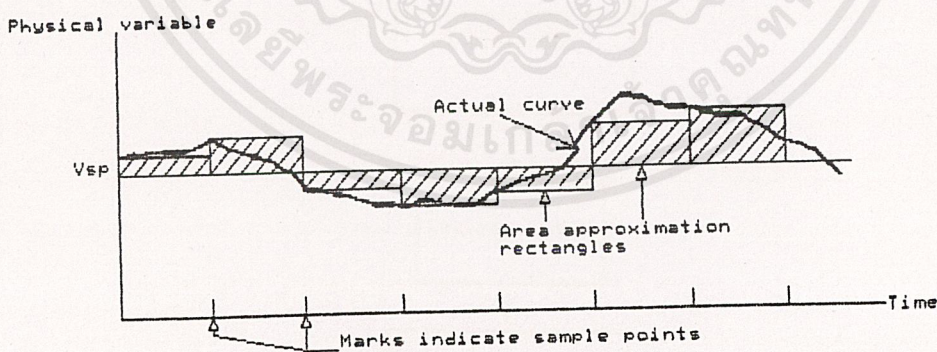
สมการที่ใช้นโหมดอินทิกรัลสำหรับเอาท์พุทของคอนโทรลเลอร์จะเป็น

$$c_i(t) = K_I A_e(t) + c_i(0) \quad (4.8)$$

โดยที่  $K_I$  คือค่าอัตราการขยายโหมดอินทิกรัล และ  $A_e(t)$  คือ พื้นที่ของ Error ซึ่งมีค่าแปรเปลี่ยนตามเวลา ซึ่งพื้นที่จะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อค่า Error มีค่าเป็นบวกและจะลดลงเมื่อ Error มีค่าเป็นลบ

#### 4.3.3 การประมาณพื้นที่ (AREA APPROXIMATION)

ในการทำงานในโหมดนี้โดยใช้คอมพิวเตอร์นั้น ค่าพื้นที่ที่คำนวณได้จะหาได้จากการลุ่มค่าอินพุทที่ค่าต่าง ๆ กัน ซึ่งมีวิธีการอยู่หลายวิธีด้วยกัน และวิธีที่นิยมใช้คือการอินทิเกรตแบบสี่เหลี่ยม (RECTANGULAR) ดังแสดงในรูปที่ 4.4 ค่าอินพุทที่เข้าสู่คอมพิวเตอร์ประกอบด้วยค่าที่ลุ่มได้ที่จุดจุดหนึ่งที่ระบุไว้บนเส้นกราฟของตัวแปรควบคุมกับเวลา ค่า Error ที่ได้คือความแตกต่างของค่าที่วัดได้กับค่าที่ต้องการควบคุม ดังนั้นความสูงของรูปสี่เหลี่ยมจะเป็นค่า Error และความกว้างคือช่วงเวลาในการลุ่ม เมื่อใดที่ค่าตัวแปรมีค่าสูงกว่าค่าที่ต้องการควบคุม ค่า Error จะมีค่าเป็นบวก และพื้นที่ของสี่เหลี่ยมจะมีค่าเป็นบวก ซึ่งคิดจากค่า Error คูณกับความกว้างของช่วงเวลาในการลุ่ม ในทางกลับกันถ้าค่าตัวแปรมีค่าต่ำกว่าค่าที่ต้องการค่าที่ต้องการควบคุม ค่า Error จะมีค่าเป็นลบและพื้นที่ของรูปสี่เหลี่ยมจะมีค่าเป็นลบ ดังนั้นจะได้ว่าพื้นที่สุทธิจะเป็นผลรวมของพื้นที่ช่วงบวกและลบ ซึ่งเราจะใช้วิธีในการประมาณค่าพื้นที่สุทธิของกราฟระหว่างค่า Error กับเวลา ความแม่นยำ (ACCURACY) ของพื้นที่โดยวิธีนี้ จะพิจารณาจากความกว้างซึ่งก็คือเวลาระหว่างช่วงของการลุ่มตัวอย่าง ซึ่งถ้าความกว้างมีค่าน้อยจะทำให้พื้นที่ที่ประมาณได้มีค่าใกล้เคียงกับความจริงมากยิ่งขึ้น โดยที่เวลาค่าตัวแปรมีการเปลี่ยนแปลงค่าอย่างมากขณะที่อยู่ในช่วง เวลาของการลุ่มตัวอย่าง จะส่งผลทำให้เกิดความผิดพลาดของพื้นที่ที่ประมาณได้



รูปที่ 4.4 กราฟแสดงการประมาณพื้นที่ของค่า Error กับเวลา โดยใช้การลุ่มตัวอย่าง

จากแนวความคิดเก่าที่ว่า จะให้ช่วงของอินพุทและ เอาท์พุทมีค่าเท่ากัน นั่นคือ  $R_{IN} = R_{OUT}$  และให้  $SUM$  คือค่าผลรวมของทุกค่า Error

$$SUM = SUM + DE \quad (4.9)$$

จะได้ว่าพื้นที่จะเขียนอยู่ในรูปของ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 25  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\text{AREA} = \frac{\text{SUM} \times \text{DT}}{\text{RIN}} \quad (4.10)$$

จากสมการที่ว่า  $\text{DCI} = \text{KI} \times \text{AREA} \times \text{ROUT}$  (4.11)

โดยที่ DCI = เอาท์พุทของโหมตอินทิกรัล

KI = ค่าอัตราการขยาย ของโหมตอินทิกรัล

AREA = พื้นที่ที่ประมาณค่าจากกราฟของ Error กับเวลา

ROUT = ช่วงของตัวแปรเอาท์พุท

จากสมการที่ (4.10) แทนค่า จะได้ว่า

$$\text{DCI} = \text{KI} \times \text{SUM} \times \text{DT} \times (\text{ROUT} / \text{RIN}) \quad (4.12)$$

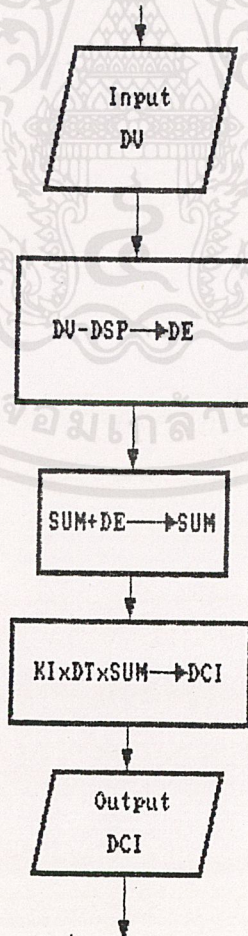
จากการที่เราให้  $\text{ROUT} = \text{RIN}$  จะได้ว่าสมการที่(4.12) จะเขียนให้อยู่ในรูปอย่างง่ายได้ โดยที่สมการทั้งหมดของโหมตอินทิกรัลสามารถเขียนอยู่ในรูป

$$\text{DE} = \text{DV} - \text{DSP}$$

$$\text{SUM} = \text{SUM} + \text{DE}$$

$$\text{DCI} = \text{KI} \times \text{SUM} \times \text{DT} \quad (4.13)$$

โพลีชาร์ตของการทำงานในโหมตอินทิกรัลของสมการเหล่านี้ เขียนได้ดังนี้



รูปที่ 4.5 รูปแบบโพลีชาร์ตต่างๆไปของการทำงานในโหมตอินทิกรัล

#### 4.4 PROPORTIONAL-INTEGRAL CONTROL MODE

โดยปกติแล้วการทำงานร่วมกันของทั้ง 2 โหมดนี้ จะใช้กันในวงจรถอนโทรล ทั้งนี้เนื่อง จากเหตุผลที่ว่า ในโหมดอินทิกรัลนั้นระบบมีความสามารถที่จะปรับตัวของมันเอง ไปยังสภาวะของโพลต์ ค่าต่างๆกันได้นั้นคือการเปลี่ยนค่าเอาท์พุท ของวงจรขณะที่ไม่เกิดค่า Error (RESETTING ACTION)

##### 4.4.1 อัลกอริทึม

โหมด PI ก็คือการรวมกันของโหมดพรอพอร์ชันนอล และอินทิกรัลที่ได้อธิบายไว้แล้วข้างต้น แต่จะพบว่า การสร้างคอมพิลท์โหมดนี้ต้องการค่าอัตราขยายโหมดพรอพอร์ชันนอล ที่นำมาคูณในเทอมของ Error และเทอมของ Error AREA ตั้งนั้นที่เวลาใดเวลาหนึ่ง เอาท์พุทของตัวคอนโทรลเลอร์จะประกอบด้วย 2 เทอม เทอมที่หนึ่งจะเกิดจากการสะสมพื้นที่ของ Error กับเวลา อีกเทอมจะเกิดขึ้นจาก ขอบเขตของค่า Error ที่เกิดขึ้น เราสามารถเขียนสมการของทั้ง 2 โหมด ให้เป็นสมการเดียวกันได้ ดังนี้คือ

$$DCPI = (KP \times DE) + (KP \times KI \times DT \times SUM) \quad (4.14)$$

โดยที่ DCPI = เอาท์พุทของคอนโทรลเลอร์ในโหมด PI

KP = อัตราการขยายโหมดพรอพอร์ชันนอล

DE = ค่า Error

DI = ช่วงเวลาการสุ่ม (SAMPLE TIME)

SUM = ผลรวมสุดท้ายของค่า Error

สังเกตว่า ถ้าค่า Error ที่จุดใดจุดหนึ่งของการสุ่มตัวอย่างมีค่าเท่ากับศูนย์ จะได้ว่าเอาท์ พูทจากสมการที่(4.14) ก็คือผลลัพธ์เฉพาะเทอมอินทิกรัล ซึ่งในเทอมนี้ก็คือผลของ Error HISTORY ของระบบแสดงในเทอมของค่า SUM จะเห็นได้ว่าเทอมอินทิกรัลจะทำให้เกิดค่า ZERO Error ให้แก่ ระบบ

โดยหลักการแล้วนั้น การทำงานในโหมดนี้สามารถเกิดขึ้นได้โดยการนำสมการที่ (4.14) เข้าไปไว้ในตัวคอนโทรลเลอร์เอาท์พุท แต่ในความเป็นจริงแล้ว ตามสมการที่(4.14) นั้น ถ้าเราใช้ คอมพิวเตอร์เป็นตัวควบคุมระบบจะก่อให้เกิดปัญหายุ่งยากเกี่ยวกับการคำนวณขึ้น ดังต่อไปนี้

##### 4.4.2 สมการ

จากสมการที่(4.14)เป็นการกำหนดการทำงานของโหมด PI ในทางคณิตศาสตร์ แต่ไม่สามารถนำไปใช้ในคอมพิวเตอร์ได้โดยตรง แต่เราจะแยกสมการเหล่านี้ให้เป็นขั้นตอนหลายๆขั้นตอน เนื่องจากว่าตัวคอมพิวเตอร์สามารถทำงานทางคณิตศาสตร์ได้เพียง 1 ครั้ง ในเวลาหนึ่งๆเท่านั้น ดังนั้นสมการที่นำไปใช้ได้มีดังนี้

$$DE = DV - DSP \quad (4.15)$$

$$SUM = SUM + DE \quad (4.16)$$

$$DCI = KP \times KI \times DT \times SUM \quad (4.17)$$

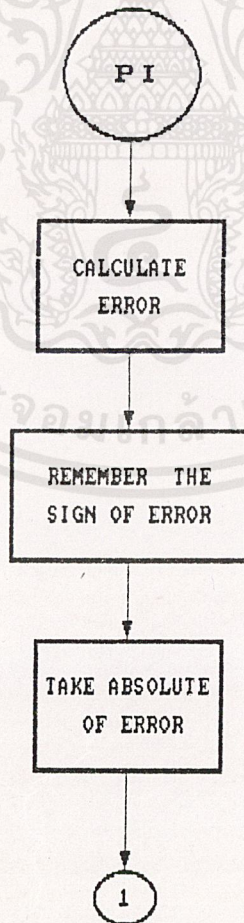
$$DCP = KP \times DE \quad (4.18)$$

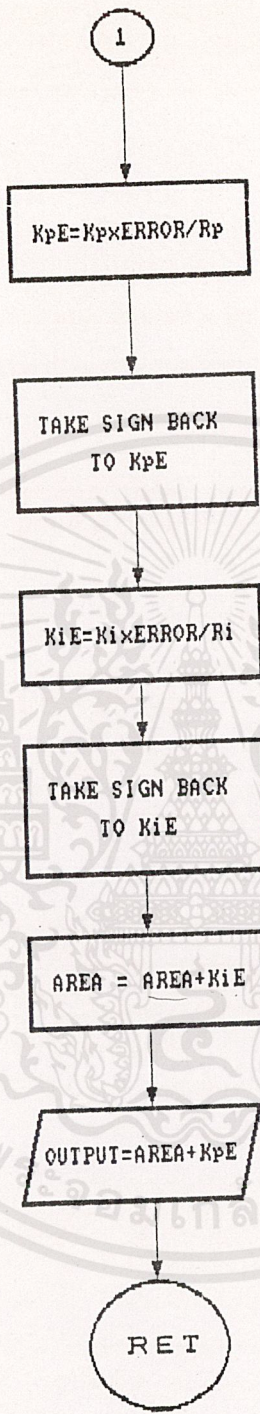
$$DCPI = DCI + DCP \quad (4.19)$$

จะเห็นว่าสมการแต่ละสมการสามารถหาค่าออกมาได้ โดยการนำค่าสิ่งต่างๆในตัวคอมพิวเตอร์ จากสมการที่ (4.17) ค่า  $KP \times KI \times DT$  จะกำหนดค่าใหม่ค่าเป็นค่าคงที่  $K1$  เพื่อที่จะใช้ในการคำนวณจริง

บางกรณีที่ย้ายมาจะรวมสมการที่ (4.16) และ (4.17) เข้าด้วยกัน แล้วเขียนอยู่ในรูป  $DCI = DCI + (KP \times KI \times DT \times DE)$  แต่มีเหตุผลที่ว่ามันไม่เป็นการดีที่จะรวมสมการเหล่านี้เข้าด้วยกัน เนื่องจากว่า ค่าของ  $DE$  ปกติแล้วจะมีค่าน้อยและผลคูณของมันกับค่าคงที่จะมีค่าน้อยกว่า 1 เสมอ นั้นหมายความว่าค่า Error ทั้งหมดที่ได้ จะไม่ส่งผลให้เกิดความเปลี่ยนแปลงขึ้นกับค่า  $DCI$  เนื่องจากผลของการคูณกันระหว่างค่าคงที่กับ  $DE$  จะมีค่าน้อยมากจนไม่สามารถที่จะเขียนให้อยู่ในรูปของข้อมูลทางคอมพิวเตอร์ได้ ซึ่งเราจะแก้ไขโดยการรวมค่าของ  $DE$  กับ  $SUM$  ก่อน เพื่อที่ว่าการสะสมค่าของค่าน้อยๆหลายๆค่า ทำให้เห็นผลที่เกิดขึ้นกับระบบควบคุมได้ชัดเจนกว่า

#### 4.5 โพลีชาร์ตการทำงานของโปรแกรมส่วนบ่อนกลับ



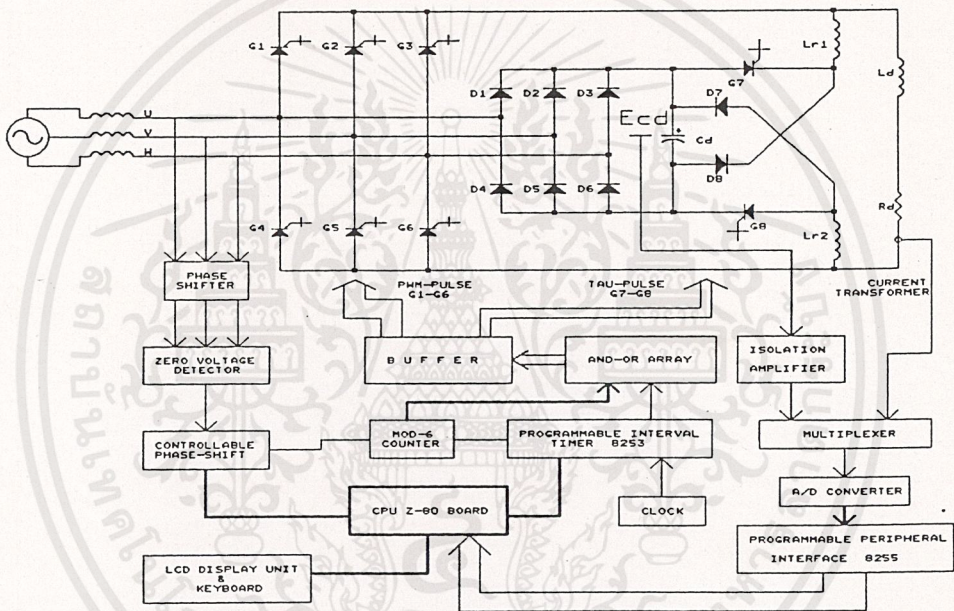


AREA

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 29  
 ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1 การทำงานของวงจรควบคุม

จากรูปแสดงบล็อกไดอะแกรมของระบบวงจรควบคุม ซึ่งประกอบด้วยไมโครโพรเซสเซอร์ Z80 วงจรเลื่อนเฟส วงจรตรวจจับตำแหน่งอ้างอิง วงจรกำเนิดพัลส์ หน่วยแสดงผล LCD อุปกรณ์รับข้อมูล หรือคีย์บอร์ด วงจรส่วนป้อนกลับ ซึ่งประกอบไปด้วย ไอซีเลขนัมเบอร์ 1555 หรือแปลงกระแส แล มัลติเพล็กซ์เซอร์ เอชดีคอนเวอร์เตอร์ และอุปกรณ์รับข้อมูลส่งไปยังไมโครโพรเซสเซอร์ (PPI 8255)



รูปที่ 5.1 วงจรกำลัง และ บล็อกไดอะแกรม

ของวงจรควบคุมดิจิทัล

วงจรควบคุมที่ได้แสดงไว้ สามารถที่จะใช้ควบคุมการทำงานในส่วนของวงจรถูกกำลัง ได้

5 ลักษณะ คือ

- (1) จำนวนพัลส์ของคลื่นกระแสที่ดับลิวเอ็ม (m) สามารถปรับเปลี่ยนให้ยู่นจำนวน 6,9,12 และ 15 พัลส์ได้
- (2) สามารถเลื่อนเฟสของกระแสเอซีไลน์ ( $\alpha$ ) ให้มีมุมที่แตกต่างจากแรงดันเอซีในช่วงจากมุมนำหน้า  $90^\circ$  (LEADING) จนถึงมุมล่าหลัง  $90^\circ$  (LAGGING) ได้
- (3) ความกว้างพัลส์ของคลื่นกระแสที่ดับลิวเอ็ม ( $\lambda$ ) สามารถที่จะแปรเปลี่ยน ให้มีค่าในช่วง 0 ถึง 1 ได้
- (4) สามารถทำให้ขนาดของกระแสเอซีไลน์ทางด้านอินพุท และขนาดของกระแสที่ชี้ทางด้านเอาต์พุทมีค่าคงที่ตลอดช่วงของมุมเลื่อนเฟส ( $\alpha$ )

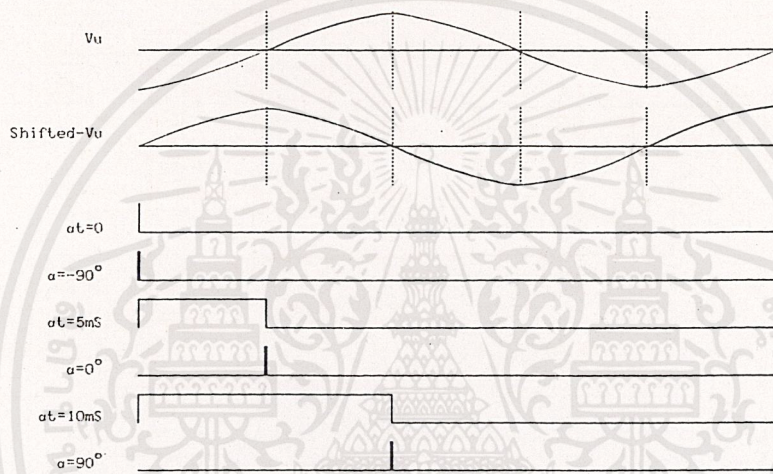
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา 30 เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(5) สามารถปรับช่วงเวลากการคายประจุ ( $\tau$ ) ของคาปาซิเตอร์ Ca ในวงจรช่วย ไปยังด้านไหลคตซี ที่ค่าเวลาต่างๆได้

จากบล็อกโคตะแกรมของแต่ละรูป สามารถที่จะอธิบายเป็นส่วนๆได้ดังนี้

1. ไมโครโปรเซสเซอร์ Z-80 เป็นหัวใจสำคัญของวงจรวควบคุมทั้งหมด ซึ่งมีหน้าที่หลักในการสร้างพัลส์ต่างๆ โดยส่งข้อมูลที่คำนวณได้ไปยัง PIT 8253 และ หน้าที่อีกอย่างหนึ่งคือรับข้อมูลจากสวนวงจรย้อนกลับ (Feedback Network) แล้วหาไปประมวลผล เพื่อให้ได้ขนาดของกระแสทางด้านเอาท์พุท (Id) มีค่าคงที่

2. วงจรเลื่อนเฟส เป็นส่วนที่ทำหน้าที่เลื่อนเฟสของแรงดันอ้างอิง (ในวงจรจะใช้เฟส U เป็นเฟสอ้างอิง) ให้มีทิศทางการนำหน้าเป็นมุม  $90^\circ$  ดังแสดงในรูปที่ 5.2

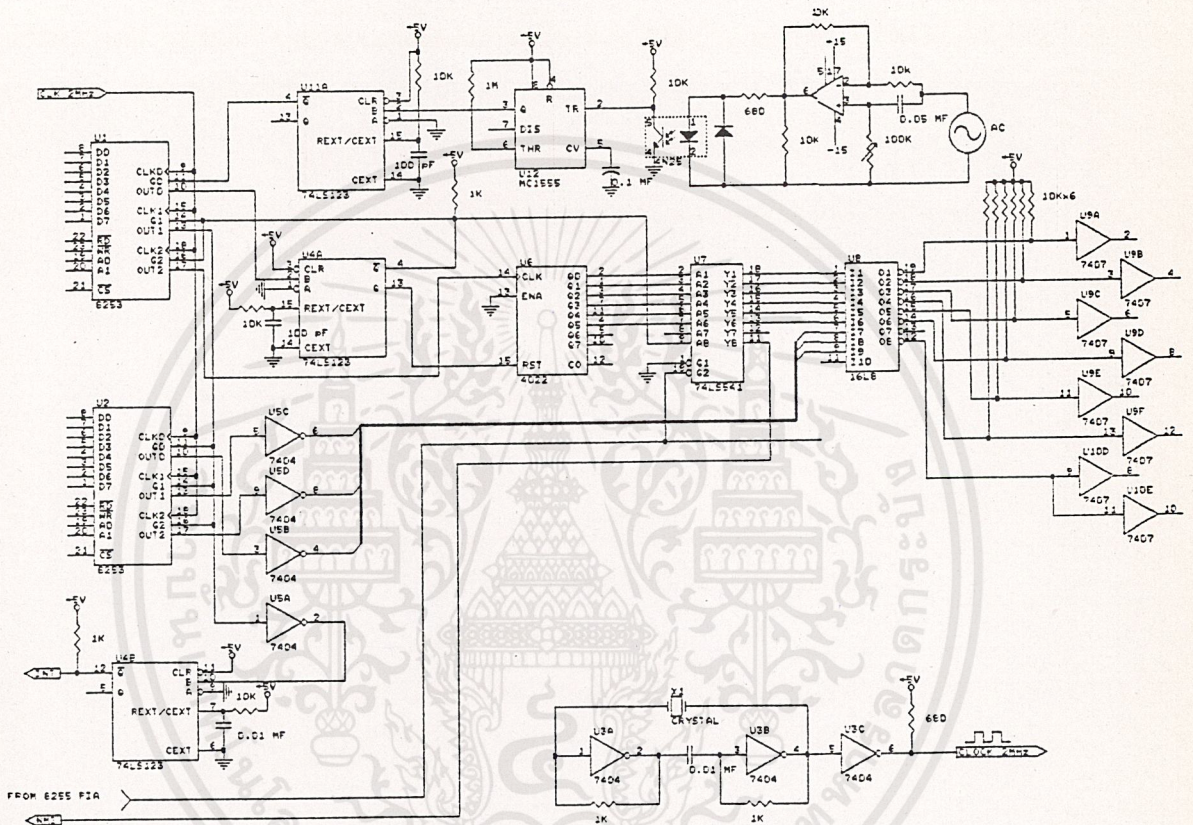


รูปที่ 5.2 แผนภาพเวลาของการเลื่อนเฟสสัญญาณอ้างอิง และ แสดงคาบเวลาของสัญญาณ  $\alpha_t$  ที่  $\alpha = -90^\circ, 0^\circ$  และ  $90^\circ$  ตามลำดับ

3. วงจรตรวจจับตำแหน่งอ้างอิง (Zero Voltage Detector) จะใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่า Opto Isolator เป็นตัวสร้างสัญญาณ (Controllable Phase Shifter) ให้กับตัวโมโนสเตเบิลเพื่อกำเนิดสัญญาณ ไปกระตุ้นเคาน์เตอร์ #10 ของ PIT 8253 ให้สร้างสัญญาณ  $\alpha_t$  ซึ่งมีคาบเวลา 0 วินาที ที่มุมล้าหน้า  $90^\circ$  จนถึงคาบเวลา 10 ms ที่มุมล้าหลัง  $90^\circ$  ดังแสดงในรูปที่ 5.2

4. วงจรกำเนิดสัญญาณพัลส์ ซึ่งจะใช้ PIT 8253 เป็นวงจรมัน ซึ่งตัว 8253 นี้จะรับข้อมูลจากทางไมโครโปรเซสเซอร์ เพื่อให้ว่าจะให้เคาน์เตอร์แต่ละตัวกำเนิดสัญญาณต่าง ๆ ดังนี้คือ  $2T, T, \lambda T, X\lambda T, (1-X)\lambda T$  และ  $\lambda T - \tau$  โดยที่สัญญาณเหล่านี้จะซึ่งโครโมซกับสัญญาณ  $\alpha_t$  ซึ่งการทำงานของวงจรมันส่วนนี้สามารถอธิบายการทำงานของตัวเคาน์เตอร์ ของ PIT 8253 ได้ดังนี้คือ

ในรูปที่ 5.3 เคาน์เตอร์ #10 จะถูกโปรแกรมให้ทำงานในโหมดที่ 1 (One Shot) โดยที่เคาน์เตอร์ส่วนนี้จะรับสัญญาณรีเซ็ต 1 จากส่วนตัวจับตำแหน่งอ้างอิง (Zero Voltage Detector) แล้วนำมาขยายคาบเวลาออกตามค่าของมุมเลื่อนเฟส  $\alpha$  ที่รับจากอุปกรณ์ทางด้านอินพุท ซึ่งคาบเวลานี้ก็



รูปที่ 5.3 วงจรควบคุมส่วนสร้างสัญญาณเกต

คือสัญญาณรีเซต 2 ที่ทำหน้าที่เป็นจุดเริ่มต้นของการสร้างสัญญาณต่าง ๆ ของเคาน์เตอร์ตัวที่เหลือทั้งหมด ซึ่งสัญญาณเหล่านี้มีดังต่อไปนี้คือ

สัญญาณ T เกิดจากเอาท์พุทของเคาน์เตอร์ #11 ซึ่งมีคาบเวลาเป็น  $1/12, 1/18, 1/24$  เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และ 1/30 เท่าของหนึ่งไซเคิลไฟฟ้ากระแสสลับที่มีความถี่ 50 เฮิรตซ์ ในกรณีของ 12, 18, 24, 30 พัลส์ในหนึ่งไซเคิลตามลำดับ สัญญาณ T ที่ได้นี้จะเป็นตัวกำหนดคาบเวลาในการขออินเตอร์รัพท์การทำงานของผู้ขับ ซึ่งสัญญาณ T นี้ จะเป็นคาบเวลาในการเริ่มต้นหรือสิ้นสุดการสร้างสัญญาณ  $(1-X)\lambda T$ ,  $(1-X)\lambda T$ ,  $\lambda T - \tau$  โดยที่สัญญาณ T นี้ จะเป็นสัญญาณกระตุ้น ำให้เคาน์เตอร์ของสัญญาณเหล่านี้ทำงาน

สัญญาณเกท  $G_1 - G_6$  จะประกอบไปด้วยสัญญาณ  $O_0 - O_5$ ,  $X\lambda T$ ,  $(1-X)\lambda T$  และ  $(1-\lambda T)$  ส่วนสัญญาณเกท  $G_7 - G_8$  จะประกอบด้วย  $\lambda T - \tau$  กับ  $\lambda T$  และสัญญาณต่างๆ ดังกล่าว จะสามารถเขียนแสดงอยู่ในรูปสมการบูลีนดังนี้

$$G_1 = X\lambda T.O_0 + O_1 + (1-X)\lambda T.O_2 + (1-\lambda)T.O_4$$

$$G_2 = X\lambda T.O_2 + O_3 + (1-X)\lambda T.O_4 + (1-\lambda)T.O_0$$

$$G_3 = X\lambda T.O_4 + O_5 + (1-X)\lambda T.O_0 + (1-\lambda)T.O_2$$

$$G_4 = X\lambda T.O_3 + O_4 + (1-X)\lambda T.O_5 + (1-\lambda)T.O_1$$

$$G_5 = X\lambda T.O_5 + O_0 + (1-X)\lambda T.O_1 + (1-\lambda)T.O_3$$

$$G_6 = X\lambda T.O_1 + O_2 + (1-X)\lambda T.O_3 + (1-\lambda)T.O_5$$

$$G_7, G_8 = (\lambda T - \tau) \oplus \lambda T$$

- โดยที่  $G_1 - G_8$  : สัญญาณเกทของจีทีโอทั้งแปด
- $O_0 - O_5$  : สัญญาณเอาต์พุตทั้งหมดของวงจรรีบหก
- $(\lambda T - \tau)$  : สัญญาณคาบเวลา T

ส่วนสัญญาณ  $\lambda T$ ,  $X\lambda T$  และ  $(1-X)\lambda T$  สามารถเขียนแสดงความหมายที่จำนวนพัลส์ต่าง ๆ

ดังนี้

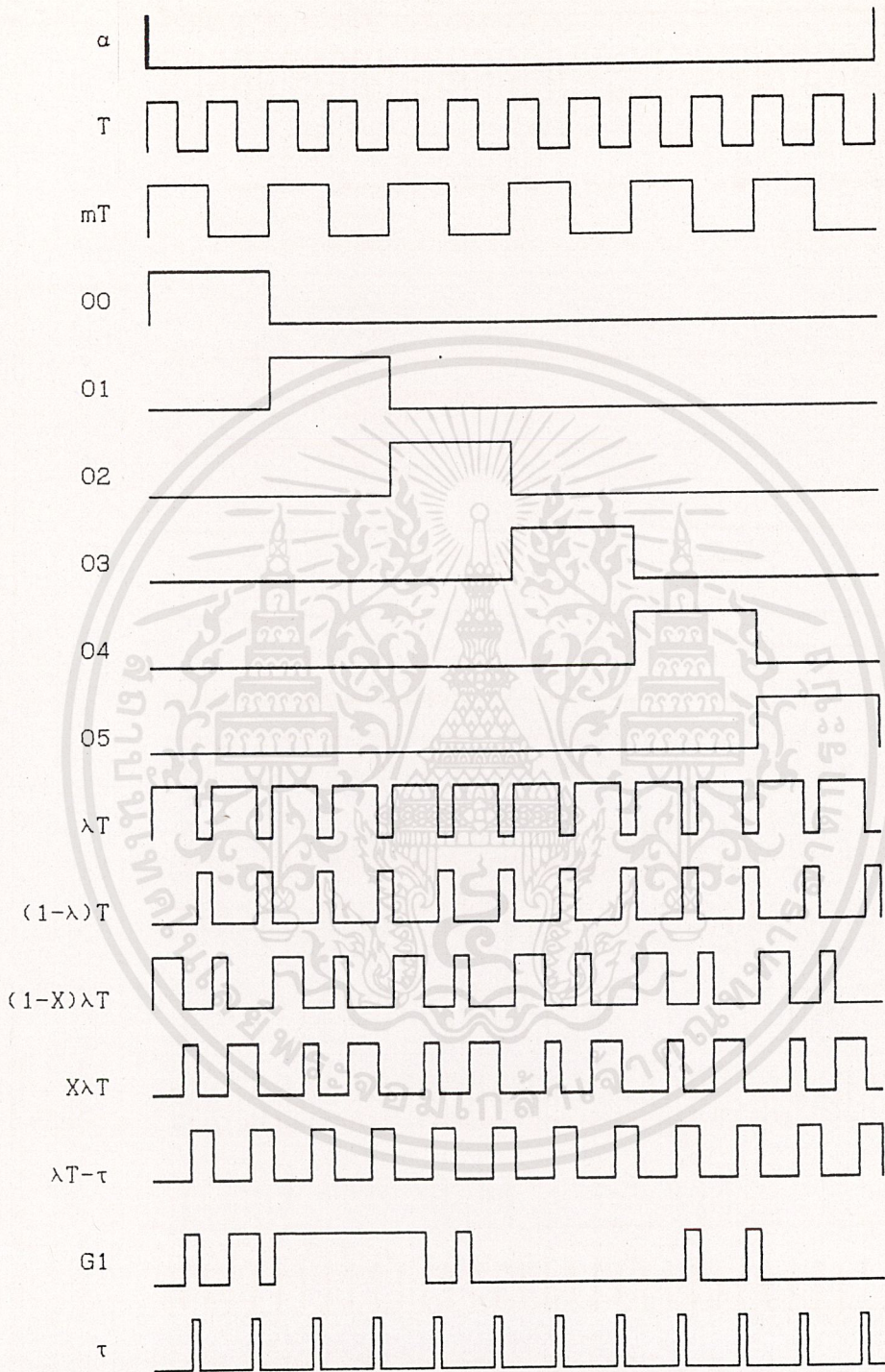
ตารางที่ 5.1

แสดงช่วงเวลาของสัญญาณ  $\lambda T$ ,  $X\lambda T$  และ  $(1-X)\lambda T$  ที่จำนวนพัลส์ต่าง ๆ

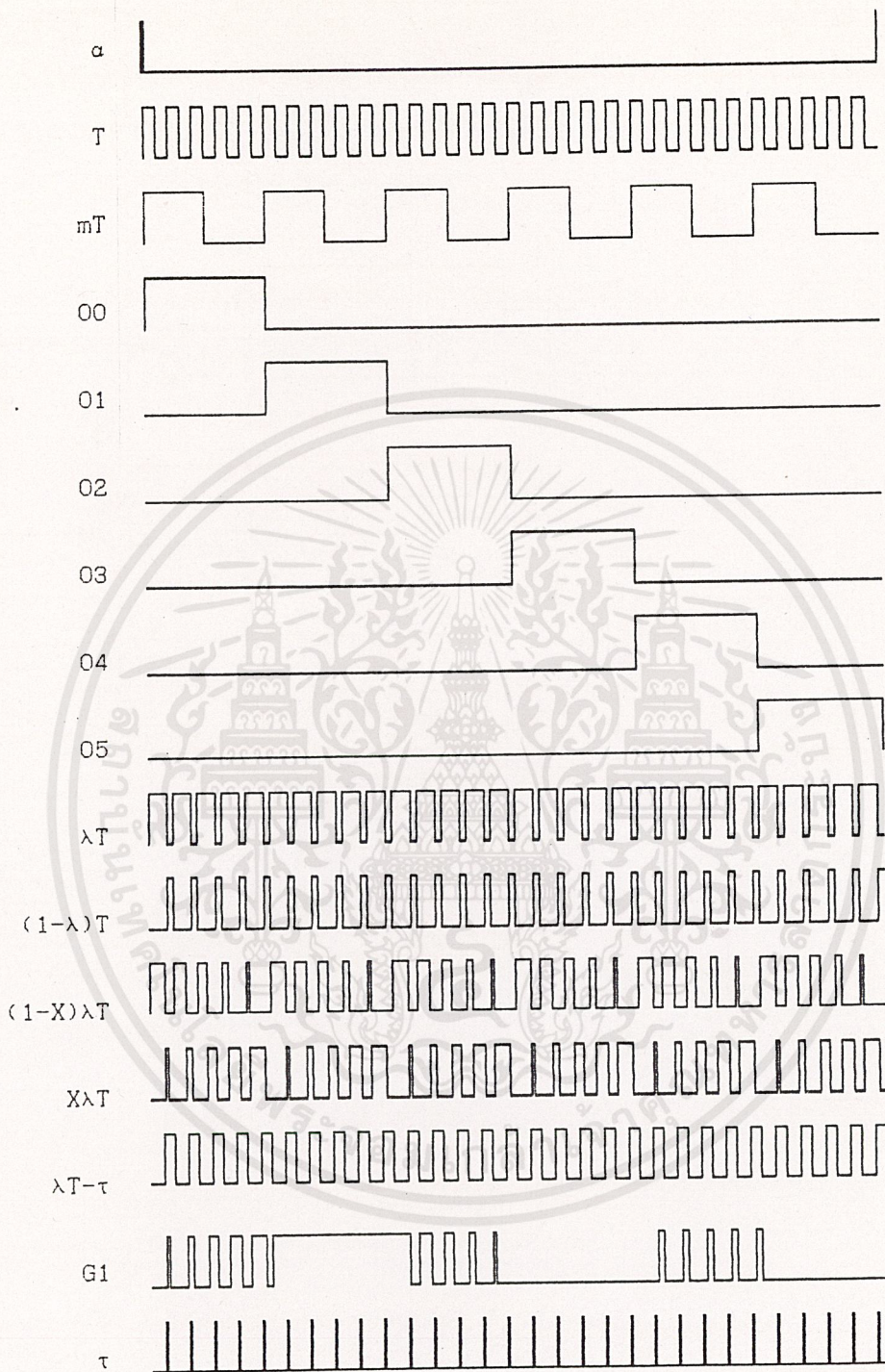
พัลส์	$\lambda T$	$X\lambda T$	$(1-X)\lambda T$
6	T/12	$\lambda T/3, 2\lambda T/3$	$2\lambda T/3, \lambda T/3$
9	T/18	$\lambda T/4, \lambda T/2, 3\lambda T/4$	$3\lambda T/4, \lambda T/2, \lambda T/4$
12	T/24	$\lambda T/5, 2\lambda T/5, 3\lambda T/5, 4\lambda T/5$	$4\lambda T/5, 3\lambda T/5, 2\lambda T/5, \lambda T/5$
15	T/30	$\lambda T/6, \lambda T/3, \lambda T/2, 2\lambda T/3, 5\lambda T/6$	$5\lambda T/6, 2\lambda T/3, \lambda T/2, \lambda T/3, \lambda T/6$

รูปที่ 5.4 และ 5.5 แสดงให้เห็นถึงรายละเอียดของสัญญาณต่าง ๆ จากวงจรรสร้างพัลส์สำหรับกรณีคลื่นกระแส 6 และ 15 พัลส์ ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.4 แผนภาพเวลาของสัญญาณต่าง ๆ จากวงจรสร้างพัลส์ นกกรณี 6 พัลส์

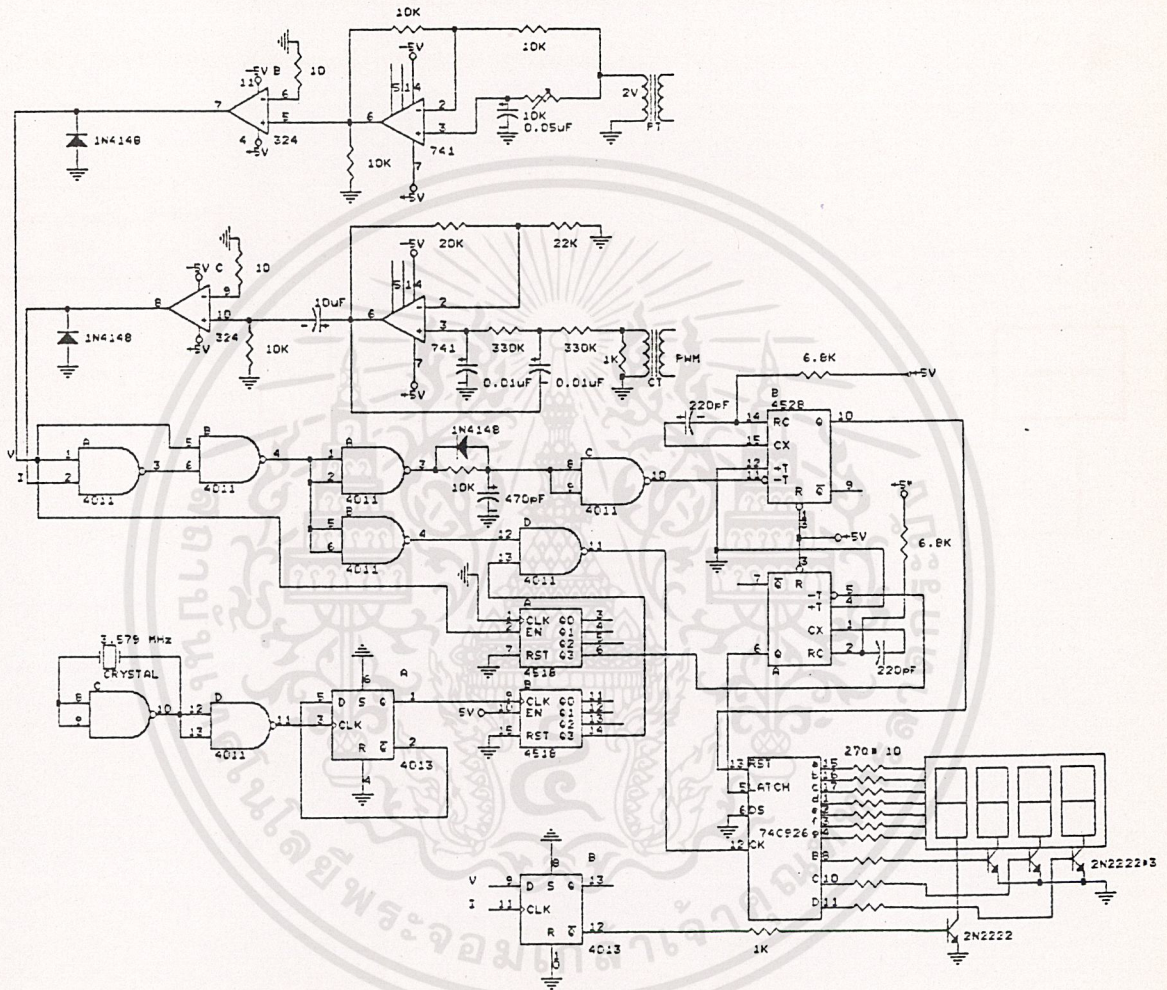


รูปที่ 5.5 แผนภาพเวลาของสัญญาณต่าง ๆ จากวงจรสร้างพัลส์ ในกรณี 15 พัลส์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษา<sup>35</sup> เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5.2 วงจรวัดค่ามระหว่างแรงดันกับกระแส

วงจรวัดค่ามระหว่างแรงดันกับกระแสประกอบด้วย วงจรเลื่อนเฟส, วงจรตรวจจับตำแหน่งอ้างอิง, วงจรแอดทีฟฟิลเตอร์, วงจรสร้างสัญญาณนาฬิกา, วงจรส่วนแสดงผล, วงจรนับ และ มีลติเพล็กซ์เซอร์ ดังในรูปที่ 5.6



รูปที่ 5.6 วงจรวัดค่ามระหว่างแรงดันกับกระแส

## 5.3 วงจรส่วนบ่อนกลับ

จากรูปที่ 5.7 เป็นบล็อกไดอะแกรมแสดงระบบการบ่อนกลับของสัญญาณที่ต้องการควบคุมซึ่งในบล็อกไดอะแกรมของตัว Feedback Network ประกอบด้วย

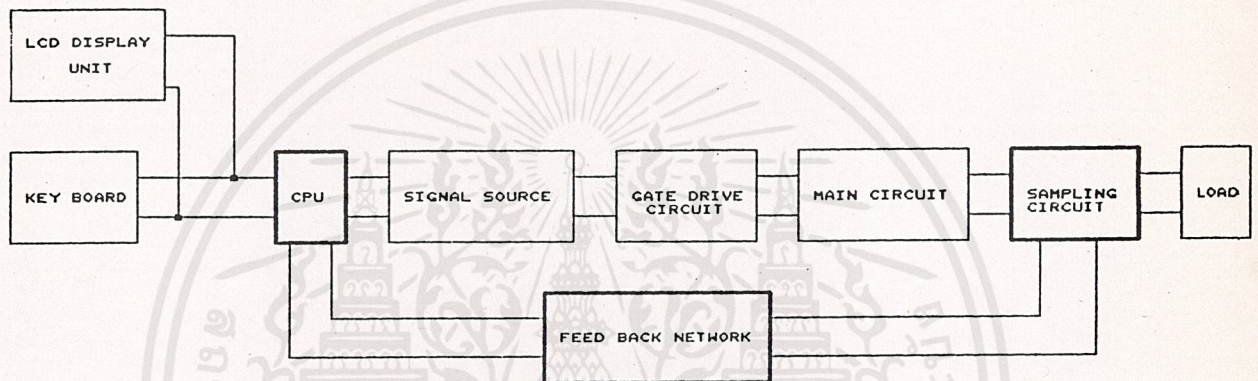
### 5.3.1 แคมป์ลิงเน็ตเวิร์ค

คือส่วนที่ทำหน้าที่ในการตรวจจับสัญญาณต่าง ๆ ทางด้านเอาท์พุทแล้วส่งสัญญาณที่ตรวจจับ

ได้มายังส่วนบ่อนกลับ ซึ่งในส่วนแชนเปลิ่งนี้มีอุปกรณ์ 4 ชนิด คือ หม้อแปลงกระแสซึ่งจะเป็นตัวอ่านค่ากระแสที่ระดับลิแวนเอ็ม, ไอโซเลชันแอมพลิฟายร์ จะเป็นอุปกรณ์ในการอ่านค่าแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุ Cd , ออปแอมป์ทำหน้าที่ในการขยายกระแสของสัญญาณจากอุปกรณ์แชนเปลิ่ง, และมัลติเพิลิกเซอร์ จะเป็นตัวแยกสัญญาณเอาท์พุทไปยังส่วน Feedback ตามที่ต้องการ ซึ่งสามารถควบคุมโดยตรงจากซอฟต์แวร์

### 5.3.2 วงจรส่วนบ่อนกลับ

ประกอบด้วยอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการเปลี่ยนสัญญาณ แบบอนาลอก มาเป็นสัญญาณแบบดิจิทัล (A/D CONVERTER) ซึ่งในวงจรนี้จะใช้ขนาด 12 บิต



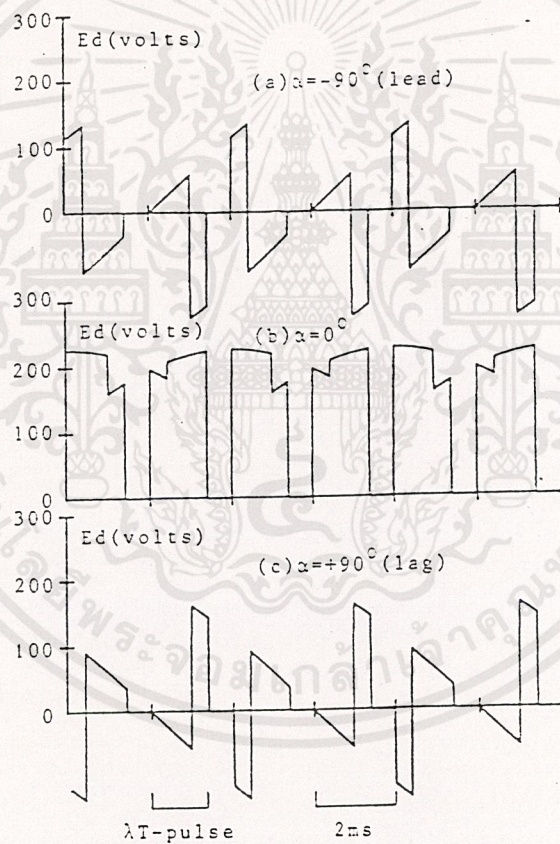
รูปที่ 5.7 บล็อกไดอะแกรมของวงจรส่วนบ่อนกลับ

## บทที่ 6

### การวิเคราะห์แรงดันทางด้านเอาต์พุตเมื่อมีการเลื่อนเฟส

ตามที่ได้กล่าวมาแล้วว่า มุมของกระแสอินพุตแบบพีคดับลิวเอ็ม สามารถที่จะเปลี่ยนแปลงได้ เมื่อเทียบกับกับมุมเลื่อนเฟสของแรงดันจากแหล่งจ่าย ซึ่งการเปลี่ยนแปลงนี้จะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงแรงดันเฉลี่ยทางด้านเอาต์พุตด้วย (กรณีที่มีการปรับค่า  $\alpha$  ด้วย) ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงการวิเคราะห์ค่าแรงดันทางด้านเอาต์พุตที่เลื่อนออกไป (Shift Phase) ในกรณีที่แตกต่างกัน 2 กรณี นั่นคือกรณีที่คิดค่าเวลาการคายประจุ  $\tau$  และกรณีที่ไม่มีค่า  $\tau$

#### 6.1 กรณีที่ไม่มีช่วงเวลาการคายประจุ ( $\tau=0$ )



รูปที่ 6.1 รูปคลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตที่คำนวณได้ เมื่อมุมเลื่อนเฟสมีค่านำหน้า  $90^\circ, 0^\circ$  และล่าหลัง  $90^\circ$  (คาบเวลาการคายประจุ  $\tau=0 \mu s$ )

ในกรณีนี้รูปคลื่นของแรงดันเอาต์พุตที่คำนวณได้อยู่ในรูปที่ 6.1(a)-(c) สำหรับมุมที่เลื่อนไปคือ  $\alpha = -90^\circ, 0^\circ$  และ  $+90^\circ$  ตามลำดับ จะสังเกตเห็นได้ว่ารูปคลื่นที่ได้ ณ จุดที่เฟสมีการนำหน้า เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และลำหลังด้วยค่าที่เท่ากันนั้น ค่าแรงดันเฉลี่ยทางด้านเอาก์พุทจะมีค่าไม่เท่ากัน (บางที่อาจจะแตกต่างกันด้วย) ซึ่งเป็นการเห็นได้ชัดว่า มุมของเพสที่มีการลำหลังจะส่งผลให้ค่าแรงดันมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ขณะเดียวกันกับที่ค่าแรงดันเฉลี่ยทางด้านเอาก์พุทมีค่าเกือบเป็นศูนย์ ณ จุดที่มุม  $\alpha$  มีค่าประมาณ  $90^\circ$  ค่าของแรงดันเฉลี่ยทางด้านเอาก์พุทที่เกิดขึ้นจริงสำหรับค่ามุม  $\alpha$  ใดๆ สามารถคำนวณได้จากรูปที่ 6.1 โดยคิดอยู่ในเทอมของค่ามุม  $\alpha$  กับค่าตัวประกอบมอดูเลชัน  $\lambda$  ในสมการที่ (6.1) ดังนี้

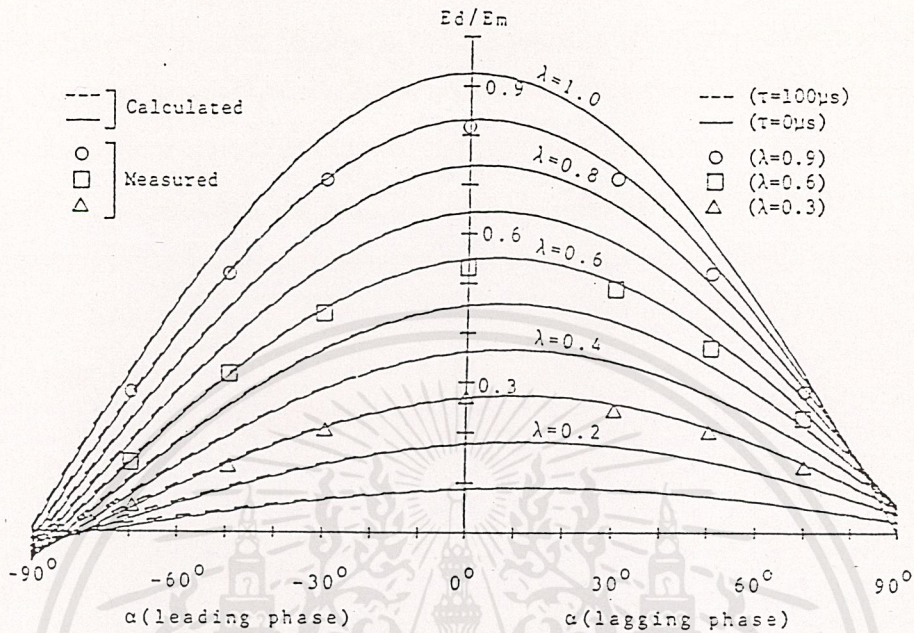
$$Ed(\alpha) = (3/\pi) \left[ \int_{\alpha}^{(1-X_1)\lambda\pi/6 + \alpha} Em \cdot \cos \theta \, d\theta + \int_{(1-X_1)\lambda\pi/6 + \alpha}^{\lambda\pi/6 + \alpha} Em \cdot \sin(\theta + \pi/6) \, d\theta \right. \\ \left. + \int_{\pi/6 + \alpha}^{\pi/6 + X_1\lambda\pi/6 + \alpha} Em \cdot \cos \theta \, d\theta + \int_{\pi/6 + X_1\lambda\pi/6 + \alpha}^{\pi/6 + \lambda\pi/6 + \alpha} Em \cdot \sin(\theta + \pi/6) \, d\theta \right] \quad (6.1)$$

หลังจากที่เราได้สมการ และจัดรูปสมการที่ (6.1) ใหม่จะได้ว่าค่าแรงดันเฉลี่ยทางด้านเอาก์พุทซึ่งเขียนอยู่ในรูปของค่าออร์มัลไลซ์ ( $Ed/Em$ ) จะเขียนอยู่ในสมการที่ (6.2) โดยมีค่ามุมเลื่อนเพส ( $\alpha$ ) ทั้งนำหน้า และลำหลัง

$$Ed(\alpha, \tau)/Em = 3/\pi \left[ \sin \left\{ \frac{(1-X_1)\lambda\pi}{6} + \alpha \right\} - \sin \alpha + \cos \left\{ \frac{(1-X_1)\lambda\pi}{6} + \alpha + \frac{\pi}{6} \right\} \right. \\ \left. - \cos \left\{ \frac{\lambda\pi}{6} + \omega\tau + \alpha + \frac{\pi}{6} \right\} + \sin \left\{ \frac{\pi}{6} + X_1\frac{\lambda\pi}{6} + \alpha \right\} - \sin \left\{ \frac{\pi}{6} + \alpha \right\} \right. \\ \left. + \cos \left\{ \frac{\pi}{6} + X_1\frac{\lambda\pi}{6} + \alpha + \frac{\pi}{6} \right\} - \cos \left\{ \frac{\pi}{6} + \frac{\lambda\pi}{6} - \omega\tau + \alpha + \frac{\pi}{6} \right\} \right] \quad (6.2)$$

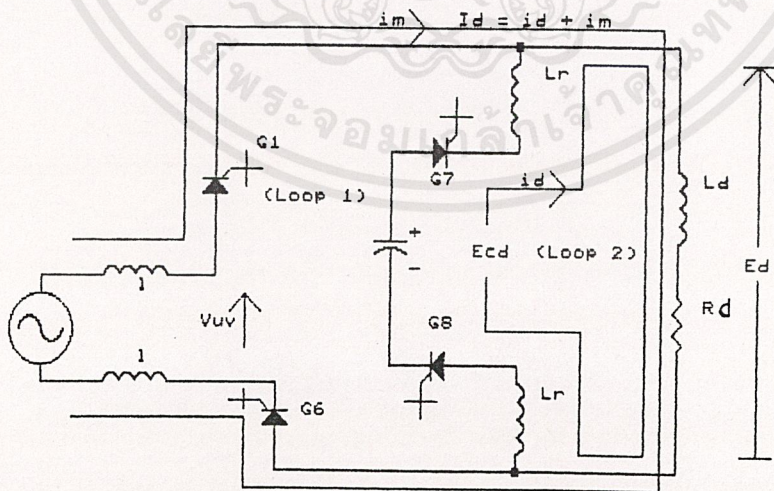
สมการที่ (6.2) สามารถที่จะคำนวณโดยวิธีเชิงตัวเลขด้วยคอมพิวเตอร์ และผลลัพธ์ที่ได้จะแสดงได้โดยใช้กราฟที่เป็นเส้นทึบในรูปที่ (6.2) ในรูปที่ 6.2 จะแสดงค่าแรงดันเฉลี่ยทางด้านเอาก์พุทเทียบกับมุมเลื่อนเพส ในขณะที่ค่าตัวประกอบมอดูเลชันเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ศูนย์จนถึง 1 จากรูปจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าการเปลี่ยนแปลงค่าแรงดันเฉลี่ยทางด้านเอาก์พุท (ที่ถูกออร์มัลไลซ์แล้ว) เมื่อเทียบกับมุมเลื่อนเพสจะอยู่ในรูปของกราฟรูปโคไซน์ ที่สมมาตรสำหรับค่า  $\lambda=1$  และจะเกิดการไม่สมมาตรเล็กน้อยเมื่อค่า  $\lambda$  เปลี่ยนแปลงจาก 1 ถึง 0 พร้อมกับค่าสูงสุดของแต่ละกราฟรูปโคไซน์ จะมีค่าลดลงตามค่าตัวประกอบของมอดูเลชันด้วย ซึ่งมีผลมาจากการที่ค่าพื้นที่ใต้กราฟรูปโคไซน์ของแรงดันเฉลี่ยทางด้านเอาก์พุทมีค่าไม่เท่ากัน ณ จุดที่มีค่ามุมเลื่อนเพสที่เท่ากันทั้งนำหน้า และลำหลัง (ขณะที่ค่า  $\lambda < 1$ ) ยกตัวอย่างเช่น รูปที่ (6.1)(a) และ (c) ที่มีมุมเลื่อนเพสเท่ากับ  $90^\circ$  ที่นำหน้าและลำหลังตามลำดับ โดยที่ค่า  $\lambda=0.7$  จะเห็นได้ว่าค่าพื้นที่ใต้กราฟของแรงดันเฉลี่ยทางด้านเอาก์พุท ณ จุดที่มุมเลื่อนเพสมีค่านำหน้าจะมีค่าเป็นลบเล็กน้อย (หรือมีค่าน้อยกว่า) ในขณะที่มุมเลื่อนเพสมีค่าลำหลังจะมีค่า

เป็นบวกเล็กน้อย (หรือมีค่ามากกว่า) ค่าสูงสุดของแรงดันเฉลี่ยทางด้านเอาต์พุตที่นอร์มัลไลซ์แล้ว จะมีค่า 0.926 สำหรับค่าอินพุตเพาเวอร์แฟกเตอร์มูลฐาน และค่าตัวประกอบมอดูเลชัน  $\lambda$  มีค่าเท่ากับ 1



รูปที่ 6.2 แสดงค่าแรงดันเอาต์พุตที่นอร์มัลไลซ์เฉลี่ย ( $E_d/E_m$ ) เทียบกับ ค่ามุมเลื่อนเฟส  $\alpha$  ( $0 < \lambda < 1$ ), โดยที่ เส้นทึบคือที่  $\tau = 0$  และเส้นประคือที่  $\tau > 0$

### 6.2 กรณีที่มีช่วงเวลากการคายประจุ ( $\tau > 0$ )



รูปที่ 6.3 แสดงการทำงานของวงจรกำลังในช่วงเวลากการคายประจุ  $\tau$  ในวงจรช่วย

ถ้าวงจรช่วยปราศจากตัวเหนี่ยวนำทั้งสองแล้ว ค่าแรงดันที่ปรากฏที่เอาต์พุทเทอร์มินัล ในช่วงที่จีโอ G7 และ G8 นำกระแส จะมีค่าเท่ากับแรงดัน  $E_{cd}$  ของตัวเก็บประจุในวงจรช่วย อย่างไรก็ตาม ในวงจรช่วยจำเป็นต้องมีตัวเหนี่ยวนำ  $L_r$  ทั้งสองตัวเพื่อประโยชน์ในการป้องกันจีโอ G7 และ G8 ในขณะที่มันหยุดนำกระแส ดังนั้นค่าแรงดันเอาต์พุทในช่วงเวลาการคายประจุ จะมีค่าไม่เท่ากับค่า  $E_{cd}$  ซึ่งเราจะต้องหาค่าแรงดันนี้ให้ได้โดยวิธีการพิจารณาวงจรหลัก ขณะที่ช่วงเวลาการคายประจุ  $\tau$  ที่ทำให้เกิดสภาพการนำกระแสของ G7 และ G8 ในวงจรช่วย ซึ่งการทำงานของวงจร แสดงไว้ในรูปที่ 6.3 โดยที่ขณะนี้ G1 และ G6 ในวงจรเรกติฟาย์กำลังนำกระแส  $i_m$  พร้อม ๆ กับ G7 และ G8 ในวงจรช่วยกำลังนำกระแสที่เกิดจากการคายประจุ  $i_d$  จากรูปเราจะได้สมการของลูปแรงดัน 2 สมการ ดังนี้

Loop 1

$$2l(\text{dim}/dt) = V_{uv} - E_d \quad (6.3)$$

และ Loop 2

$$2L_r(dic/dt) = E_{cd} - E_d \quad (6.4)$$

จากสมการที่ (6.4)

$$2L_r\{d(I_c - I_m)/dt\} = E_{cd} - E_d$$

$$\text{dim}/dt = (E_{cd} - E_d)/2L_r \quad (6.5)$$

แทนค่าสมการที่ (6.5) ลงในสมการที่ (6.3) เราจะได้ว่า

$$(1/L_r)(E_d - E_{cd}) = V_{uv} - E_d \quad (6.6)$$

ให้  $1/L_r = k$  และแทนค่าลงในสมการที่ (6.6) จะได้ว่า

$$(1+k)E_d = V_{uv} + kE_{cd}$$

$$E_d = 1/(1+k)V_{uv} + k/(1+k)E_{cd} \quad (6.7)$$

โดยที่

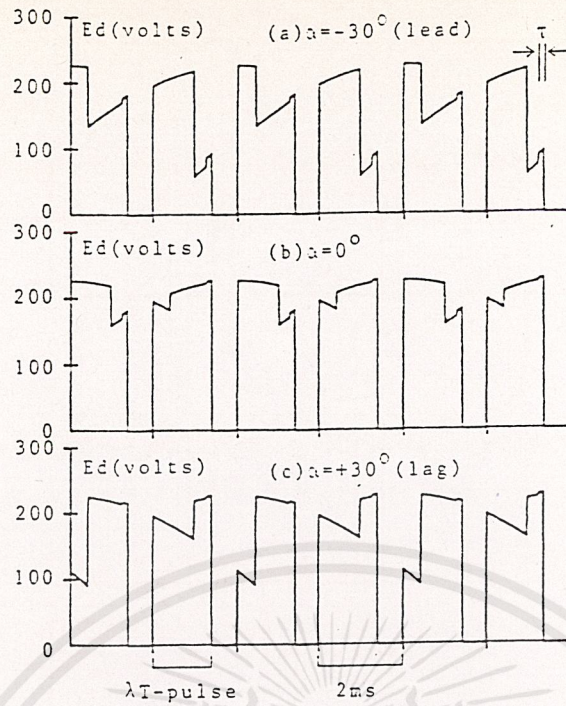
$$1/(1+k) = K \quad (6.8)$$

$$k/(1+k) = 1 - K \quad (6.9)$$

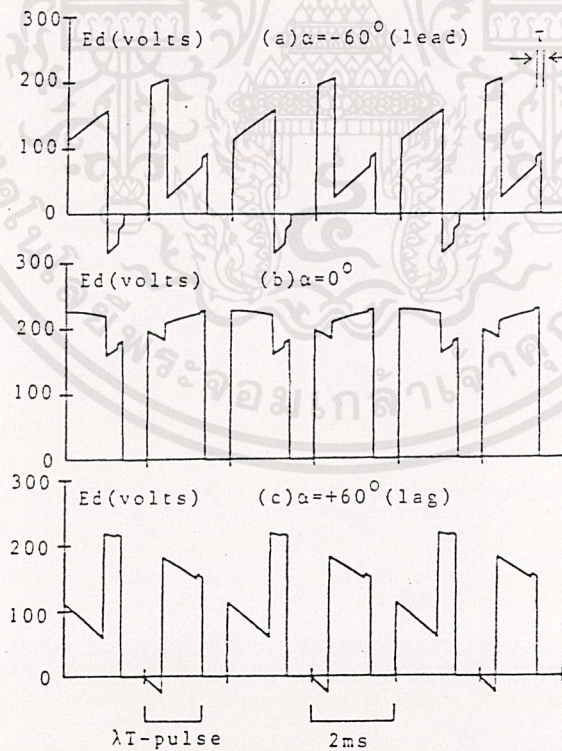
แทนค่าสมการที่ (6.8) และ (6.9) ลงในสมการที่ (6.7) เราจะได้ว่า

$$E_d = KV_{uv} + (1-K)E_{cd} \quad (6.10)$$

จากสมการที่ (6.10) เห็นได้อย่างชัดเจนว่า ค่าแรงดันทางดักเอาต์พุท  $E_d$  ตลอดช่วงเวลาการคายประจุ  $\lambda$  จะขึ้นอยู่กับค่าอัตราส่วนของตัวเหนี่ยวนำ  $1/L_r$  ค่าโวลต์โวลต์โวลเตจ ( $V_{uv}$ ) และค่าแรงดันของตัวเก็บประจุในวงจรช่วย ( $E_{cd}$ ) รูปคลื่นของแรงดันทางดักเอาต์พุทที่คำนวณได้ในกรณีนี้ จะมีรูปแบบเหมือนกับในกรณีที่ไม่มีค่าของช่วงเวลา การคายประจุ  $\lambda$  เมื่อเราทำการพิจารณาค่า  $\lambda$  สมการที่ (6.10) จะมีผลที่ช่วงท้ายของแต่ละช่วงพัลส์  $\lambda T$  ของรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุท  $E_d$  รูปที่ (6.4)-(6.6)แสดงถึงรูปคลื่นสำหรับค่ามุมเลื่อนเฟส  $\alpha = \pm 30^\circ, \pm 60^\circ$  และ  $\pm 90^\circ$  ตามลำดับ เมื่อเทียบกับค่ามุมเลื่อนเฟสเท่ากับศูนย์ เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับรูปคลื่นแรงดันในรูปที่ 6.1 รูปคลื่นที่ใดเหล่านี้ จะมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยที่พอจะสังเกตเห็นได้ที่แต่ละช่วงท้ายๆ ของพัลส์  $\lambda T$

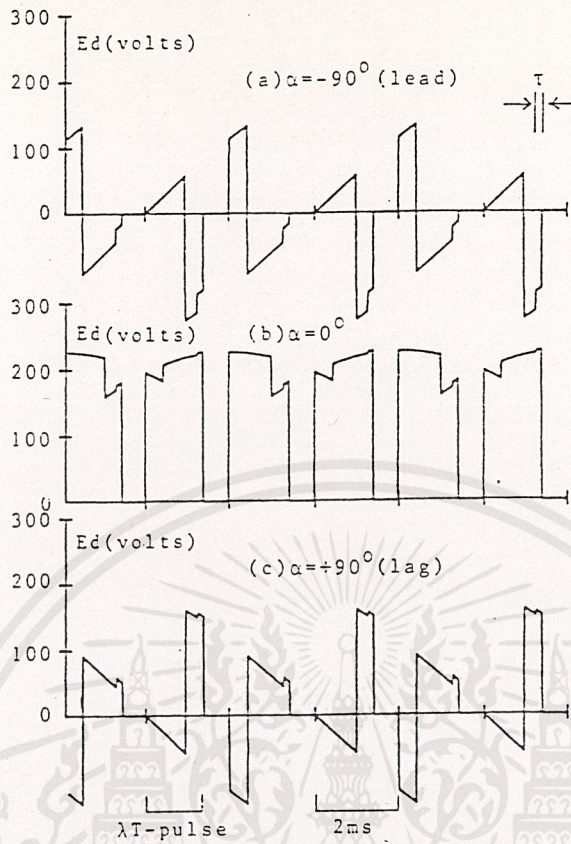


รูปที่ 6.4 รูปคลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตที่คำนวณได้ เมื่อมุมเลื่อนเฟสมีค่านำหน้า  $30^\circ$ ,  $0^\circ$  และล้าหลัง  $30^\circ$  (คาบเวลาการคายประจุ  $\tau = 100 \mu\text{s}$ )



รูปที่ 6.5 รูปคลื่นแรงดันทางด้านเอาต์พุตที่คำนวณได้ เมื่อมุมเลื่อนเฟสมีค่านำหน้า  $60^\circ$ ,  $0^\circ$  และล้าหลัง  $60^\circ$  (คาบเวลาการคายประจุ  $\tau = 100 \mu\text{s}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 42  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.6 รูปคลื่นแรงดันทางต้านเอาต์พุตที่คำนวณได้ เมื่อมุมเลื่อนเฟสมีค่านำหน้า  $90^\circ$ ,  $0^\circ$  และล่าหลัง  $90^\circ$  (คาบเวลาการคายประจุ  $\tau=100 \mu\text{s}$ )

เมื่อพิจารณาถึงผลกระทบเมื่อพิจารณาคาบเวลาการคายประจุ ( $\tau$ ) จะสามารถคำนวณค่าแรงดันเฉลี่ยทางต้านเอาต์พุตโดยใช้สมการที่ (6.10) และรูปคลื่นที่คำนวณได้ในรูปที่ 6.4-รูปที่ 6.6 ดังนี้

$$E_d(\alpha, \tau) = \frac{3}{\pi} \left[ \int_{\alpha}^{(1-X_1)\lambda\pi/6+\alpha} E_m \cos \theta \, d\theta + \int_{(1-X_1)\lambda\pi/6+\alpha}^{\lambda\pi/6-\omega\tau+\alpha} E_m \sin(\theta + \pi/6) \, d\theta \right. \\ \left. + \int_{\lambda\pi/6-\omega\tau+\alpha}^{\lambda\pi/6+\alpha} \{K \cdot E_m \sin(\theta + \pi/6) + (1-K)E_c d\} \, d\theta \right. \\ \left. + \int_{\pi/6+\alpha}^{\pi/6+X_1\lambda\pi/6+\alpha} E_m \cos \theta \, d\theta + \int_{\pi/6+X_1\lambda\pi/6+\alpha}^{\pi/6+\lambda\pi/6-\omega\tau+\alpha} E_m \sin(\theta + \pi/6) \, d\theta \right]$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 43  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\int_{\pi/6+\lambda\pi/6-\omega\tau+\alpha}^{\pi/6+\lambda\pi/6+\alpha} \{K \cdot E_m \cdot \sin(\theta + \pi/6) + (1-K)E_{cd}\} d\theta \quad (6.11)$$

แก้สมการที่ (6.11) จะได้ค่าแรงดันนอร์มัลไลซ์เฉลี่ยทางด้านเอาท์พุทมีค่าเท่ากับ

$$\begin{aligned} Ed(\alpha, \tau)/E_m &= 3/\pi \left[ \sin \left\{ (1-X_1) \frac{\lambda\pi}{6} + \alpha \right\} - \sin \alpha + \cos \left\{ (1-X_1) \frac{\lambda\pi}{6} + \alpha + \frac{\pi}{6} \right\} \right. \\ &\quad - \cos \left\{ \frac{\lambda\pi}{6} + \omega\tau + \alpha + \frac{\pi}{6} \right\} + K \cdot \cos \left\{ \frac{\lambda\pi}{6} - \omega\tau + \alpha + \frac{\pi}{6} \right\} \\ &\quad - K \cdot \cos \left\{ \frac{\lambda\pi}{6} + \alpha + \frac{\pi}{6} \right\} + (1-K)(E_{cd}/E_m)\omega\tau \\ &\quad + \sin \left\{ \frac{\pi}{6} + X_1 \frac{\lambda\pi}{6} + \alpha \right\} - \sin \left\{ \frac{\pi}{6} + \alpha \right\} \\ &\quad + \cos \left\{ \frac{\pi}{6} + X_1 \frac{\lambda\pi}{6} + \alpha + \frac{\pi}{6} \right\} - \cos \left\{ \frac{\pi}{6} + \frac{\lambda\pi}{6} - \omega\tau + \alpha + \frac{\pi}{6} \right\} \\ &\quad + K \cdot \cos \left\{ \frac{\pi}{6} + \frac{\lambda\pi}{6} - \omega\tau + \alpha + \frac{\pi}{6} \right\} - K \cdot \cos \left\{ \frac{\pi}{6} + \frac{\lambda\pi}{6} + \alpha + \frac{\pi}{6} \right\} \\ &\quad \left. + (1-K)(E_{cd}/E_m)\omega\tau \right] \quad (6.12) \end{aligned}$$

ซึ่ง  $K: 1/(1+k)$ ,  $k: 1/L_r$ ,  $l$ : ลีเกจอินตักแตนท์จากแหล่งจ่ายเอซี,

$L_r$ : ค่าอินตักแตนท์ในวงจรช่วย

รูปที่ (6.2) เป็นการพล็อตกราฟระหว่างค่าแรงดันนอร์มัลไลซ์เฉลี่ยทางด้านเอาท์พุท เมื่อพิจารณา  $\tau$  เทียบกับมุมเลื่อนเฟส  $\alpha$  และเทียบกับค่าตัวประกอบมอดูเลชัน  $\lambda$  ตามลำดับ โดยที่ค่าแรงดันนอร์มัลไลซ์เฉลี่ยทางด้านเอาท์พุทเมื่อไม่พิจารณาค่า  $\tau$  (แสดงด้วยเส้นหนา) จะนำมาพล็อตกราฟด้วยเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างในทั้งสองกรณี

จากรูปจะเห็นว่า ผลลัพธ์ทั้งสองมีค่าเกือบจะเท่ากัน เมื่ออยู่ในย่านที่มุมเลื่อนเฟสมีค่าต่ำ และจะมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อยเมื่ออยู่ในย่านที่มุมเลื่อนเฟส  $\alpha$  มีค่ามากขึ้น ทั้งนี้เป็นกรณีสำหรับทั้งมุมนำหน้า และมุมล่าหลัง ทั้งนี้เนื่องมาจากว่า ที่ย่านมุมเลื่อนเฟสมีค่ามากขึ้นค่าแรงดันเฉลี่ยทางด้านเอาท์พุทมีค่าต่ำ ส่งผลทำให้เกิดความแตกต่างกันเล็กน้อยระหว่างสองกรณีนี้ และค่าแรงดันเอาท์พุทเฉลี่ยที่คำนวณได้สำหรับทั้งสองกรณี สามารถที่จะตรวจสอบได้โดยการทดลองให้เห็นจริง ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้แสดงให้เห็นว่า รูปคลื่นของแรงดันเฉลี่ยทางด้านเอาท์พุท จะส่งผลให้เห็นว่า ค่าแรงดันสไบค์ที่เกิดขึ้นที่เอาท์พุท ในช่วงเวลาการเกิดการคายประจุ  $\tau$  จะถูกทำให้น้อยลงโดยตัวเหนี่ยวนำ  $L_r$  ทั้งสองในวงจรช่วย เนื่องจากว่าค่าแรงดันสไบค์ที่เกิดขึ้นนี้ จะถูกจำกัดให้อยู่ระดับเดียวกับกับค่าแรงดันโวลท์ไลน์ แทนที่จะเป็นค่าแรงดันของตัวเก็บประจุในวงจรช่วย ( $E_{cd}$ ) ด้วยวิธีนี้ รูปคลื่นของแรงดันทางด้านเอาท์พุทจะดีขึ้น โดยที่รูปคลื่นของแรงดันเอาท์พุทที่คำนวณได้ในรูปที่ 6.4-6.6

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
44  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.3 สมการนอร์มัลไลซ์เฉลี่ยของแรงดันทางด้านเอาต์พุตที่ N-พัลส์

ในกรณีที่เราคำนวณหาค่าแรงดันเอาต์พุตโดยที่พิจารณาคาบเวลาการคายประจุของคาปาซิเตอร์ Cd ด้วย และคำนวณหาค่าแรงดันทางด้านเอาต์พุตที่มุมเลื่อนเฟสต่าง ๆ กัน นั่นคือเราจะคิดค่าแรงดันเอาต์พุตเฉลี่ยที่เป็นฟังก์ชันของมุมเลื่อนเฟสและคาบเวลาการคายประจุ ซึ่งเราจะแยกตามจำนวนพัลส์ของรูปแบบกระแสทาง เอชไอไลน์

#### 6.3.1 รูปแบบสมการ

จากสมการที่ (6.11) นั้นเป็นการหาค่าแรงดันเอาต์พุตเฉลี่ยที่ 6-พัลส์ โดยคิดค่าคาบเวลาการคายประจุด้วย ดังนั้นเราสามารถที่จะเขียนสมการของแรงดันทางด้านเอาต์พุตที่ N-พัลส์ ได้โดยการกำหนดช่วงเวลาของการอินทิเกรต ดังนี้

#### ที่ 6-พัลส์ ช่วงการอินทิเกรตคือ

- |                                |       |                                       |
|--------------------------------|-------|---------------------------------------|
| 1. $\alpha$                    | $t_0$ | $(1-X_1)\lambda T + \alpha$           |
| 2. $(1-X_1)\lambda T + \alpha$ | $t_0$ | $\lambda T + \alpha - \omega\tau$     |
| 3. $T + \alpha$                | $t_0$ | $T + X_1\lambda T + \alpha$           |
| 4. $T + X_1\lambda T + \alpha$ | $t_0$ | $T + \lambda T + \alpha - \omega\tau$ |

#### 9-พัลส์ ช่วงการอินทิเกรตคือ

- |                                 |       |  |
|---------------------------------|-------|--|
| 1. $\alpha$                     | $t_0$ | $(1-X_1)\lambda T + \alpha$            |
| 2. $(1-X_1)\lambda T + \alpha$  | $t_0$ | $\lambda T + \alpha - \omega\tau$      |
| 3. $T + \alpha$                 | $t_0$ | $T + 0.5\lambda T + \alpha$            |
| 4. $T + 0.5\lambda T + \alpha$  | $t_0$ | $T + \lambda T + \alpha - \omega\tau$  |
| 5. $2T + \alpha$                | $t_0$ | $2T + X_1\lambda T + \alpha$           |
| 6. $2T + X_1\lambda T + \alpha$ | $t_0$ | $2T + \lambda T + \alpha - \omega\tau$ |

#### 12-พัลส์ ช่วงการอินทิเกรตคือ

- |                                 |       |  |
|---------------------------------|-------|--|
| 1. $\alpha$                     | $t_0$ | $(1-X_1)\lambda T + \alpha$            |
| 2. $(1-X_1)\lambda T + \alpha$  | $t_0$ | $\lambda T + \alpha - \omega\tau$      |
| 3. $T + \alpha$                 | $t_0$ | $(1-X_2)\lambda T + \alpha$            |
| 4. $(1-X_2)\lambda T + \alpha$  | $t_0$ | $T + \lambda T + \alpha - \omega\tau$  |
| 5. $2T + \alpha$                | $t_0$ | $2T + X_2\lambda T + \alpha$           |
| 6. $2T + X_2\lambda T + \alpha$ | $t_0$ | $2T + \lambda T + \alpha - \omega\tau$ |
| 7. $3T + \alpha$                | $t_0$ | $3T + X_1\lambda T + \alpha$           |
| 8. $3T + X_1\lambda T + \alpha$ | $t_0$ | $3T + \lambda T + \alpha - \omega\tau$ |

#### 15-พัลส์ ช่วงการอินทิเกรตคือ

- |             |       |                             |
|-------------|-------|-----------------------------|
| 1. $\alpha$ | $t_0$ | $(1-X_1)\lambda T + \alpha$ |
|-------------|-------|-----------------------------|

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- |                                    |    |  |
|------------------------------------|----|--|
| 2. $(1-X_1)\lambda T + \alpha$     | to | $\lambda T + \alpha - \omega\tau$      |
| 3. $T + \alpha$                    | to | $T + (1-X_2)\lambda T + \alpha$        |
| 4. $T + (1-X_2)\lambda T + \alpha$ | to | $T + \lambda T + \alpha - \omega\tau$  |
| 5. $2T + \alpha$                   | to | $2T + 0.5\lambda T + \alpha$           |
| 6. $2T + 0.5\lambda T + \alpha$    | to | $2T + \lambda T + \alpha - \omega\tau$ |
| 7. $3T + \alpha$                   | to | $3T + X_2\lambda T + \alpha$           |
| 8. $3T + X_2\lambda T + \alpha$    | to | $3T + \lambda T + \alpha - \omega\tau$ |
| 9. $4T + \alpha$                   | to | $4T + X_1\lambda T + \alpha$           |
| 10. $4T + X_1\lambda T + \alpha$   | to | $4T + \lambda T + \alpha - \omega\tau$ |

เมื่อเราได้ช่วงของการอินทิเกรตที่จำนวนพัลส์ต่างๆแล้ว จัดให้อยู่ในรูปอย่างง่ายๆ(ในที่นี้จะไม่มี การพิสูจน์สมการ แต่จะนำผลที่คำนวณได้มาแสดง เลย) ดังนั้นสมการค่าแรงดันนอร์มัลไลซ์เฉลี่ยทาง ด้านเอาท์พุทที่มีความสัมพันธ์กับมุมเลื่อนเฟสและคาบเวลาการคายประจุจะเป็นดังนี้

ที่ 6-พัลส์

$$\begin{aligned}
 & \text{Ed}(\alpha, \tau)/\text{Em} = \frac{3}{\pi} \left[ \frac{\text{SIN} \left\{ \frac{(1-X_1)\lambda\pi + \alpha}{6} \right\}}{6} - \frac{\text{SIN} \alpha}{6} + \frac{\text{COS} \left\{ \frac{(1-X_1)\lambda\pi}{6} + \alpha + \frac{\pi}{3} \right\}}{6} \right. \\
 & \quad - \frac{\text{COS} \left\{ \frac{\lambda\pi}{6} + \omega\tau + \alpha + \frac{\pi}{3} \right\}}{6} + K \cdot \frac{\text{COS} \left\{ \frac{\lambda\pi}{6} - \omega\tau + \alpha + \frac{\pi}{3} \right\}}{6} \\
 & \quad \left. - K \cdot \frac{\text{COS} \left\{ \frac{\lambda\pi}{6} + \alpha + \frac{\pi}{3} \right\}}{6} + (1-K) \frac{\text{Ecd}/\text{Em}}{6} \omega\tau \right] \\
 & \quad + \frac{\text{SIN} \left\{ \frac{\pi + X_1\lambda\pi + \alpha}{6} \right\}}{6} - \frac{\text{SIN} \left\{ \frac{\pi + \alpha}{6} \right\}}{6} \\
 & \quad + \frac{\text{COS} \left\{ \frac{\pi + X_1\lambda\pi + \alpha + \pi}{6} \right\}}{6} - \frac{\text{COS} \left\{ \frac{\pi + \lambda\pi - \omega\tau + \alpha + \pi}{6} \right\}}{6} \\
 & \quad + K \cdot \frac{\text{COS} \left\{ \frac{\pi + \lambda\pi - \omega\tau + \alpha + \pi}{6} \right\}}{6} - K \cdot \frac{\text{COS} \left\{ \frac{\pi + \lambda\pi + \alpha + \pi}{6} \right\}}{6}
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการตีพิมพ์เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

(7)

$$+ (1-K)(Ecd/Em) \omega \tau$$

$$\begin{aligned} \text{จาก (1)} \quad & \left[ \frac{\text{SIN} \{ (1-X_1)\lambda\pi + \alpha \}}{6} + \frac{\text{SIN} \{ \pi + X_1\lambda\pi + \alpha \}}{6} \right] \\ &= \frac{2\text{SIN} \{ (1+\lambda)\pi + \alpha \}}{12} \cos \frac{\pi + (2X_1-1)\lambda\pi}{12} \end{aligned}$$

$$\text{จาก (2)} \quad -\text{SIN} \alpha - \frac{\text{SIN} \{ \pi + \alpha \}}{6} = -2 \frac{\text{SIN} \{ \pi + \alpha \}}{12} \cos \frac{\pi}{12}$$

$$\begin{aligned} \text{จาก (3)} \quad & \frac{\text{COS} \{ (1-X_1)\lambda\pi + \alpha + \pi \}}{6} + \frac{\text{COS} \{ \pi + X_1\lambda\pi + \alpha + \pi \}}{6} \\ &= \frac{2 \text{COS} \{ (3+\lambda)\pi + \alpha \}}{12} \cos \frac{\pi + (2X_1-1)\lambda\pi}{12} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จาก (4)} \quad & -\frac{\text{COS} \{ \lambda\pi - \omega\tau + \alpha + \pi \}}{6} - \frac{\text{COS} \{ \pi + \lambda\pi - \omega\tau + \alpha + \pi \}}{6} \\ &= -2 \frac{\text{COS} \{ (3+2\lambda)\pi - \omega\tau + \alpha \}}{12} \cos \frac{\pi}{12} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จาก (5)} \quad & \frac{K \cdot \text{COS} \{ \lambda\pi - \omega\tau + \alpha + \pi \}}{6} + \frac{K \cdot \text{COS} \{ \pi + \lambda\pi - \omega\tau + \alpha + \pi \}}{6} \\ &= \frac{2K \cdot \text{COS} \{ \lambda\pi + 3\pi - \omega\tau + \alpha \}}{12} \cos \frac{\pi}{12} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จาก (6)} \quad & -\frac{K \cdot \text{COS} \{ \lambda\pi + \alpha + \pi \}}{6} - \frac{K \cdot \text{COS} \{ \pi + \lambda\pi + \alpha + \pi \}}{6} \\ &= -\frac{2K \cdot \text{COS} \{ \lambda\pi + 3\pi + \alpha \}}{12} \cos \frac{\pi}{12} \end{aligned}$$

$$(5) + (6) = \frac{4K \cdot \text{COS} \frac{\pi}{12} \text{SIN} \{ (3+2\lambda)\frac{\pi}{12} - \frac{\omega\tau}{2} + \alpha \}}{12} \frac{\text{SIN} \frac{\omega\tau}{2}}{2}$$

$$\text{จาก (7)} = 2(1-K)(Ecd/Em)\omega\tau$$

รวมเทอมต่าง ๆ ข้างบนจะได้

$$\begin{aligned} \text{Ed}(\alpha, \tau)/\text{Em} = & \frac{3}{\pi} \left[ \frac{2\text{COS} \{ \pi + (2X_1-1)\lambda\pi \}}{12} \left[ \frac{\text{SIN} \{ (1+\lambda)\pi + \alpha \}}{12} \right. \right. \\ & \left. \left. + \frac{\text{COS} \{ (3+\lambda)\pi + \alpha \}}{12} \right] - \frac{2\text{COS} \frac{\pi}{12} \left[ \text{SIN} \{ \pi + \alpha \}}{12} \right]}{12} \right] \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$+ \text{COS} \left\{ \frac{(3+2\lambda)\pi}{12} - \omega\tau + \alpha \right\} - 2K \cdot \text{SIN} \left\{ \frac{(3+2\lambda)\pi}{12} - \frac{\omega\tau}{2} + \alpha \right\} \\ \cdot \text{SIN} \frac{\omega\tau}{2} + 2\omega\tau(1-K)(\text{Ecd}/\text{Em})]$$

ที่ 9-พัลส์

$$\begin{aligned} \text{Ed}(\alpha, \tau)/\text{Em} = & \frac{3}{\pi} \left[ \text{SIN} \left\{ \frac{(1-X_1)\lambda\pi}{9} + \alpha \right\} - \text{SIN} \alpha + \text{COS} \left\{ \frac{(1-X_1)\lambda\pi}{9} + \alpha + \frac{\pi}{6} \right\} \right. \\ & - \text{COS} \left\{ \frac{\lambda\pi}{9} - \omega\tau + \alpha + \frac{\pi}{6} \right\} + K \cdot \text{COS} \left\{ \frac{\lambda\pi}{9} - \omega\tau + \alpha + \frac{\pi}{6} \right\} \\ & - K \cdot \text{COS} \left\{ \frac{\lambda\pi}{9} + \alpha + \frac{\pi}{6} \right\} + (1-K)(\text{Ecd}/\text{Em})\omega\tau \\ & + \text{SIN} \left\{ \frac{\pi}{9} + 0.5\frac{\lambda\pi}{9} + \alpha \right\} - \text{SIN} \left\{ \frac{\pi}{9} + \alpha \right\} + \text{COS} \left\{ \frac{\pi}{9} + 0.5\frac{\lambda\pi}{9} + \alpha + \frac{\pi}{6} \right\} \\ & - \text{COS} \left\{ \frac{\pi}{9} + \frac{\lambda\pi}{9} - \omega\tau + \alpha + \frac{\pi}{6} \right\} + K \cdot \text{COS} \left\{ \frac{\pi}{9} + \frac{\lambda\pi}{9} - \omega\tau + \alpha + \frac{\pi}{6} \right\} \\ & - K \cdot \text{COS} \left\{ \frac{\pi}{9} + \frac{\lambda\pi}{9} + \alpha + \frac{\pi}{6} \right\} + (1-K)(\text{Ecd}/\text{Em})\omega\tau \\ & + \text{SIN} \left\{ \frac{2\pi}{9} + X_1\frac{\lambda\pi}{9} + \alpha \right\} - \text{SIN} \left\{ \frac{2\pi}{9} + \alpha \right\} \\ & + \text{COS} \left\{ \frac{2\pi}{9} + X_1\frac{\lambda\pi}{9} + \alpha + \frac{\pi}{6} \right\} - \text{COS} \left\{ \frac{2\pi}{9} + \frac{\lambda\pi}{9} - \omega\tau + \alpha + \frac{\pi}{6} \right\} \\ & + K \cdot \text{COS} \left\{ \frac{2\pi}{9} + \frac{\lambda\pi}{9} - \omega\tau + \alpha + \frac{\pi}{6} \right\} - K \cdot \text{COS} \left\{ \frac{2\pi}{9} + \frac{\lambda\pi}{9} + \alpha + \frac{\pi}{6} \right\} \\ & \left. + (1-K)(\text{Ecd}/\text{Em})\omega\tau \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จาก (1)} \quad & \text{SIN} \left\{ \frac{(1-X_1)\lambda\pi}{9} + \alpha \right\} + \text{SIN} \left\{ \frac{2\pi}{9} + X_1\frac{\lambda\pi}{9} + \alpha \right\} \\ & = 2\text{SIN} \left\{ \frac{(2+\lambda)\pi}{18} + \alpha \right\} \text{COS} \left\{ \frac{\pi}{9} + \frac{(2X_1-1)\lambda\pi}{18} \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จาก (2)} \quad & -\text{SIN} \alpha - \text{SIN} \left\{ \frac{\pi}{9} + \alpha \right\} - \text{SIN} \left\{ \frac{2\pi}{9} + \alpha \right\} \\ & = -2\text{SIN} \left\{ \frac{\pi}{9} + \alpha \right\} \left[ \text{COS} \frac{\pi}{9} + 0.5 \right] \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{จาก (3)} \quad & \cos \left\{ \frac{(1-X_1)\lambda\pi}{9} + \frac{\alpha + \pi}{6} \right\} + \cos \left\{ \frac{2\pi + X_1\lambda\pi}{9} + \frac{\alpha + \pi}{6} \right\} \\ & = 2 \cos \left\{ \frac{(5 + \lambda)\pi}{18} + \frac{\alpha}{6} \right\} \cos \left\{ \frac{\pi + (2X_1 - 1)\lambda\pi}{9} \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จาก (4)} \quad & K \cdot \cos \left\{ \frac{\lambda\pi}{9} - \frac{\omega\tau + \alpha + \pi}{6} \right\} + K \cdot \cos \left\{ \frac{\pi + \lambda\pi}{9} - \frac{\omega\tau + \alpha + \pi}{6} \right\} \\ & + K \cdot \cos \left\{ \frac{2\pi + \lambda\pi}{9} - \frac{\omega\tau + \alpha - \pi}{6} \right\} \\ & = 2K \cdot \cos \left\{ \frac{(5 + 2\lambda)\pi}{18} - \frac{\omega\tau + \alpha}{6} \right\} \left[ \cos \frac{\pi}{9} + 0.5 \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จาก (5)} \quad & -K \cdot \cos \left\{ \frac{\lambda\pi}{9} + \frac{\alpha + \pi}{6} \right\} - K \cdot \cos \left\{ \frac{\pi + \lambda\pi}{9} + \frac{\alpha + \pi}{6} \right\} \\ & - K \cdot \cos \left\{ \frac{2\pi + \lambda\pi}{9} + \frac{\alpha + \pi}{6} \right\} \\ & = -2K \cdot \cos \left\{ \frac{(5 + 2\lambda)\pi}{18} + \frac{\alpha}{6} \right\} \left[ \cos \frac{\pi}{9} + 0.5 \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จาก (6)} \quad & \sin \left\{ \frac{\pi + 0.5\lambda\pi}{9} + \frac{\alpha}{6} \right\} + \cos \left\{ \frac{\pi + 0.5\lambda\pi}{9} + \frac{\alpha + \pi}{6} \right\} \\ & + 3\omega\tau(1-K)(E_{cd}/E_m) \\ & = \sin \left\{ \frac{(2 + \lambda)\pi}{18} + \frac{\alpha}{6} \right\} + \cos \left\{ \frac{(5 + \lambda)\pi}{18} + \frac{\alpha}{6} \right\} + 3\omega\tau(1-K)(E_{cd}/E_m) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จาก (7)} \quad & -\cos \left\{ \frac{\lambda\pi}{9} - \frac{\omega\tau + \alpha + \pi}{6} \right\} - \cos \left\{ \frac{\pi + \lambda\pi}{9} - \frac{\omega\tau + \alpha + \pi}{6} \right\} \\ & - \cos \left\{ \frac{2\pi + \lambda\pi}{9} - \frac{\omega\tau + \alpha + \pi}{6} \right\} \\ & = -2 \cos \left\{ \frac{(5 + 2\lambda)\pi}{18} - \frac{\omega\tau + \alpha}{6} \right\} \left[ \cos \frac{\pi}{9} + 0.5 \right] \end{aligned}$$

รวมเทอมต่าง ๆ ข้างบนจะได้

$$\begin{aligned} E_d(\alpha, \tau)/E_m = & 3/\pi \left[ 2 \cos \left\{ \frac{\pi + (2X_1 - 1)\lambda\pi}{9} \right\} \left[ \sin \left\{ \frac{(2 + \lambda)\pi}{18} + \frac{\alpha}{6} \right\} \right. \right. \\ & \left. \left. + \cos \left\{ \frac{(5 + \lambda)\pi}{18} + \frac{\alpha}{6} \right\} \right] - 2 \left[ \cos \frac{\pi}{9} + 0.5 \right] \left[ \sin \frac{\pi}{9} + \alpha \right] \right] \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
& + \text{COS} \left\{ \frac{(5+2\lambda)\pi}{18} - \omega\tau + \alpha \right\} - 2K \cdot \text{SIN} \left\{ \frac{(5+2\lambda)\pi}{18} - \frac{\omega\tau}{2} + \frac{\alpha}{2} \right\} \text{SIN} \frac{\omega\tau}{2} \\
& + \text{SIN} \left\{ \frac{(2+\lambda)\pi}{18} + \alpha \right\} + \text{COS} \left\{ \frac{(5+\lambda)\pi}{18} + \alpha \right\} + 3\omega\tau(1-K)(\text{Ecd}/\text{Em})
\end{aligned} \tag{6.14}$$

ที่ 12-ผลลัพธ์

$$\begin{aligned}
\text{Ed}(\alpha, \tau)/\text{Em} = & \frac{3}{\pi} \left[ \text{SIN} \left\{ \frac{(1-X_1)\lambda\pi}{12} + \alpha \right\} - \text{SIN} \alpha \right. \\
& + \text{COS} \left\{ \frac{(1-X_1)\lambda\pi}{12} + \alpha + \frac{\pi}{6} \right\} - \text{COS} \left\{ \frac{\lambda\pi}{12} - \omega\tau + \alpha + \frac{\pi}{6} \right\} \\
& + K \cdot \text{COS} \left\{ \frac{\lambda\pi}{12} - \omega\tau + \alpha + \frac{\pi}{6} \right\} - K \cdot \text{COS} \left\{ \frac{\lambda\pi}{12} + \alpha + \frac{\pi}{6} \right\} \\
& + (1-K)(\text{Ecd}/\text{Em})\omega\tau + \text{SIN} \left\{ \frac{\pi}{12} + \frac{(1-X_2)\lambda\pi}{12} + \alpha \right\} \\
& - \text{SIN} \left\{ \frac{\pi}{12} + \alpha \right\} + \text{COS} \left\{ \frac{\pi}{12} + \frac{(1-X_2)\lambda\pi}{12} + \alpha + \frac{\pi}{6} \right\} \\
& - \text{COS} \left\{ \frac{\pi}{12} + \frac{\lambda\pi}{12} - \omega\tau + \alpha + \frac{\pi}{6} \right\} + K \cdot \text{COS} \left\{ \frac{\pi}{12} + \frac{\lambda\pi}{12} - \omega\tau + \alpha + \frac{\pi}{6} \right\} \\
& - K \cdot \text{COS} \left\{ \frac{\pi}{12} + \frac{\lambda\pi}{12} + \alpha + \frac{\pi}{6} \right\} + (1-K)(\text{Ecd}/\text{Em})\omega\tau \\
& + \text{SIN} \left\{ \frac{2\pi}{12} + \frac{X_2\lambda\pi}{12} + \alpha \right\} - \text{SIN} \left\{ \frac{2\pi}{12} + \alpha \right\} \\
& + \text{COS} \left\{ \frac{2\pi}{12} + \frac{X_2\lambda\pi}{12} + \alpha + \frac{\pi}{6} \right\} - \text{COS} \left\{ \frac{2\pi}{12} + \frac{\lambda\pi}{12} - \omega\tau + \alpha + \frac{\pi}{6} \right\} \\
& + K \cdot \text{COS} \left\{ \frac{2\pi}{12} + \frac{\lambda\pi}{12} - \omega\tau + \alpha + \frac{\pi}{6} \right\} - K \cdot \text{COS} \left\{ \frac{2\pi}{12} + \frac{\lambda\pi}{12} + \alpha + \frac{\pi}{6} \right\} \\
& + (1-K)(\text{Ecd}/\text{Em})\omega\tau + \text{SIN} \left\{ \frac{3\pi}{12} + \frac{X_1\lambda\pi}{12} + \alpha \right\} \\
& - \text{SIN} \left\{ \frac{3\pi}{12} + \alpha \right\} + \text{COS} \left\{ \frac{3\pi}{12} + \frac{X_1\lambda\pi}{12} + \alpha + \frac{\pi}{6} \right\} \\
& - \text{COS} \left\{ \frac{3\pi}{12} + \frac{\lambda\pi}{12} - \omega\tau + \alpha + \frac{\pi}{6} \right\} + K \cdot \text{COS} \left\{ \frac{3\pi}{12} + \frac{\lambda\pi}{12} - \omega\tau + \alpha + \frac{\pi}{6} \right\} \\
& - K \cdot \text{COS} \left\{ \frac{3\pi}{12} + \frac{\lambda\pi}{12} + \alpha + \frac{\pi}{6} \right\} + (1-K)(\text{Ecd}/\text{Em})\omega\tau
\end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned} \text{จาก (1)} \quad & \frac{\sin \{(1-X_1)\lambda\pi + \alpha\}}{12} + \frac{\sin \{3\pi + X_1\lambda\pi + \alpha\}}{12} \\ & = 2\sin \left\{ \frac{(3+\lambda)\pi + \alpha}{24} \right\} \cos \left\{ \frac{3\pi + (2X_1-1)\lambda\pi}{24} \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จาก (2)} \quad & -\sin \alpha - \frac{\sin \{\pi + \alpha\}}{12} - \frac{\sin \{2\pi + \alpha\}}{12} - \frac{\sin \{3\pi + \alpha\}}{12} \\ & = -2\sin \left\{ \frac{3\pi + \alpha}{24} \right\} \left[ \cos \frac{3\pi}{24} + \cos \frac{\pi}{24} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จาก (3)} \quad & \frac{\sin \{\pi + (1-X_2)\lambda\pi + \alpha\}}{12} + \frac{\sin \{2\pi + X_2\lambda\pi + \alpha\}}{12} \\ & = 2\sin \left\{ \frac{(3+\lambda)\pi + \alpha}{24} \right\} \cos \left\{ \frac{\pi + (2X_2-1)\lambda\pi}{24} \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จาก (4)} \quad & \frac{\cos \{(1-X_1)\lambda\pi + \alpha + \pi\}}{12} + \frac{\cos \{3\pi + X_1\lambda\pi + \alpha + \pi\}}{12} \\ & = 2\cos \left\{ \frac{(7+\lambda)\pi + \alpha}{24} \right\} \cos \left\{ \frac{3\pi + (2X_1-1)\lambda\pi}{24} \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จาก (5)} \quad & \frac{\cos \{\pi + (1-X_2)\lambda\pi + \alpha\}}{12} + \frac{\cos \{2\pi + X_2\lambda\pi + \alpha\}}{12} \\ & = 2\cos \left\{ \frac{(7+\lambda)\pi + \alpha}{24} \right\} \cos \left\{ \frac{\pi + (2X_2-1)\lambda\pi}{24} \right\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จาก (6)} \quad & -\frac{\cos \{\lambda\pi - \omega\tau + \alpha + \pi\}}{12} - \frac{\cos \{\pi + \lambda\pi - \omega\tau + \alpha + \pi\}}{12} \\ & - \frac{\cos \{2\pi + \lambda\pi - \omega\tau + \alpha + \pi\}}{12} - \frac{\cos \{3\pi + \lambda\pi - \omega\tau + \alpha + \pi\}}{12} \\ & = -2\cos \left\{ \frac{(7+2\lambda)\pi - \omega\tau + \alpha}{24} \right\} \left[ \cos \frac{3\pi}{24} + \cos \frac{\pi}{24} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{จาก (7)} \quad & K \cdot \frac{\cos \{\lambda\pi - \omega\tau + \alpha + \pi\}}{12} + K \cdot \frac{\cos \{\pi + \lambda\pi - \omega\tau + \alpha + \pi\}}{12} \\ & + K \cdot \frac{\cos \{2\pi + \lambda\pi - \omega\tau + \alpha + \pi\}}{12} + K \cdot \frac{\cos \{3\pi + \lambda\pi - \omega\tau + \alpha + \pi\}}{12} \\ & = 2K \cdot \cos \left\{ \frac{(7+2\lambda)\pi - \omega\tau + \alpha}{24} \right\} \left[ \cos \frac{3\pi}{24} + \cos \frac{\pi}{24} \right] \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 \text{จาก (8)} \quad & -K \cdot \cos \frac{\lambda\pi}{12} + \alpha + \frac{\pi}{6} - K \cdot \cos \frac{\pi}{12} + \frac{\lambda\pi}{12} + \alpha + \frac{\pi}{6} \\
 & -K \cdot \cos \frac{2\pi}{12} + \frac{\lambda\pi}{12} + \alpha + \frac{\pi}{6} - K \cdot \cos \frac{3\pi}{12} + \frac{\lambda\pi}{12} + \alpha + \frac{\pi}{6} \\
 = & -2K \cdot \cos \frac{(7+2\lambda)\pi}{24} + \alpha \left[ \cos \frac{3\pi}{24} + \cos \frac{\pi}{24} \right]
 \end{aligned}$$

$$\text{จาก (9)} \quad = 4\omega\tau(1-K)(Ecd/Em)$$

$$\begin{aligned}
 Ed(\alpha, \tau)/Em = & 3/\pi \left[ 2\cos \frac{3\pi}{24} + (2X_1-1)\frac{\lambda\pi}{24} \right] \left[ \sin \frac{(3+\lambda)\pi}{24} + \alpha \right] \\
 & + \cos \frac{(7+\lambda)\pi}{24} + \alpha \left] + 2\cos \frac{\pi}{24} + (2X_2-1)\frac{\lambda\pi}{24} + \alpha \right] \\
 & \left[ \sin \frac{(3+\lambda)\pi}{24} + \alpha \right] + \cos \frac{(7+\lambda)\pi}{24} + \alpha \left] \right. \\
 & - 2 \left[ \cos \frac{3\pi}{24} + \cos \frac{\pi}{24} \right] \left[ \sin \frac{3\pi}{24} + \alpha \right] + \cos \frac{(7+2\lambda)\pi}{24} - \omega\tau + \alpha \left] \\
 & - 2K \cdot \sin \frac{(7+\lambda)\pi}{24} - \frac{\omega\tau + \alpha}{2} \sin \frac{\omega\tau}{2} \left] + 4\omega\tau(1-K)(Ecd/Em) \right]
 \end{aligned}$$

รวมเทอมต่าง ๆ ข้างบนจะได้

$$\begin{aligned}
 Ed(\alpha, \tau)/Em = & 3/\pi \left[ \left[ 2\cos \frac{3\pi}{24} + (2X_1-1)\frac{\lambda\pi}{24} + 2\cos \frac{\pi}{24} + (2X_2-1)\frac{\lambda\pi}{24} \right] \right. \\
 & \left. \left[ \sin \frac{(3+\lambda)\pi}{24} + \alpha \right] + \cos \frac{(7+\lambda)\pi}{24} + \alpha \right] - 2 \left[ \cos \frac{3\pi}{24} + \cos \frac{\pi}{24} \right] \\
 & \left[ \sin \frac{3\pi}{24} + \alpha \right] + \cos \frac{(7+2\lambda)\pi}{24} - \omega\tau + \alpha \left] - 2K \cdot \sin \frac{(7+\lambda)\pi}{24} \right. \\
 & \left. - \frac{\omega\tau + \alpha}{2} \sin \frac{\omega\tau}{2} \right] + 4\omega\tau(1-K)(Ecd/Em) \quad (6.15)
 \end{aligned}$$

ที่ 15-พัลส์

$$\begin{aligned}
 Ed(\alpha, \tau)/Em = & 3/\pi \left[ \sin \frac{(1-X_1)\lambda\pi}{15} + \alpha \right] - \sin \alpha \\
 & + \cos \frac{(1-X_1)\lambda\pi}{15} + \alpha + \frac{\pi}{6} - \cos \frac{\lambda\pi}{15} - \omega\tau + \alpha + \frac{\pi}{6} \\
 & + K \cdot \cos \frac{\lambda\pi}{15} - \omega\tau + \alpha + \frac{\pi}{6} - K \cdot \cos \frac{\lambda\pi}{15} + \alpha + \frac{\pi}{6}
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
& + (1-K)(Ecd/Em)\omega\tau + \text{SIN} \left\{ \frac{\pi}{15} + \frac{(1-X_2)\lambda\pi}{15} + \frac{\alpha}{15} \right\} \\
& - \text{SIN} \left\{ \frac{\pi}{15} + \frac{\alpha}{15} \right\} + \text{COS} \left\{ \frac{\pi}{15} + \frac{(1-X_2)\lambda\pi}{15} + \frac{\alpha}{15} + \frac{\pi}{6} \right\} \\
& - \text{COS} \left\{ \frac{\pi}{15} + \frac{\lambda\pi}{15} - \omega\tau + \frac{\alpha}{6} + \frac{\pi}{6} \right\} + K \cdot \text{COS} \left\{ \frac{\pi}{15} + \frac{\lambda\pi}{15} - \omega\tau + \frac{\alpha}{6} + \frac{\pi}{6} \right\} \\
& - K \cdot \text{COS} \left\{ \frac{\pi}{15} + \frac{\lambda\pi}{15} + \frac{\alpha}{6} + \frac{\pi}{6} \right\} + (1-K)(Ecd/Em)\omega\tau \\
& + \text{SIN} \left\{ \frac{2\pi}{15} + \frac{0.5\lambda\pi}{15} + \frac{\alpha}{15} \right\} - \text{SIN} \left\{ \frac{2\pi}{15} + \frac{\alpha}{15} \right\} \\
& + \text{COS} \left\{ \frac{2\pi}{15} + \frac{0.5\lambda\pi}{15} + \frac{\alpha}{6} + \frac{\pi}{6} \right\} - \text{COS} \left\{ \frac{2\pi}{15} + \frac{\lambda\pi}{15} - \omega\tau + \frac{\alpha}{6} + \frac{\pi}{6} \right\} \\
& + K \cdot \text{COS} \left\{ \frac{2\pi}{15} + \frac{\lambda\pi}{15} + \frac{\alpha}{6} - \omega\tau + \frac{\pi}{6} \right\} - K \cdot \text{COS} \left\{ \frac{2\pi}{15} + \frac{\lambda\pi}{15} + \frac{\alpha}{6} + \frac{\pi}{6} \right\} \\
& + (1-K)(Ecd/Em)\omega\tau + \text{SIN} \left\{ \frac{3\pi}{15} + \frac{X_2\lambda\pi}{15} + \frac{\alpha}{15} \right\} - \text{SIN} \left\{ \frac{3\pi}{15} + \frac{\alpha}{15} \right\} \\
& + \text{COS} \left\{ \frac{3\pi}{15} + \frac{X_2\lambda\pi}{15} + \frac{\alpha}{6} + \frac{\pi}{6} \right\} - \text{COS} \left\{ \frac{3\pi}{15} + \frac{\lambda\pi}{15} - \omega\tau + \frac{\alpha}{6} + \frac{\pi}{6} \right\} \\
& + K \cdot \text{COS} \left\{ \frac{3\pi}{15} + \frac{\lambda\pi}{15} - \omega\tau + \frac{\alpha}{6} + \frac{\pi}{6} \right\} - K \cdot \text{COS} \left\{ \frac{3\pi}{15} + \frac{\lambda\pi}{15} + \frac{\alpha}{6} + \frac{\pi}{6} \right\} \\
& + (1-K)(Ecd/Em)\omega\tau + \text{SIN} \left\{ \frac{4\pi}{15} + \frac{X_1\lambda\pi}{15} + \frac{\alpha}{15} \right\} - \text{SIN} \left\{ \frac{4\pi}{15} + \frac{\alpha}{15} \right\} \\
& + \text{COS} \left\{ \frac{4\pi}{15} + \frac{X_1\lambda\pi}{15} + \frac{\alpha}{6} + \frac{\pi}{6} \right\} - \text{COS} \left\{ \frac{4\pi}{15} + \frac{\lambda\pi}{15} - \omega\tau + \frac{\alpha}{6} + \frac{\pi}{6} \right\} \\
& + K \cdot \text{COS} \left\{ \frac{4\pi}{15} + \frac{\lambda\pi}{15} - \omega\tau + \frac{\alpha}{6} + \frac{\pi}{6} \right\} - K \cdot \text{COS} \left\{ \frac{4\pi}{15} + \frac{\lambda\pi}{15} + \frac{\alpha}{6} + \frac{\pi}{6} \right\} \\
& + (1-K)(Ecd/Em)\omega\tau]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{จาก (1)} \quad & \text{SIN} \left\{ \frac{(1-X_1)\lambda\pi}{15} + \frac{\alpha}{15} \right\} + \text{SIN} \left\{ \frac{4\pi}{15} + \frac{X_1\lambda\pi}{15} + \frac{\alpha}{15} \right\} \\
& = 2\text{SIN} \left\{ \frac{(4+\lambda)\pi}{30} + \frac{\alpha}{30} \right\} \text{COS} \left\{ \frac{4\pi}{30} + \frac{(2X_1-1)\lambda\pi}{30} \right\}
\end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
 \text{จาก (2)} \quad & -\frac{\sin \alpha}{15} - \frac{\sin \{\frac{\pi}{15} + \alpha\}}{15} - \frac{\sin \{\frac{2\pi}{15} + \alpha\}}{15} - \frac{\sin \{\frac{3\pi}{15} + \alpha\}}{15} \\
 & - \frac{\sin \{\frac{4\pi}{15} + \alpha\}}{15} \\
 = & -2 \left[ \frac{\sin \{2\pi + \alpha\}}{15} \cos \frac{2\pi}{15} + \frac{\sin \{2\pi + \alpha\}}{15} \cos \frac{\pi}{15} + 0.5 \frac{\sin \{2\pi + \alpha\}}{15} \right] \\
 = & -2 \frac{\sin \{2\pi + \alpha\}}{15} \left[ \cos \frac{2\pi}{15} + \cos \frac{\pi}{15} + 0.5 \right]
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{จาก (3)} \quad & -\frac{\cos \{(1-X_1)\lambda\pi + \alpha\}}{15} + \frac{\cos \{4\pi + X_1\lambda\pi + \alpha + \frac{\pi}{6}\}}{15} + \frac{\pi}{6} \\
 = & 2 \frac{\cos \{(9+\lambda)\pi + \alpha\}}{30} \cos \frac{4\pi}{30} + \frac{(2X_1 - 1)\lambda\pi}{30}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{จาก (4)} \quad & \frac{\sin \{\frac{\pi}{15} + (1-X_2)\lambda\pi + \alpha\}}{15} + \frac{\sin \{\frac{3\pi}{15} + X_2\lambda\pi + \alpha\}}{15} \\
 = & 2 \frac{\sin \{(4+\lambda)\pi + \alpha\}}{30} \cos \frac{2\pi}{30} + \frac{(2X_2 - 1)\lambda\pi}{30}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{จาก (5)} \quad & \frac{\cos \{\frac{\pi}{15} + (1-X_2)\lambda\pi + \alpha + \frac{\pi}{6}\}}{15} + \frac{\cos \{\frac{3\pi}{15} + X_2\lambda\pi + \alpha + \frac{\pi}{6}\}}{15} + \frac{\pi}{6} \\
 = & 2 \frac{\cos \{(9+\lambda)\pi + \alpha\}}{30} \cos \frac{2\pi}{30} + \frac{(2X_2 - 1)\lambda\pi}{30}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{จาก (6)} \quad & -\frac{\cos \{\lambda\pi - \omega\tau + \alpha + \frac{\pi}{6}\}}{15} - \frac{\cos \{\frac{\pi}{15} + \lambda\pi - \omega\tau + \alpha + \frac{\pi}{6}\}}{15} + \frac{\pi}{6} \\
 & - \frac{\cos \{2\pi + \lambda\pi - \omega\tau + \alpha + \frac{\pi}{6}\}}{15} - \frac{\cos \{3\pi + \lambda\pi - \omega\tau + \alpha + \frac{\pi}{6}\}}{15} + \frac{\pi}{6} \\
 & - \frac{\cos \{4\pi + \lambda\pi - \omega\tau + \alpha + \frac{\pi}{6}\}}{15} \\
 = & -2 \left[ \frac{\cos \{(9+2\lambda)\pi - \omega\tau + \alpha\}}{30} \cos \frac{2\pi}{15} \right. \\
 & \left. + \frac{\cos \{(9+2\lambda)\pi - \omega\tau + \alpha\}}{30} \cos \frac{\pi}{15} + 0.5 \frac{\cos \{(9+2\lambda)\pi - \omega\tau + \alpha\}}{30} \right] \\
 = & -2 \frac{\cos \{(9+2\lambda)\pi - \omega\tau + \alpha\}}{30} \left[ \cos \frac{2\pi}{15} + \cos \frac{\pi}{15} + 0.5 \right]
 \end{aligned}$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 54  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\begin{aligned}
\text{จาก (7)} \quad & K \cdot \text{COS} \left\{ \frac{\lambda\pi}{15} - \omega\tau + \alpha + \frac{\pi}{6} \right\} + K \cdot \text{COS} \left\{ \frac{\pi}{15} + \frac{\lambda\pi}{15} - \omega\tau + \alpha + \frac{\pi}{6} \right\} \\
& + K \cdot \text{COS} \left\{ \frac{2\pi}{15} + \frac{\lambda\pi}{15} + \alpha - \omega\tau + \frac{\pi}{6} \right\} + K \cdot \text{COS} \left\{ \frac{3\pi}{15} + \frac{\lambda\pi}{15} - \omega\tau + \alpha + \frac{\pi}{6} \right\} \\
& + K \cdot \text{COS} \left\{ \frac{4\pi}{15} + \frac{\lambda\pi}{15} - \omega\tau + \alpha + \frac{\pi}{6} \right\} \\
= & 2K \cdot \text{COS} \left\{ \frac{(9+2\lambda)\pi}{30} - \omega\tau + \alpha \right\} \left[ \text{COS} \frac{2\pi}{15} + \text{COS} \frac{\pi}{15} + 0.5 \right]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{จาก (8)} \quad & - K \cdot \text{COS} \left\{ \frac{\lambda\pi}{15} + \alpha + \frac{\pi}{6} \right\} - K \cdot \text{COS} \left\{ \frac{\pi}{15} + \frac{\lambda\pi}{15} + \alpha + \frac{\pi}{6} \right\} \\
& - K \cdot \text{COS} \left\{ \frac{2\pi}{15} + \frac{\lambda\pi}{15} + \alpha + \frac{\pi}{6} \right\} - K \cdot \text{COS} \left\{ \frac{3\pi}{15} + \frac{\lambda\pi}{15} + \alpha + \frac{\pi}{6} \right\} \\
& - K \cdot \text{COS} \left\{ \frac{4\pi}{15} + \frac{\lambda\pi}{15} + \alpha + \frac{\pi}{6} \right\} \\
= & -2K \cdot \text{COS} \left\{ \frac{(9+2\lambda)\pi}{30} + \alpha \right\} \left[ \text{COS} \frac{2\pi}{15} + \text{COS} \frac{\pi}{15} + 0.5 \right]
\end{aligned}$$

$$\text{จาก (9)} \quad = 4K \cdot \text{SIN} \left\{ \frac{(9+2\lambda)\pi}{30} - \omega\tau + \alpha \right\} \left[ \text{COS} \frac{2\pi}{15} + \text{COS} \frac{\pi}{15} + 0.5 \right]$$

$$\begin{aligned}
\text{จาก (10)} \quad & \text{SIN} \left\{ \frac{2\pi}{15} + \frac{0.5\lambda\pi}{15} + \alpha \right\} + \text{COS} \left\{ \frac{2\pi}{15} + \frac{0.5\lambda\pi}{15} + \alpha + \frac{\pi}{6} \right\} \\
& + 5\omega\tau(1-K)(Ecd/Em) \\
= & \text{SIN} \left\{ \frac{(4+\lambda)\pi}{30} + \alpha \right\} + \text{COS} \left\{ \frac{(9+\lambda)\pi}{30} + \alpha \right\} + 5\omega\tau(1-K)(Ecd/Em)
\end{aligned}$$

รวมเทอมต่าง ๆ ข้างบนจะได้

$$\begin{aligned}
Ed(\alpha, \tau)/Em = & 3/\pi \left[ 2\text{COS} \left\{ \frac{4\pi}{30} + \frac{(2X_1-1)\lambda\pi}{30} \right\} \left[ \text{SIN} \left\{ \frac{(4+\lambda)\pi}{30} + \alpha \right\} \right. \right. \\
& \left. \left. + \text{COS} \left\{ \frac{(9+\lambda)\pi}{30} + \alpha \right\} \right] + 2\text{COS} \left\{ \frac{2\pi}{30} + \frac{(2X_2-1)\lambda\pi}{30} \right\} \right. \\
& \left. \left[ \text{SIN} \left\{ \frac{(4+\lambda)\pi}{30} + \alpha \right\} + \text{COS} \left\{ \frac{(9+\lambda)\pi}{30} + \alpha \right\} \right] \right. \\
& \left. - 2 \left[ \text{COS} \frac{2\pi}{15} + \text{COS} \frac{\pi}{15} + 0.5 \right] \left[ \text{SIN} \left\{ \frac{2\pi}{15} + \alpha \right\} \right] \right.
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \frac{\text{COS} \left\{ (9 + 2\lambda)\frac{\pi}{30} - \omega\tau + \alpha \right\}}{30} - 2K \cdot \frac{\text{SIN} \left\{ (9 + 2\lambda)\frac{\pi}{30} - \frac{\omega\tau}{2} + \alpha \right\}}{30} \\
& \frac{\text{SIN} \frac{\omega\tau}{2}}{2} + \frac{\text{SIN} \left\{ (4 + \lambda)\frac{\pi}{30} + \alpha \right\}}{30} + \frac{\text{COS} \left\{ (9 + \lambda)\frac{\pi}{30} + \alpha \right\}}{30} \\
& + 5\omega\tau(1-K)(\text{Ecd}/\text{Em})]
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\text{Ed}(\alpha, \tau)/\text{Em} = & 3/\pi \left[ \frac{2\text{COS} \left\{ \frac{4\pi}{30} + (2X_1 - 1)\frac{\lambda\pi}{30} \right\}}{30} + \frac{2\text{COS} \left\{ \frac{2\pi}{30} + (2X_2 - 1)\frac{\lambda\pi}{30} \right\}}{30} \right. \\
& \left. \frac{[\text{SIN} \left\{ (4 + \lambda)\frac{\pi}{30} + \alpha \right\} + \text{COS} \left\{ (9 + \lambda)\frac{\pi}{30} + \alpha \right\}]}{30} \right. \\
& - 2 \left[ \frac{\text{COS} \frac{2\pi}{15} + \text{COS} \frac{\pi}{15} + 0.5}{15} \right] \left[ \frac{\text{SIN} \left\{ \frac{2\pi}{15} + \alpha \right\}}{15} \right. \\
& \left. + \frac{\text{COS} \left\{ (9 + 2\lambda)\frac{\pi}{30} - \omega\tau + \alpha \right\}}{30} - 2K \cdot \frac{\text{SIN} \left\{ (9 + 2\lambda)\frac{\pi}{30} - \frac{\omega\tau}{2} + \alpha \right\}}{30} \right. \\
& \left. \cdot \frac{\text{SIN} \frac{\omega\tau}{2}}{2} + \frac{\text{SIN} \left\{ (4 + \lambda)\frac{\pi}{30} + \alpha \right\}}{30} + \frac{\text{COS} \left\{ (9 + \lambda)\frac{\pi}{30} + \alpha \right\}}{30} \right. \\
& \left. + 5\omega\tau(1-K)(\text{Ecd}/\text{Em}) \right]
\end{aligned}$$

จากสมการที่ (6.13) ถึง (6.16) จะสามารถทำให้อยู่ในรูปแบบทั่วไปได้ดังนี้

### 6.3.2 รูปแบบทั่วไปของสมการแรงดันออร์มัลไลซ์เฉลี่ยทางด้านเอาท์พุท

$$\begin{aligned}
\text{Ed}(\alpha, \tau)/\text{Em} = & 3/\pi \left[ \frac{2\text{COS} \left\{ (m-1)\frac{\pi}{6m} + (2X_1 - 1)\frac{\lambda\pi}{6m} \right\}}{6m} + Y_0 \cdot \frac{\text{COS} \left\{ (m-3)\frac{\pi}{6m} + (2X_2 - 1)\frac{\lambda\pi}{6m} \right\}}{6m} \right. \\
& \left. + Y_3 \left[ \frac{\text{SIN} \left\{ (m-1+\lambda)\frac{\pi}{6m} + \alpha \right\}}{6m} + \frac{\text{COS} \left\{ (2m-1+\lambda)\frac{\pi}{6m} + \alpha \right\}}{6m} \right] \right. \\
& - 2 \left[ \frac{\text{COS} \left\{ (m-1)\frac{\pi}{6m} \right\}}{6m} + Y_1 \cdot \frac{\text{COS} \left\{ (m-3)\frac{\pi}{6m} \right\}}{6m} + Y_2 \right] \left[ \frac{\text{SIN} \left\{ (m-1)\frac{\pi}{6m} + \alpha \right\}}{6m} \right. \\
& \left. + \frac{\text{COS} \left\{ (2m-1+2\lambda)\frac{\pi}{6m} - \omega\tau + \alpha \right\}}{6m} \right. \\
& \left. - 2K \cdot \frac{\text{SIN} \left\{ (2m-1+2\lambda)\frac{\pi}{6m} - \omega\tau + \alpha \right\}}{6m} \cdot \frac{\text{SIN} \frac{\omega\tau}{2}}{2} \right. \\
& \left. + m \cdot \omega\tau(1-K)(\text{Ecd}/\text{Em}) \right]
\end{aligned}$$

6-ฟิลล์	$Y_0 = 0$	$Y_1 = 0$	$Y_2 = 0$	$Y_3 = 0$	$X_1$ : variable
9-ฟิลล์	$Y_0 = 0$	$Y_1 = 0.5$	$Y_2 = 0$	$Y_3 = 1$	$X_1$ : variable
12-ฟิลล์	$Y_0 = 2$	$Y_1 = 1$	$Y_2 = 0$	$Y_3 = 0$	$X_1, X_2$ : variable
15-ฟิลล์	$Y_0 = 2$	$Y_1 = 1$	$Y_2 = 0.5$	$Y_3 = 1$	$X_1, X_2$ : variable



## บทที่ 7

### วิเคราะห์ผลการทดลอง

#### 7.1 กราฟแสดงคุณลักษณะของแรงดันเฉลี่ยทางด้านเอาต์พุตกับมุมเลื่อนเฟส

จากทฤษฎีที่ได้กล่าวมาแล้วในบทแรกๆ สามารถยืนยันได้ด้วยผลการทดลองว่า เมื่อมีการเลื่อนเฟสของกระแสอินพุตที่ดับลิว เอ็มทางด้านเอซีไลน์ เมื่อเทียบกับแรงดันทางแหล่งจ่ายจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนเฟสของแรงดันเฉลี่ยทางด้านเอาต์พุต เมื่อค่าตัวประกอบมอดูเลชัน  $\lambda$  มีการเปลี่ยนแปลง ดังนั้นจากรูปที่ 7.1 ถึง 7.4 เป็นการแสดงถึงผลที่ได้จากการทดลอง โดยทำการทดลองที่ 6-, 9-, 12- และ 15-พัลส์ โดยที่มีค่า  $\lambda$  ตั้งแต่ 0.4, 0.6 และ 0.8 ตารางที่ 7.1 ถึง 7.12 แสดงถึงค่าต่างๆที่วัดและคำนวณได้จากการทดลอง

$$\text{โดยที่ } VA = \sqrt{3} V_{uv} I_{in}$$

$$PF = 2 \times W_{uv} / P_{in}$$

$$POUT = E_d \cdot I_d$$

$$EFF = P_{out} / P_{in}$$

#### 7.2 ผลกระทบของจำนวนพัลส์ต่อองค์ประกอบฮาร์โมนิกของกระแสที่ดับลิว เอ็ม

จากรูปที่ 7.5 ถึง 7.28 เป็นกราฟแสดงการกระจายองค์ประกอบฮาร์โมนิกของกระแสอินพุตเอซีไลน์ โดยเทียบกับระหว่างผลที่ได้จากการทดลองและที่ได้จากการคำนวณ ขณะที่ค่าตัวประกอบมอดูเลชันแปรเปลี่ยน ตั้งแต่ค่า  $\lambda = 0.8, 0.5$  และ  $0.2$  จากรูป สามารถวิเคราะห์ได้ว่า เมื่อจำนวนพัลส์ของรูปแบบของกระแส มีจำนวนมากขึ้น จะส่งผลให้ขนาดขององค์ประกอบฮาร์โมนิกอันดับต่ำๆของกระแสที่ดับลิว เอ็มมีค่าลดลง ซึ่งจากการคำนวณจะให้เห็นที่ใกล้เคียง กับผลที่ได้จากการทดลองอย่างมาก

จากรูปเราจะสังเกตเห็นได้ว่า ที่จำนวนพัลส์ค่าหนึ่งๆ เมื่อค่าตัวประกอบมอดูเลชันมีค่าลดลง จะส่งผลให้ขนาดของกระแสอินพุตที่ตามมามีค่าลดลง หรือกล่าวได้อีกอย่างหนึ่งว่า เมื่อเพิ่มจำนวนพัลส์ของกระแสที่ดับลิว เอ็ม จะส่งผลให้กระแสอินพุตที่ตามมามีค่าลดลง

#### 7.3 ผลของ FEEDBACK ที่มีต่อขนาดกระแสอินพุตที่ดับลิว เอ็ม

จากรูปที่ 7.29 ถึง 7.40 แสดงถึงรูปคลื่นของกระแสที่ดับลิว เอ็ม ที่มีค่ามุมต่างๆกัน โดยมีจำนวนพัลส์ตั้งแต่ 6-, 9-, 12- และ 15-พัลส์ จากรูปจะแสดงที่มุม  $0^\circ$ , ล้าหลัง  $50^\circ$  และนำหน้า  $50^\circ$  จะเห็นได้ชัดเจนว่าที่ค่ามุมต่างๆนั้น กระแสที่ดับลิว เอ็มทางด้านเอซีไลน์จะมีขนาดคงที่ซึ่ง เป็นผลมาจากวงจรส่วนคอนโทรล และซอฟต์แวร์ส่วน CLOSED-LOOP ซึ่งได้ออกแบบมาให้ระบบทำงานในโหมด PI เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
58  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ในการที่จะควบคุมให้ขนาดของกระแสที่ดับลิว เอ็มมีค่าคงที่ให้ได้นั้น เราจะทำการควบคุมที่ค่าตัวประกอบมอดูเลชัน ( $\lambda$ ) จากรูปที่จะสังเกตเห็นได้ว่าที่มุม  $0^\circ$  นั้น จะมีขนาดความกว้างของพัลส์ที่ค่าหนึ่ง ซึ่งปกติถ้าไม่มีวงจรมอดูเลชัน CLOSED-LOOP ขนาดของกระแสที่ดับลิว เอ็มจะลดลง ขณะที่ค่าตัวประกอบมอดูเลชันมีค่าคงที่ แต่เมื่อมีวงจรมอดูเลชัน CLOSED-LOOP เมื่อมีการเลื่อนเฟส วงจรมอดูเลชันจะสั่งให้ค่าตัวประกอบมอดูเลชันมีค่ามากขึ้น เมื่อมุมมีค่ามากขึ้น (ทั้งทางนำหน้า และ ล้าหลัง) ส่งผลให้ขนาดของกระแสที่ดับลิว เอ็มมีค่าคงที่เสมอ

#### 7.4 การประยุกต์ใช้คอนเวอร์เตอร์ในงานชดเชยค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์

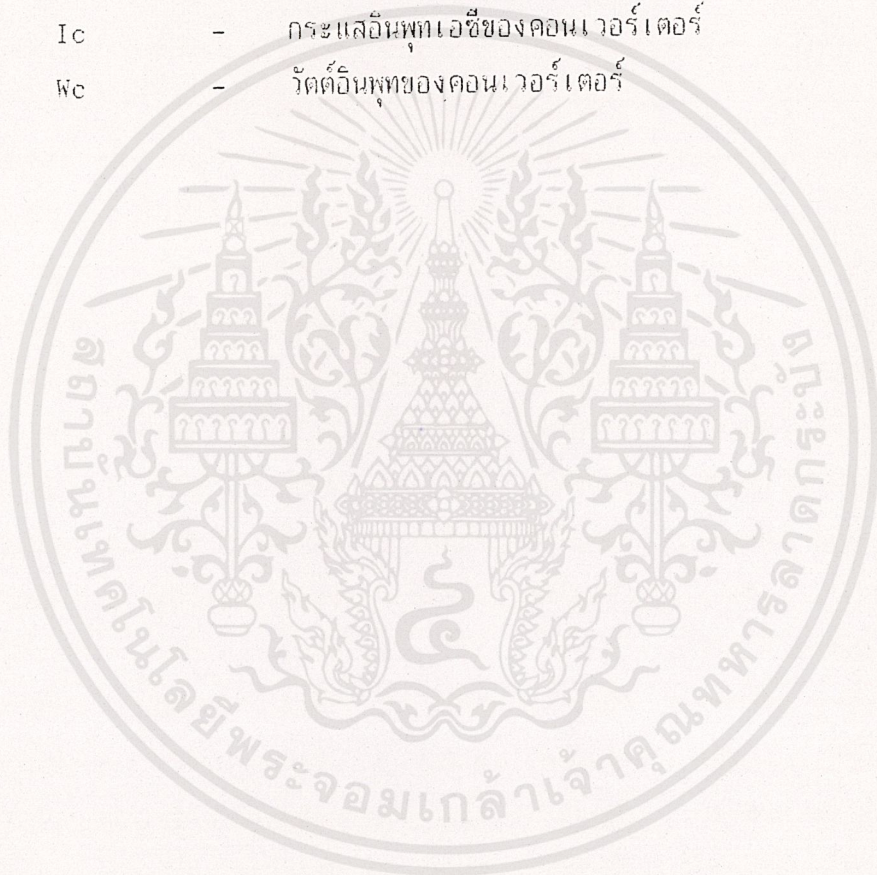
คอนเวอร์เตอร์ที่ได้นำเสนอนี้สามารถที่จะนำมาประยุกต์เพื่อเป็นอุปกรณ์ในการจ่ายพลังงานรีแอกตีฟ ให้กับระบบจ่ายไฟได้นั้นคือมันสามารถที่จะทำให้เพาเวอร์แฟกเตอร์รวมของระบบมีค่าต่างกันได้ ไม่ว่าจะเป็นค่านำหน้า ล้าหลัง หรือค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์เป็นหนึ่ง (UNITY POWER FACTOR) โดยขึ้นอยู่กับว่า ตัวคอนเวอร์เตอร์นั้นกำลังอยู่ในสถานะอย่างไร

จากรูปที่ 7.41 ถึงรูปที่ 7.44 เป็นการแสดงรูปคลื่นของกระแสรวมของระบบจ่ายไฟฟ้า โดยนำเอาตัวคอนเวอร์เตอร์ต่อขนานกับโหลด ซึ่งเป็นมอเตอร์เหนี่ยวนำ 3 เฟส โดยชดเชยที่รูปแบบกระแสที่ดับลิว เอ็ม ที่ 6, 9, 12 และ 15 พัลส์ ตามลำดับ จากรูปจะเห็นว่า เป็นกระแสของตัวคอนเวอร์เตอร์รวมกับกระแสของมอเตอร์ (ซึ่งล้าหลังอยู่) ซึ่งในการชดเชยให้เพาเวอร์แฟกเตอร์รวมของระบบให้ มีค่าเป็นหนึ่งนั้น จะต้องทำให้กระแสไลน์ของตัวคอนเวอร์เตอร์มีลักษณะนำหน้าแรงดัน ซึ่งกระแสของคอนเวอร์เตอร์ที่นำหน้านี้จะก่อให้เกิดรีแอกตีฟเพาเวอร์ที่มีค่าหักล้างกับค่ารีแอกตีฟเพาเวอร์ที่เกิดจากตัวมอเตอร์ ส่งผลให้เพาเวอร์แฟกเตอร์รวมของระบบมีค่าเข้าใกล้หนึ่งมากยิ่งขึ้น

ในการที่เราจะทราบว่าตัวคอนเวอร์เตอร์นั้น สามารถชดเชยค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์รวมของระบบให้มีค่าเป็นหนึ่ง (ชดเชยค่ารีแอกตีฟเพาเวอร์จนหมด) ได้ นั้น โดยการวัดค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์มูลฐานรวมของระบบ (PF1) ว่ามีค่าเท่าไร หรือโดยการคำนวณหาค่ารีแอกตีฟเพาเวอร์ที่เกิดจากตัวคอนเวอร์เตอร์ จากสมการในบทที่ 3 ตั้งแต่สมการที่ (3.6) ถึง (3.10) โดยแทนค่ามอดูเลชันเพาเวอร์แฟกเตอร์ขณะนั้น และแทนค่า  $n=1$  (ค่ามูลฐาน) จากนั้นจึงสามารถนำไปคำนวณหาค่ารีแอกตีฟเพาเวอร์มูลฐานที่เกิดจากตัวคอนเวอร์เตอร์ได้

## อักษรย่อที่ใช้ในการทดลอง

$I_{in}$	-	กระแสอินพุทเอซีของคอนเวอร์เตอร์
$W_{uv}$	-	วัตต์อินพุทของคอนเวอร์เตอร์
$I_d$	-	กระแสเอาต์พุตดีซีของคอนเวอร์เตอร์
$V_A$	-	โวลต์-แอมป์อินพุทของคอนเวอร์เตอร์
$P_F$	-	เพาเวอร์แฟคเตอร์ของคอนเวอร์เตอร์
$P_{out}$	-	เพาเวอร์เอาต์พุทของคอนเวอร์เตอร์
$Eff$	-	ประสิทธิภาพของคอนเวอร์เตอร์
$I_c$	-	กระแสอินพุทเอซีของคอนเวอร์เตอร์
$W_c$	-	วัตต์อินพุทของคอนเวอร์เตอร์



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 1  
ค่าที่วัดได้จากการทดลอง ที่ 6-พัลส์  $\lambda=0.8$

มุม $\alpha$	I <sub>in</sub>	W <sub>uv</sub>	I <sub>d</sub>	E <sub>d</sub>	VA	PF	P <sub>out</sub>	%Eff
-90	0.63	60	0.9	19	174.59	0.69	17.10	9.79
-80	0.91	100	1.3	39	252.19	0.79	50.70	20.10
-70	1.19	140	1.64	60	329.78	0.85	98.40	29.84
-60	1.44	180	2	84	399.06	0.90	168.00	42.10
-50	1.65	218	2.25	104	457.26	0.95	234.00	51.17
-40	1.81	245	2.48	122	501.60	0.98	302.56	60.32
-30	1.95	260	2.6	136	540.40	0.96	353.60	65.43
-20	2.05	265	2.75	148	568.11	0.93	407.00	71.64
-10	2.1	255	2.8	152	581.97	0.88	425.60	73.13
0	2.1	230	2.8	152	581.97	0.79	425.60	73.13
10	2.06	200	2.75	148	570.88	0.70	407.00	71.29
20	2.08	158	2.65	138	576.43	0.55	365.70	63.44
30	1.88	115	2.5	124	521.00	0.44	310.00	59.50
40	1.73	70	2.3	108	479.43	0.29	248.40	51.81
50	1.53	30	2.1	88	424.01	0.14	184.80	43.58

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศีกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 2  
ค่าที่วัดได้จากการทดลอง ที่ 6-ฟิลส์  $\lambda=0.6$

มุม $\alpha$	Iin	Wuv	Id	Ed	VA	PF	Pout	%Eff
-90	0.45	50	0.78	14	124.71	0.80	10.92	8.76
-80	0.64	65	1.05	27	177.36	0.73	28.35	15.98
-70	0.82	90	1.32	42	227.25	0.79	55.44	24.40
-60	0.99	110	1.69	57	274.36	0.80	96.33	35.11
-50	1.15	130	1.8	72	318.70	0.82	129.60	40.67
-40	1.28	150	2	86	354.72	0.85	172.00	48.49
-30	1.39	165	2.15	96	385.21	0.86	206.40	53.58
-20	1.47	170	2.28	107	407.38	0.83	243.96	59.89
-10	1.52	168	2.32	110	421.23	0.80	255.20	60.58
0	1.54	158	2.35	112	426.78	0.74	263.20	61.67
10	1.53	138	2.32	111	424.01	0.65	257.52	60.73
20	1.49	115	2.28	106	412.92	0.56	241.68	58.53
30	1.42	90	2.15	98	393.52	0.46	210.70	53.54
40	1.32	60	2	86	365.81	0.33	172.00	47.02
50	1.19	40	1.8	72	329.78	0.24	129.60	39.30

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3  
ค่าที่วัดได้จากการทดลอง ที่ 6-พัลส์  $\lambda=0.4$

มุม $\alpha$	I <sub>in</sub>	W <sub>uv</sub>	I <sub>d</sub>	E <sub>d</sub>	VA	PF	P <sub>out</sub>	%Eff
-90	0.33	30	0.7	12	91.45	0.66	8.40	9.19
-80	0.44	40	0.9	18	121.94	0.66	16.20	13.29
-70	0.54	50	1.1	28	149.65	0.67	30.80	20.58
-60	0.64	60	1.25	36	177.36	0.68	45.00	25.37
-50	0.73	75	1.4	46	202.30	0.74	64.40	31.83
-40	0.81	85	1.63	54	224.47	0.76	88.02	39.21
-30	0.89	90	1.65	61	246.64	0.73	100.65	40.81
-20	0.95	100	1.75	68	263.27	0.76	119.00	45.20
-10	1.01	100	1.8	72	279.90	0.71	129.60	46.30
0	1.02	90	1.85	76	282.67	0.64	140.60	49.74
10	1.02	85	1.85	75	282.67	0.60	138.75	49.09
20	1.01	70	1.8	72	279.90	0.50	129.60	46.30
30	0.9	60	1.75	68	249.42	0.48	119.00	47.71
40	0.91	40	1.65	60	252.19	0.32	99.00	39.26
50	0.84	30	1.5	52	232.79	0.26	78.00	33.51

ตารางที่ 4  
ค่าที่วัดได้จากการทดลอง ที่ 9-พัลส์  $\lambda=0.8$

มุม $\alpha$	I <sub>in</sub>	W <sub>uv</sub>	I <sub>d</sub>	E <sub>d</sub>	VA	PF	P <sub>out</sub>	%Eff
-90	0.64	65	0.9	19	177.36	0.73	17.10	9.64
-80	0.91	100	1.27	39	252.19	0.79	49.53	19.64
-70	1.2	145	1.62	60	332.55	0.87	97.20	29.23
-60	1.43	180	1.95	82	396.29	0.91	159.90	40.35
-50	1.64	220	2.2	102	454.49	0.97	224.40	49.37
-40	1.81	240	2.4	118	501.60	0.96	283.20	56.46
-30	1.94	260	2.58	132	537.63	0.97	340.56	63.34
-20	2.02	265	2.7	142	559.80	0.95	383.40	68.49
-10	2.08	250	2.75	148	576.43	0.87	407.00	70.61
0	2.09	230	2.75	149	579.20	0.79	409.75	70.74
10	2.07	200	2.7	145	573.66	0.70	391.50	68.25
20	2	160	2.6	137	554.26	0.58	356.20	64.27
30	1.89	120	2.48	124	523.77	0.46	307.52	58.71
40	1.74	75	2.29	108	482.20	0.31	247.32	51.29
50	1.54	30	2	88	426.78	0.14	176.00	41.24
60	1.31	10	1.7	65	363.04	0.06	110.50	30.44
70	1.01		1.32	42	279.90	0.00	55.44	19.81

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศีกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 5  
ค่าที่วัดได้จากการทดลอง ที่ 9-พัลส์  $\lambda=0.6$

มุม $\alpha$	I <sub>in</sub>	W <sub>uv</sub>	I <sub>d</sub>	E <sub>d</sub>	VA	PF	P <sub>out</sub>	%Eff
-90	0.54	50	0.95	20	149.65	0.67	19.00	12.70
-80	0.7	75	1.2	32	193.99	0.77	38.40	19.79
-70	0.87	100	1.4	47	241.10	0.83	65.80	27.29
-60	1.04	125	1.65	60	288.21	0.87	99.00	34.35
-50	1.18	145	1.85	75	327.01	0.89	138.75	42.43
-40	1.31	160	2	88	363.04	0.88	176.00	48.48
-30	1.41	175	2.15	98	390.75	0.90	210.70	53.92
-20	1.49	175	2.26	106	412.92	0.85	239.56	58.02
-10	1.53	170	2.3	110	424.01	0.80	253.00	59.67
0	1.54	160	2.32	112	426.78	0.75	259.84	60.88
10	1.53	138	2.3	110	424.01	0.65	253.00	59.67
20	1.49	115	2.25	104	412.92	0.56	234.00	56.67
30	1.41	85	2.12	96	390.75	0.44	203.52	52.08
40	1.31	60	1.98	84	363.04	0.33	166.32	45.81
50	1.17	30	1.78	70	324.24	0.19	124.60	38.43
60	1	15	1.52	54	277.13	0.11	82.08	29.62
70	8		1.25	36	2217.03	0.00	45.00	2.03

ตารางที่ 6

แสดงค่าที่วัดได้จากการทดลอง ที่ 9-ฟิลล์  $\lambda=0.4$

มุม $\alpha$	I <sub>in</sub>	W <sub>uv</sub>	I <sub>d</sub>	E <sub>d</sub>	VA	PF	P <sub>out</sub>	%Eff
-90	0.38	35	0.8	13	105.31	0.58	10.40	9.88
-80	0.47	45	0.98	22	130.25	0.60	21.56	16.55
-70	0.58	60	1.15	31	160.73	0.65	35.65	22.18
-60	0.69	70	1.31	40	191.22	0.63	52.40	27.40
-50	0.79	85	1.48	50	218.93	0.67	74.00	33.80
-40	0.87	98	1.6	58	241.10	0.70	92.80	38.49
-30	0.95	100	1.7	66	263.27	0.66	112.20	42.62
-20	1	105	1.7	70	277.13	0.66	119.00	42.94
-10	1.04	100	1.85	75	288.21	0.60	138.75	48.14
0	1.06	100	1.9	77	293.76	0.59	146.30	49.80
10	1.05	85	1.85	76	290.98	0.51	140.60	48.32
20	1.04	75	1.8	74	288.21	0.45	133.20	46.22
30	1	60	1.75	69	277.13	0.38	120.75	43.57
40	0.93	45	1.65	62	257.73	0.30	102.30	39.69
50	0.85	30	1.5	52	235.56	0.22	78.00	33.11
60	0.74	20	1.35	42	205.07	0.17	56.70	27.65
70	0.63	10	1.15	30	174.59	0.10	34.50	19.76

ตารางที่ 7

ค่าที่วัดได้จากการทดลอง ที่ 12-พัลส์  $\lambda=0.8$

มุม $\alpha$	I <sub>in</sub>	W <sub>uv</sub>	I <sub>d</sub>	E <sub>d</sub>	VA	PF	P <sub>out</sub>	%Eff
-90	0.69	80	1	25	191.22	0.84	25.00	13.07
-80	0.91	110	1.3	42	252.19	0.87	54.60	21.65
-70	1.15	145	1.6	60	318.70	0.91	96.00	30.12
-60	1.39	180	1.9	80	385.21	0.93	152.00	39.46
-50	1.6	220	2.15	98	443.41	0.99	210.70	47.52
-40	1.79	250	2.4	118	496.06	1.01	283.20	57.09
-30	1.93	270	2.55	132	534.86	1.01	336.60	62.93
-20	2.02	270	2.7	142	559.80	0.96	383.40	68.49
-10	2.08	265	2.7	147	576.43	0.92	396.90	68.86
0	2.1	240	2.75	150	581.97	0.82	412.50	70.88
10	2.08	210	2.72	147	576.43	0.73	399.84	69.37
20	2.02	175	1.65	140	559.80	0.63	231.00	41.26
30	1.94	135	2.52	130	537.63	0.50	327.60	60.93
40	1.8	90	2.35	114	498.83	0.36	267.90	53.71
50	1.62	50	2.1	95	448.95	0.22	199.50	44.44
60	1.38	20	1.8	73	382.44	0.10	131.40	34.36
70	1.09		1.45	48	302.07	0.00	69.60	23.04

ตารางที่ 8  
ค่าที่วัดได้จากการทดลอง ที่ 12-พัลส์  $\lambda=0.6$

มุม $\alpha$	Iin	Wuv	Id	Ed	VA	PF	Pout	%Eff
-90	0.57	60	1	22	157.96	0.76	22.00	13.93
-80	0.72	80	1.2	34	199.53	0.80	40.80	20.45
-70	0.88	100	1.45	48	243.87	0.82	69.60	28.54
-60	1.04	130	1.65	62	288.21	0.90	102.30	35.49
-50	1.19	150	1.85	75	329.78	0.91	138.75	42.07
-40	1.32	165	2	88	365.81	0.90	176.00	48.11
-30	1.42	180	2.15	98	393.52	0.91	210.70	53.54
-20	1.5	180	2.25	106	415.69	0.87	238.50	57.37
-10	1.55	180	2.3	112	429.55	0.84	257.60	59.97
0	1.58	170	2.35	115	437.86	0.78	270.25	61.72
10	1.58	150	2.35	113	437.86	0.69	265.55	60.65
20	1.55	130	2.3	108	429.55	0.61	248.40	57.83
30	1.48	100	2.2	100	410.15	0.49	220.00	53.64
40	1.35	65	2	88	374.12	0.35	176.00	47.04
50	1.21	40	1.8	73	335.33	0.24	131.40	39.19
60	1.05	20	1.6	58	290.98	0.14	92.80	31.89
70	0.86		1.3	40	238.33	0.00	52.00	21.82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการตีพิมพ์เท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 9  
ค่าที่วัดได้จากการทดลอง ที่ 12-พัลส์  $\lambda=0.4$

มุม $\alpha$	Iin	Wuv	Id	Ed	VA	PF	Pout	%Eff
-90	0.39	40	0.85	15	108.08	0.74	12.75	11.80
-80	0.49	50	1	23	135.79	0.74	23.00	16.94
-70	0.59	60	1.15	32	163.51	0.73	36.80	22.51
-60	0.69	75	1.3	41	191.22	0.78	53.30	27.87
-50	0.79	90	1.45	50	218.93	0.82	72.50	33.12
-40	0.88	100	1.6	58	243.87	0.82	92.80	38.05
-30	0.95	105	1.7	65	263.27	0.80	110.50	41.97
-20	1.02	110	1.8	71	282.67	0.78	127.80	45.21
-10	1.06	110	1.85	75	293.76	0.75	138.75	47.23
0	1.08	100	1.85	77	299.30	0.67	142.45	47.59
10	1.09	95	1.9	76	302.07	0.63	144.40	47.80
20	1.07	80	1.8	73	296.53	0.54	131.40	44.31
30	1.03	65	1.75	70	285.44	0.46	122.50	42.92
40	0.96	50	1.65	62	266.04	0.38	102.30	38.45
50	0.88	35	1.5	52	243.87	0.29	78.00	31.98
60	0.77	20	1.35	44	213.39	0.19	59.40	27.84
70	0.65	10	1.15	32	180.13	0.11	36.80	20.43

ตารางที่ 10  
ค่าที่วัดได้จากการทดลอง ที่ 15-พัลส์  $\lambda=0.8$

มุม $\alpha$	Iin	Wuv	Id	Ed	VA	PF	Pout	%Eff
-90	0.73	85	1.1	28	202.30	0.84	30.80	15.22
-80	0.95	120	1.4	44	263.27	0.91	61.60	23.40
-70	1.19	150	1.7	63	329.78	0.91	107.10	32.48
-60	1.42	190	1.95	82	393.52	0.97	159.90	40.63
-50	1.63	225	2.2	101	451.72	1.00	222.20	49.19
-40	1.81	250	2.4	117	501.60	1.00	280.80	55.98
-30	1.94	270	2.55	130	537.63	1.00	331.50	61.66
-20	2.04	275	2.7	140	565.34	0.97	378.00	66.86
-10	2.1	270	2.75	147	581.97	0.93	404.25	69.46
0	2.12	245	2.75	149	587.51	0.83	409.75	69.74
10	2.11	220	2.75	147	584.74	0.75	404.25	69.13
20	2.06	180	2.65	139	570.88	0.63	368.35	64.52
30	1.95	135	2.5	128	540.40	0.50	320.00	59.22
40	1.81	95	2.35	112	501.60	0.38	263.20	52.47
50	1.62	50	2.1	94	448.95	0.22	197.40	43.97
60	1.38	20	1.8	72	382.44	0.10	129.60	33.89
70	1.11		1.45	50	307.61	0.00	72.50	23.57

ตารางที่ 11

ค่าที่วัดได้จากการทดลอง ที่ 15-พัลส์  $\lambda=0.6$

มุม $\alpha$	Iin	Wuv	Id	Ed	VA	PF	Pout	%Eff
-90	0.53	55	0.8	18	146.88	0.75	14.40	9.80
-80	0.69	75	1.15	32	191.22	0.78	36.80	19.25
-70	0.87	100	1.4	46	241.10	0.83	64.40	26.71
-60	1.05	130	1.65	60	290.98	0.89	99.00	34.02
-50	1.2	150	1.85	74	332.55	0.90	136.90	41.17
-40	1.33	170	2	87	368.58	0.92	174.00	47.21
-30	1.43	180	2.15	97	396.29	0.91	208.55	52.63
-20	1.51	185	2.25	104	418.46	0.88	234.00	55.92
-10	1.57	180	2.3	110	435.09	0.83	253.00	58.15
0	1.59	170	2.35	112	440.63	0.77	263.20	59.73
10	1.59	150	2.3	110	440.63	0.68	253.00	57.42
20	1.55	130	2.25	107	429.55	0.61	240.75	56.05
30	1.48	100	2.15	98	410.15	0.49	210.70	51.37
40	1.38	70	2	88	382.44	0.37	176.00	46.02
50	1.25	50	1.85	75	346.41	0.29	138.75	40.05
60	1.07	25	1.6	58	296.53	0.17	92.80	31.30
70	0.89	10	1.35	42	246.64	0.08	56.70	22.99

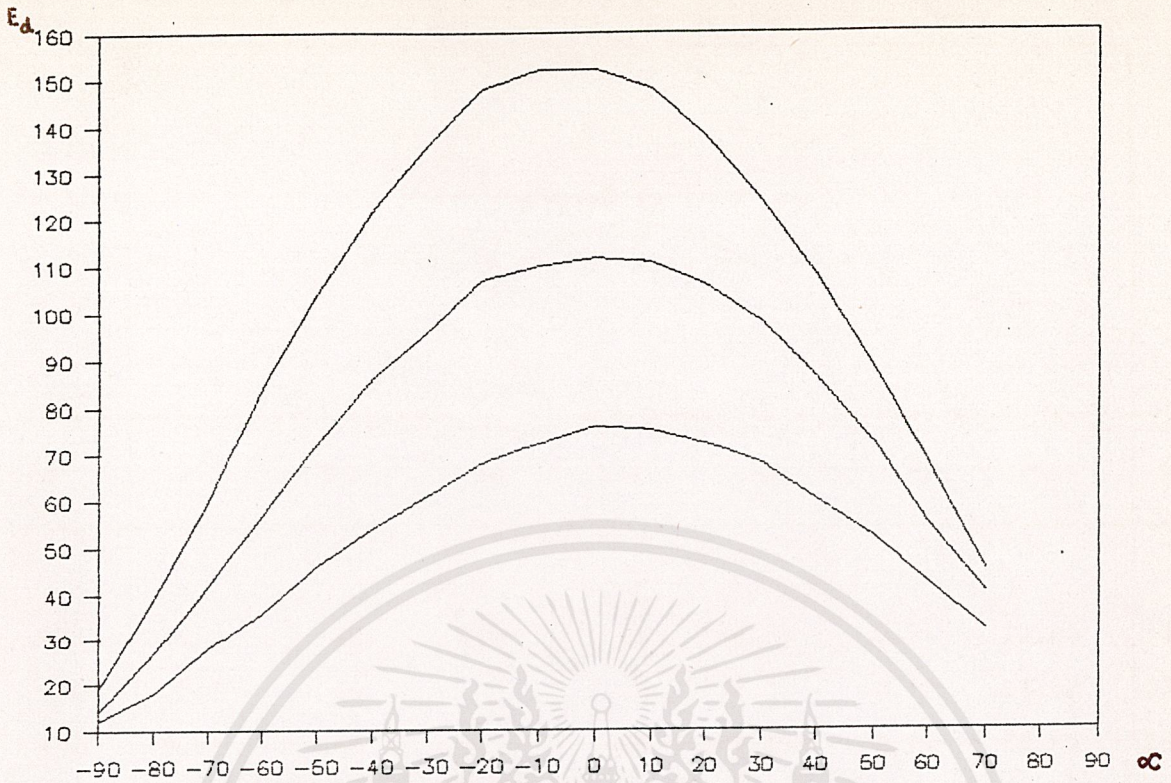
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 12

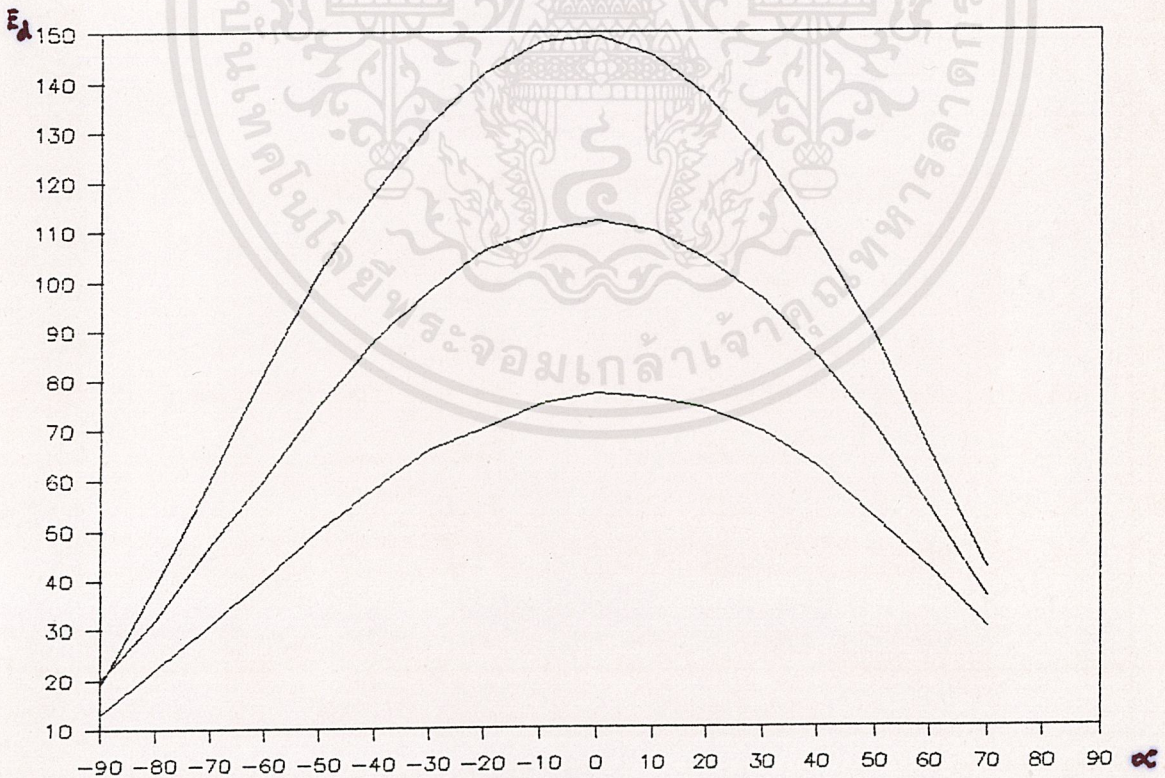
ค่าที่วัดได้จากการทดลอง ที่ 15-พัลส์  $\lambda=0.4$

มุม $\alpha$	Iin	Wuv	Id	Ed	VA	PF	Pout	%Eff
-90	0.39	40	0.8	16	108.08	0.74	12.80	11.84
-80	0.5	50	1	24	138.56	0.72	24.00	17.32
-70	0.62	65	1.2	33	171.82	0.76	39.60	23.05
-60	0.72	80	1.35	42	199.53	0.80	56.70	28.42
-50	0.83	95	1.5	51	230.02	0.83	76.50	33.26
-40	0.91	105	1.6	58	252.19	0.83	92.80	36.80
-30	0.99	110	1.7	65	274.36	0.80	110.50	40.28
-20	1.05	115	1.8	71	290.98	0.79	127.80	43.92
-10	1.09	110	1.85	75	302.07	0.73	138.75	45.93
0	1.11	105	1.9	77	307.61	0.68	146.30	47.56
10	1.12	100	1.9	77	310.38	0.64	146.30	47.14
20	1.1	85	1.85	74	304.84	0.56	136.90	44.91
30	1.05	65	1.75	70	290.98	0.45	122.50	42.10
40	0.98	50	1.65	61	271.59	0.37	100.65	37.06
50	0.88	35	1.5	53	243.87	0.29	79.50	32.60
60	0.77	20	1.35	42	213.39	0.19	56.70	26.57
70	0.65	15	1.15	31	180.13	0.17	35.65	19.79

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการวิจัยเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดลอกเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

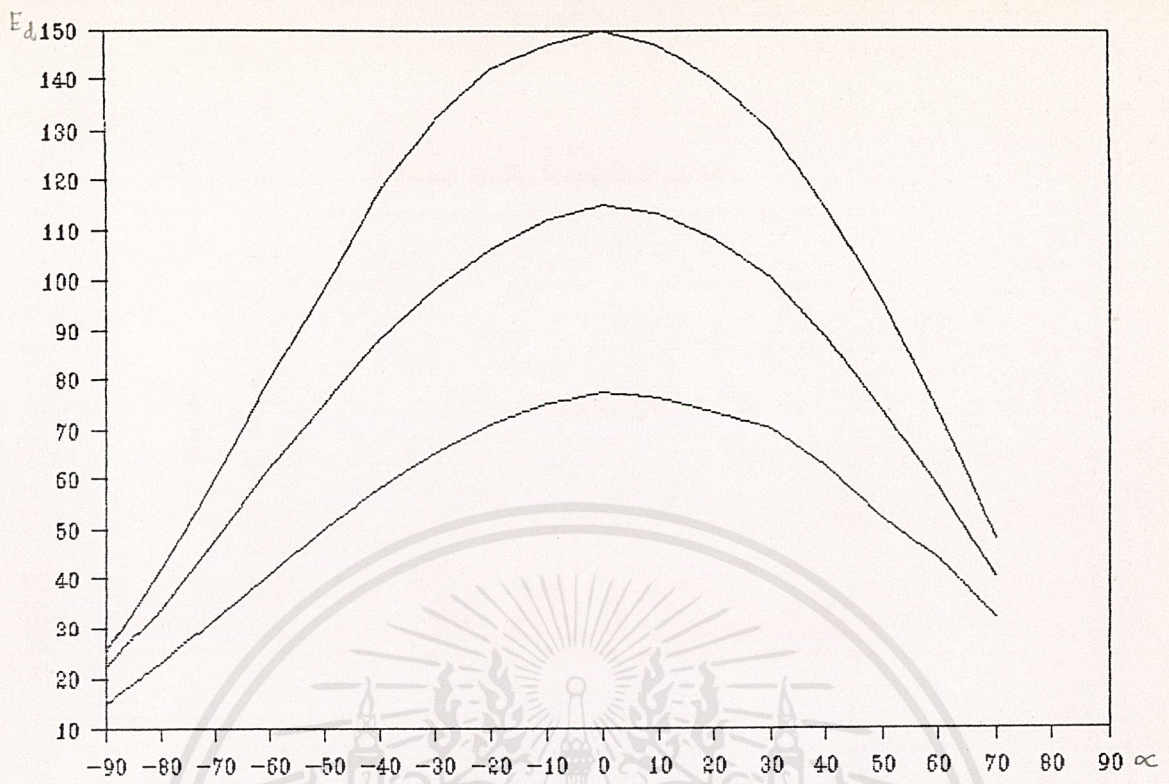


รูปที่ 7.1 กราฟแสดงแรงดันเฉลี่ยทางด้านเอาต์พุตกับมุมเลื่อนเฟส  
กรณี 6-พัลส์ ที่ค่า  $\lambda = 0.8, 0.6$  และ  $0.4$  (จากบนลงล่าง)

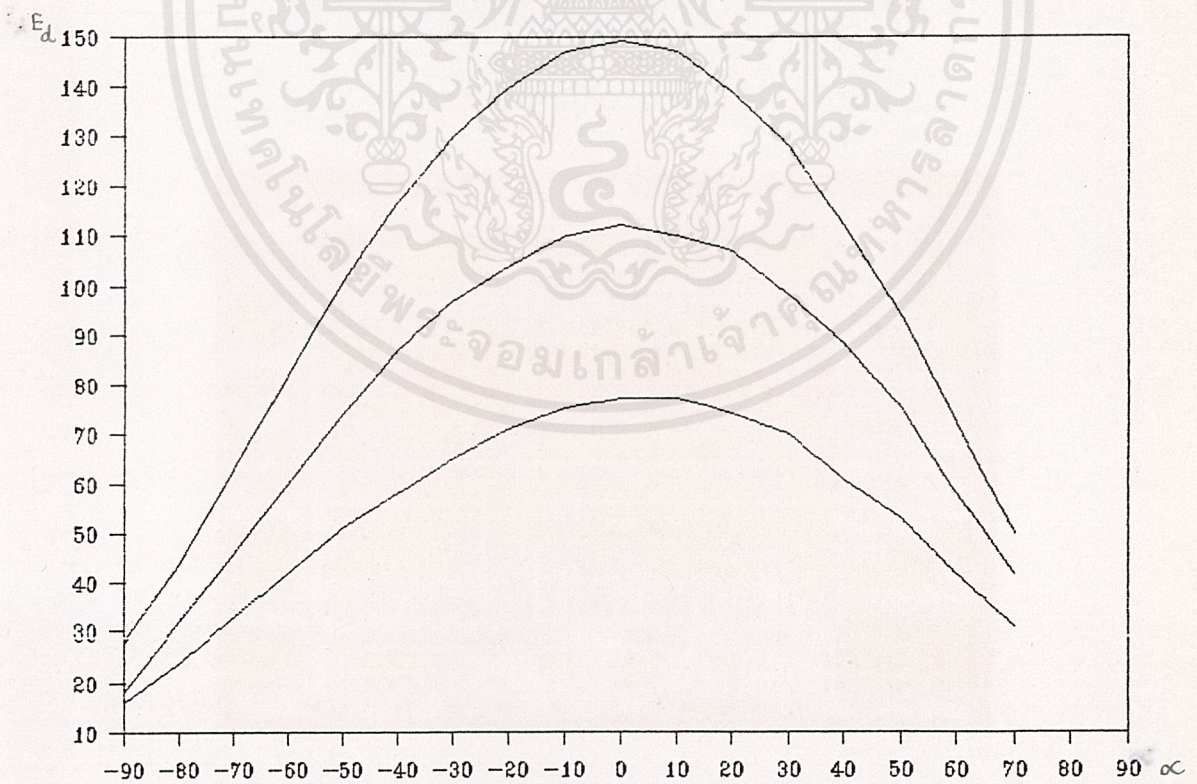


รูปที่ 7.2 กราฟแสดงแรงดันเฉลี่ยทางด้านเอาต์พุตกับมุมเลื่อนเฟส  
กรณี 9-พัลส์ ที่ค่า  $\lambda = 0.8, 0.6$  และ  $0.4$  (จากบนลงล่าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้คัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



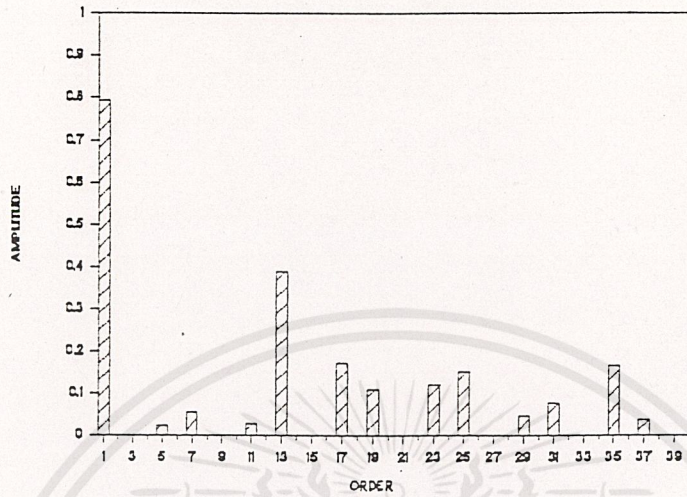
รูปที่ 7.3 กราฟแสดงแรงดันเฉลี่ยทางด้านเอาท์พุทกับมุมเลื่อนเฟส  
กรณี 12-พัลส์ ที่ค่า  $\lambda = 0.8, 0.6$  และ  $0.4$  (จากบนลงล่าง)



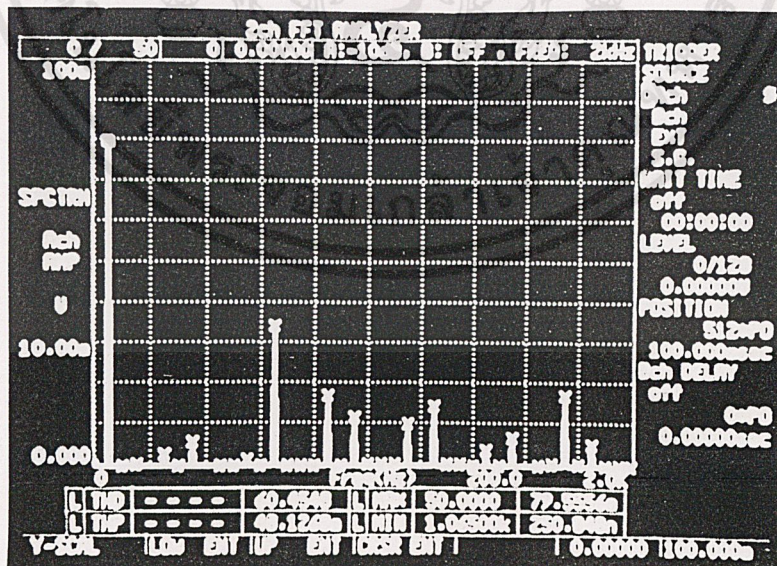
รูปที่ 7.4 กราฟแสดงแรงดันเฉลี่ยทางด้านเอาท์พุทกับมุมเลื่อนเฟส  
กรณี 15-พัลส์ ที่ค่า  $\lambda = 0.8, 0.6$  และ  $0.4$  (จากบนลงล่าง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

modulation factor=0.8 (6-pulse)



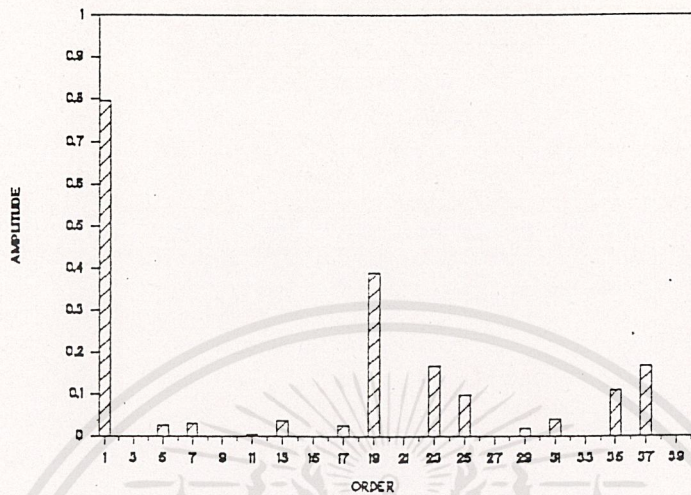
รูปที่ 7.5 กราฟแสดงการกระจายองค์ประกอบฮาร์โมนิกของกระแสอินพุตที่ดับลิ้วเอ็ม ที่ได้จากการคำนวณ ที่ 6-พัลส์  $\lambda=0.8$



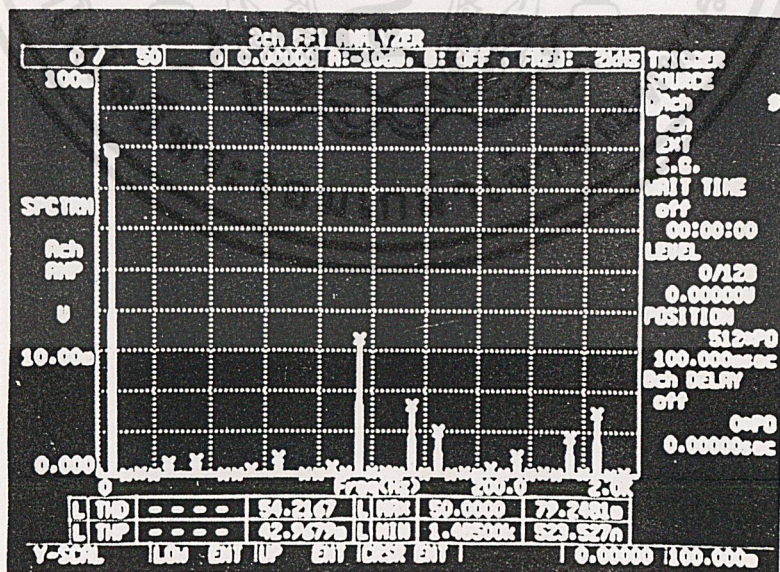
รูปที่ 7.6 กราฟแสดงการกระจายองค์ประกอบฮาร์โมนิกของกระแสอินพุตที่ดับลิ้วเอ็ม ที่ได้จากการทดลอง ที่ 6-พัลส์  $\lambda=0.8$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

modulation factor=0.8 (9-pulse)



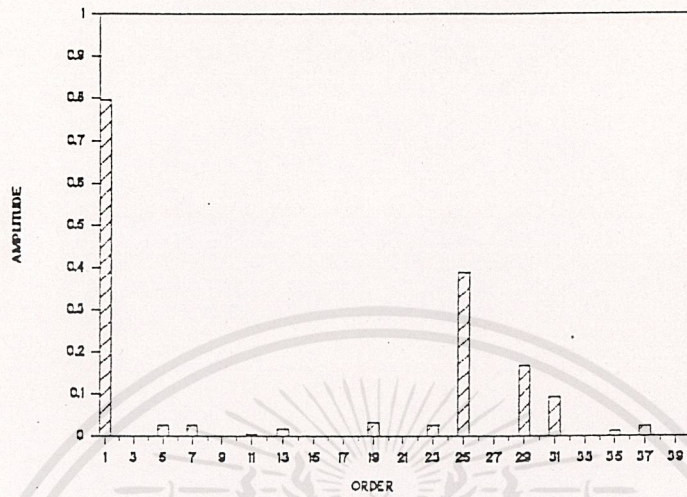
รูปที่ 7.7 กราฟแสดงการกระจายองค์ประกอบฮาร์โมนิกของกระแสอินพุตที่ดับลิว เอ็ม ที่ได้จากค่าจำนวน ที่ 9-พัลส์  $\lambda=0.8$



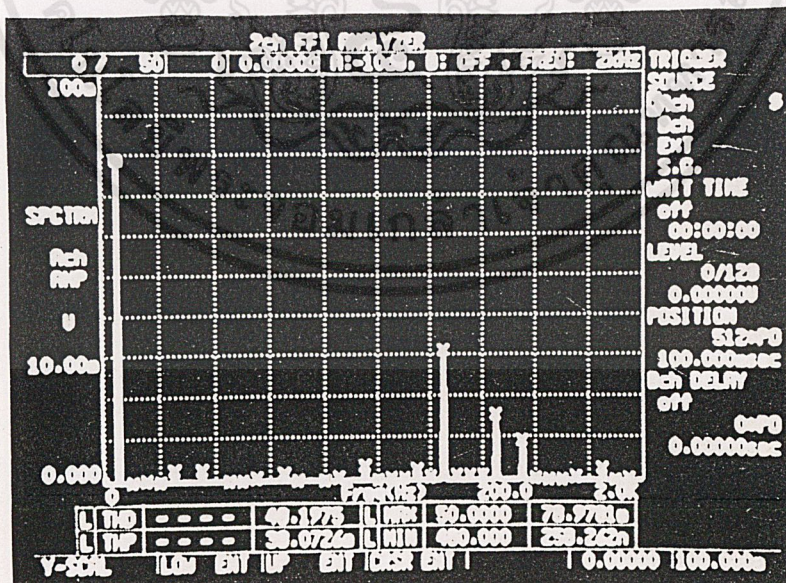
รูปที่ 7.8 กราฟแสดงการกระจายองค์ประกอบฮาร์โมนิกของกระแสอินพุตที่ดับลิว เอ็ม ที่ได้จากค่าทดลอง ที่ 9-พัลส์  $\lambda=0.8$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

modulation factor=0.8 (12-pulse)



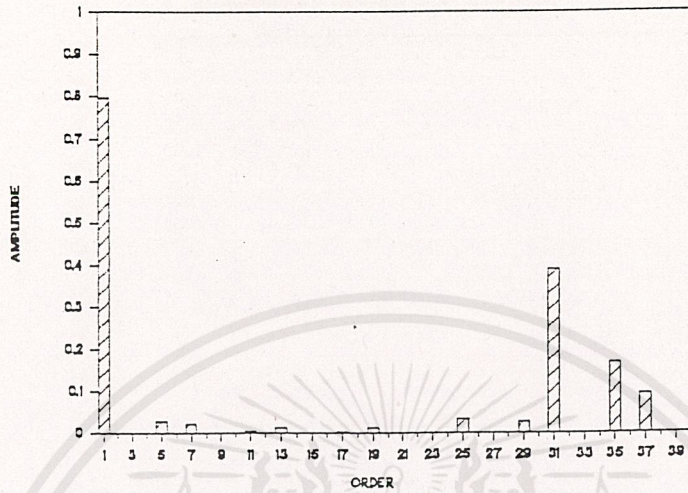
รูปที่ 7.9 กราฟแสดงการกระจายองค์ประกอบฮาร์โมนิกของกระแสไฟฟ้าที่ดับลิวเอ็่ม  
ที่ได้จากการคำนวณ ที่ 12-พัลส์  $\lambda=0.8$



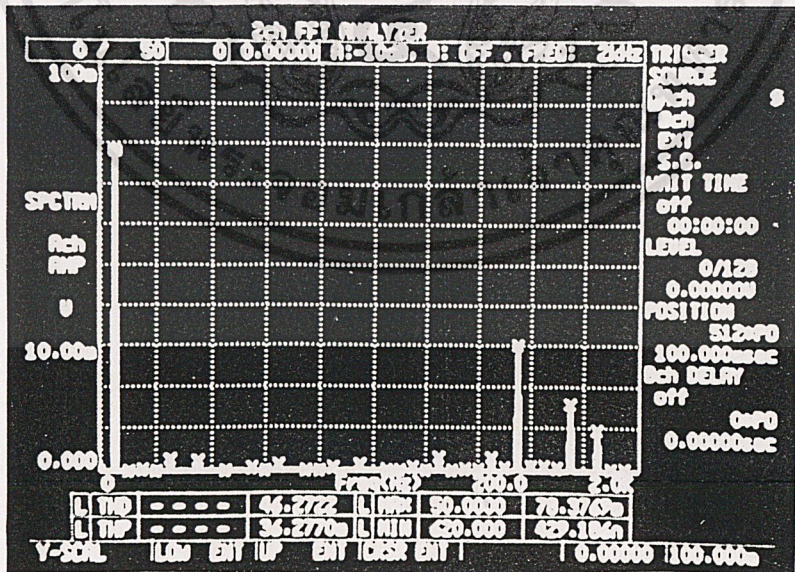
รูปที่ 7.10 กราฟแสดงการกระจายองค์ประกอบฮาร์โมนิกของกระแสไฟฟ้าที่ดับลิวเอ็่ม  
ที่ได้จากการทดลอง ที่ 12-พัลส์  $\lambda=0.8$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

modulation factor=0.8 (15-pulse)



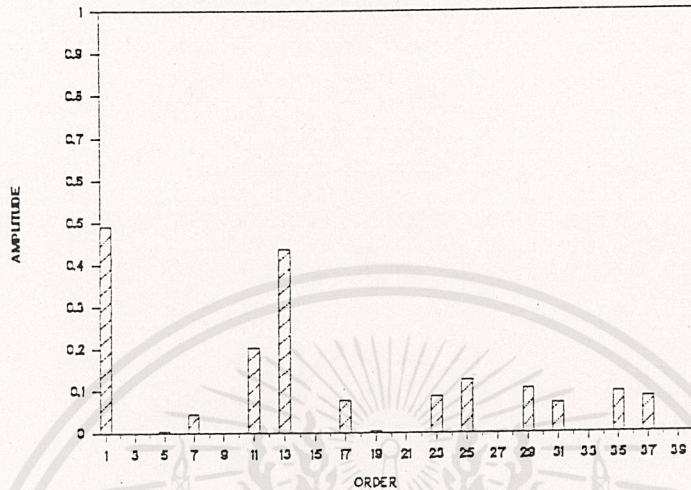
รูปที่ 7.11 กราฟแสดงการกระจายองค์ประกอบฮาร์มอนิกของกระแสไฟฟ้าที่ดับลิ้ว เอ็ม ที่ได้จากการคำนวณ ที่ 15-พัลส์  $\lambda=0.8$



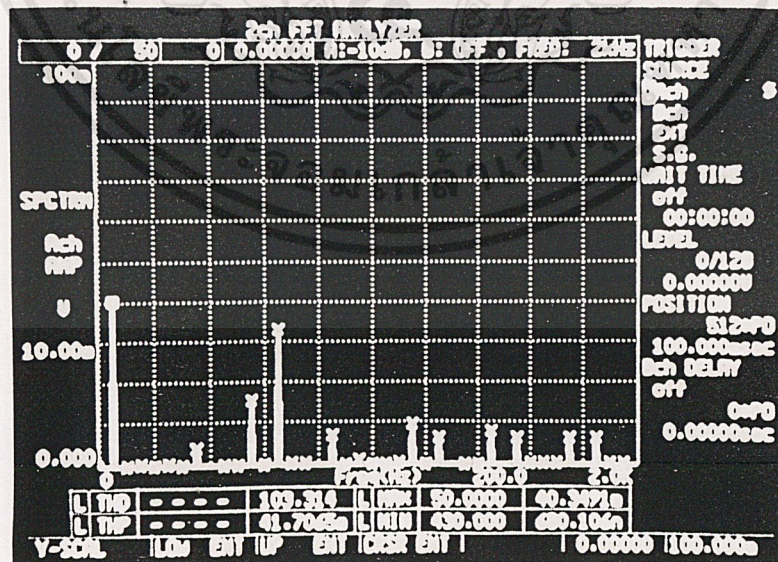
รูปที่ 7.12 กราฟแสดงการกระจายองค์ประกอบฮาร์มอนิกของกระแสไฟฟ้าที่ดับลิ้ว เอ็ม ที่ได้จากการทดลอง ที่ 15-พัลส์  $\lambda=0.8$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

modulation factor=0.5 (6-pulse)

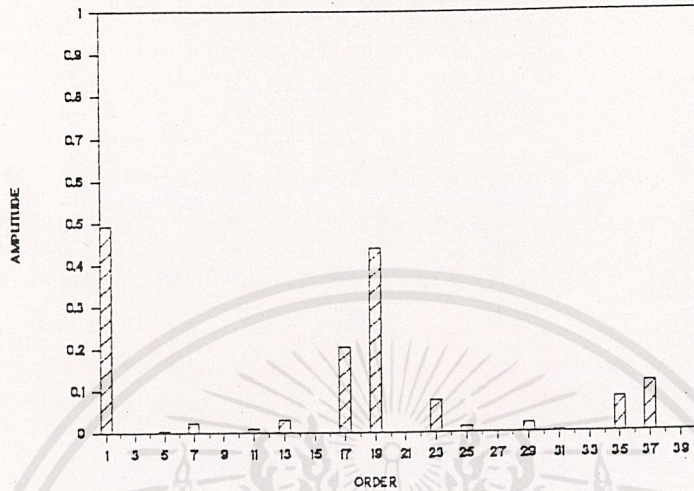


รูปที่ 7.13 กราฟแสดงการกระจายองค์ประกอบฮาร์โมนิกของกระแสอินพุตที่ดับลิวเอ็ม  
ที่ได้จากการคำนวณ ที่ 6-พัลส์  $\lambda=0.5$

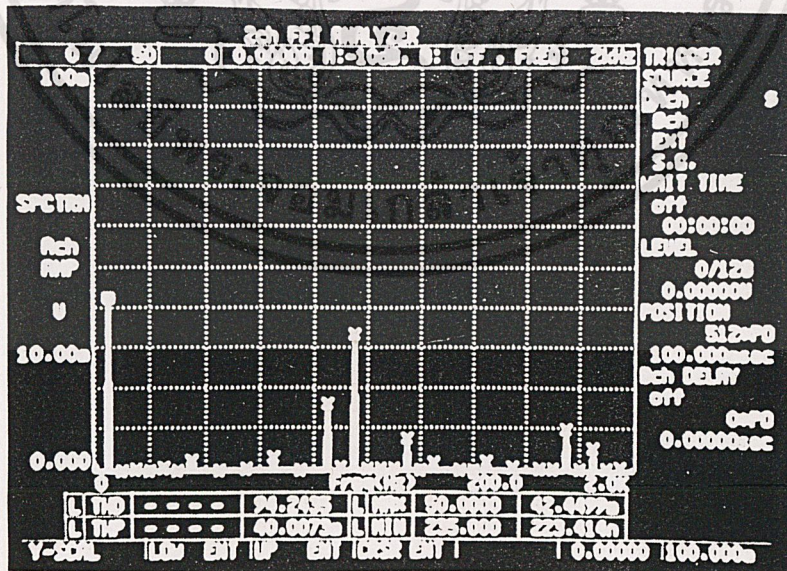


รูปที่ 7.14 กราฟแสดงการกระจายองค์ประกอบฮาร์โมนิกของกระแสอินพุตที่ดับลิวเอ็ม  
ที่ได้จากการทดลอง ที่ 6-พัลส์  $\lambda=0.5$

modulation factor=0.5 (9-pulse)



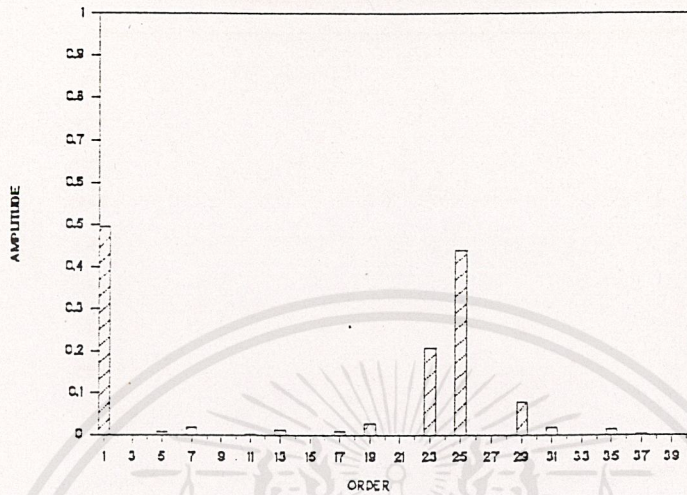
รูปที่ 7.15 กราฟแสดงการกระจายองค์ประกอบฮาร์โมนิกของกระแสอินพุตที่ดับลิ่ว เอ็ม ที่ได้จากการคำนวณ ที่ 9-พัลส์  $\lambda=0.5$



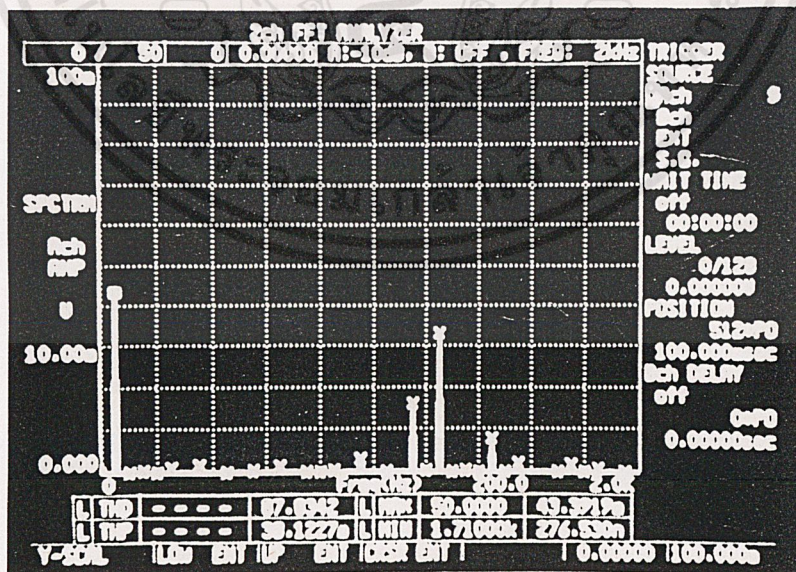
รูปที่ 7.16 กราฟแสดงการกระจายองค์ประกอบฮาร์โมนิกของกระแสอินพุตที่ดับลิ่ว เอ็ม ที่ได้จากการทดลอง ที่ 9-พัลส์  $\lambda=0.5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

modulation factor=0.5 (12-pulse)



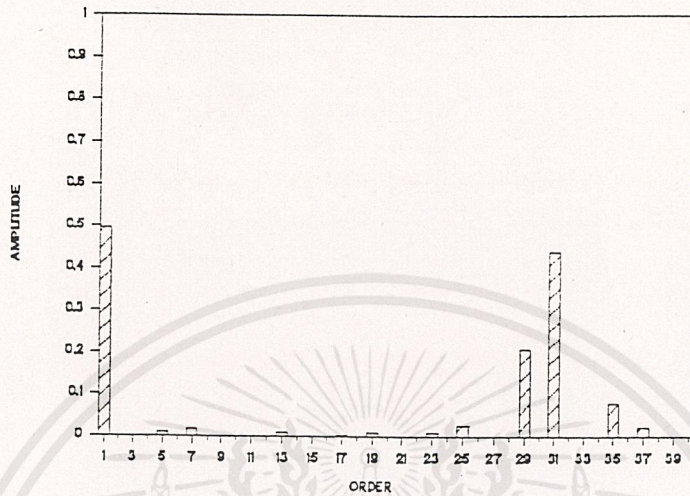
รูปที่ 7.17 กราฟแสดงการกระจายองค์ประกอบฮาร์มอนิกของกระแสไฟฟ้าที่ดับลิ้ว เอ็ม ที่ได้จากการคำนวณ ที่ 12-พัลส์  $\lambda=0.5$



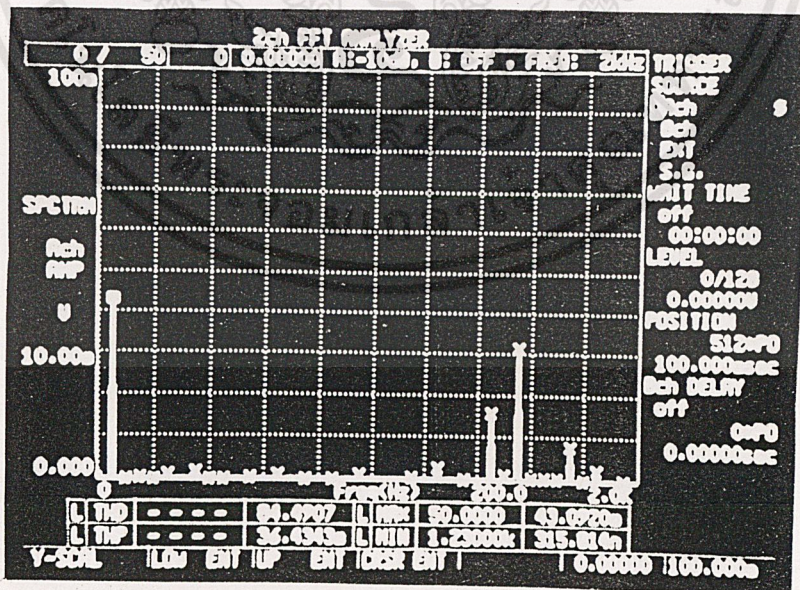
รูปที่ 7.18 กราฟแสดงการกระจายองค์ประกอบฮาร์มอนิกของกระแสไฟฟ้าที่ดับลิ้ว เอ็ม ที่ได้จากการทดลอง ที่ 12-พัลส์  $\lambda=0.5$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

modulation factor=0.5 (15-pulse)

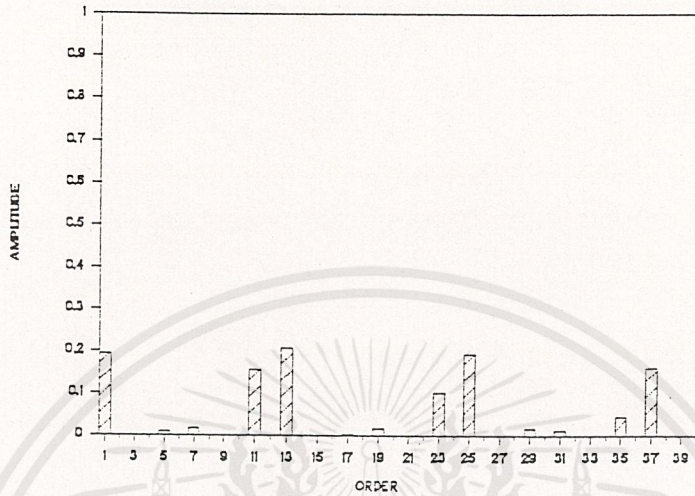


รูปที่ 7.19 กราฟแสดงการกระจายองค์ประกอบฮาร์มอนิกของกระแสสลับพหุพีคดับลิ้ว เอ็ม ที่ได้จากการคำนวณ ที่ 15-พัลส์  $\lambda=0.5$

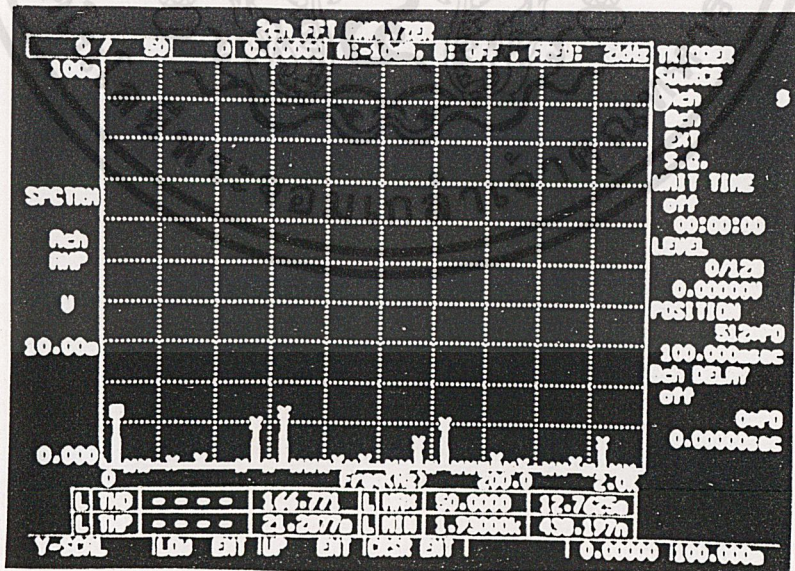


รูปที่ 7.20 กราฟแสดงการกระจายองค์ประกอบฮาร์มอนิกของกระแสสลับพหุพีคดับลิ้ว เอ็ม ที่ได้จากการทดลอง ที่ 15-พัลส์  $\lambda=0.5$

modulation factor=0.2 (6-pulse)



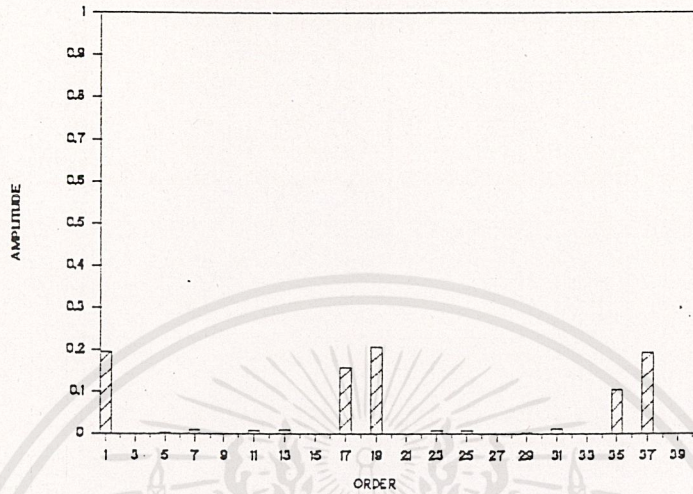
รูปที่ 7.21 กราฟแสดงการกระจายองค์ประกอบฮาร์โมนิกของกระแสอินพุตที่ดับลิ้วเอ็ม  
ที่ได้จากการคำนวณ ที่ 6-พัลส์  $\lambda=0.2$



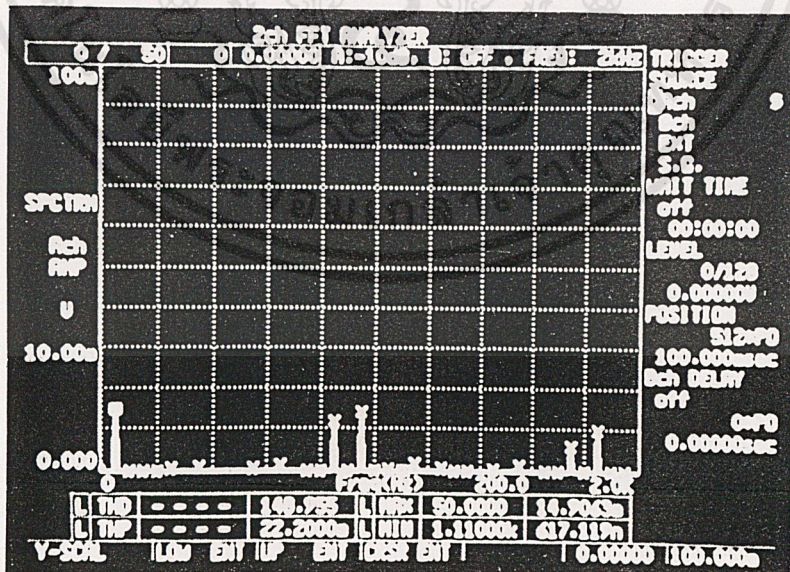
รูปที่ 7.22 กราฟแสดงการกระจายองค์ประกอบฮาร์โมนิกของกระแสอินพุตที่ดับลิ้วเอ็ม  
ที่ได้จากการทดลอง ที่ 6-พัลส์  $\lambda=0.2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

modulation factor=0.2 (9-pulse)

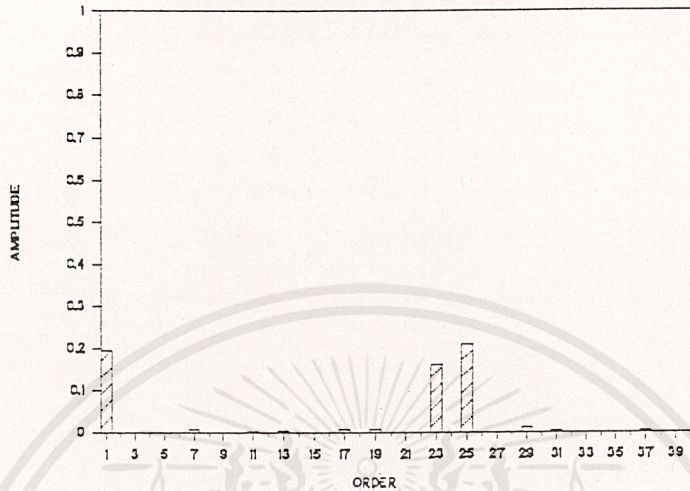


รูปที่ 7.23 กราฟแสดงการกระจายองค์ประกอบฮาร์โมนิกของกระแสอินพุตที่ดับลิ่ว เอ็ม  
ที่ได้จากการคำนวณ ที่ 9-พัลส์  $\lambda=0.2$

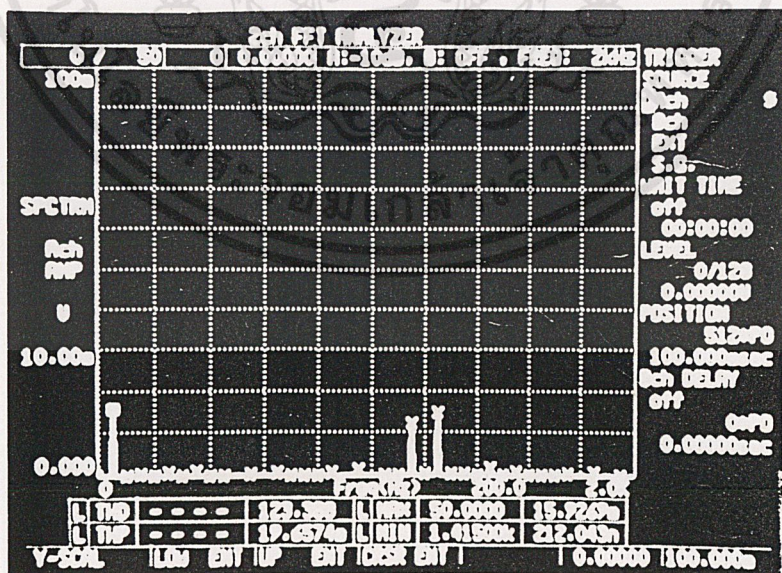


รูปที่ 7.24 กราฟแสดงการกระจายองค์ประกอบฮาร์โมนิกของกระแสอินพุตที่ดับลิ่ว เอ็ม  
ที่ได้จากการทดลอง ที่ 9-พัลส์  $\lambda=0.2$

modulation factor=0.2 (12-pulse)



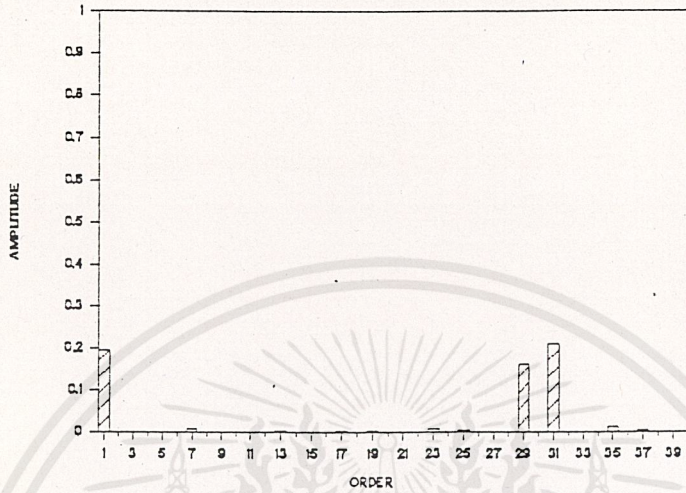
รูปที่ 7.25 กราฟแสดงการกระจายองค์ประกอบฮาร์โมนิกของกระแสอินพุตที่ดับลิว เอ็ม  
ที่ได้จากการคำนวณ ที่ 12-พัลส์  $\lambda=0.2$



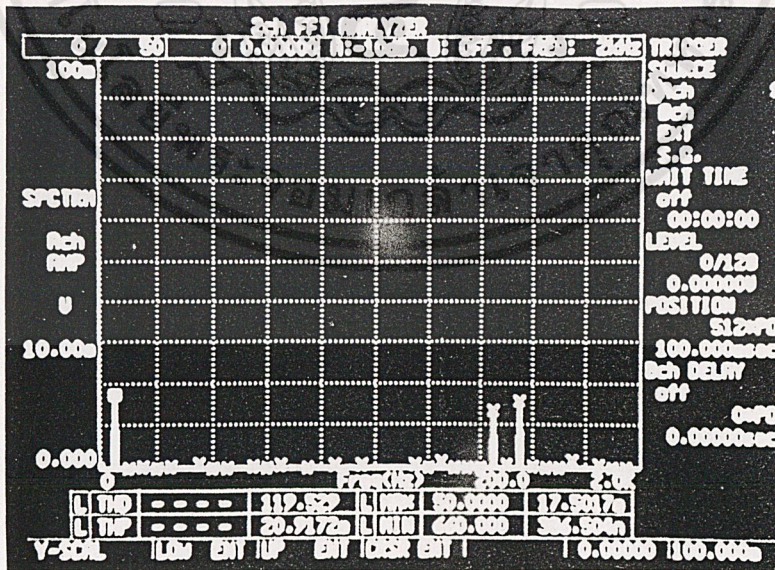
รูปที่ 7.26 กราฟแสดงการกระจายองค์ประกอบฮาร์โมนิกของกระแสอินพุตที่ดับลิว เอ็ม  
ที่ได้จากการทดลองที่ 12-พัลส์  $\lambda=0.2$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

modulation factor=0.2 (15-pulse)

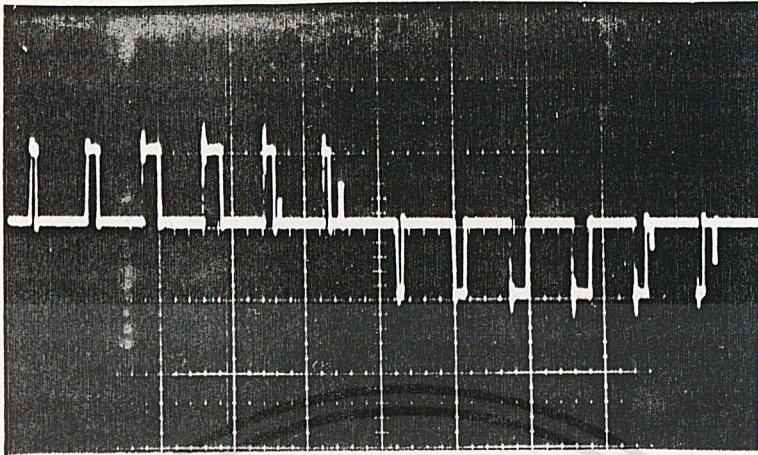


รูปที่ 7.27 กราฟแสดงการกระจายองค์ประกอบฮาร์มอนิกของกระแสอินพุตที่ดับลิวเอม  
ที่ได้จากการคำนวณ ที่ 15-พัลส์  $\lambda=0.2$

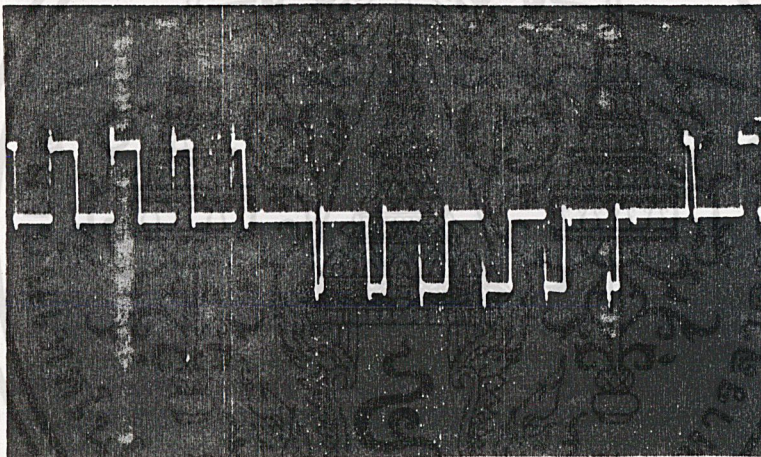


รูปที่ 7.28 กราฟแสดงการกระจายองค์ประกอบฮาร์มอนิกของกระแสอินพุตที่ดับลิวเอม  
ที่ได้จากการทดลอง ที่ 15-พัลส์  $\lambda=0.2$

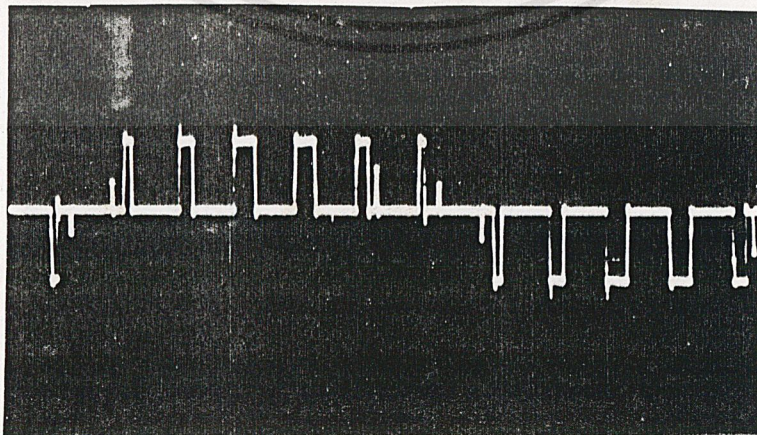
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.29 รูปคลื่นของกระแสที่ตัวบลิวเอียม(เฟส U) ชนิด 6-พัลส์ ที่มุม  $\alpha=0^\circ$

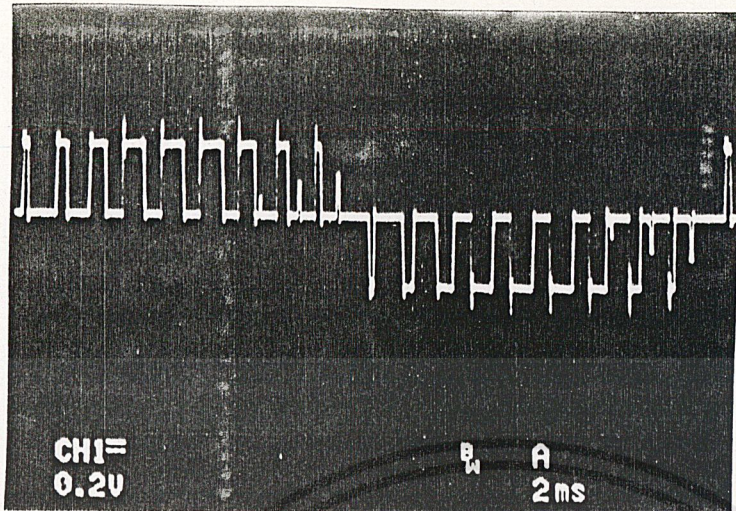


รูปที่ 7.30 รูปคลื่นของกระแสที่ตัวบลิวเอียม(เฟส U) ชนิด 6-พัลส์ ที่มุม  $\alpha=-50^\circ$  (มุมนำหน้า)

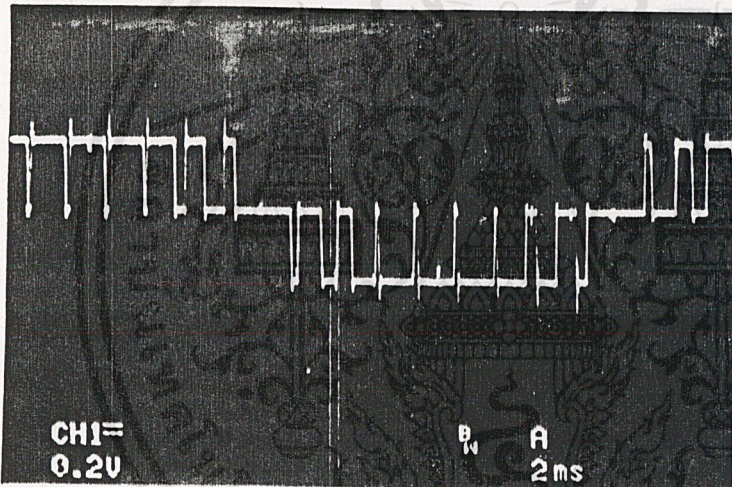


รูปที่ 7.31 รูปคลื่นของกระแสที่ตัวบลิวเอียม(เฟส U) ชนิด 6-พัลส์ ที่มุม  $\alpha=50^\circ$  (มุมล่าหลัง)

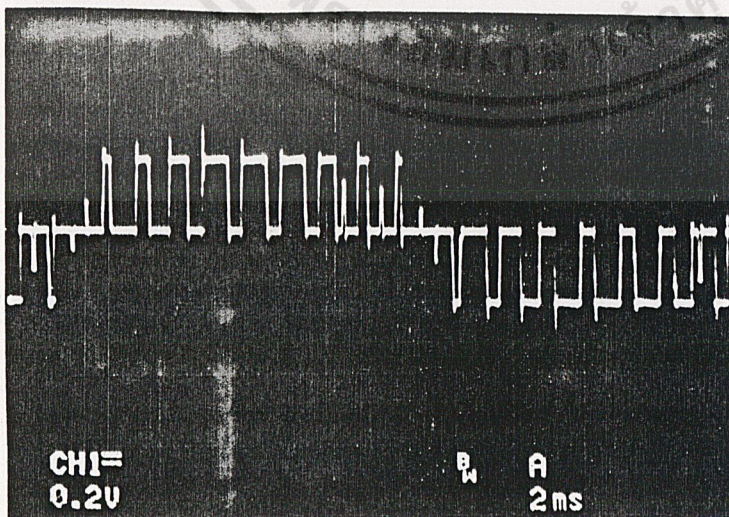
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า, ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต่อ 86 ไปถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.32 รูปคลื่นของกระแสไฟดับลิวเอ็ม(เฟส U) ชนิด 9-พัลส์ ที่มุม  $\alpha=0^\circ$

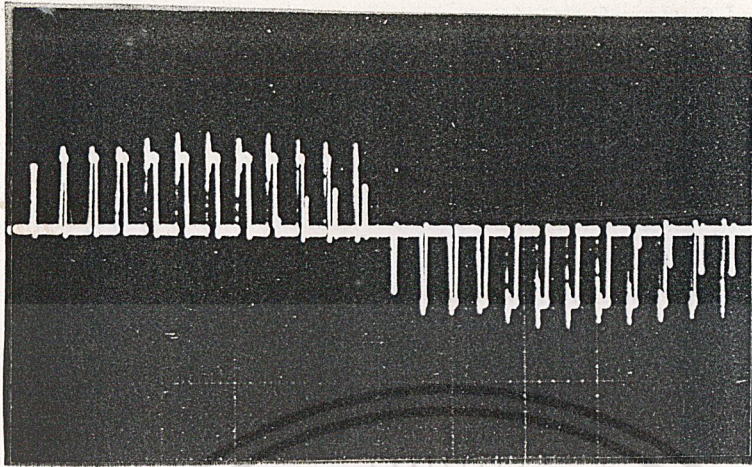


รูปที่ 7.33 รูปคลื่นของกระแสไฟดับลิวเอ็ม(เฟส U) ชนิด 9-พัลส์ ที่มุม  $\alpha=-50^\circ$  (มุมหน้า)

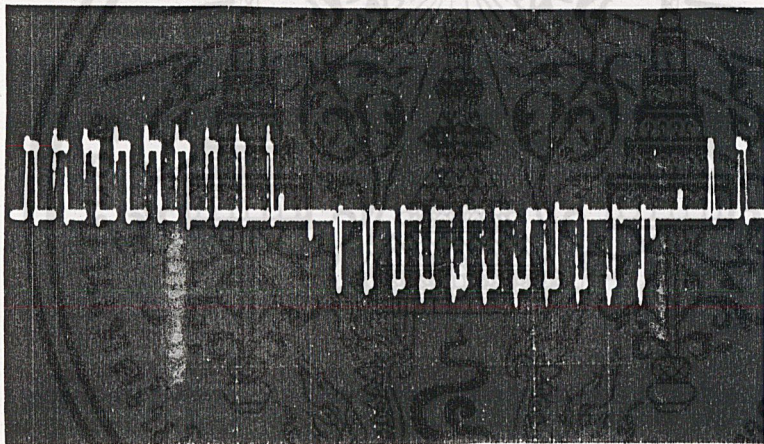


รูปที่ 7.34 รูปคลื่นของกระแสไฟดับลิวเอ็ม(เฟส U) ชนิด 9-พัลส์ ที่มุม  $\alpha=50^\circ$  (มุมล่าหลัง)

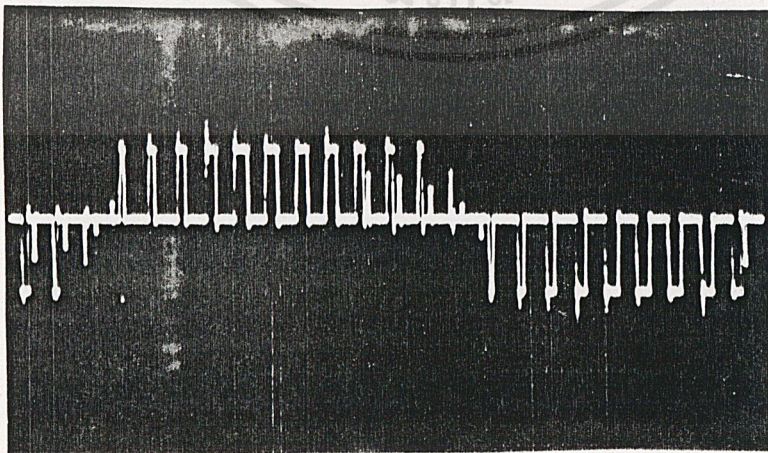
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา<sup>87</sup>ละต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.35 รูปคลื่นของกระแสฟัดบลิวเอ็ม (เฟส U) ชนิด 12-พัลส์ ที่มุม  $\alpha=0^\circ$

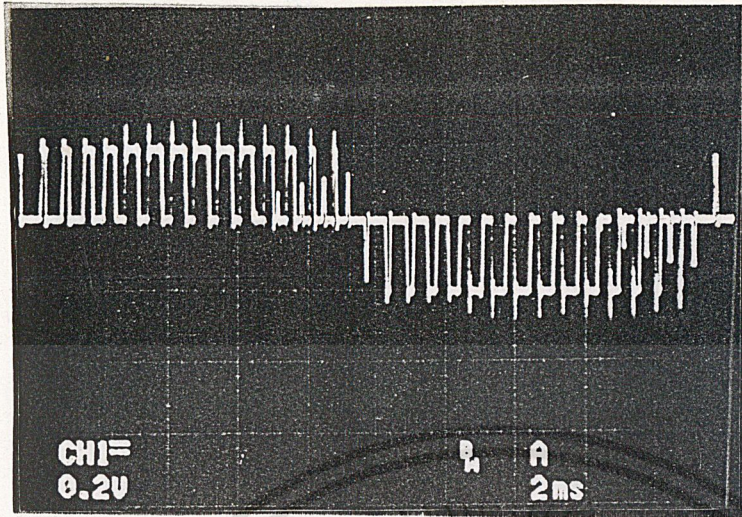


รูปที่ 7.36 รูปคลื่นของกระแสฟัดบลิวเอ็ม (เฟส U) ชนิด 12-พัลส์ ที่มุม  $\alpha=-50^\circ$  (มุมหน้า)

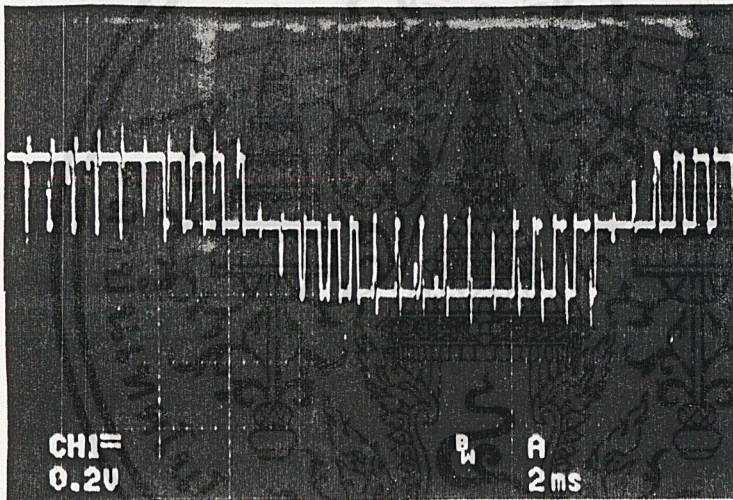


รูปที่ 7.37 รูปคลื่นของกระแสฟัดบลิวเอ็ม (เฟส U) ชนิด 12-พัลส์ ที่มุม  $\alpha=50^\circ$  (มุมหลัง)

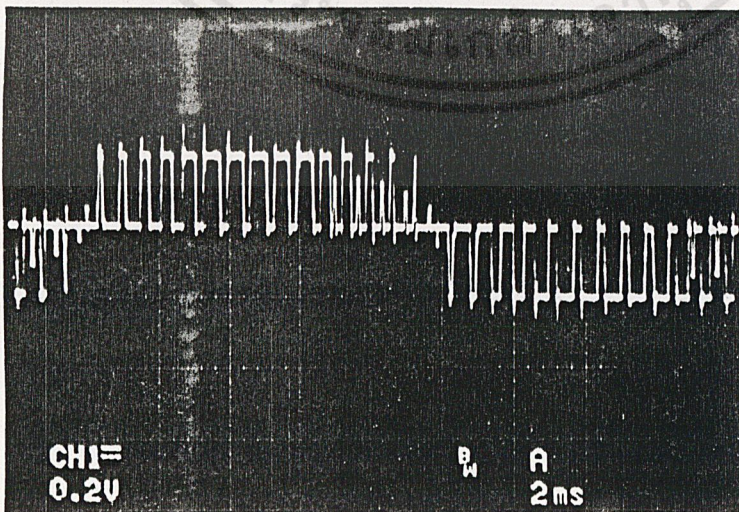
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและ 88 อ่างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.38 รูปคลื่นของกระแสฟีดแบ็คลิวเอ็ม (เฟส U) ชนิด 15-พัลส์ ที่มุม  $\alpha=0^\circ$

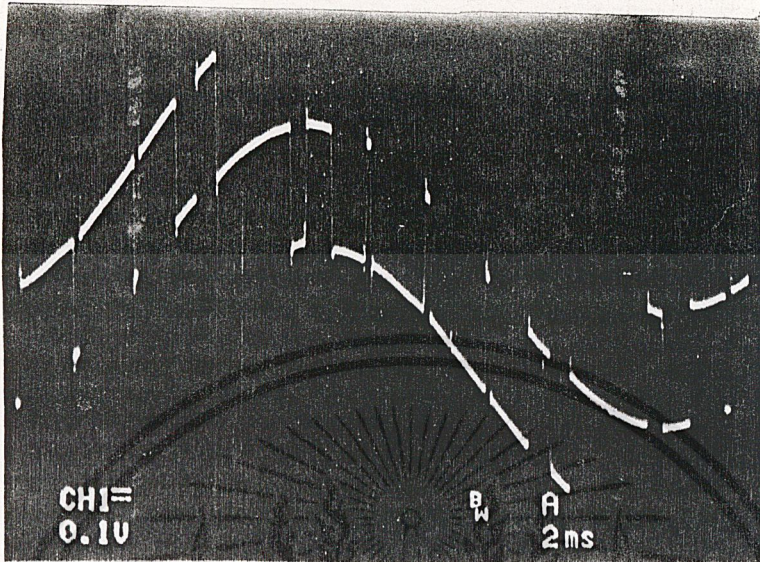


รูปที่ 7.39 รูปคลื่นของกระแสฟีดแบ็คลิวเอ็ม (เฟส U) ชนิด 15-พัลส์ ที่มุม  $\alpha=-50^\circ$  (มุมก้นหน้า)

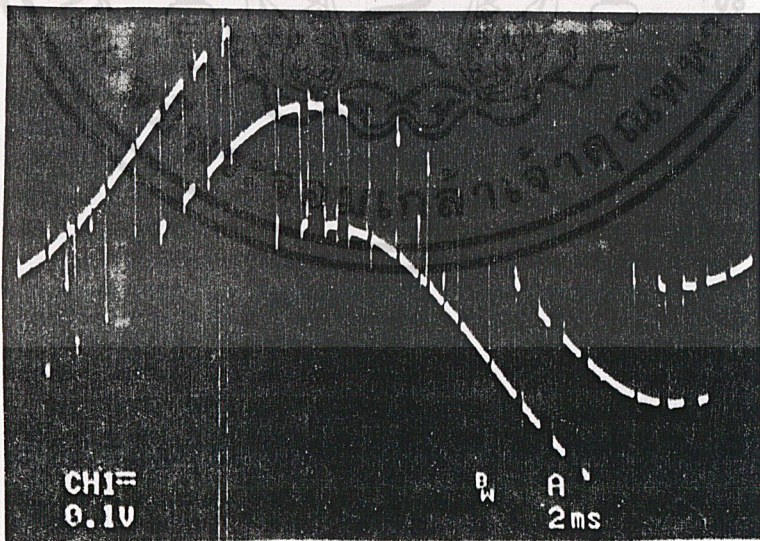


รูปที่ 7.40 รูปคลื่นของกระแสฟีดแบ็คลิวเอ็ม (เฟส U) ชนิด 15-พัลส์ ที่มุม  $\alpha=50^\circ$  (มุมล้ำหลัง)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและ 89 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

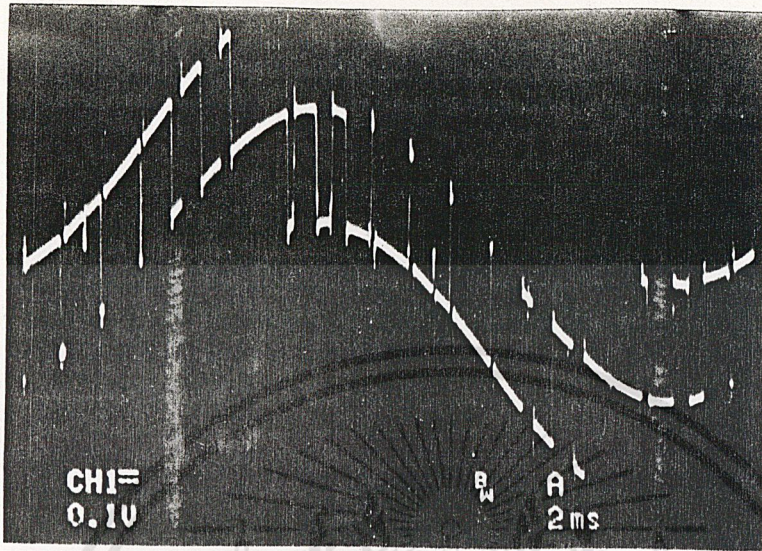


รูปที่ 7.41 แสดงรูปคลื่นกระแสรวม ของระบบจ่ายไฟฟ้า เมื่อนำคอนเวอเตอร์ มาใช้ในการชดเชยค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์รวมของระบบ โดยมีโหลดเป็น มอเตอร์กระแสสลับ 3 เฟส (ที่ 6 ฟิลล์)

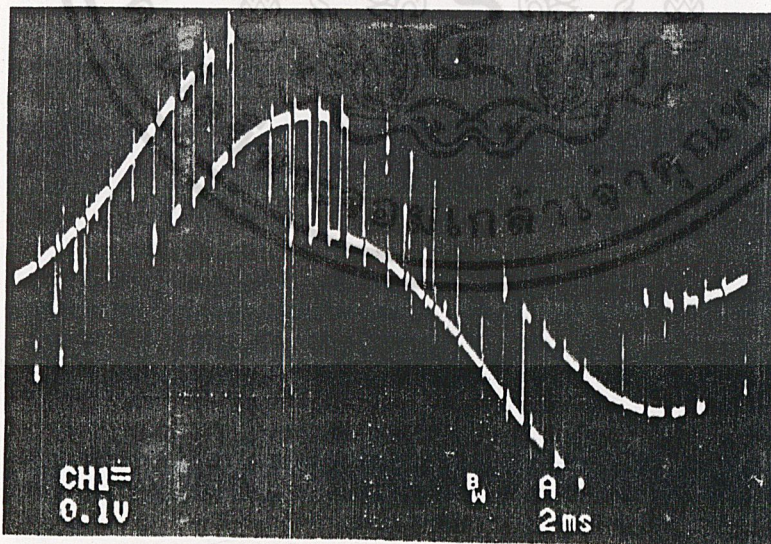


รูปที่ 7.42 แสดงรูปคลื่นกระแสรวม ของระบบจ่ายไฟฟ้า เมื่อนำคอนเวอเตอร์ มาใช้ในการชดเชยค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์รวมของระบบ โดยมีโหลดเป็น มอเตอร์กระแสสลับ 3 เฟส (ที่ 12 ฟิลล์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและรูปอย่างถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 7.43 แสดงรูปคลื่นกระแสรวม ของระบบจ่ายไฟฟ้า เมื่อนำคอนเวอร์เตอร์ มาใช้ในการชดเชยค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์รวมของระบบ โดยมีโหลดเป็น มอเตอร์กระแสสลับ 3 เฟส (ที่ 9 พัลส์)



รูปที่ 7.44 แสดงรูปคลื่นกระแสรวม ของระบบจ่ายไฟฟ้า เมื่อนำคอนเวอร์เตอร์ มาใช้ในการชดเชยค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์รวมของระบบ โดยมีโหลดเป็น มอเตอร์กระแสสลับ 3 เฟส (ที่ 15 พัลส์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา 91 ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 13

ผลการทดลอง การจ่ายรีแอกทีฟเพาเวอร์ ที่ 6 พัลส์  
ขณะที่กระแสดีซี ทางด้านเอาก์พุท มีค่าคงที่

6 PULSE  
Vuv(input)=160 Volt Tau = 10 uS  
Wmotor=380 W Iline(motor)=1.83 A Id=2.0 A

	ALPHA	I <sub>system</sub>	I <sub>c</sub>	W <sub>c</sub>	E <sub>cd</sub>	Ed
0	4.35	0.80	60.00	300.00	28	
-10	4.33	0.83	65.00	300.00	28	
-20	4.29	0.89	70.00	300.00	28	
-30	4.15	0.98	85.00	320.00	28	
-40	4.05	1.13	105.00	330.00	28	
-50	3.90	1.36	130.00	330.00	28	
-57	3.65	1.50	150.00	330.00	27	

ตารางที่ 14

ผลการทดลอง การจ่ายรีแอกทีฟเพาเวอร์ ที่ 15 พัลส์  
ขณะที่กระแสดีซี ทางด้านเอาก์พุท มีค่าคงที่

15 PULSE  
Vuv(input)=160 Volt Tau = 10 uS  
Wmotor=380 W Iline(motor)=1.83 A Id=2.0 A

	ALPHA	I <sub>system</sub>	I <sub>c</sub>	W <sub>c</sub>	E <sub>cd</sub>	Ed
0	4.70	0.98	75.00	320.00	30	
-10	4.69	0.98	80.00	310.00	29	
-20	4.57	0.98	80.00	320.00	28	
-30	4.50	1.04	90.00	300.00	29	
-40	4.40	1.13	100.00	300.00	29	
-50	4.20	1.33	125.00	300.00	29	
-57	3.98	1.59	165.00	320.00	29	

## กติกกรมประกาศ

ผู้จัดทำขอขอบพระคุณ อาจารย์ วิริยะ พิเชฐจำเริญ ที่ให้คำแนะนำและแนวทางในการทำงานจนสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และขอขอบคุณพี่ชาย และ เฮียรัก ที่ให้กำลังใจและคำแนะนำที่ดีแก่ผู้จัดทำด้วยดีมาโดยตลอด

ท้ายที่สุดนี้ ขอมอบให้เพื่อนๆร่วมรุ่น 26 ทุกคนที่ได้มีโอกาสร่วมเรียนด้วยกันมาตลอดระยะเวลา 4 ปี



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## หนังสืออ้างอิง

1. ชัยวัฒน์ โควาวิสารัช และโชคชัย ธรรมารุธรรม ,ปริญญาานิพนธ์ "เครื่องแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงและปรับปรุงตัวประกอบกำลัง โดยจี้ทีโอไทรสเตอร์", ปีการศึกษา 2530
2. พงษ์ธวัช จงเจริญยานนท์, สุรเดช ศรีวรรมณี, สมศักดิ์ อยู่สอน และสุพจน์ พงษ์อัชฌา, ปริญญาานิพนธ์ "เครื่องแปลงไฟฟ้ากระแสสลับเป็นกระแสตรงและการควบคุมรูปแบบกระแสในลักษณะพีดับบลิวเอ็ม", ปีการศึกษา 2533
3. สุชาติ แซ่ตั้ง และรศ.ดร.วิริยะ พิเชฐจำเริญ, "พีดับบลิวเอ็มคอนเวอร์เตอร์ชนิดไม่มีวงจรรวมมีวเตท", การประชุมทางวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า 9 สถาบัน ครั้งที่ 12
4. LASZLO GYUGYI, "Reactive Power Generation and Control by Thyristor Circuits", IEEE Trans.Ind.Appl., Vol.IA1-15, NO.5 Sep./Oct. 1979
5. CURTIS D.JOHNSON , "Microprocessor-Based Process Control" , Prentice-Hall, Inc; Englewood Cliffs, New Jersey Office , 1984

