

# สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

ปีการศึกษา 2542

การเปรียบเทียบการควบคุมกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ  
โดยวิธีอินทิกรัลไซเคิลคอนโทรลและเฟสคอนโทรล

Comparison of AC Power Control with Integral Cycle Control and Phase Control



โดย

นายอนันต์ อธิธิบุชาเกียรติ  
นายทนต์ศักดิ์ กนกหงษ์  
นายสุรเชษฐ์ เสริมชีพ

อาจารย์ที่ปรึกษา

รศ.ดร.วิริยะ พิเชษฐจำเริญ  
ดร.วิจิตร กิณเรศ  
อาจารย์สุรินทร์ คำฝอย

เลขหมึก.....  
เลขทะเบียน..... 36978  
วัน, เดือน, ปี 30 ส.ค. 2543

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับกรใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริญญาโทปีการศึกษา 2542

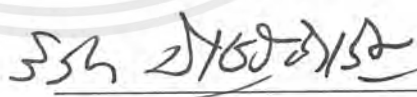
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

คณะวิศวกรรมศาสตร์สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เรื่อง การเปรียบเทียบการควบคุมกำลังไฟฟ้ากระแสสลับโดยวิธีอินทิกรัลไซเคิลคอนโทรลและเฟสคอนโทรล

ผู้จัดทำ

- 
1. นายอนันต์ อธิธิบุชาเกียรติ
  2. นายทงศักดิ์ กนกหงษ์
  3. นายสุรเชษฐ์ เสริมชีพ



อาจารย์ที่ปรึกษา

(รศ.ดร.วิริยะ พิเชฐจำเริญ)



อาจารย์ที่ปรึกษา

(ดร.วิจิตร กิณเรศ)



อาจารย์ที่ปรึกษา

(อาจารย์สุรินทร์ คำฝอย)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การเปรียบเทียบการควบคุมกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ  
โดยวิธีอินทิกรัลไซเคิลคอนโทรลและเฟสคอนโทรล

นายอนันต์	อิทธิบุชาเกียรติ	
นายทงศักดิ์	กนกหงษ์	
นายสุรเชษฐ์	เสริมชีพ	
รศ.ดร.วิริยะ	พิเชษฐจำเริญ	อาจารย์ที่ปรึกษา
ดร.วิจิตร	กิณเรศ	อาจารย์ที่ปรึกษา
อาจารย์สุรินทร์	คำฝอย	อาจารย์ที่ปรึกษา
ปีการศึกษา 2542		

บทคัดย่อ

โครงการนี้เป็นารสร้างวงจรทดลอง เพื่อใช้สำหรับประกอบการเรียนการสอน โดยภายในชุดทดลองนี้ ประกอบไปด้วย วงจรที่ใช้สำหรับควบคุมกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ ที่ใช้หลักการทางเพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์ 2 แบบคือ วงจรเฟสคอนโทรลและวงจรอินทิกรัลไซเคิลคอนโทรล โดยชุดทดลองนี้สามารถใช้ทดลองกับโหลดที่พิกัดสูงสุด 25 แอมป์ 600 โวลต์ โดยวงจรในแต่ละแบบก็จะศึกษาหาความสัมพันธ์ว่ามีลักษณะการควบคุมการเปลี่ยนแปลงของ แรงดัน กระแส กำลังไฟฟ้าจริง กำลังไฟฟ้าที่ปรากฏ ตัวประกอบกำลัง เป็นอย่างไร และนำมาเปรียบเทียบกันระหว่างผลที่ได้จากการทดลองกับทฤษฎีที่ได้ศึกษามา โดยใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์คือ โปรแกรมเมทแลปช่วยในการวิเคราะห์ จากนั้นก็นำผลการทดลองจากวงจรเฟสคอนโทรลและอินทิกรัลไซเคิลคอนโทรลมาเปรียบเทียบกัน ว่าแต่ละแบบมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันอย่างไร โดยผลจากการทดลองที่ก่ำลังไฟฟ้าที่โหลดได้รับเท่ากัน การควบคุมแบบเฟสคอนโทรลจะมีผลกระทบจากฮาร์มอนิกส์น้อยกว่าการควบคุมแบบอินทิกรัลไซเคิลคอนโทรล ส่วนการใช้ขนาดของก่ำลังไฟฟ้าที่ปรากฏ เพื่อให้ได้ก่ำลังไฟฟ้าจริงที่ตกร่อมโหลดเท่ากัน ผลการทดลองของทั้งสองวงจรจะมีความใกล้เคียงกัน

**Comparision Of AC Power Control with Integral Cycle Control and Phase Control**

**Anan                    Ittibuchakite**

**Tanongsak        Kanokhong**

**Surachat           Sumchip**

**Assoc.Prof.Dr.Viriya Pichetchumroen    Advisor**

**Dr. Vijit Kinares    Advisor**

**Mr. Surin Khomfoi    Advisor**

**1999**

**ABSTRACT**

This project , it was designed for help to study. Its ' inside consist of two circuits for control the AC power by using phase control technic and integral cycle control technic. This project can test with load 25 amp. 600 volt and included the relationship of voltage , current , active power , apparent power , power factor. After that this project is provided into phase control circuit , integral cycle control circuit , the compare circuit that will compare the signal that generated with the signal of setting by use computer programs is Matlab to help circuit analysis. The experiment of the analysis of the value of harmanic and by theory , we can concluded that integral cycle control has the effect value of harmonic more than phase control.

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	I
ABSTRACT	II
สารบัญรูป	III
สารบัญตาราง	IX
บทที่ 1 บทนำ	1
บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน	3
2.1 เอสซีอาร์ (Silicon Control Rectifier)	3
2.2 โครงสร้างภายในและสัญลักษณ์	3
2.3 รูปร่างของเอสซีอาร์	4
2.4 การทำงานของเอสซีอาร์	5
2.5 คุณลักษณะของแรงดันและกระแสของเอสซีอาร์	6
2.6 กรรมวิธีการนำกระแสของเอสซีอาร์	8
2.7 เอสซีอาร์ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ	8
2.8 การควบคุมเอสซีอาร์	9
2.9 การจูนชนวนเอสซีอาร์	9
บทที่ 3 เฟสคอนโทรล	11
3.1 การแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับ	11
3.2 การต่อเอสซีอาร์แบบขนานหัวกลับ	12
3.3 หลักการ	12
3.4 การวิเคราะห์การทำงาน	13
3.5 คุณลักษณะของโหลด	14
3.6 คุณลักษณะของกระแส ณ แหล่งจ่าย	16
3.6.1 ตัวประกอบกำลัง	16
3.6.2 การกระจายอนุกรมของกระแส ณ แหล่งจ่าย	18
3.6.3 คุณลักษณะกำลังไฟฟ้า	20
บทที่ 4 อินทิกรัลไซเคิลคอนโทรล	22
4.1 การทำงาน	22
4.2 คุณลักษณะ	23

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

	หน้า	
4.2.1	คุณลักษณะการควบคุม	23
4.2.2	คุณลักษณะของกระแส ณ แหล่งจ่าย	25
บทที่ 5 วงจรต้นแบบ		33
5.1 เฟสคอนโทรล		33
5.1.1	วงจรจุดชนวนเกตแบบควบคุมเฟส	33
5.1.2	คุณสมบัติของ TCA 785 Integrated Phase Control	33
5.1.3	ความรู้พื้นฐานและหลักการทํางานของ TCA 785	34
5.1.4	วงจรแรงดันอ้างอิง (Reference Voltage)	35
5.1.5	วงจรตรวจจับจุดตัดศูนย์ (Zero Crossing)	36
5.1.6	วงจรสร้างสัญญาณลาดเอียง (Ramp Generator)	36
5.1.7	วงจรเปรียบเทียบ (Control Comparator Circuit)	38
5.1.8	แผนภาพสัญญาณพัลส์ของ TCA 785	39
5.1.9	ลักษณะของสัญญาณจุดชนวนเกต	40
5.1.10	ชุดควบคุมเฟสแบบเฟสเดียว	41
5.1.11	วงจรชุดควบคุมเฟส (Phase Control Circuit)	42
5.1.12	ตัวเชื่อมโยงทางแสง	44
5.2 อินทิกรัลไซเคิลคอนโทรล		46
บทที่ 6 ผลการทดลองอินทิกรัลไซเคิลคอนโทรลและเฟสคอนโทรล		48
6.1 ผลการทดลองการควบคุมกำลังไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสคอนโทรล		48
6.1.1	ลักษณะรูปคลื่นของกระแสและแรงดัน	48
6.1.2	ผลของฮาร์โมนิกส์ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่มุมเฟสต่าง ๆ	49
6.1.3	ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ลำดับฮาร์โมนิกส์หลักและมุมทริก	65
6.1.4	ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าที่มุมทริกต่าง ๆ	67
6.2 ผลการทดลองการควบคุมกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ		
แบบอินทิกรัลไซเคิลคอนโทรล		69
6.2.1	ผลของฮาร์โมนิกส์ในการควบคุมกำลังไฟฟ้า	69
6.2.2	การเปรียบเทียบจำนวนฮาร์โมนิกส์เมื่อ $p'$ ต่างๆกัน	90
6.2.3	การเปรียบเทียบผลของฮาร์โมนิกส์ที่มีค่าเท่ากันเมื่อค่า $p$ ต่างกัน	91
6.2.4	คุณสมบัติในการควบคุมกำลังไฟฟ้า	94
6.3 การเปรียบเทียบระหว่างอินทิกรัลไซเคิลคอนโทรลและเฟสคอนโทรล		96
6.4 สรุปผลการทดลอง		98

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก การคำนวณผลการทดลองโดยโปรแกรม MATLAB

ภาคผนวก ข การ Simulation การควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยโปรแกรม MATLAB

ภาคผนวก ค ใบงานการทดลอง

กิตติกรรมประกาศ

เอกสารอ้างอิง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### III

## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 โครงสร้างภายในและสัญลักษณ์ของเอสซีอาร์	4
รูปที่ 2.2 รูปร่างต่างๆภายนอกของเอสซีอาร์	4
รูปที่ 2.3 การไบแอสเอสซีอาร์	5
รูปที่ 2.4 แบบจำลองเอสซีอาร์ด้วยทรานซิสเตอร์	6
รูปที่ 2.5 กราฟคุณลักษณะแรงดันและกระแสของเอสซีอาร์	7
รูปที่ 2.6 เอสซีอาร์ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ	8
รูปที่ 2.7 แผนภาพวงจรควบคุมมุมจุดชนวนเกต	9
รูปที่ 2.8 คุณลักษณะการควบคุมมุมจุดชนวนเกต	10
รูปที่ 3.1 แผนภาพวงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ(AC to AC Converter)	11
รูปที่ 3.2 วงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับโดยใช้เอสซีอาร์	12
รูปที่ 3.3 แสดงรูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมโหลด	13
รูปที่ 3.4 แสดงคุณสมบัติของแรงดันที่ฮาร์โมนิกส์ต่างๆ	19
รูปที่ 3.5 แสดงคุณสมบัติของกำลังไฟฟ้า	21
รูปที่ 4.1 วงจรหลักของอินทิกรัลไซเคิลคอนโทรล	22
รูปที่ 4.2 ลักษณะรูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมโหลด( $V'$ )	22
รูปที่ 4.3 คุณลักษณะการควบคุมกำลังของฟังก์ชัน $1-\alpha$	24
รูปที่ 4.4 สเปกตรัมกระแสที่ $\alpha=0.5$ ซึ่ง $p'=10$ และ $p'=20$	27
รูปที่ 4.5 สเปกตรัมของกระแสที่ $p'=10$ ซึ่ง $\alpha=0.4$ และ $\alpha=0.6$	27
รูปที่ 4.6 แสดงถึงการลดลงของกำลังไฟฟ้า $1-P/P_0$	30
รูปที่ 4.7 แสดงถึงสเปกตรัมของกำลังไฟฟ้าชั่วขณะที่ $p'=10$ แล้ว $p$ เท่ากับ 2 และ 4	32
รูปที่ 5.1 แผนภาพของ TCA 785	34
รูปที่ 5.2 การต่อแหล่งจ่ายแรงดันให้กับ TCA785 และแรงดันอ้างอิงภายใน	35
รูปที่ 5.3 การสร้างแรงดันลาดเอียงกับวงจรวัดจุดตัดศูนย์	36
รูปที่ 5.4 การปรับค่ากระแส $I_{cont}$ โดยปรับความต้านทาน $R_0$	37
รูปที่ 5.5 การเปรียบเทียบแรงดันควบคุมและแรงดันลาดเอียง	38
รูปที่ 5.6 แผนภาพสัญญาณพัลส์ของ TCA785	39
รูปที่ 5.7 ลักษณะของสัญญาณจุดชนวนเกตแบบต่างๆ	41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

รูปที่ 5.8	แผนภาพกรอบวงจรควบคุมเฟส แบบเฟสเดียว	42
รูปที่ 5.9	วงจรชุดควบคุมเฟสแบบเฟสเดียว	43
รูปที่ 5.10	ภาพเอาต์พุตเป็นโฟโต้ทรานซิสเตอร์	45
รูปที่ 5.11	วงจรเชื่อมตัวโยงทางแสง	45
รูปที่ 5.12	วงจรอินทิกรัลไซเคิลคอนโทรล	47
รูปที่ 6.1	แสดงรูปสัญญาณของกระแสและแรงดันที่ตกคร่อมโหลดความต้านทาน	48
รูปที่ 6.2	แสดงสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อม โหลดเมื่อมุมทริก( $\psi$ ) = $3\pi/25$	49
รูปที่ 6.3	กราฟการทดลองหา Amplitude Voltage ที่ลำดับฮาร์โมนิกส์ต่างๆ เมื่อ $\psi=3\pi/25$	50
รูปที่ 6.4	กราฟ Simulation หา Amplitude Voltage ที่ลำดับฮาร์โมนิกส์ต่างๆ เมื่อ $\psi=3\pi/25$	50
รูปที่ 6.5	แสดงสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อม โหลดเมื่อมุมทริก( $\psi$ ) = $6\pi/25$	51
รูปที่ 6.6	กราฟการทดลองหา Amplitude Voltage ที่ลำดับฮาร์โมนิกส์ต่างๆ เมื่อ $\psi=6\pi/25$	52
รูปที่ 6.7	กราฟ Simulation หา Amplitude Voltage ที่ลำดับฮาร์โมนิกส์ต่างๆ เมื่อ $\psi=6\pi/25$	52
รูปที่ 6.8	แสดงสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อม โหลดเมื่อมุมทริก( $\psi$ ) = $9\pi/25$	53
รูปที่ 6.9	กราฟการทดลองหา Amplitude Voltage ที่ลำดับฮาร์โมนิกส์ต่างๆ เมื่อ $\psi=9\pi/25$	54
รูปที่ 6.10	กราฟ Simulation หา Amplitude Voltage ที่ลำดับฮาร์โมนิกส์ต่างๆ เมื่อ $\psi=9\pi/25$	54
รูปที่ 6.11	แสดงสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อม โหลดเมื่อมุมทริก( $\psi$ ) = $12\pi/25$	55
รูปที่ 6.12	กราฟการทดลองหา Amplitude Voltage ที่ลำดับฮาร์โมนิกส์ต่างๆ เมื่อ $\psi=12\pi/25$	56
รูปที่ 6.13	กราฟ Simulation หา Amplitude Voltage ที่ลำดับฮาร์โมนิกส์ต่างๆ เมื่อ $\psi=12\pi/25$	56
รูปที่ 6.14	แสดงสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อม โหลดเมื่อมุมทริก( $\psi$ ) = $15\pi/25$	57
รูปที่ 6.15	กราฟการทดลองหา Amplitude Voltage ที่ลำดับฮาร์โมนิกส์ต่างๆ เมื่อ $\psi=15\pi/25$	58

รูปที่ 6.16	กราฟ Simulation หา Amplitude Voltage ที่ลำดับฮาร์โมนิกส์ต่างๆ เมื่อ $\psi=15\pi/25$	58
รูปที่ 6.17	แสดงสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมโหลดเมื่อมุมทริก ( $\psi$ ) = $18\pi/25$	59
รูปที่ 6.18	กราฟการทดลองหา Amplitude Voltage ที่ลำดับฮาร์โมนิกส์ต่างๆ เมื่อ $\psi=18\pi/25$	60
รูปที่ 6.19	กราฟ Simulation หา Amplitude Voltage ที่ลำดับฮาร์โมนิกส์ต่างๆ เมื่อ $\psi=18\pi/25$	60
รูปที่ 6.20	แสดงสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมโหลดเมื่อมุมทริก ( $\psi$ ) = $21\pi/25$	61
รูปที่ 6.21	กราฟการทดลองหา Amplitude Voltage ที่ลำดับฮาร์โมนิกส์ต่างๆ เมื่อ $\psi=21\pi/25$	62
รูปที่ 6.22	กราฟ Simulation หา Amplitude Voltage ที่ลำดับฮาร์โมนิกส์ต่างๆ เมื่อ $\psi=21\pi/25$	62
รูปที่ 6.23	แสดงสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมโหลดเมื่อมุมทริก ( $\psi$ ) = $24\pi/25$	63
รูปที่ 6.24	กราฟการทดลองหา Amplitude Voltage ที่ลำดับฮาร์โมนิกส์ต่างๆ เมื่อ $\psi=24\pi/25$	64
รูปที่ 6.25	กราฟ Simulation หา Amplitude Voltage ที่ลำดับฮาร์โมนิกส์ต่างๆ เมื่อ $\psi=24\pi/25$	64
รูปที่ 6.26	กราฟการทดลองคุณสมบัติของแรงดันที่ฮาร์โมนิกส์ต่างๆ	65
รูปที่ 6.27	กราฟ Simulation คุณสมบัติของแรงดันที่ฮาร์โมนิกส์ต่างๆ	65
รูปที่ 6.28	กราฟการทดลองหาค่าลึงไฟฟ้าที่มุมทริกต่างๆ	67
รูปที่ 6.29	กราฟ Simulation หาค่าลึงไฟฟ้าที่มุมทริกต่างๆ	67
รูปที่ 6.30	แสดงสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมโหลดเมื่อ $p = 10, p' = 100$	69
รูปที่ 6.31	แสดงการขยายแรงดันที่ตกคร่อมโหลดเมื่อ $p = 10, p' = 100$	69
รูปที่ 6.32	กราฟทดลองหา Amplitude Voltage ที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ต่างๆ เมื่อ $p = 10, p' = 100$	70
รูปที่ 6.33	กราฟ Simulation หา Amplitude Voltage ที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ต่างๆ เมื่อ $p = 10, p' = 100$	70
รูปที่ 6.34	กราฟการทดลองคุณลักษณะของกระแสที่ความถี่ต่างๆเมื่อ $p = 10, p' = 100$	71
รูปที่ 6.35	กราฟการทดลองคุณลักษณะของกระแสที่ความถี่ต่างๆเมื่อ $p = 10, p' = 100$	71

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## VI

รูปที่ 6.36	แสดงสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมโหลดเมื่อ $p = 20, p' = 100$	72
รูปที่ 6.37	แสดงการขยายแรงดันที่ตกคร่อมโหลดเมื่อ $p = 20, p' = 100$	72
รูปที่ 6.38	กราฟทดลองหา Amplitude Voltage ที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ต่างๆ เมื่อ $p = 20, p' = 100$	73
รูปที่ 6.39	กราฟ Simulation หา Amplitude Voltage ที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ต่างๆ เมื่อ $p = 20, p' = 100$	73
รูปที่ 6.40	กราฟการทดลองคุณลักษณะของกระแสที่ความถี่ต่างๆเมื่อ $p = 20, p' = 100$	74
รูปที่ 6.41	กราฟ Simulation คุณลักษณะของกระแสที่ความถี่ต่างๆเมื่อ $p = 20, p' = 100$	74
รูปที่ 6.42	แสดงสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมโหลดเมื่อ $p = 40, p' = 100$	75
รูปที่ 6.43	แสดงการขยายแรงดันที่ตกคร่อมโหลดเมื่อ $p = 40, p' = 100$	75
รูปที่ 6.44	กราฟทดลองหา Amplitude Voltage ที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ต่างๆ เมื่อ $p = 40, p' = 100$	76
รูปที่ 6.45	กราฟ Simulation หา Amplitude Voltage ที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ต่างๆ เมื่อ $p = 40, p' = 100$	76
รูปที่ 6.46	กราฟการทดลองคุณลักษณะของกระแสที่ความถี่ต่างๆเมื่อ $p = 40, p' = 100$	77
รูปที่ 6.47	กราฟการทดลองคุณลักษณะของกระแสที่ความถี่ต่างๆเมื่อ $p = 40, p' = 100$	77
รูปที่ 6.48	แสดงสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมโหลดเมื่อ $p = 50, p' = 100$	78
รูปที่ 6.49	แสดงการขยายแรงดันที่ตกคร่อมโหลดเมื่อ $p = 50, p' = 100$	78
รูปที่ 6.50	กราฟทดลองหา Amplitude Voltage ที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ต่างๆ เมื่อ $p = 50, p' = 100$	79
รูปที่ 6.51	กราฟ Simulation หา Amplitude Voltage ที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ต่างๆ เมื่อ $p = 50, p' = 100$	79
รูปที่ 6.52	กราฟการทดลองคุณลักษณะของกระแสที่ความถี่ต่างๆเมื่อ $p = 50, p' = 100$	80
รูปที่ 6.53	กราฟการทดลองคุณลักษณะของกระแสที่ความถี่ต่างๆเมื่อ $p = 50, p' = 100$	80
รูปที่ 6.54	แสดงสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมโหลดเมื่อ $p = 60, p' = 100$	81
รูปที่ 6.55	แสดงการขยายแรงดันที่ตกคร่อมโหลดเมื่อ $p = 60, p' = 100$	81
รูปที่ 6.56	กราฟทดลองหา Amplitude Voltage ที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ต่างๆ เมื่อ $p = 60, p' = 100$	82

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## VII

รูปที่ 6.57	กราฟSimulationหาAmplitude Voltageที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ต่างๆ เมื่อ $p=60, p'=100$	82
รูปที่ 6.58	กราฟการทดลองคุณลักษณะของกระแสที่ความถี่ต่างๆเมื่อ $p=60, p'=100$	83
รูปที่ 6.59	กราฟการทดลองคุณลักษณะของกระแสที่ความถี่ต่างๆเมื่อ $p=60, p'=100$	83
รูปที่ 6.60	แสดงสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมโหลดเมื่อ $p = 90, p' = 100$	84
รูปที่ 6.61	แสดงการขยายแรงดันที่ตกคร่อมโหลดเมื่อ $p = 90, p' = 100$	84
รูปที่ 6.62	กราฟทดลองหาAmplitude Voltageที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ต่างๆ เมื่อ $p = 90, p' = 100$	85
รูปที่ 6.63	กราฟSimulationหาAmplitude Voltageที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ต่างๆ เมื่อ $p=90, p'=100$	85
รูปที่ 6.64	กราฟการทดลองคุณลักษณะของกระแสที่ความถี่ต่างๆเมื่อ $p=90, p'=100$	86
รูปที่ 6.65	กราฟการทดลองคุณลักษณะของกระแสที่ความถี่ต่างๆเมื่อ $p=90, p'=100$	86
รูปที่ 6.66	แสดงสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมโหลดเมื่อ $p = 100, p' = 100$	87
รูปที่ 6.67	แสดงการขยายแรงดันที่ตกคร่อมโหลดเมื่อ $p = 100, p' = 100$	87
รูปที่ 6.68	กราฟทดลองหา Amplitude Voltage ที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ต่างๆ เมื่อ $p = 100, p' = 100$	88
รูปที่ 6.69	กราฟ Simulation หา Amplitude Voltage ที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ต่างๆ เมื่อ $p=100, p'=100$	88
รูปที่ 6.70	กราฟการทดลองคุณลักษณะของกระแสที่ความถี่ต่างๆเมื่อ $p=100, p'=100$	89
รูปที่ 6.71	กราฟการทดลองคุณลักษณะของกระแสที่ความถี่ต่างๆเมื่อ $p=100, p'=100$	89
รูปที่ 6.72	แสดงจำนวน Hamonic ที่ Duty Cycle( $\alpha$ ) = 0.5, $p' = 10$	90
รูปที่ 6.73	แสดงจำนวน Hamonic ที่ Duty Cycle( $\alpha$ ) = 0.5, $p' = 20$	90
รูปที่ 6.74	แสดงจำนวน Hamonic ที่ Duty Cycle( $\alpha$ ) = 0.5, $p' = 100$	90
รูปที่ 6.75	กราฟแสดงลักษณะของฮาร์โมนิกส์ ที่ Duty Cycle( $\alpha$ ) = 0.1	91
รูปที่ 6.76	กราฟแสดงลักษณะของฮาร์โมนิกส์ ที่ Duty Cycle( $\alpha$ ) = 0.9	91
รูปที่ 6.77	กราฟแสดงลักษณะของฮาร์โมนิกส์ ที่ Duty Cycle( $\alpha$ ) = 0.4	92
รูปที่ 6.78	กราฟแสดงลักษณะของฮาร์โมนิกส์ ที่ Duty Cycle( $\alpha$ ) = 0.6	92
รูปที่ 6.79	การทดลองการควบคุมกำลังไฟฟ้าในรูปฟังก์ชัน $1-\alpha$	94
รูปที่ 6.80	กราฟ Simulation คุณสมบัติการควบคุมกำลังไฟฟ้าในรูปฟังก์ชัน $1-\alpha$	94

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## VIII

รูปที่ 6.81	กราฟทดลองคุณสมบัติกำลังไฟฟ้า(Power Characteristics)	95
รูปที่ 6.82	กราฟ Simulation คุณสมบัติกำลังไฟฟ้า(Power Characteristics)	95
รูปที่ 6.83	ความสัมพันธ์ Active Power และ Apparent Power ของอินทิกรัลไซเคิลคอนโทรล	96
รูปที่ 6.84	ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าปรากฏของเฟสคอนโทรล	96
รูปที่ 6.85	การเปรียบเทียบ Reactive Power และ Apparent Power	97
รูปที่ 6.86	การเปรียบเทียบ Active Power เฟสคอนโทรลและอินทิกรัลอินทิกรัล ไซเคิลคอนโทรล	97



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 5.1 ค่าตัวประจุที่ต่อกับขา 12	40
ตารางที่ 5.2 ความกว้างของสัญญาณจุดชนวนแบบต่างๆกับชนิดของโหลด	40
ตารางที่ 6.1 แสดงค่าแรงดันที่ได้จากการทดลองที่มุมทริกต่างๆ	66
ตารางที่ 6.2 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าที่มุมทริกต่างๆ	68
ตารางที่ 6.3 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่าง $p$ และกำลังไฟฟ้า	93



## บทที่ 1

### บทนำ

โครงการชิ้นนี้เป็น การศึกษาการควบคุมกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ ระหว่างหลักการของ อินทิกรัลไซครัลคอนโทรลและเฟสคอนโทรล (Integral Cycle Control and Phase Control) ซึ่งการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่เกิดขึ้นบนโหลด (load) นั้น สามารถทำได้โดยการเพิ่มอุปกรณ์บางตัวขึ้นระหว่างแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับกับโหลด เพื่อทำการควบคุมกำลังไฟฟ้าตามที่ต้องการ

ในปีการศึกษา 2536 ได้มีการนำหลักการดังกล่าวมาเสนอในรูปแบบโครงการมาก่อนแล้ว โดยทำในลักษณะของ การควบคุมอุณหภูมิเตาอบ ซึ่งจัดได้ว่าเป็นการควบคุมกำลังไฟฟ้ากับโหลด ความต้านทานเพียงอย่างเดียว ซึ่งจะทำให้ไม่สามารถรู้ได้เลยว่าเมื่อโหลดเปลี่ยนเป็นลักษณะอื่นแล้ว ในการควบคุมแบบที่มีอยู่แบบใดจึงจะเหมาะสมกว่ากัน แต่ในความเป็นจริงทั้งสองหลักการดังกล่าวสามารถควบคุมกำลังไฟฟ้ากับโหลดได้ทุก ๆ ชนิด ขึ้นอยู่กับว่าผู้ใช้นำเอาคุณสมบัติของแต่ละหลักการ ไปประยุกต์ใช้กับงาน ได้อย่างเหมาะสมมากน้อยเพียงใด

ดังนั้นขอบเขตของงานจึงต้องศึกษา ทดลองและเปรียบเทียบ เพื่อให้ได้มาซึ่งคุณลักษณะ (Characteristics) ของการควบคุมเมื่อโหลดเปลี่ยน ไปและสามารถเลือกชนิดของการควบคุมได้อย่างเหมาะสม

ในส่วนของทฤษฎีได้มีการกล่าวถึงเกี่ยวกับการทำงานของทั้งสองระบบไว้โดยละเอียดอยู่แล้ว จึงทำให้มีข้อมูลมารองรับหลักการดังกล่าวนั่นเอง แต่อย่างไรก็ตาม ก็ยังขาดข้อมูลที่เป็ความจริงในส่วนของปฏิบัติไป ถึงแม้ว่า ในปัจจุบันนี้จะมีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางก็ตาม แต่ไม่รู้ว่าระบบใดจะสามารถให้ผลการทำงานในลักษณะของโหลดต่าง ๆ ได้ดีกว่ากัน จึงทำให้เกิดความสนใจที่จะทำการวิเคราะห์ , เปรียบเทียบผลการทำงานจริงของทั้งสองกรณี ตลอดจนสามารถสรุปผลที่ได้ให้ชัดเจนออกมา

จากเหตุผลข้างต้น เราจึงทำการแก้ปัญหาเพื่อให้ได้มาซึ่งแหล่งข้อมูลอ้างอิงที่เป็นจริง โดยทำการประกอบวงจรแล้วทดลองโดยใช้หลักการของอินทิกรัลไซครัลคอนโทรลและเฟสคอนโทรล แล้วทดลองวงจรจริงกับโหลดชนิดต่าง ๆ เช่น โหลดตัวต้านทานอย่างเดียว (pure R) , โหลดตัวต้านทานกับตัวเหนี่ยวนำ (R-L) เป็นต้น นอกจากจะทำการเปรียบเทียบกันทางด้านทฤษฎีแล้ว เรายังนำผลที่ได้จากการปฏิบัติ(ทดลอง) ไปเปรียบเทียบกับข้อมูลที่ได้จากการจำลองการทำงานทางคอมพิวเตอร์ (simulation) ตลอดจนได้ใช้โปรแกรมแมทแล็บ (math lab) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ (parameter) ต่าง ๆ ในวงจร

### วัตถุประสงค์ของงานปริญญานิพนธ์

1. เพื่อศึกษาทฤษฎีและหลักการของการควบคุมกำลังไฟฟ้ากระแสสลับที่เกิดขึ้นบนโหลดในแต่ละลักษณะ
2. เพื่อศึกษาวงจรที่สามารถนำมาใช้ในการควบคุมกำลังไฟฟ้า
3. เพื่อศึกษาการจำลองวงจรและเทคนิคที่ใช้ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าด้วยโปรแกรม Pspice และ MATLAB
4. เพื่อสามารถนำผลการจำลองทางด้านซอฟต์แวร์ (software) ทั้งสองโปรแกรมข้างมาเปรียบเทียบกันได้
5. เพื่อสามารถนำผลการทดลองทางด้านฮาร์ดแวร์ (hardware) ผลการจำลองทางด้านซอฟต์แวร์ มาเปรียบเทียบกับทฤษฎีได้

### ประโยชน์ที่ได้จากงานปริญญานิพนธ์

1. สามารถนำงานปริญญานิพนธ์นี้ไปเป็นข้อมูลในการสร้างวงจรการควบคุมกำลังไฟฟ้ากระแสสลับต่อไปได้
2. ได้เรียนรู้ถึงวิธีการศึกษาวงจรไฟฟ้าโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อดูแนวโน้มของผลที่จะได้ก่อนสร้างวงจรจริง
3. ได้เรียนรู้งานทางด้านฮาร์ดแวร์ที่เกี่ยวกับด้านเพาเวอร์อิเล็กทรอนิกส์

### ขอบเขตของงานปริญญานิพนธ์

1. ศึกษาทฤษฎีและวงจรที่ใช้ในการควบคุมกำลังไฟฟ้ากระแสสลับโดยการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อพิจารณาผลที่ได้รับและเปรียบเทียบข้อดีข้อเสีย
2. ทดลองสร้างวงจรต้นแบบเพื่อนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับผลการจำลองด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

## บทที่ 2 ทฤษฎีพื้นฐาน

### 2.1 เอสซีอาร์ (Sillicon Control Rectifier : SCR)

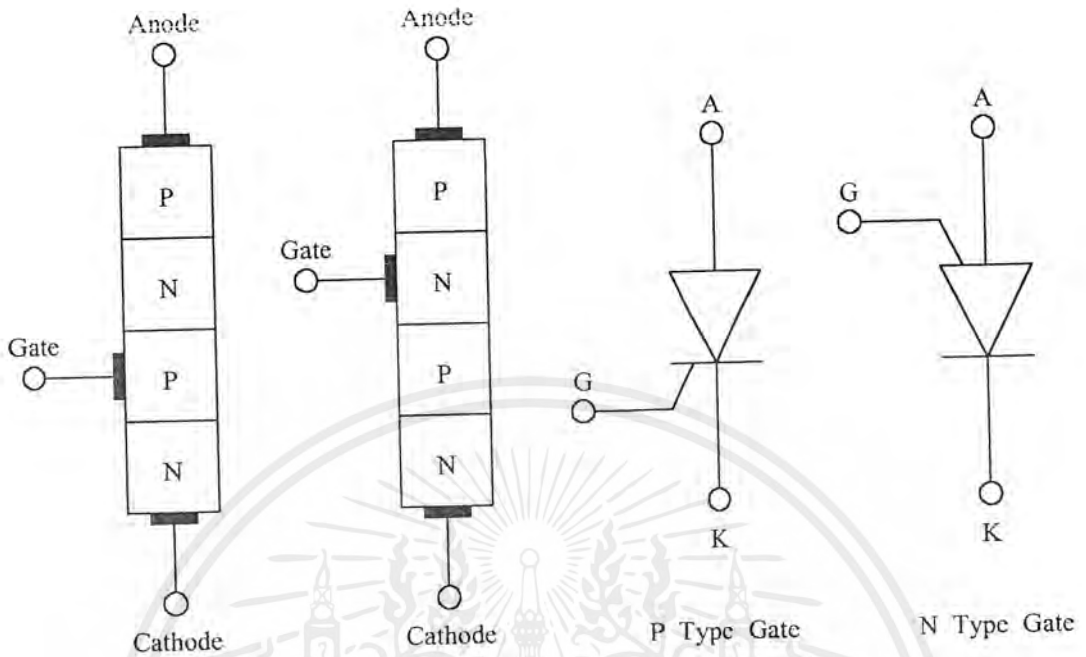
ไทรสเตอร์ (Thyristor) เป็นชื่อทั่วไปของสิ่งประดิษฐ์สารกึ่งตัวนำที่ประกอบด้วยชั้นของสารกึ่งตัวนำ P และ N วางเรียงสลับกันสี่ชั้น และคุณสมบัติของสวิตช์มีการสลัก (Latching Switch) ไทรสเตอร์อาจมี 2, 3 หรือ 4 ขั้ว และอาจนำกระแสทางเดียวหรือสองทางก็ได้ ไทรสเตอร์ที่นำกระแสทางเดียวได้แก่ เอสซีอาร์ (Sillicon Control Rectifier : SCR) GTO (Gate turn off thyristor) LASCR (Light Activated SCR) และไทรสเตอร์ที่นำกระแสได้สองทางได้แก่ Triac (Triode AC Switch)

เอสซีอาร์ เป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำที่จัดอยู่ในตระกูลไทรสเตอร์ (Thyristor) ได้ถูกพัฒนาขึ้นในปลายปี ค.ศ.1957 โดยทีมวิศวกรของบริษัท General Electric และได้ถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางในวงการอุตสาหกรรมตั้งแต่ปี ค.ศ.1970 และได้พัฒนาขีดความสามารถทางด้านแรงดันและกระแสเรื่อยมา จากขนาดพิกัด 1.6A 25V ขึ้นมาจนถึง 3,500A 4,000V หรือ 6,000V ในปัจจุบันเพื่อใช้ในระบบส่งจ่ายกำลังไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง (HVDC) และสามารถเพิ่มพิกัดแรงดันและกระแสได้โดยการต่ออนุกรมและขนาน

### 2.2 โครงสร้างภายในและสัญลักษณ์

เอสซีอาร์เป็นไทรสเตอร์ (Thyristor) ที่นิยมใช้มากที่สุด ทำหน้าที่เป็นสวิตช์อิเล็กทรอนิกส์ที่ยอมให้กระแสไฟฟ้าไหลผ่านได้ในทิศทางเดียว มีขนาดเล็กน้ำหนักเบาการทำงานมีความเชื่อถือได้สูงเมื่อใช้ระบบป้องกันที่เหมาะสม การใช้งานเอสซีอาร์ไม่ต้องมีการบำรุงรักษาและเสียค่าใช้จ่ายต่อแอมแปร์ต่ำ เอสซีอาร์เป็นสวิตช์ที่มีค่าความต้านทานสูงแม้ในขณะที่ได้รับแรงดันไปหน้า (Forward Voltage) จนกว่าจะมีสัญญาณจุดชนวนเกดที่เหมาะสม ป้อนให้กับขาเกตของเอสซีอาร์ เอสซีอาร์ก็จะนำกระแสได้ และค้างสภาวะการทำงาน (Latching) คือนำกระแสต่อไปได้โดยลำพัง ในสภาวะนี้เอสซีอาร์จะมีความต้านทานภายในต่ำมาก

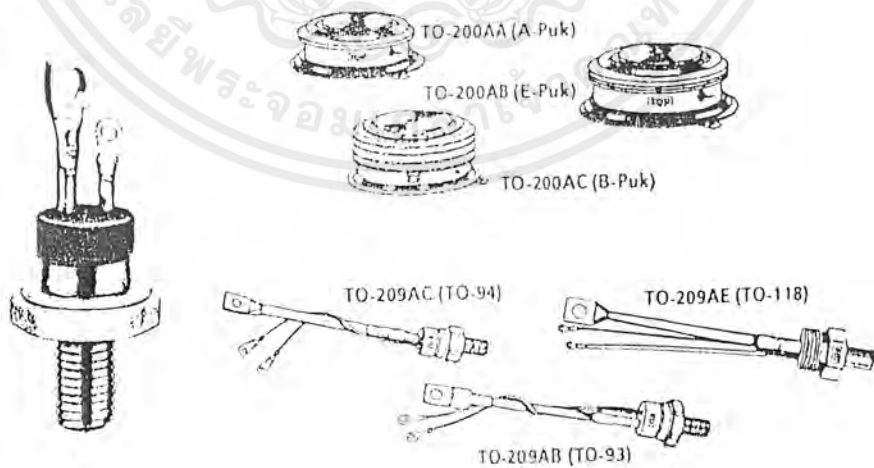
เอสซีอาร์จะประกอบด้วยสารกึ่งตัวนำชนิดซิลิกอน 4 ชั้น คือ P-N-P-N จึงมี 3 รอยต่อ และมีขั้วต่อทางไฟฟ้าเพียง 3 ขั้ว คือ ขั้วแคโทด (Cathode : K) ขั้วแอนโนด (Anode : A) และขาเกต (Gate : G) ดังในรูปที่ 2.1 SCR มีทั้งชนิดที่ขาเกตอยู่ที่สารพีเรียกว่า เกตชนิดพี (P-gate) และขาเกตที่อยู่สารเอ็น เรียกว่า เกตชนิดเอ็น (N-gate) แต่โดยทั่วไปจะเป็นเกตชนิดพี



รูปที่ 2.1 โครงสร้างภายในและสัญลักษณ์ของเอสซีอาร์

2.3 รูปร่างของเอสซีอาร์

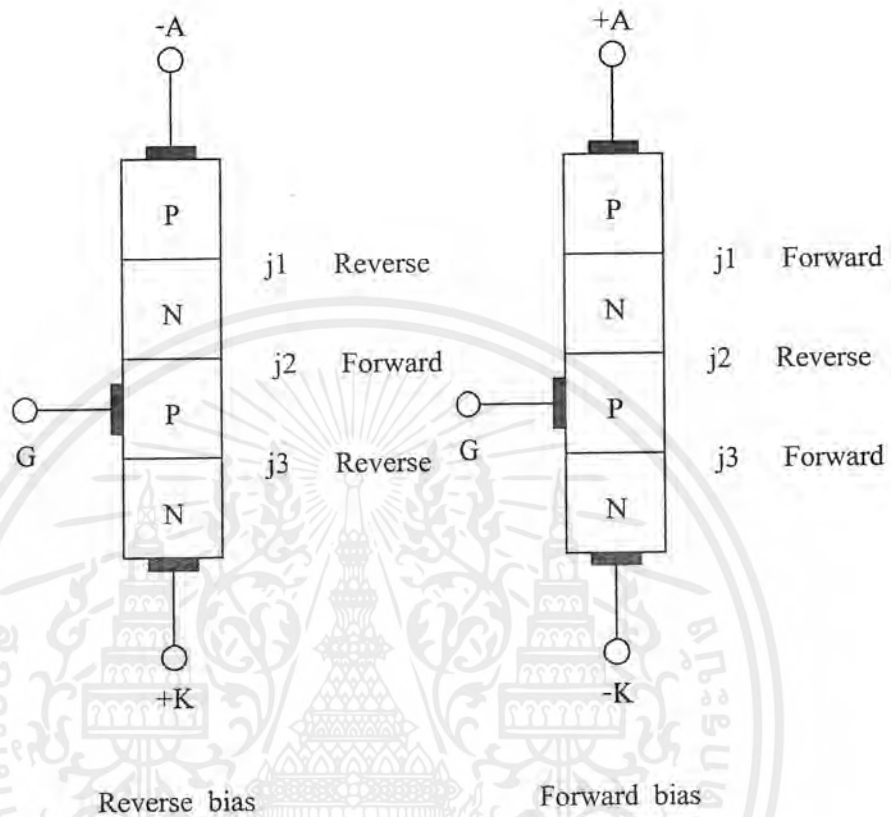
ผลึกสารกึ่งตัวนำทั้ง 4 ชั้น จะถูกบรรจุไว้ในภาชนะรูปทรงต่าง ๆ ซึ่งรูปร่างของเอสซีอาร์ จะมีลักษณะคล้ายกับไดโอดกำลัง แต่เอสซีอาร์จะมีขั้วเกตอีกหนึ่งขั้วแสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 รูปร่างแบบต่างๆ ภายนอกของเอสซีอาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.4 การทำงานของเอสซีอาร์

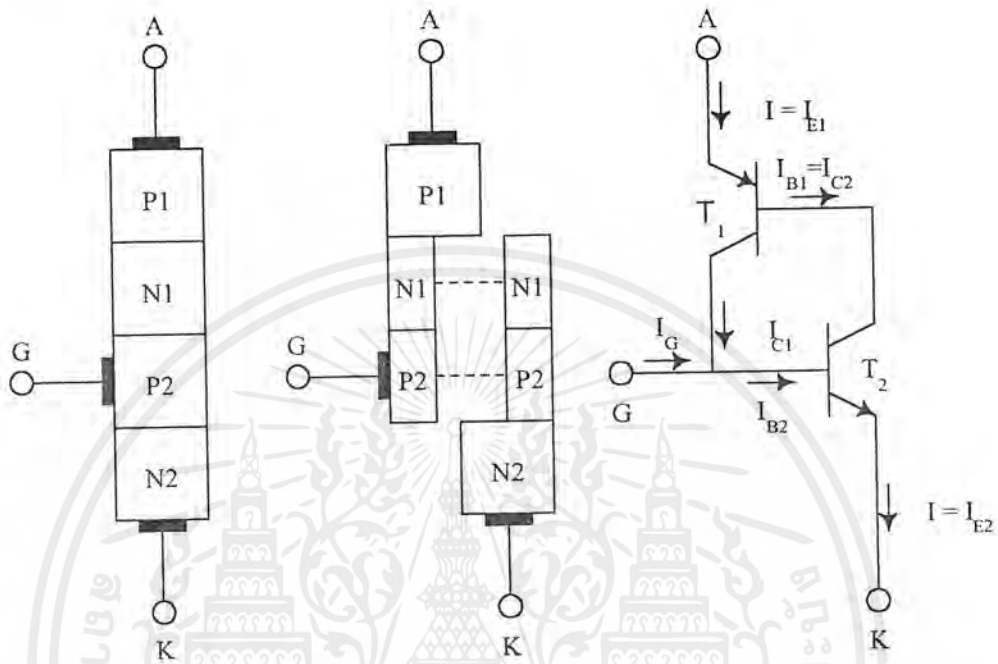


รูปที่ 2.3 การไบแอสเอสซีอาร์

การไบแอสย้อนกลับ (Reverse bias) คือ การป้อนศักย์แรงดันไฟฟ้าลบให้กับขั้วแอโนดและป้อนศักย์ไฟฟ้าบวกให้กับขั้วแคโทด สถานะนี้ถ้าแรงดันไปสูงเกินพิคตเอสซีอาร์จะไม่นำกระแส ถึงแม้จะป้อนสัญญาณควบคุมให้กับขาเกตก็ตาม

การไบแอสไปหน้า (Forward bias) คือ การป้อนศักย์ไฟฟ้าบวกให้กับขั้วแอโนดและป้อนศักย์ไฟฟ้าลบให้กับขั้วแคโทด สถานะนี้เอสซีอาร์ก็จะยังไม่สามารถนำกระแสได้ จนกว่าจะป้อนสัญญาณควบคุมเกต โดยขาเกตจะได้ศักย์ไฟฟ้าบวกเมื่อเทียบกับขั้วแคโทดเอสซีอาร์จึงจะนำกระแส กระแสไหลผ่านจากขั้วแอโนดไปยังขั้วแคโทดได้และเมื่อเอสซีอาร์นำกระแสแล้วไม่จำเป็นมีสัญญาณเกตอีกต่อไป เอสซีอาร์จะหยุดนำกระแสเมื่อกระแสไหลผ่านเอสซีอาร์เป็นศูนย์

การทำงานของเอสซีอาร์ สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองทรานซิสเตอร์ (Transistor model) ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 แบบจำลองเอสซีอาร์ด้วยทรานซิสเตอร์

ชั้นสาร P-N-P-N สามารถจำลองเป็นทรานซิสเตอร์ 2 ตัว คือ PNP และ NPN เมื่อป้อน  $I_C$  เข้าที่ขาเกตหรือขาเบสของทรานซิสเตอร์  $T_2$  ก็จะทำให้เกิด  $I_{C2}$  หรือ  $I_{B1}$  และทรานซิสเตอร์  $T_1$  ก็จะนำกระแส กระแส  $I_{C1}$  ก็จะป้อนให้ขาเบสของ  $T_2$  วงเวียนกันไปจนกระแสเพิ่มถึงจุดอิ่มตัวและถูกจำกัดด้วยค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดกระแส  $I_C$  ก็สามารถตัดออกได้

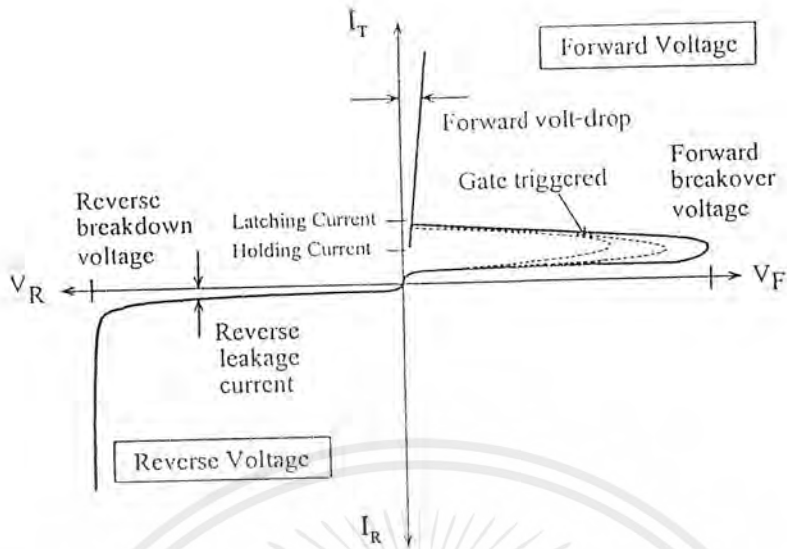
## 2.5 คุณสมบัติแรงดันและกระแสของเอสซีอาร์

เอสซีอาร์สามารถแบ่งสภาวะการทำงานได้ 3 สภาวะ คือ

1. สภาวะปิดกั้นแรงดันย้อนกลับ (Reverse Blocking)
2. สภาวะปิดกั้นแรงดันย้อนกลับ (Forward Blocking)
3. สภาวะนำกระแสไปหน้า (Forward Conduction)

ในสภาวะ Reverse blocking เอสซีอาร์ได้รับไบแอสย้อนกลับ ( $V_R$ ) จะมีกระแสรั่วไหล ( $V_R$ ) เพียงเล็กน้อย กระแสจะไหลจากขั้วแคโทดไปยังขั้วแอนโนด กระแสรั่วไหลจะทำให้อุณหภูมิของรอยต่อสูงขึ้น ด้วยผลของอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นกระแสรั่วไหลจึงสูงขึ้นเป็นปฏิกิริยาตกโซ่ ดังนั้น

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 2.5 กราฟคุณลักษณะแรงดันและกระแสของเอสซีอาร์

ค่ากระแสสูงสุดภายใต้สภาวะไบแอสแบบย้อนกลับจะถูกกำหนดโดยผู้ผลิต เพื่อจำกัดผลของความร้อนภายใน แต่อย่างไรก็ตามขนะไบแอสแบบย้อนกลับ ไม่ควรมีการป้อนแรงดันระหว่างขาเกตและขั้วแคโทด ในช่วงไบแอสแบบย้อนกลับเมื่อป้อนแรงดันสูงขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงจุด Reverse Breakdown จะเกิดผลเช่นเดียวกับไดโอด กระแสจะไหลเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วซึ่งสามารถทำให้เอสซีอาร์เสียหายได้ เนื่องจากอุณหภูมิบริเวณรอยต่อสูงเกินค่าที่กำหนด

ในสภาวะ Forward Blocking (Off - State) เอสซีอาร์ได้รับไบแอสไปหน้า ( $V_D$ ) แต่บริเวณรอยต่อ  $j_2$  ระหว่าง  $N_1$  และ  $P_2$  ยังคงเป็นไบแอสย้อนกลับ เนื่องจากไม่มีสัญญาณเกต ดังนั้นกระแส ( $I_D$ ) ที่ไหลระหว่างขั้วแอโนดและขั้วแคโทดจึงยังเป็นเพียงกระแสรั่วไหลเท่านั้นในสภาวะ แต่เมื่อเพิ่มขึ้นอีกจนถึงจุด Forward Breakover Voltage หรือ  $V_{BO}$  แล้วกระแสก็จะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และแรงดันที่ตกคร่อมระหว่างขั้วแอโนดและขั้วแคโทดก็จะลดลงต่ำกว่า  $V_{BO}$  เข้าสู่สภาวะนำกระแสได้

Forward Conduction (on - stat) เอสซีอาร์ได้รับไบแอสไปหน้า ( $V_D$ ) และมีสัญญาณจุดชนวนเกตหรือกระแสเกต เอสซีอาร์จะนำกระแสจากขั้วแอโนดไปยังแคโทดซึ่งมีแรงดันตกคร่อมขนะนำกระแส ( $V_T$ ) โดยประมาณ 1-1.5V ขณะเมื่อเอสซีอาร์เริ่มนำกระแสถ้าหากมีกระแสแอโนด ( $I_T$ ) สูงกว่าค่ากระแสค้าง (Latching Current :  $I_L$  เอสซีอาร์ก็จะสามารถคงค้างสภาวะการนำกระแสต่อไปได้ โดยมีต้องอาศัยกระแสเกตอีกเมื่อเอสซีอาร์นำกระแสเต็มที่แล้ว ถ้ากระแสไหลผ่านเอสซีอาร์ลดลงต่ำกว่ากระแสยึด (Holding Current :  $I_H$  ของเอสซีอาร์แล้ว เอสซีอาร์ก็จะหยุดนำกระแสได้เอง

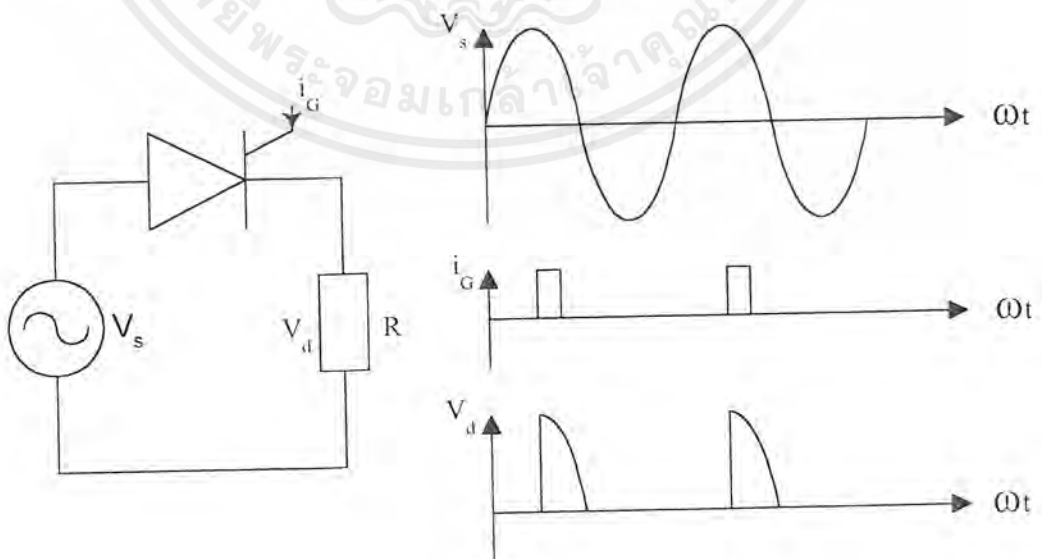
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.6 กรรมวิธีการนำกระแสของเอสซีอาร์

เทคนิคการควบคุมให้เอสซีอาร์นำกระแสในขณะไบแอสไปหน้า (Forward Bias) มีวิธีการ ดังต่อไปนี้ ป้อนกระแสเกต (Gate Current) วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้ในการควบคุมให้เอสซีอาร์นำกระแสโดยทั่วไป เมื่อป้อนศักย์ไฟฟ้าบวกให้กับขาเกตเมื่อเทียบกับขั้วแคโทดแล้ว กระแสจะไหลเข้าชั้นสารชนิดพี (P2) และสารชนิดเอ็น (N2) ครบวงจรที่ขั้วแคโทด (ดังรูปที่ 2.4) ทำให้ทรานซิสเตอร์ทั้งสองตัวถูกไบแอสและนำกระแส ถ้าแรงดันตกคร่อมแอโนดและแคโทดมีค่าสูงขึ้น กระแสเกตที่ใช้ไบแอสก็จะมีค่าลดลงเอสซีอาร์ เมื่อกระแสไหลผ่านเอสซีอาร์ (ขั้วแอโนดและขั้วแคโทด) สูงกว่ากระแสค้ำแล้วสามารถตัดกระแสเกตออกได้โดยเอสซีอาร์ยังคงนำกระแสต่อไป แต่ถ้าตัดกระแสเกตออกโดยที่กระแสที่ผ่านเอสซีอาร์มีค่าต่ำกว่ากระแสค้ำแล้วเอสซีอาร์ก็จะไม่สามารถนำกระแสต่อไปได้ ดังนั้นสัญญาณเกตจะต้องมีความกว้างพอที่จะทำให้กระแสไหลผ่านเอสซีอาร์สูงกว่ากระแสค้ำก่อนที่จะตัดกระแสเกตออก

## 2.7 เอสซีอาร์ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ

การใช้งานเอสซีอาร์ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ มีลักษณะการต่อวงจรเช่นเดียวกับไดโอดกำลัง เอสซีอาร์จะนำกระแสสลับนั้นไม่เพียงแต่ต้องได้รับแรงดันไปหน้าตกคร่อมระหว่างขั้วแอโนดกับแคโทดเท่านั้น เอสซีอาร์จะต้องได้รับกระแสจุดเกิดชนวนเกตด้วย ดังนั้นการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงจึงสามารถควบคุมได้ โดยหน่วงเวลาจุดชนวนเกตหรือควบคุมมุมจุดชนวนเกต (Trigger Delay Angle :  $\alpha$ ) นั้นเองแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 เอสซีอาร์ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ

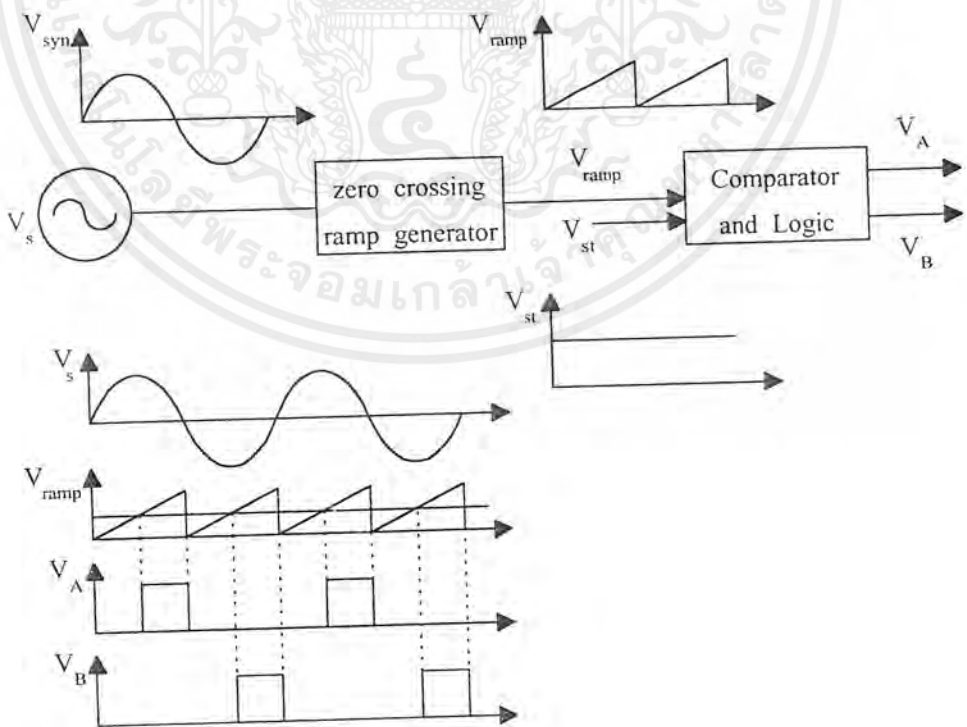
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.8 การควบคุมเอสซีอาร์

จากรูปที่ 2.6 ขั้วแอโนดของเอสซีอาร์ต่อกับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ  $V_s$  (แรงดันอินพุต) ขั้วแคโทดต่อกับโหลดตัวต้านทาน ช่วงเวลาที่แรงดันอินพุตเป็นบวกเอสซีอาร์จะได้รับแรงดันไปหน้า  $0 < \omega t < 180$  เมื่อจุดชนวนเกิดจะทำให้เอสซีอาร์นำกระแส ตั้งแต่  $\omega t = \alpha$  ไปจนกว่ากระแสไหลผ่านเอสซีอาร์ต่ำกว่ากระแสยึด (Holding Current) เอสซีอาร์จึงจะหยุดนำกระแส แรงดันอินพุตซึ่งเป็นไฟฟ้ากระแสสลับจะตกสู่ศูนย์ทุก ๆ ครึ่งรอบเช่นเดียวกัน ด้วยเหตุนี้ในรอบต่อไปต้องจุดชนวนเกิดอีกครั้งเพื่อให้เอสซีอาร์เริ่มนำกระแสในรอบต่อไป

### 2.9 การจุดชนวนเกิดเอสซีอาร์

ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับเอสซีอาร์ต้องการสัญญาณจุดชนวนเกิดทุก ๆ รอบ ดังนั้นหลักการเบื้องต้นที่จะสร้างสัญญาณจุดชนวนเกิด ต้องตรวจวัดมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับก่อน เพื่อนำมาอ้างอิงและห้วงเวลาจุดชนวนเกิดเอสซีอาร์ มุมจุดชนวนเกิดจะต้องสัมพันธ์กับแรงดันอินพุตทุก ๆ รอบซึ่งเรียกว่า การซิงโครไนซ์ (Synchronizing) วิธีออกแบบวงจรสร้างสัญญาณจุดชนวนเกิดมีหลายแบบ ในหัวข้อนี้จะอธิบายหลักการออกแบบเบื้องต้นเท่านั้น



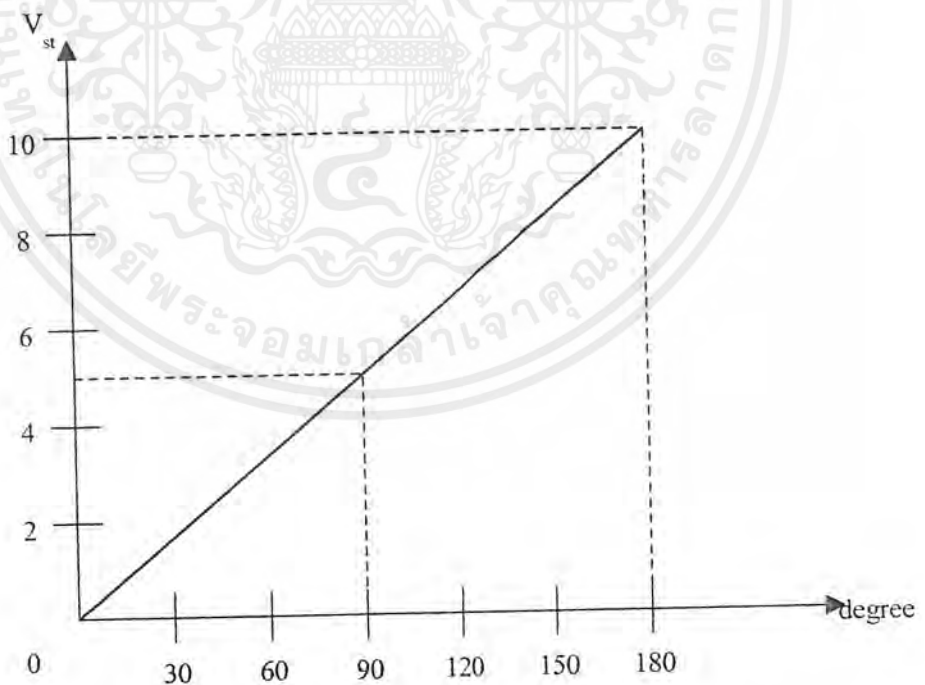
รูปที่ 2.7 แผนภาพวงจรควบคุมมุมจุดชนวนเกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 2.7 แสดงแผนภาพการสร้างสัญญาณจุดชนวนเกต โดยเริ่มจากการตรวจวัดแรงดันอินพุตรูปคลื่นไซน์และแปลงเป็นสัญญาณสี่เหลี่ยม ( $V_z$ ) โดยวิธี Zero Crossing และแปลงเป็นสัญญาณแรงดันลาดเอียง (Ramp Voltage :  $V_{ramp}$ ) ที่มีมุมเฟสตรงกับแรงดันอินพุต สัญญาณลาดเอียงจะนำมาเปรียบเทียบกับแรงดันควบคุม (Control Voltage :  $V_{st}$ ) ถ้าแรงดันควบคุมสูงกว่าแรงดันลาดเอียงจะได้ลอจิกศูนย์ แต่ถ้าแรงดันควบคุมต่ำกว่า แรงดันลาดเอียงจะได้ลอจิกหนึ่ง ดังนั้นมุมของสัญญาณลอจิกที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์กับแรงดันควบคุม ดังสมการที่ 2.1

$$Angle(\alpha) = 180 \times \frac{V_{st}}{V_{ramp(peak)}} \quad (2.1)$$

สัญญาณลอจิกที่ได้จะนำไปขยายสัญญาณให้สูงขึ้น เพื่อให้กระแสเกตมีค่าสูงพอที่จะจุดชนวนเกตให้เอสซีอาร์นำกระแสได้ จากสมการที่ 2.1 มุมจุดชนวนเกตมีคุณลักษณะการควบคุม ดังรูปที่ 2.8 หลักการที่ได้กล่าวมานี้อาจใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่าง ๆ มาต่อใช้งานก็ได้ หรือใช้วงจรรวมที่จัดทำเฉพาะ เช่น TCA785 หรือ TCA780 ของ Siemens



รูปที่ 2.8 คุณลักษณะการควบคุมมุมจุดชนวนเกต

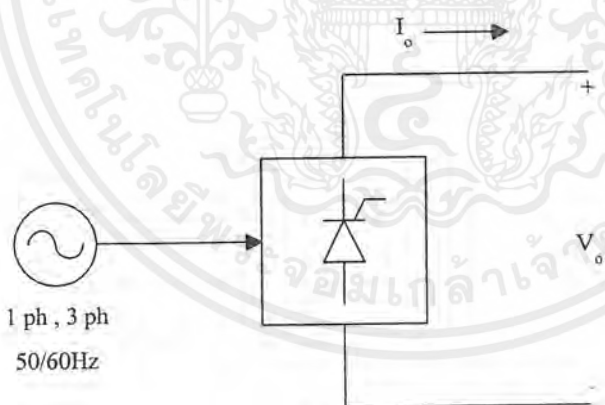
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### บทที่ 3 เฟสคอนโทรล

#### 3.1 การแปลงผันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC to AC Converter)

การควบคุมกำลังไฟฟ้าให้แก่โหลดบางอย่าง ที่ไม่จำเป็นต้องใช้แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง เช่น การควบคุมความสว่างของหลอดไฟ , การควบคุมอุณหภูมิของลวดความร้อน , การเปลี่ยนจุดต่อ (tap) ของหม้อแปลง , การควบคุมมอเตอร์เหนี่ยวนำ , งานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า , การชดเชยกำลังไฟรีแอกทีฟ เป็นต้น โหลดต่างๆ เหล่านี้สามารถควบคุมกำลังไฟฟ้าได้โดยการควบคุมค่าอาร์เอ็มเอสของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับที่จ่ายให้แก่โหลด

เกี่ยวกับการใช้เอสซีอาร์ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ โดยทำหน้าที่เรียงกระแสที่ความถี่ระบบจำหน่ายไฟฟ้า (50-60 เฮิรตซ์) เอสซีอาร์สามารถที่จะนำมาใช้ควบคุมเฟสของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับได้อีก โดยต่อเอสซีอาร์ในลักษณะขนานหัวกลับ (Anti-Parallel) ทำหน้าที่เป็นสวิทช์นำกระแสได้สองทิศทาง และยังมีอุปกรณ์สวิทช์กำลังอีกตัวหนึ่งที่นำกระแสได้สองทิศทางคือ ไทรแอก (Triac) การควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ยังสามารถที่จะเปลี่ยนความถี่และจำนวนเฟสได้ด้วย โดยต่อเอสซีอาร์ในลักษณะต่างๆ



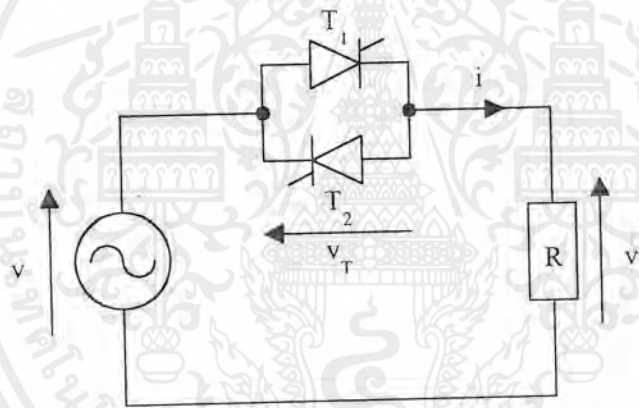
รูปที่ 3.1 แผนภาพวงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (AC to AC Converter)

การใช้งานเอสซีอาร์ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับ สามารถต่อเอสซีอาร์ขนานหัวกลับได้ ทำให้เป็นสวิทช์ที่นำกระแสได้สองทิศทาง ไทรแอกก็เช่นเดียวกัน โครงสร้างภายในมีลักษณะเดียวกับเอสซีอาร์ต่อขนานหัวกลับซึ่ง ทำให้การใช้งานไทรแอกในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับง่ายกว่าเอสซีอาร์ เพราะใช้สวิทช์กำลังน้อยกว่าและออกแบบสร้างสัญญาณเกตง่ายกว่า แต่การควบคุมกำลังไฟฟ้านขนาดสูงๆ ไทรแอกจะมีขีดจำกัดเนื่องจากมีพิกัดแรงดันและกระแสต่ำกว่าเอสซีอาร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.2 การต่อเอสซีอาร์แบบขนานหัวกลับ

จากรูปที่ 3.2 สามารถใช้เอสซีอาร์ 2 ตัว ต่อขนานแบบหัวกลับ (Anti-Parallel) จากรูปที่ 2.7 ช่วงเวลาที่แรงดันอินพุตมีค่าเป็นบวกเอสซีอาร์  $T_1$  จะได้รับแรงดันไปหน้าคั่นนั้นต้องจุดชนวนเกตเอสซีอาร์  $T_1$  ในช่วง  $0 < \omega t < 180$  เอสซีอาร์  $T_1$  จะนำกระแสตั้งแต่  $\omega t = \alpha$  ไปจนกว่ากระแสไหลผ่านเอสซีอาร์ต่ำกว่ากระแสช็อค (Holding Current) เอสซีอาร์  $T_1$  จึงจะหยุดนำกระแสในครึ่งรอบต่อไปเอสซีอาร์  $T_2$  จะได้รับแรงดันไปหน้า คั่นนั้นจึงต้องจุดชนวนเกตเอสซีอาร์  $T_2$  ในช่วง  $180 < \omega t < 360$  สัญญาณจุดชนวนเกตจึงต้องมี 2 สัญญาณและห่างกัน 180 ดังนั้นการควบคุมแรงดันไฟฟ้าสามารถควบคุมได้โดยหน่วงเวลาจุดชนวนเกต (Trigger Delay Angle :  $\alpha$ ) โดยมีพื้นฐานการออกแบบวงจรสร้างสัญญาณจุดชนวนเกต การต่อสัญญาณจุดชนวนเกตเอสซีอาร์ในวงจรไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียว แสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 3.2 วงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับโดยใช้เอสซีอาร์

3.3 หลักการ

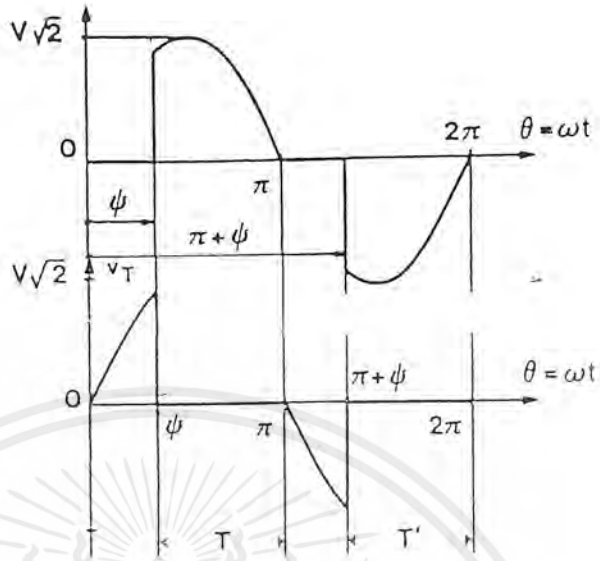
- สมมติให้แรงดัน ณ แหล่งจ่าย  $v$  เป็นแหล่งจ่ายในอุดมคติ มีค่าความต้านทานภายในเป็นศูนย์และให้แรงดันเป็นไซน์

$$v = V\sqrt{2} \sin \theta \tag{3.1}$$

- ซึ่ง  $\theta = \omega t = 2\pi / T$
- $V$  คือค่าอาร์เอ็มเอสของ  $v$
- $\omega$  คือค่าความเร็วเชิงมุมและ
- $T$  คือคาบเวลา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.4 วิเคราะห์การทำงาน



รูปที่ 3.3 แสดงแรงดันที่ตกคร่อมโหลด

การทำงานของวงจรรูปที่ 3.3 ตลอด 1 ถูกคลื่นของแรงดัน  $v$  เมื่อโหลดคือตัวต้านทานเพียงอย่างเดียว รูปที่ 3.3 ได้แสดงให้เห็นถึงรูปคลื่นของแรงดันตกคร่อมโหลด  $v'$  และแรงดันตกคร่อมไทรริสเตอร์  $v_T$  ในระหว่างคาบเวลาต่าง ๆ

- เมื่อแรงดัน  $v$  เป็นบวกไทรริสเตอร์ทั้ง 2 ตัวจะไม่นำกระแสพร้อมกัน แรงดัน  $v_T = v$  ซึ่งในขณะนั้นไทรริสเตอร์  $T_1$  จะได้รับสัญญาณจุดชนวนเกต
- เมื่อ  $\theta = \omega t = \psi$  (ซึ่ง  $\psi < \pi$ ) แรงดัน  $v_T$  จะตกลงเป็นศูนย์  $v' = v$

$$i = \frac{V\sqrt{2}}{R} \sin \theta \tag{3.2}$$

กระแสที่ไหลผ่านโหลดจะไหลผ่านไทรริสเตอร์ตลอดทั้งซีกบวก ( $\theta < \pi$ )

- เมื่อ  $\theta = \pi$  กระแส  $i$  จะตกลงเป็นศูนย์และไทรริสเตอร์  $T_1$  ก็จะหยุดนำกระแส
- เมื่อ  $\theta$  อยู่ระหว่าง  $\pi$  และ  $\pi + \psi$  ไทรริสเตอร์  $T_1$  ซึ่งจะยังคงหยุดนำกระแสอยู่และไทรริสเตอร์  $T_2$  ซึ่งจะยังคงไม่ได้รับสัญญาณจุดชนวนเกต แรงดัน  $v_T = v$  เพราะ  $i$  และ  $v'$  มีค่าเท่ากับศูนย์ทั้งคู่
- เมื่อ  $\theta = \pi + \psi$  แรงดัน  $v_T$  เป็นลบและสัญญาณเกตเข้าจุดชนวนให้กับไทรริสเตอร์  $T_2$  จึงทำให้มีการนำกระแสเกิดขึ้น
- เมื่อ  $\theta$  อยู่ระหว่าง  $\pi + \psi$  และ  $2\pi$  กระแส  $i$  ที่ไหลอยู่ในช่วงนี้ก็จะยังคงมี

ลักษณะเช่นเดียวกันกับในช่วงการนำกระแสของไทรริสเตอร์  $T_1$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.5 คุณสมบัติของโหนด

สมการที่ต้องใช้ เพื่อให้การคำนวณนั้นมีความหลากหลายมากยิ่งขึ้น ค่าแรงดันอาร์เอ็มเอสที่ตกคร่อมโหนด  $V'$  และค่าของกระแสอาร์เอ็มเอส  $I$  ในเทอมของมุม  $\psi$  สามารถคำนวณได้

$$\begin{aligned} V' &= \frac{1}{\pi} \int_{\psi}^{\theta_1} v'^2 d\theta \\ I^2 &= \frac{1}{\pi} \int_{\psi}^{\theta_1} i^2 d\theta \end{aligned} \quad (3.3)$$

เนื่องด้วยโหนดประกอบด้วยค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำ ดังนั้นค่ามุม  $\theta_1$  ที่ให้ไว้ในสมการข้างต้นนั้นเป็นฟังก์ชันของมุม  $\psi$  และมุม  $\varphi$

ถ้า  $v' = V\sqrt{2} \sin \theta$  จะได้ว่า

$$\frac{V'}{V} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \left[ \theta_1 - \psi - \frac{1}{2} (\sin 2\theta_1 - \sin 2\psi) \right]} \quad (3.4)$$

เพราะว่า  $i = \frac{V\sqrt{2}}{Z} [\sin(\theta - \varphi) - \sin(\psi - \varphi)e^{-(\theta - \psi)/Q}]$ , เมื่อ  $\theta \in (\psi, \theta_1)$

$$\begin{aligned} \frac{I}{V/Z} &= \frac{1}{\pi} \left\{ \theta_1 - \psi + \frac{1}{2} [\sin 2(\psi - \varphi) - \sin 2(\theta_1 - \varphi)] + Q \sin^2(\psi - \varphi) [1 - e^{-2(\theta_1 - \psi)/Q}] \right. \\ &\quad + \frac{4Q^2}{1+Q^2} \sin(\psi - \varphi) \left[ \left( \frac{1}{Q} \sin(\theta_1 - \varphi) + \cos(\theta_1 - \varphi) \right) e^{-(\theta_1 - \psi)/Q} \right. \\ &\quad \left. \left. - \frac{1}{Q} \sin(\psi - \varphi) - \cos(\psi - \varphi) \right] \right\}^{1/2} \end{aligned} \quad (3.5)$$

การกระจายอนุกรมฟูเรียร์ของแรงดัน  $v'$  ทำให้เหลือเพียงแต่ฮาร์มอนิกส์เลขคี่เท่านั้น

$$\begin{aligned} v' &= V'_1 \sqrt{2} \sin(\omega t + \zeta_1) + V'_3 \sqrt{2} \sin(3\omega t + \zeta_3) + \dots \\ &\quad + V'_{(2k+1)} \sqrt{2} \sin[(2k+1)\omega t + \zeta_{2k+1}] + \dots \end{aligned} \quad (3.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าอาร์เอ็มเอสของฮาร์มอนิกส์กำหนดให้ได้โดย

$$V'_{(2k+1)} = \sqrt{\frac{A_{2k+1}^2 + B_{2k+1}^2}{2}} \quad (3.7)$$

ซึ่ง  $A_{2k+1} = \frac{2}{\pi} \int_{\psi}^{\pi+\psi} v' \sin(2k+1)\theta d\theta$  และ  $B_{2k+1} = \frac{2}{\pi} \int_{\psi}^{\pi+\psi} v' \cos(2k+1)\theta d\theta$

มุมต่างเฟส

$$\zeta_{2k+1} = \arctan \frac{B_{2k+1}}{A_{2k+1}} \quad (3.8)$$

เนื่องด้วยเป็นโพลต์ตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ จะได้ว่า

$$\begin{aligned} A_{2k+1} &= \frac{V\sqrt{2}}{\pi} \left[ \frac{\sin 2k\theta_1 - \sin 2k\psi}{2k} - \frac{\sin 2(k+1)\theta_1 - \sin 2(k+1)\psi}{2(k+1)} \right] \\ B_{2k+1} &= \frac{V\sqrt{2}}{\pi} \left[ \frac{\cos 2(k+1)\psi - \cos 2(k+1)\theta_1}{2(k+1)} - \frac{\cos 2k\psi - \cos 2k\theta_1}{2k} \right] \end{aligned} \quad (3.9)$$

โดยเฉพาะค่าพินคามาเนทอล

$$\begin{aligned} A_1 &= \frac{V\sqrt{2}}{\pi} \left[ \theta_1 - \psi - \frac{1}{2} (\sin 2\theta_1 - \sin 2\psi) \right] \\ B_1 &= \frac{V\sqrt{2}}{2\pi} [\cos 2\psi - \cos 2\theta_1] \end{aligned} \quad (3.10)$$

ในกรณีทีโพลต์เป็นตัวต้านทานเพียงอย่างเดียวซึ่งสำคัญมากในการใช้งานทั่ว ๆ ไป เช่น การควบคุมกำลังไฟฟ้าของชุดติดตั้งความร้อน , ชุดปรับอุณหภูมิของเตาเผา หรือ การควบคุมอุปกรณ์ทางแสง ในกรณีนี้เพราะว่า  $\theta_1 = \pi$  และ  $v' = Ri$  เพราะฉะนั้นจะได้ว่า

$$\frac{V'}{V} = \frac{1}{V/R} = \sqrt{1 - \frac{\psi}{\pi} + \frac{1}{2\pi} \sin 2\psi} \quad (3.4')$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$A_{2k+1} = \frac{V\sqrt{2}}{2\pi} \left[ \frac{\sin 2(k+1)\psi}{k+1} - \frac{\sin 2k\psi}{k} \right]$$

$$B_{2k+1} = \frac{V\sqrt{2}}{2\pi} \left[ \frac{\cos 2(k+1)\psi - 1}{k+1} - \frac{\cos 2k\psi - 1}{k} \right]$$
(3.9')

$$A_1 = \frac{V\sqrt{2}}{\pi} \left( \pi - \psi + \frac{1}{2} \sin 2\psi \right)$$

$$B_1 = \frac{V\sqrt{2}}{2\pi} (\cos 2\psi - 1)$$
(3.10')

สำหรับการใช้งาน บ่อยครั้งที่ต้องการหาคุณลักษณะของการควบคุมกำลังไฟฟ้า หน้าที่ของการควบคุมมุม  $\psi$  , กำลังไฟฟ้า  $P$  ที่โหลด ซึ่งกำลังไฟฟ้านี้จะอยู่ในเทอมที่เป็นสัดส่วนกับค่าสูงสุด  $P_0$  จะได้ว่า

$$\frac{P}{P_0} = \frac{RI^2}{R(V/R)^2} = \left( \frac{I}{V/R} \right)^2 = 1 - \frac{\psi}{\pi} + \frac{1}{2\pi} \sin 2\psi$$
(3.11)

### 3.6 คุณลักษณะของกระแส ณ แหล่งจ่าย

#### 3.6.1 ตัวประกอบกำลัง

การลดลงของกำลังไฟฟ้าเป็นผลเนื่องมาจากโหลด ซึ่งเมื่อมุม  $\psi$  เพิ่มขึ้นก็จะส่งผลกระทบต่อระบบแหล่งจ่ายอยู่ 2 ข้อคือ

- การสูญเสียกำลังไฟฟ้าย้อนที่ฟ เนื่องจากมุมล้าหลัง  $\phi_1$  ของรูปคลื่นกระแสฟันคานเมนทอลเมื่อเทียบกับแรงดัน ณ แหล่งจ่าย
- การฉีกพ่นกระแสฮาร์โมนิกส์เข้าไปสู่แหล่งจ่าย

ความสำคัญของผลกระทบทั้ง 2 ชนิดนี้นั้น สามารถประมาณได้ด้วยการคำนวณจากตัวประกอบกำลัง  $PF$

$$PF = \frac{P}{S}$$
(3.12)

ซึ่ง  $S = VI$  กำลังไฟฟ้าที่ปรากฏ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะว่าความต้านทาน ณ แหล่งจ่ายเป็นศูนย์และแรงดัน ณ แหล่งจ่ายเป็นไซน์ (ไม่คำนึงถึงรูปคลื่นกระแส) กำลังไฟฟ้าจริงซึ่งมีค่าเท่ากับค่าเฉลี่ยของกำลังไฟฟ้าชั่วขณะ

$$P = VI_1 \cos \phi_1 \quad (3.13)$$

เพราะฉะนั้น

$$PF = \frac{I_1}{I} \cos \phi_1 \quad (3.14)$$

เมื่อ  $I_3, I_5, \dots, I_{2k+1}, \dots$  คือค่าอาร์เอ็มเอสของอันดับที่  $3, 5, \dots, 2k+1, \dots$  ตามลำดับ ซึ่งค่าของกระแสอาร์เอ็มเอส  $I$  สามารถกำหนดได้โดย

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_3^2 + \dots + I_{2k+1}^2 + \dots} \quad (3.15)$$

ตัวประกอบความผิดเพี้ยนของฮาร์โมนิกส์  $\tau_i$  อธิบายได้โดย

$$\tau_i = \frac{1}{I_1} \sqrt{I_3^2 + I_5^2 + \dots + I_{2k+1}^2 + \dots}$$

$$\tau_i = \frac{1}{I_1} \sqrt{I^2 - I_1^2} = \sqrt{\left(\frac{I}{I_1}\right)^2 - 1}$$

หรือ

$$\frac{I}{I_1} = \sqrt{\tau_i^2 + 1} \quad (3.16)$$

จะได้ว่า

$$PF = \frac{\cos \phi_1}{\sqrt{\tau_i^2 + 1}} \quad (3.17)$$

ตัวประกอบกำลังสามารถลดลงได้เนื่องจาก

- การลดลงของค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียด้วยค่า  $\cos \varphi_1$
- การแอสซาร์มอนิกส์โดยผ่านค่า  $\tau_i$

ตัวประกอบกำลังสามารถคำนวณได้โดยตรงด้วย

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{RI^2}{VI} = \frac{I}{V/R} \quad (3.18)$$

ซึ่งโหลดตัวต้านทานและตัวเหนี่ยวนำ  $Z = R\sqrt{1+Q^2}$  และ

$$PF = \left( \frac{I}{V/Z} \right) \frac{1}{\sqrt{1+Q^2}} \quad (3.19)$$

### 3.6.2 การกระจายอนุกรมของกระแส ณ แหล่งจ่าย

การกระจายฟูเรียร์ของกระแส ณ แหล่งจ่ายต่อไปนี้

$$i = I_1\sqrt{2} \sin(\omega t + \zeta_1 - \varphi_1) + I_3\sqrt{2} \sin(3\omega t + \zeta_3 - \varphi_3) + \dots \\ + I_{2k+1}\sqrt{2} \sin[(2k+1)\omega t + \zeta_{2k+1} - \varphi_{2k+1}] + \dots \quad (3.20)$$

ค่าอาร์เอ็มเอสของฮาร์มอนิกส์อันดับที่  $2k+1$  สามารถอธิบายได้จากค่า  $V'_{2k+1}$  ของแรงดันฮาร์มอนิกส์โดย

$$I_{2k+1} = \frac{V'_{2k+1}}{\sqrt{R^2 + (2k+1)^2 L^2 \omega^2}} = \frac{V'_{2k+1}}{R\sqrt{1+(2k+1)^2 Q^2}} \quad (3.21)$$

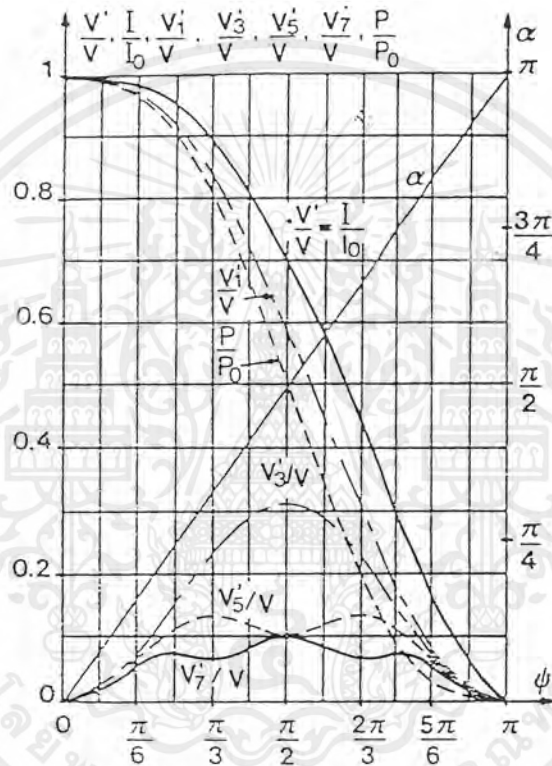
เพราะว่า  $R = Z/\sqrt{1+Q^2}$

$$\frac{I_{2k+1}}{I_0} = \frac{V'_{2k+1}}{V} \sqrt{\frac{1+Q^2}{1+(2k+1)^2 Q^2}} \quad (3.22)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

มุมต่างเฟสที่กล่าวถึงนั้นเมื่อเทียบกับค่าของแรงดันฮาร์โมนิกส์ซึ่งกำหนดได้โดย

$$\varphi_{2k+1} = \arctan \frac{(2k+1)L\omega}{R} = \arctan(2k+1)Q \quad (3.23)$$



รูปที่ 3.4 แสดงคุณสมบัติของแรงดันที่ฮาร์โมนิกส์ต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.6.3 คุณลักษณะกำลังไฟฟ้า

ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังไฟฟ้าเมื่อกระแสที่ไม่เป็นไซน์ถูกสร้างโดยแรงดัน ณ แหล่งจ่ายที่เป็นไซน์

- กำลังไฟฟ้าที่ปรากฏ  $S = VI$  อาจจะเขียนได้อีกรูปแบบหนึ่ง

$$S = V\sqrt{I_1^2 + I_3^2 + \dots + I_{2k+1}^2 + \dots} = \sqrt{(VI)^2 + V^2(I^2 - I_1^2)}$$

$$S = \sqrt{S_1^2 + D^2} \quad (3.24)$$

ซึ่ง  $S_1 = VI_1$  คือพินดามเมนทอลของกำลังไฟฟ้าสูญเสีย

$$D = V\sqrt{I^2 - I_1^2} \quad (3.25)$$

ความคิดเพี้ยนของกำลังไฟฟ้าอันเนื่องมาจากผลกระทบของฮาร์มอนิกส์

- $S_1$  สามารถแตกแรงได้ดังนี้

$$S_1 = VI_1 = \sqrt{(VI_1 \cos \varphi_1)^2 + (VI_1 \sin \varphi_1)^2}$$

$$S_1 = \sqrt{P^2 + Q_1^2} \quad (3.26)$$

ซึ่ง  $P$  คือกำลังไฟฟ้าจริง

$Q_1$  คือพินดามเมนทอลของกำลังไฟฟ้าสูญเสีย

แทนค่า  $S$  ใน  $S_1$

$$S = \sqrt{P^2 + Q_1^2 + D^2} \quad (3.27)$$

กำลังไฟฟ้าเหล่านี้สัมพันธ์กับ  $\tau$ ,  $\cos \theta$ , และ  $PF$

$$\frac{D}{S_1} = \tau$$

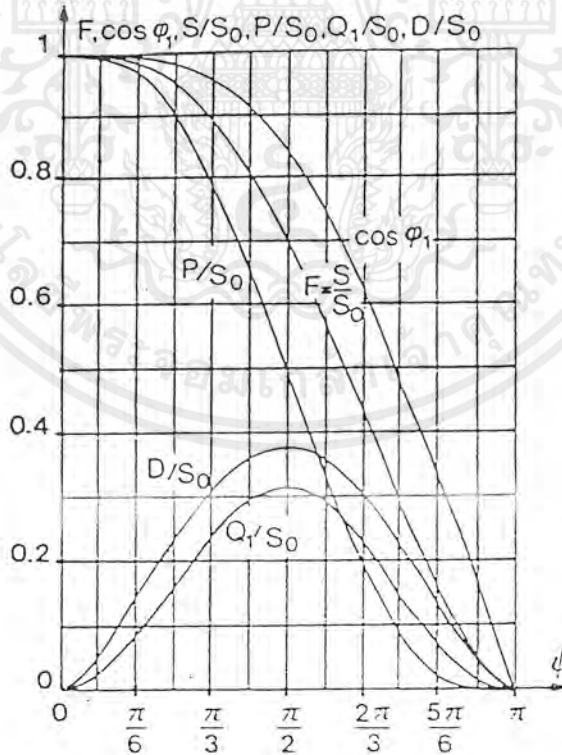
$$\frac{P}{S_1} = \cos \varphi_1 \quad (3.28)$$

$$\frac{P}{S} = PF$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพื่อที่จะอธิบายการเปลี่ยนแปลงในกำลังไฟฟ้าชนิดต่าง ๆ ในเทอมของอัตราส่วนของ  $S_0 = VI_0$  กำลังไฟฟ้าปรากฏเมื่อทำงานภายใต้สภาวะเต็มคลื่น  
ต่อไปนี่คือความสัมพันธ์ที่ง่าย ๆ

$$\begin{aligned} \frac{P}{S_0} &= \frac{1}{\sqrt{1+Q^2}} \left( \frac{I}{I_0} \right)^2 \\ \frac{D}{S_0} &= \sqrt{\left( \frac{I}{I_0} \right)^2 - \left( \frac{V_1'}{V} \right)^2} \\ \frac{S}{S_0} &= \frac{I}{I_0} \\ \frac{Q_1}{S_0} &= \sqrt{\left( \frac{V_1'}{V} \right)^2 - PF^2 \left( \frac{I}{I_0} \right)^2} \end{aligned} \tag{3.29}$$



รูปที่ 3.5 แสดงคุณสมบัติของกำลังไฟฟ้า

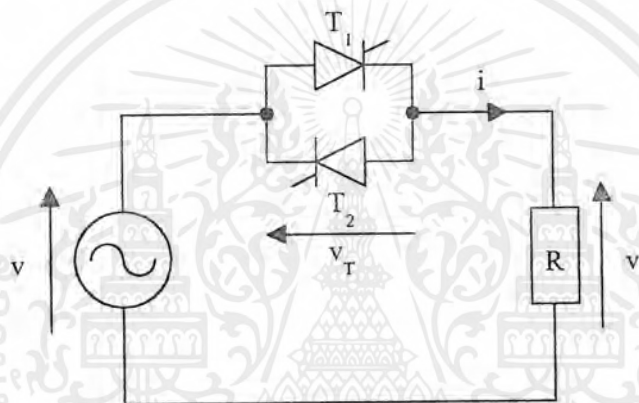
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### อินทิกรัล ไซเคิล คอนโทรล

#### 4.1 การทำงาน

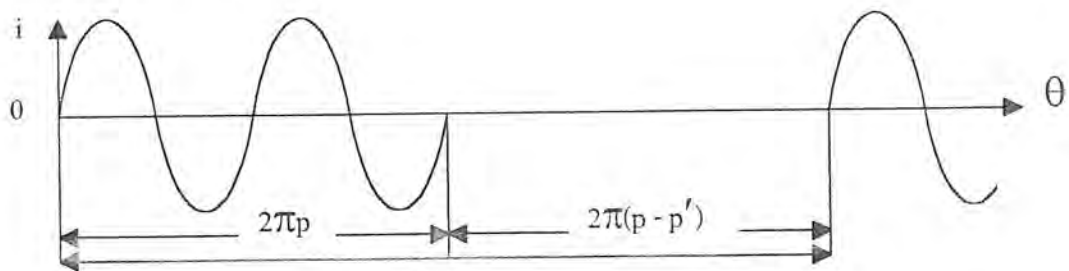
เพื่อที่จะควบคุมการไหลของกระแสจากแหล่งจ่ายไฟสลับ 1 เฟสไปยังโหลดนั้น (ในรูปที่ 4.1) แต่แทนที่จะใช้วิธีการเลื่อนมุมเพื่อให้เกิดการเริ่มนำกระแสของไทรริสเตอร์นั้น ก็อาจจะให้ชุดเรกกูเรทนั้นทำหน้าที่เป็นสวิตช์ทางกลก็ได้



รูปที่ 4.1 วงจรหลักของอินทิกรัลไซเคิลคอนโทรล

เพื่อให้เกิดความมั่นใจได้ว่ากระแสที่ไหลผ่านโหลดนั้นมีค่าเฉลี่ยเป็นศูนย์ ซึ่งชุดเรกกูเรทจะต้องยอมให้กระแสไหลผ่านนั้นมีลักษณะเป็นคลื่นจำนวนเต็ม  $p$  (integral number of cycles) ดังนั้นจะต้องทำการกำหนดลูกคลื่นกระแสเป็น  $p' - p$

เราควรจะพิจารณาแต่เฉพาะเพียงแหล่งจ่าย  $\omega$  แรงดันที่ต่อกับโหลดตัวด้านทานเพียงอย่างเดียว ภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ เหล่านี้



รูปที่ 4.2 ลักษณะรูปคลื่นแรงดันที่ตกคร่อมโหลด ( $V'$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หมายเหตุ แรงดัน ณ แหล่งจ่าย  $v = V\sqrt{2} \sin \theta$  เพราะ  $\theta = \omega t$  และ  $\omega = \frac{2\pi}{T}$  แรงแง

คั่นตกรวมโพลด  $v'$  , กระแส  $i$  และแรงดันคั่นตกรวมชุดเรกกูเรเตอร์  $v_T$

ไทรริสเตอร์จะนำกระแสเป็นช่วง ๆ อย่างเช่นว่ามีลักษณะการทำงานเป็นลูกคลื่นตามจำนวนลูกคลื่น  $p'$  ของแหล่งจ่าย มีคาบเวลาการทำงานเป็น  $2p'\pi/\omega$

ก่อนอื่นคาบเวลาการทำงานของการนำกระแสของ  $T_1$  เมื่อ  $\theta = 0, 2\pi, \dots, (p-1)2\pi$  และ  $T_2$  เมื่อ  $\theta = \pi, 3\pi, \dots, (2p-1)\pi$  (รูปที่ 4.2)

เมื่อโพลดเป็นค่าความต้านทาน กระแสที่ไหลผ่านในชุดเรกกูเรเตอร์ นั่นคือ ลูกคลื่นจำนวน  $p$  ของแหล่งจ่าย  $v_T$  เป็นศูนย์และเพราะฉะนั้น  $v = v' = Ri$

$$i = \frac{V\sqrt{2}}{R} \sin \theta \quad (4.1)$$

เมื่อชุดเรกกูเรเตอร์อยู่ในสภาวะหยุดนำกระแส นั่นคือ ลูกคลื่นจำนวน  $p' - p$  ของแหล่งจ่าย  $i = 0$  ฉะนั้น  $v' = 0$  และ  $v_T = v$

## 4.2 คุณลักษณะ

### 4.2.1 คุณลักษณะการควบคุม

เมื่อลูกคลื่นจำนวน  $p$  แปรเปลี่ยนไปแต่ลูกคลื่นจำนวน  $p'$  จะยังคงคงที่อยู่ที่ ค่ากระแสอาร์เอ็มเอสในโพลดจะเปลี่ยนจากศูนย์ เมื่อ  $p = 0$  และมีค่าสูงสุดเป็น  $V/R$  เมื่อ  $p = p'$  อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นก็ไม่ต่อเนื่อง ถึงแม้ว่าลูกคลื่นจำนวน  $p$  จะเปลี่ยนแปลงเป็นขั้น ๆ ก็ตาม

เพราะว่าคาบเวลาการทำงานเป็น  $p'T$  และชุดเรกกูเรเตอร์ก็นำกระแสได้เพียงลูกคลื่นจำนวน  $p$  กำหนดให้

$$I^2 = \frac{1}{2\pi p'} \int_0^{2\pi p'} i^2 d\theta = \frac{1}{2\pi p'} \int_0^{2\pi p} \frac{2V^2}{R^2} \sin^2 d\theta \quad (4.2)$$

สามารถแสดงเป็นสูตรดังนี้

$$I = \frac{V}{R} \sqrt{\frac{p}{p'}} \quad (4.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสเมื่อชุดเรกกูเรเตอร์อย่างทำงานเต็มพิกัดโดย  $I_0 = \frac{V}{R}$  และอัตราส่วนคิวตี้

$$\text{ไซเคิล } \alpha = \frac{P}{P'}$$

$$I = I_0 \sqrt{\alpha} \tag{4.4}$$

เพราะโหลดเป็นตัวต้านทานอย่างเดียว  $v' = Ri$  และแรงดันอาร์เอ็มเอสที่ตกคร่อมโหลด  $V' = RI$

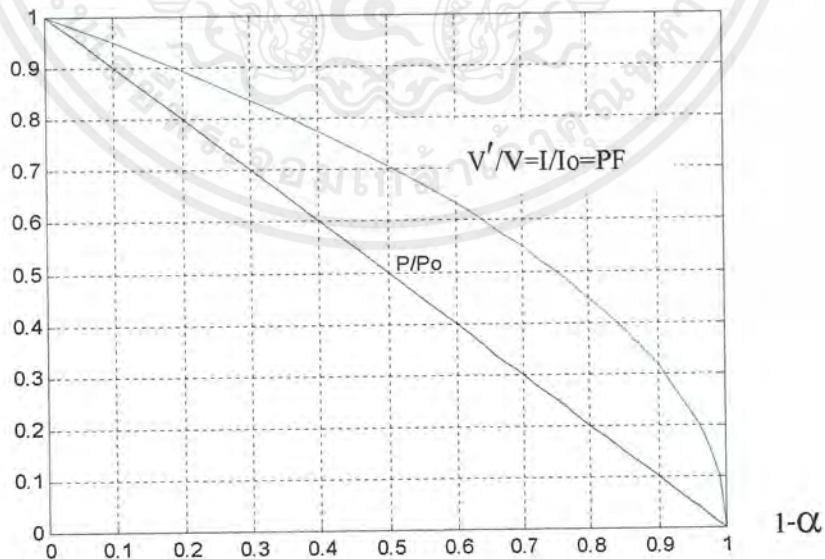
$$\frac{V'}{V} = \frac{I}{I_0} = \sqrt{\alpha} \tag{4.5}$$

ถ้า  $P$  คือกำลังไฟฟ้าจริงและ  $P_0$  กำลังไฟฟ้าสูงสุดที่ส่งไปยังโหลด ดังนั้นเมื่อชุดเรกกูเรเตอร์ทำงานอย่างเต็มพิกัด นั่นคือ เมื่อ  $\alpha = 1$  จะได้ว่า

$$\frac{P}{P_0} = \frac{RI^2}{RI_0^2} = \alpha \tag{4.6}$$

พารามิเตอร์  $\alpha$  คือคุณลักษณะของการควบคุมกำลังไฟฟ้า

$V'/V, I/I_0, P/P_0, PF$



รูปที่ 4.3 คือคุณลักษณะการควบคุมของฟังก์ชัน  $1-\alpha$  นั่นคือกำลังไฟฟ้าจะลดลงเป็น

$$1 - P/P_0$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2.2 คุณสมบัติของกระแส ณ แหล่งจ่าย

การกระจายอนุกรมของกระแส ณ แหล่งจ่าย

คาบเวลาของกระแส  $I$  เท่ากับ  $p'T$  หรือความถี่เท่ากับ  $f/p'$  การกระจายสามารถจัดให้อยู่ในเทอมของความถี่ได้  $f/p', 2f/p', \dots, (p' - 1)f/p', f, (p' + 1)f/p', (p' + 2)f/p', \dots, kf/p'$

ฮาร์โมนิกอันดับ  $k$  ใด ๆ ที่น้อยกว่า  $p'$  เป็นความถี่ที่ต่ำกว่าแหล่งจ่าย เรียกว่า "ซับฮาร์โมนิกส์" ส่วนอันดับ  $k$  ใด ๆ ที่มากกว่า  $p'$  ความถี่เหล่านั้นจะสูงกว่าความถี่  $f$  ที่แหล่งจ่าย เรียกว่า "ฮาร์โมนิกส์"

สามารถแสดงให้เห็นถึง "พินดามนทอล" กระแสฮาร์โมนิกส์ ณ แหล่งจ่าย นั่นคืออันดับ  $k$  ใด ๆ เท่ากับ  $p'$

การกระจายของแหล่งจ่ายอาจจะเขียนได้ในรูปแบบนี้

$$i = I_{V/p'} \sqrt{2} \sin(\theta / p' - \phi_{V/p'}) + \dots + I_1 \sqrt{2} \sin(\theta - \phi_1) + \dots + I_{k/p'} \sin(k\theta / p' - \phi_{k/p'}) \quad (4.7)$$

ค่าอาร์เอ็มเอส  $I_{k/p'}$  ของฮาร์โมนิกส์อันดับ  $k$  ใด ๆ

$$I_{k/p'} = \sqrt{\frac{A_{k/p'}^2 + B_{k/p'}^2}{2}} \quad (4.8)$$

ซึ่ง

$$A_{k/p'} = \frac{1}{p'\pi} \int_0^{2p'\pi} \frac{V\sqrt{2}}{R} \sin \theta \sin \frac{k\theta}{p'} d\theta$$

$$B_{k/p'} = \frac{1}{p'\pi} \int_0^{2p'\pi} \frac{V\sqrt{2}}{R} \sin \theta \cos \frac{k\theta}{p'} d\theta \quad (4.9)$$

สำหรับฮาร์โมนิกส์และซับฮาร์โมนิกส์ นั่นคือ เมื่อ  $k \neq p'$  จะได้ว่า

$$A_{k/p'} = -\frac{\sqrt{2}I_0}{\pi} \frac{p'}{p'^2 - k^2} \sin 2k\pi\alpha$$

$$B_{k/p'} = \frac{\sqrt{2}I_0}{\pi} \frac{p'}{p'^2 - k^2} (1 - \cos 2k\pi\alpha) \quad (4.10)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เพราะฉะนั้น

$$\frac{I_{k/p'}}{I_0} = \frac{1}{\pi} \frac{2p'}{p'^2 - k^2} |\sin k\pi\alpha| \quad (4.11)$$

สำหรับค่าพินคาเมนทอล นั่นคือ ฮาร์มอนิกส์อันดับที่  $k = p'$

$$\begin{aligned} A_1 &= \sqrt{2\alpha} I_0 \\ B_1 &= 0 \end{aligned} \quad (4.12)$$

เพราะฉะนั้น  $I_1 = \alpha I_0$

เพราะว่า  $\varphi_1 = \arctan B_1/A_1 = 0$  เทอมของความถี่อยู่ในเฟสเดียวกับแหล่งจ่าย  $v$  ตัวประกอบความผิดเฟสฮาร์มอนิกส์

$$\tau_i = \sqrt{\left(\frac{I}{I_1}\right)^2 - 1} \quad (4.13)$$

แสดงเป็นสูตรโดย

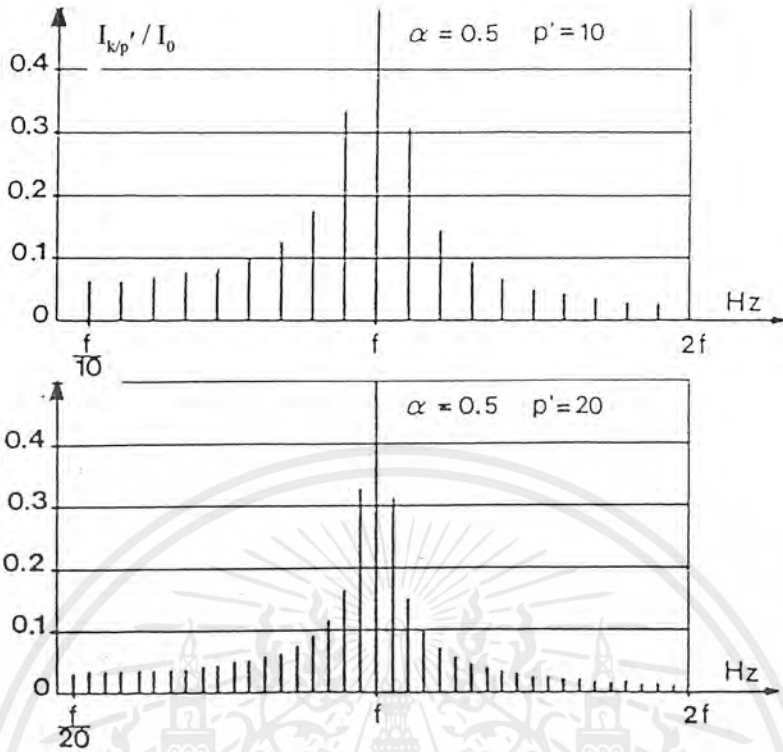
$$\tau_i = \sqrt{\frac{1-\alpha}{\alpha}} \quad (4.13)$$

ตัวประกอบความผิดเฟสฮาร์มอนิกส์ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนคัตไจเซิล  $\alpha$  แต่ไม่ขึ้นอยู่กับ  $p'$

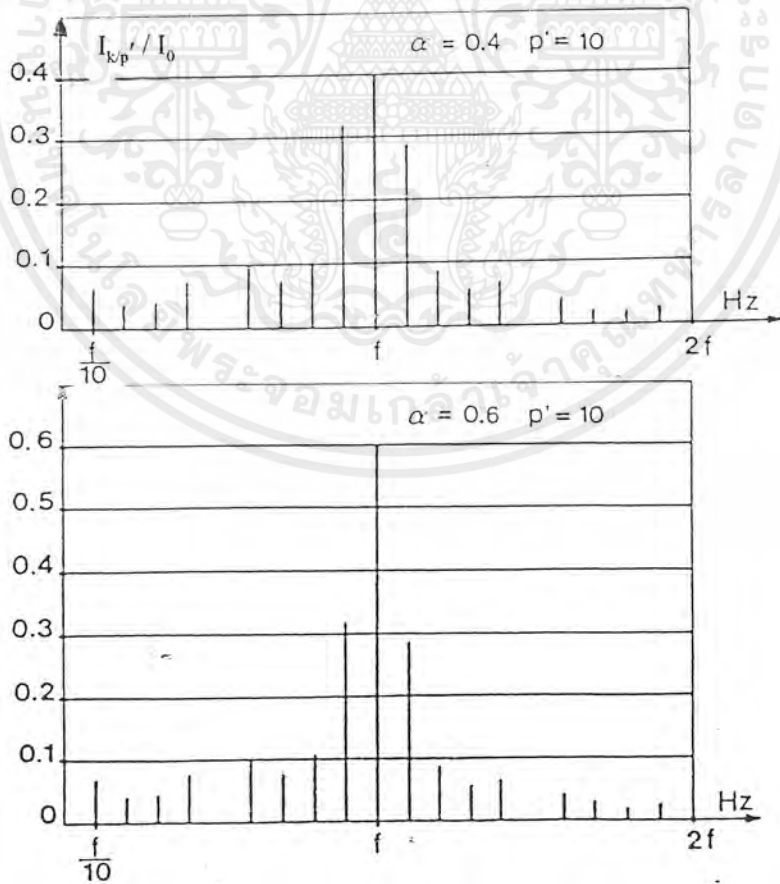
เพื่อที่จะให้รูปที่ได้แสดงไว้นั้นเป็นจริง ได้จำลองสเปกตรัมของกระแสที่  $\alpha = 0.5$  (รูปที่ 4.4) ซึ่งมีลักษณะเช่นเดียวกันกับการลดลงของกำลังไฟฟ้าที่ 50% สำหรับที่  $p' = 10$  และ  $p' = 20$  ตามลำดับ แน่นอนได้แสดงให้เห็นว่าได้มีการเพิ่มขึ้นของ  $p'$  การเพิ่มขึ้นของจำนวนฮาร์มอนิกส์ ทำให้เกิดการลดลงระหว่างฮาร์มอนิกส์กับแอมพลิจูด แต่พินคาเมนทอลกับตัวประกอบความผิดเฟสฮาร์มอนิกส์ไม่เปลี่ยนแปลง

สำหรับค่า  $p'$  ที่เหมือนกันนั้น ฮาร์มอนิกส์ต่างๆ ที่มีค่า  $\alpha$  และ  $1 - \alpha$  ที่เหมือนกันจริงๆ แล้วในสมการที่ (4.11)  $|\sin k\pi\alpha| = |\sin k\pi(1-\alpha)|$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.4 สเปกตรัมกระแสที่  $\alpha = 0.5$  ซึ่ง  $p' = 10$  และ  $p' = 20$  ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 คือสเปกตรัมของกระแสที่  $p' = 10$  ซึ่ง  $\alpha = 0.4$  และ  $\alpha = 0.6$  ตามลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตัวประกอบกำลัง

ค่าของฮาร์มอนิกสัณฐานยังขึ้นอยู่กับ การเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังไฟฟ้าคู่หนึ่งที่ได้มาโดย  $\alpha$  และคาบเวลาของรูปคลื่นกระแสทั้งหมดที่เข้ามาโดยการเลือกของ  $p'$  ตัวประกอบความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิก  $\tau$ , ไม่ขึ้นกับ  $p'$  จึงยอมให้คุณลักษณะทั้งหมดของการรบกวนที่เกิดขึ้นจากการทำงานของชุดเรกกูเรเตอร์ ในขณะที่ความผิดเพี้ยนที่เกิดขึ้นนี้มีความสัมพันธ์โดยตรงกับตัวประกอบกำลัง

$$PF = \frac{P}{S} \quad (4.14)$$

ซึ่ง  $S = VI$  และ  $P = VI_1$  เพราะว่ากำลังไฟฟ้าจริงนั้นยังประกอบไปด้วยฮาร์มอนิกที่ความถี่  $f$  และยังมีเฟสเดียวกันกับแรงดัน เพราะฉะนั้น

$$PF = \frac{I_1}{I} \quad (4.15)$$

เพราะว่า

$$\tau_i = \sqrt{\left(\frac{I}{I_1}\right)^2 - 1} \quad (4.16)$$

จะได้ว่า

$$PF = \frac{1}{\sqrt{1 + \tau_i^2}} \quad (4.17)$$

ตัวประกอบกำลังสามารถคำนวณได้โดยตรง เพราะว่า  $P = RI^2$

$$PF = \frac{RI^2}{VI} = \frac{I}{I_0} = \sqrt{\alpha} = \sqrt{\frac{P}{P_0}} \quad (4.18)$$

การลดลงของตัวประกอบกำลังสัมพันธ์โดยตรงกับระดับของการปรับเปลี่ยนที่ได้จัดเตรียม

ไว้ให้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### คุณลักษณะของกำลังไฟฟ้า

เพราะว่ากระแสฟลักซ์ความเหนี่ยวนำอยู่ในเฟสเดียวกันกับแรงดัน กำลังไฟฟ้าสูญเสีย  $Q_1$  จะเป็นศูนย์และตัวประกอบกำลังจะลดลงเนื่องจากฮาร์มอนิกส์

วงจรก่อนหน้านี้ สามารถคำนวณหากำลังไฟฟ้าต่างๆ ได้

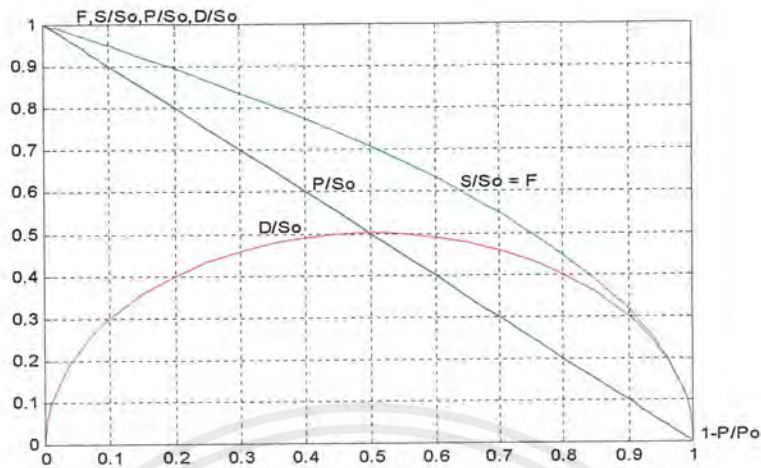
$$\begin{aligned}\frac{S}{S_0} &= \frac{VI}{VI_0} = \sqrt{\alpha} \\ \frac{P}{S_0} &= \frac{RI^2}{VI_0} = \left(\frac{I}{I_0}\right)^2 = \alpha \\ \frac{Q_1}{S_0} &= 0 \\ \frac{D}{S_0} &= \frac{1}{S_0} \sqrt{S^2 - P^2} = \sqrt{\alpha(1-\alpha)}\end{aligned}\tag{4.19}$$

วงจรโดยทั่วไปจะทำงานที่ค่า  $\cos \varphi_1 = 1$  ซึ่งจะตรงกันข้ามกับการควบคุมแบบเฟส ค่า  $\cos \varphi_1$  จะลดลงก็ต่อเมื่อกำลังไฟฟ้าจริงนั้นลดลงนั่นเอง ตัวประกอบกำลังนั้นจะเหมือนกันทั้ง 2 วงจร การควบคุมแบบอินทิกรัลไซเคิลจะเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าซึ่งสูงกว่าการควบคุมแบบเฟส

ส่วนรูปที่ 4.6 นั้นได้แสดงถึงการลดลงของกำลังไฟฟ้า  $1 - P/P_0$  นอกจากนั้นยังมีการเปลี่ยนแปลงของ  $S/S_0 = F$ ,  $P/S_0$  และ  $D/S_0$  ส่วนเส้นโค้งของ  $Q_1/S_0$  และ  $D/S_0$  เมื่อได้มีการควบคุมแบบเฟส ในกรณีหลังนี้ คุณลักษณะของ  $S/S_0$  และ  $P/S_0$  จะมีลักษณะเช่นเดียวกันกับการทำงานแบบอินทิกรัลไซเคิล

จะสังเกตเห็นได้ว่าขนาดของความผิดเพี้ยนของกำลังไฟฟ้า จะแสดงค่าสูงสุดที่  $0.5S_0$  (ในขณะที่กำลังไฟฟ้าได้ลดลงถึงครึ่งหนึ่ง) การลดลงที่มากกว่านี้จะทำให้การผิดเพี้ยนของกำลังไฟฟ้าจะเกิดขึ้นมากกว่ากำลังไฟฟ้าจริงที่ส่งไปยังโหลด

วงจรการควบคุมแบบเฟสเป็นการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่มุมเดียวกัน กำลังไฟฟ้าที่สูญเสียก็จะชดเชยโดยการลดค่าความผิดเพี้ยนของกำลังไฟฟ้าลง



รูปที่ 4.6 นั้นได้แสดงถึงการลดลงของกำลังไฟฟ้า  $1 - P/P_0$  นอกจากนั้นยังมีการเปลี่ยนแปลงของ  $S/S_0 = F$ ,  $P/S_0$  และ  $D/S_0$

กำลังไฟฟ้าฮาร์มอนิกส์

ความผิดเพี้ยนของกำลังไฟฟ้า, ตัวประกอบกำลังและตัวประกอบความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกส์ ไม่ขึ้นอยู่กับคาบเวลาการทำงาน  $p'T$  ใดๆก็ตาม เมื่อ  $p'$  มีขนาดใหญ่พอที่จะควบคุมแบบอินทิกรัลไซเคิลให้ได้ผลออกมาสามารถลดฮาร์มอนิกส์ลงได้ นั่นคือ ความถี่จะเป็นจำนวนเท่าของ  $f$  ก่อนอื่นที่ความถี่  $2f$  ซึ่งสอดคล้องกับค่า  $k = 2p'$  มีค่าสูงสุดคือ

$$\frac{I_{2f}}{I_0} = \frac{2p'}{\pi|p'^2 - 4p'^2|} = \frac{2}{3\pi p'} \quad (4.20)$$

เมื่อ  $p' = 10$  หรือมากกว่านี้,  $I_{2f}/I_0$  ก็จะมีค่าเท่ากับหรือน้อยกว่า 2%

เพราะฉะนั้น โดยหลัก ๆ แล้วความเสี่ยงจะไม่เกิดขึ้นกับฮาร์มอนิกส์แต่จะเกิดขึ้นกับที่ความถี่ต่ำๆ

ถ้าวงจรของแหล่งจ่ายที่ความถี่  $f$  กระแสที่ไหลอยู่ในช่วงถูกคลื่นจำนวน  $p$  และจะหยุดในช่วงถูกคลื่นจำนวน  $p' - p$  จะสามารถสังเกตเห็นกระแสเสิร์จ ผลกระทบของการการเพิ่่มและการลดลงของแรงดันจะปรากฏที่ความถี่  $f/p'$  ใดๆก็ตาม สเปกตรัมของกระแสเส้นแรกที่มีความถี่  $f/p'$  จะมีขนาดที่ต่ำลง

อันที่จริงแล้วเนื่องจากผลกระทบเหล่านี้เป็นเพียงหลักการที่ได้แสดงไว้ในสเปกตรัมด้วยความถี่ที่  $f - f/p'$  และ  $f + f/p'$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ด้วยเหตุผลที่ว่าต้องการให้เกิดความสมบูรณ์ในการวิเคราะห์ของกระแสฮาร์โมนิกส์ได้ด้วยการพิจารณาที่กำลังชั่วขณะ  $Ri^2$  ในระหว่างคาบเวลาเมื่อตัวต้านทานที่ต่ออยู่กับแหล่งจ่าย ทำให้กำลังไฟฟ้าชั่วขณะนั้นมีค่าเท่ากับ

$$Ri^2 = R \left( \frac{V\sqrt{2} \sin \theta}{R} \right)^2 = P_0(1 - \cos 2\theta) \tag{4.21}$$

เช่นกันค่ากำลังไฟฟ้าเฉลี่ย  $P_0$  ที่มีมุม  $\alpha$  เท่ากับหนึ่ง ส่วนค่าอาร์เอ็มเอสของ  $P_{k/p'}$  ที่ความถี่  $k/p'$  ใดๆ สามารถทำการกระจายอนุกรมของกำลังไฟฟ้าได้เท่ากับหนึ่ง

$$P_{k/p'} = \sqrt{\frac{A_{k/p'}^2 + B_{k/p'}^2}{2}} \tag{4.22}$$

ซึ่ง

$$\begin{aligned} A'_{k/p'} &= \frac{P_0}{p'\pi} \int_0^{p'\pi} (1 - \cos 2\theta) \sin \frac{k\theta}{p'} d\theta \\ B'_{k/p'} &= \frac{P_0}{p'\pi} \int_0^{p'\pi} (1 - \cos 2\theta) \cos \frac{k\theta}{p'} d\theta \end{aligned} \tag{4.23}$$

สำหรับ  $k \neq 2p'$  จะได้ว่า

$$\begin{aligned} A'_{k/p'} &= \frac{4p'^2 P_0}{\pi k(4p'^2 - k^2)} (1 - \cos 2k\pi\alpha) \\ B'_{k/p'} &= \frac{4p'^2 P_0}{\pi k(4p'^2 - k^2)} \sin 2k\pi\alpha \end{aligned} \tag{4.24}$$

ซึ่งกำหนดให้

$$P_{k/p'} = \frac{4p'^2 P_0 \sqrt{2}}{\pi k(4p'^2 - k^2)} |\sin k\pi\alpha| \tag{4.25}$$

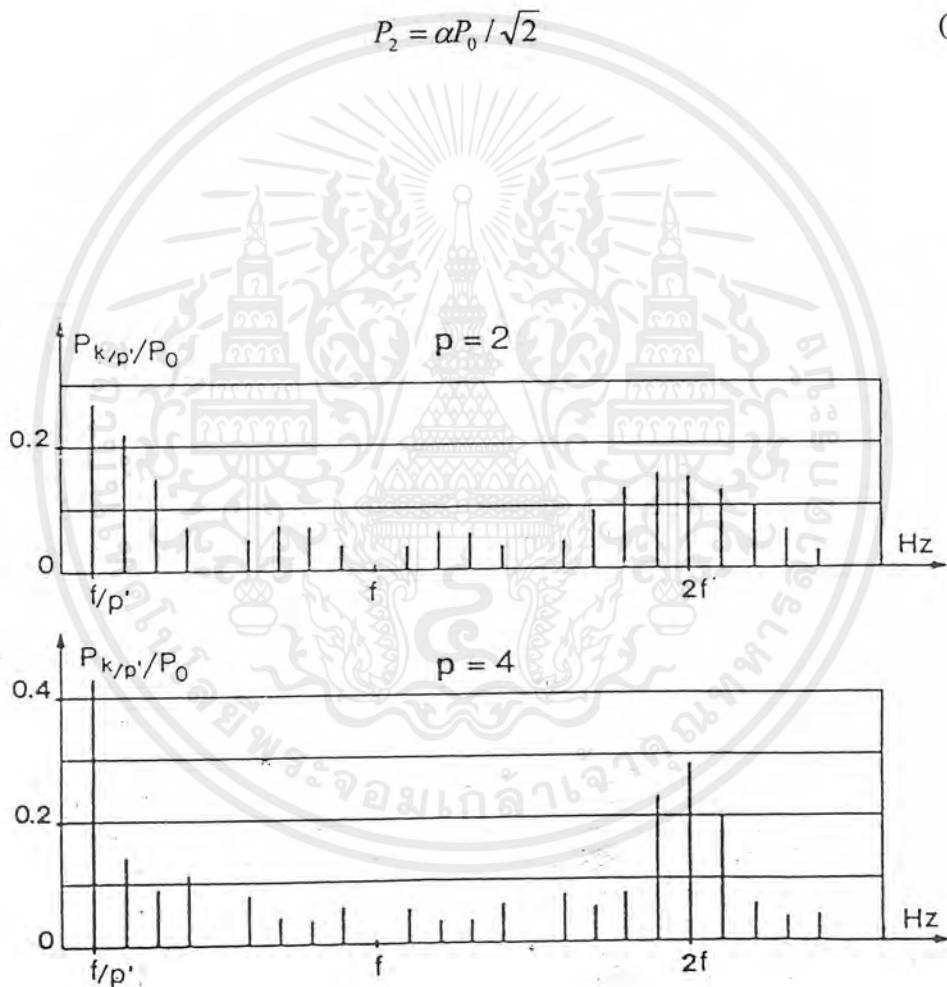
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แล้วสำหรับ  $k = 2p'$  จะได้ว่า

$$\begin{aligned} A'_2 &= 0 \\ B'_2 &= -\alpha P_0 \end{aligned} \quad (4.26)$$

เพราะฉะนั้น

$$P_2 = \alpha P_0 / \sqrt{2} \quad (4.27)$$



รูปที่ 4.7 ได้แสดงถึงสเปกตรัมของกำลังไฟฟ้าชั่วขณะ ที่  $p' = 10$  แล้ว  $p$  เท่ากับ 2 และ 4 ตาม

ลำดับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 5

### วงจรต้นแบบ

#### 5.1 เฟสคอนโทรล

##### 5.1.1 วงจรจุดชนวนเกดแบบควบคุมเฟส (Phase Control Trigger Circuits)

การควบคุมมุมจุดชนวนเกดเอสซีอาร์ หรือไทรแอก ดังที่ได้อธิบายหลักการไว้เป็นวิธีการควบคุมมุมจุดชนวนเกดแบบเชิงเส้น ซึ่งเป็นที่นิยมใช้ในงานอุตสาหกรรม เนื่องจากการทำงานของวงจรไม่มีผลกระทบจากอุณหภูมิการใช้งาน การออกแบบใช้วงจรรวม (Integrated circuit) เฉพาะงานที่จัดทำเพื่อใช้ควบคุมมุมเฟสของแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับโดยเฉพาะ เช่น TCA 785 และ TCA 780 ของ Siemens ซึ่งการใช้วงจรรวมเฉพาะงาน จะทำให้ลดขั้นตอนการออกแบบวงจรและใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์น้อยลง รวมทั้งฟังก์ชันการทำงานที่ให้สมรรถนะการควบคุมเป็นที่เชื่อถือได้ ในนี้จะเสนอตัวอย่างการออกแบบวงจรควบคุมเฟสโดยใช้ TCA 785 สำหรับนำไปใช้ในวงจรเรียงกระแสแบบควบคุมได้ และวงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ ทั้งในระบบเฟสเดียวและสามเฟส และนำไปใช้เป็นชุดทดลองควบคุมเฟส (Single Phase Controller)

##### 5.1.2 คุณสมบัติของ TCA 785 Integrated Phase control

TCA 785 Integrated Phase control เป็นวงจรรวมที่สร้างพัลส์จุดชนวนเกด เอสซีอาร์ และไทรแอก (ซึ่งต่อไปจะเรียกรวมว่าไทรริสเตอร์) โดยสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับงานต่อไปนี้

1. วงจรเรียงกระแส แบบควบคุมได้เต็มที่และครึ่งเดียว (Full and Half Control) ทั้งแบบเฟสเดียวและสามเฟส
2. วงจรควบคุมมุมเฟสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเฟสเดียวและสามเฟส

TCA 785 มีคุณสมบัติเด่นหลายประการ ดังนี้

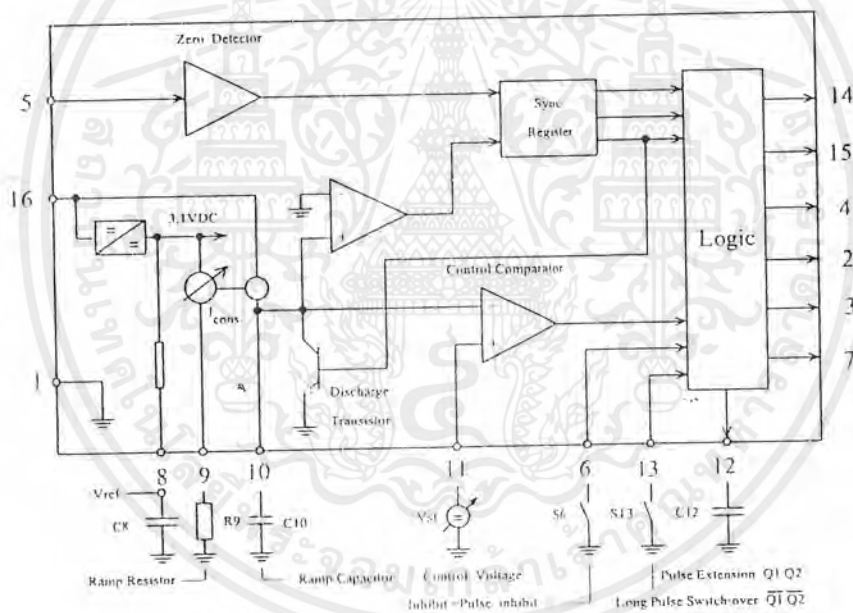
- สามารถจุดชนวนเกดไทรริสเตอร์ได้อย่างน้อย 2 ตัว
- สามารถเลื่อนมุมจุดชนวนเกดได้ระหว่าง 0 ถึง 180 องศา
- ใช้กับแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในช่วง 8-18 โวลต์
- กระแสภายในวงจรรวมใช้ประมาณ 4.5 mA ถึง 10 mA
- สามารถใช้งานได้ในช่วงอุณหภูมิ -25 ถึง 85 องศาเซลเซียส
- กระแสจุดชนวนเกด สามารถจ่ายได้ถึง 250 mA
- สัญญาณจุดชนวนเกด สามารถควบคุมได้โดยขา Inhibit function

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- ลักษณะของสัญญาณจุดขนวนเกิด สามารถที่จะกำหนดได้เป็นแบบเดี่ยว และแบบต่อเนื่อง
- ใช้งานกับวงจร Zero Crossing
- ความถี่ใช้งาน 10-500 เฮิรตซ์

### 5.1.3 ความรู้พื้นฐานและหลักการทำงานของ TCA 785

แผนภาพกรอบของ TCA 785 แสดงในรูปที่ 5.1 แสดงให้เห็นโครงสร้างการทำงานของวงจร ซึ่งได้รวมวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่มีหน้าที่ต่าง ๆ ไว้ในตัวเดียวได้แก่



รูปที่ 5.1 แผนภาพของ TCA 785

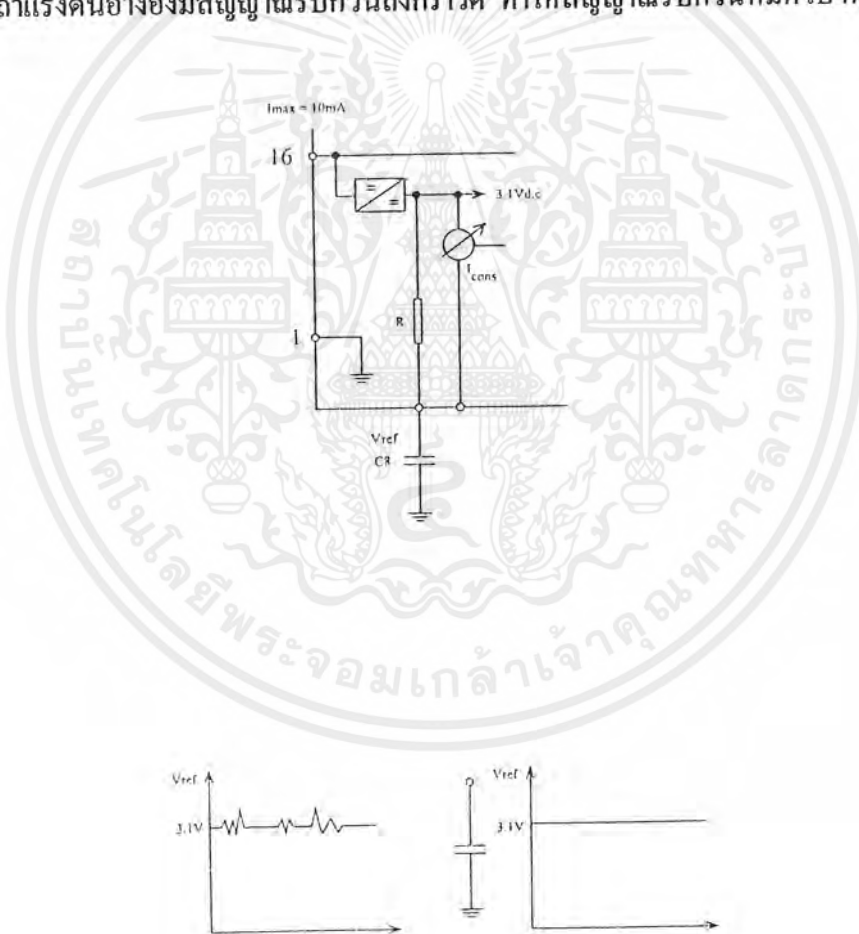
1. วงจรแรงดันอ้างอิง (Reference Voltage)
2. วงจรตรวจจับจุดตัดศูนย์ (Zero Crossing Detector)
3. วงจรสร้างสัญญาณลาดเอียง (Ramp Generator)
4. วงจรเปรียบเทียบ (Control Comparator Circuit)
5. วงจรลอจิก (Logic Circuit)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.4 วงจรแรงดันอ้างอิง (Reference Voltage)

การทำงานของวงจรรวมจะไม่ขึ้นกับแหล่งจ่ายแรงดันจากภายนอกที่จ่ายเข้ามาซึ่งแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงภายนอกสามารถใช้ได้ถึงในช่วง 8 – 18 โวลต์ โดยแรงดันบวกจะต่อเข้ากับขา 16 ( $+V_{CC} = 15 \text{ VDC}$ ) และแรงดันศูนย์จะต่อเข้ากับขา 1 ( $G = 0 \text{ VDC}$ ) ของวงจรรวม แรงดันอ้างอิงที่กำเนิดขึ้นภายในวงจรรวม คือ  $V_{ref} = 3.1$  โวลต์ กระแสที่จ่ายให้วงจรรวมขณะที่ไม่มีโหลดจะใช้กระแสสูงสุด 10 mA

ตัวเก็บประจุ  $V_g$  จะต่อจากวงจรภายนอกเข้าที่ขา 8 ซึ่งเป็นขาเดียวกับแรงดันอ้างอิง และต่อกับกราวด์ ตัวเก็บประจุ  $V_g$  จะเป็นตัวลดสัญญาณรบกวน (noise) ที่จะเกิดขึ้นในส่วนของแรงดันอ้างอิง ถ้าแรงดันอ้างอิงมีสัญญาณรบกวนลงกราวด์ ทำให้สัญญาณรบกวนหมดไป ดังรูปที่ 5.2

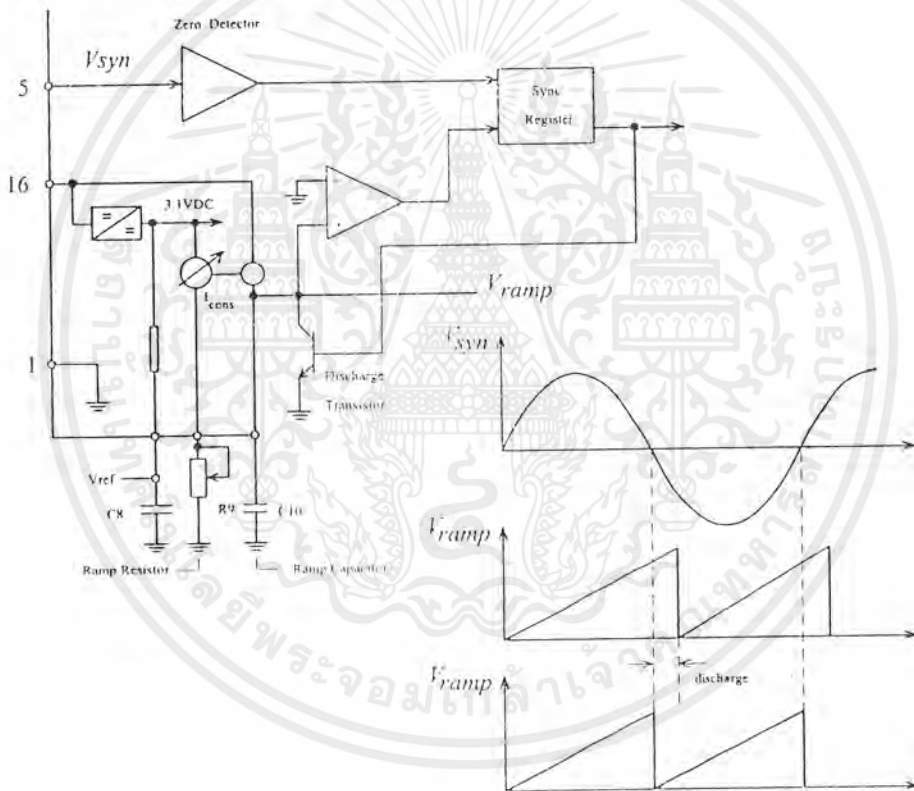


รูปที่ 5.2 การต่อแหล่งจ่ายแรงดันให้กับ TCA 785 และแรงดันอ้างอิงภายใน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.5 วงจรตรวจจับจุดตัดศูนย์ (Zero Crossing Detector)

สัญญาณ Synchronization หรือ  $V_{syn}$  ต่อกับขา 5 โดยผ่านความต้านทานจำกัดกระแส และต่อลงกราวด์โดยผ่านไดโอดซึ่งจะต่อกลับกันอยู่ 2 ตัว ทั้งนี้เพื่อให้ไดโอดไปจำกัดค่าแรงดันของ  $V_{syn}$  เพื่อให้มีค่าประมาณ 0.6 โวลต์ ในส่วนของวงจรตรวจจับจุดตัดศูนย์นั้น จะเป็นส่วนที่มีความไวสูงมาก สามารถจะทำให้เกิดการ Synchronization ระหว่างสัญญาณแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ (แรงดันอินพุต) กับสัญญาณจุกชนวนเกตไทรสเตอร์ นั่นคือแรงดันอินพุตต่อกับไทรสเตอร์ จะตรงเฟสกับมุมจุกชนวนเกตพอดีสัญญาณที่ตรวจวัดจุดตัดศูนย์ได้จะนำไปสร้างสัญญาณลาดเอียงที่ตรงเฟสกับแรงดันอินพุต แสดงดังรูปที่ 5.3



รูปที่ 5.3 การสร้างสัญญาณลาดเอียงกับวงจรตรวจจับจุดตัดศูนย์

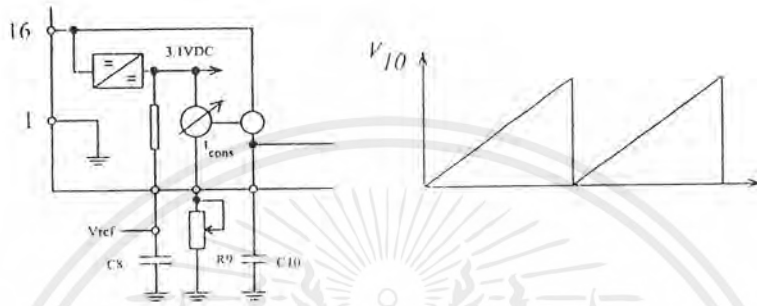
### 5.1.6 วงจรสร้างสัญญาณลาดเอียง (Ramp Generator)

การสร้างสัญญาณลาดเอียงหรือฟันเลื่อย (Ramp or Saw tooth) ขึ้นมาเพื่อให้แรงดันลาดเอียงมีเฟสตรงกับแรงดันอินพุต และเป็นเชิงเส้นกับมุมเฟสของแรงดันอินพุต

ส่วนอื่น ๆ ที่มีความสำคัญเช่นเดียวกันคือ ส่วนที่ทำหน้าที่เป็นแหล่งจ่ายกระแสคงที่ (Constant current source) จะทำหน้าที่สร้างกระแสคงที่  $I_{cons}$  โดยกระแสส่วนนี้จะจ่ายให้กับตัว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เก็บประจุ ( $C_{10}$ ) หรือเรียกว่า (Ramp capacitor :  $C_R$ ) ค่าของกระแสที่คงที่ให้กับ  $C_{10}$  นี้จะทำให้  $C_{10}$  เกิดการเก็บประจุ (Charge) อย่างเป็นเชิงเส้น (Linear) กับเวลาทำให้สัญญาณแรงดันที่ตกคร่อม  $C_{10}$  เป็นสัญญาณลาดเอียงหรือฟันเลื่อย



รูปที่ 5.4 การปรับค่ากระแส  $I_{cons}$  โดยการปรับความต้านทาน  $R_9$

สัญญาณลาดเอียง จะสร้างจากวงจร RC Circuit คือ  $R_9$  และ  $C_{10}$  ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดขนาดขอดคลื่นของสัญญาณลาดเอียงที่  $V_{10}$  โดยสัญญาณลาดเอียงที่เกิดขึ้นนั้นจะมีการปรับ Zero crossing ให้ตรงกับสัญญาณแรงดันอินพุต สัญญาณลาดเอียงที่กำเนิดจากการคายประจุของ  $C_{10}$  จะถูกนำไปจ่ายให้กับ Discharge transistor ที่อยู่ในวงจรรวมอีกครั้งหนึ่ง แสดงดังรูปที่ 5.3 และ 5.4

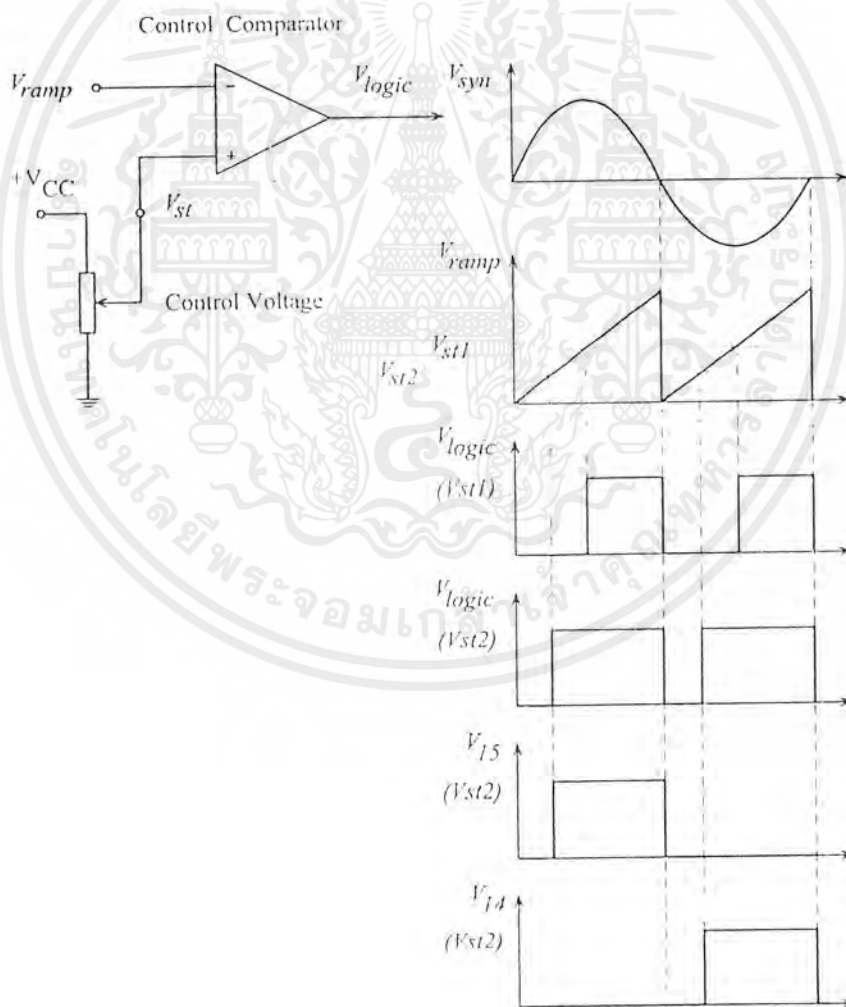
ค่าขอดของสัญญาณลาดเอียง จะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับค่าของตัวเก็บประจุ  $C_{10}$  ที่เลือกใช้ โดยค่าของตัวเก็บประจุมีค่าระหว่าง 500pf-1 $\mu$ f ส่วนของค่ากระแส  $I_{cons}$  สามารถที่จะทำการปรับค่าได้ โดยปรับความต้านทานที่ต่อจากภายนอกเข้าที่ขา 9 ค่าของ  $R_9$  สามารถปรับได้ในช่วง 3-300 กิโลโอห์ม  $R_9$  เรียกว่า Ramp resistor :  $R_R$

จากรูปที่ 5.4 การทำงานในส่วนของ Discharge transistor จะทำหน้าที่คายประจุสัญญาณลาดเอียงที่กำเนิดเกินค่า Zero crossing นั่นคือถ้าหากว่าแรงดันอินพุต นั้นเป็นศูนย์แล้วจะทำให้ค่าของสัญญาณลาดเอียงจะเป็นศูนย์เนื่องจาก Synchronization register จะส่งสัญญาณไบแอสให้ Discharge transistor ทำงานจะทำให้แรงดันลาดเอียงตกเป็นศูนย์ตรงกับจุดที่แรงดันอินพุตเป็นศูนย์พอดี การคายประจุของทรานซิสเตอร์นั้น จะเห็นได้ว่าค่าแรงดันที่เกิดออกมาของ  $V_{10}$  จะไม่มีผลจากส่วนใดของวงจรรวม สัญญาณลาดเอียงที่เกิดขึ้นจะเป็นเชิงเส้นกับมุมเฟสของแรงดันอินพุต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.7 วงจรเปรียบเทียบ (Control Comparator Circuit)

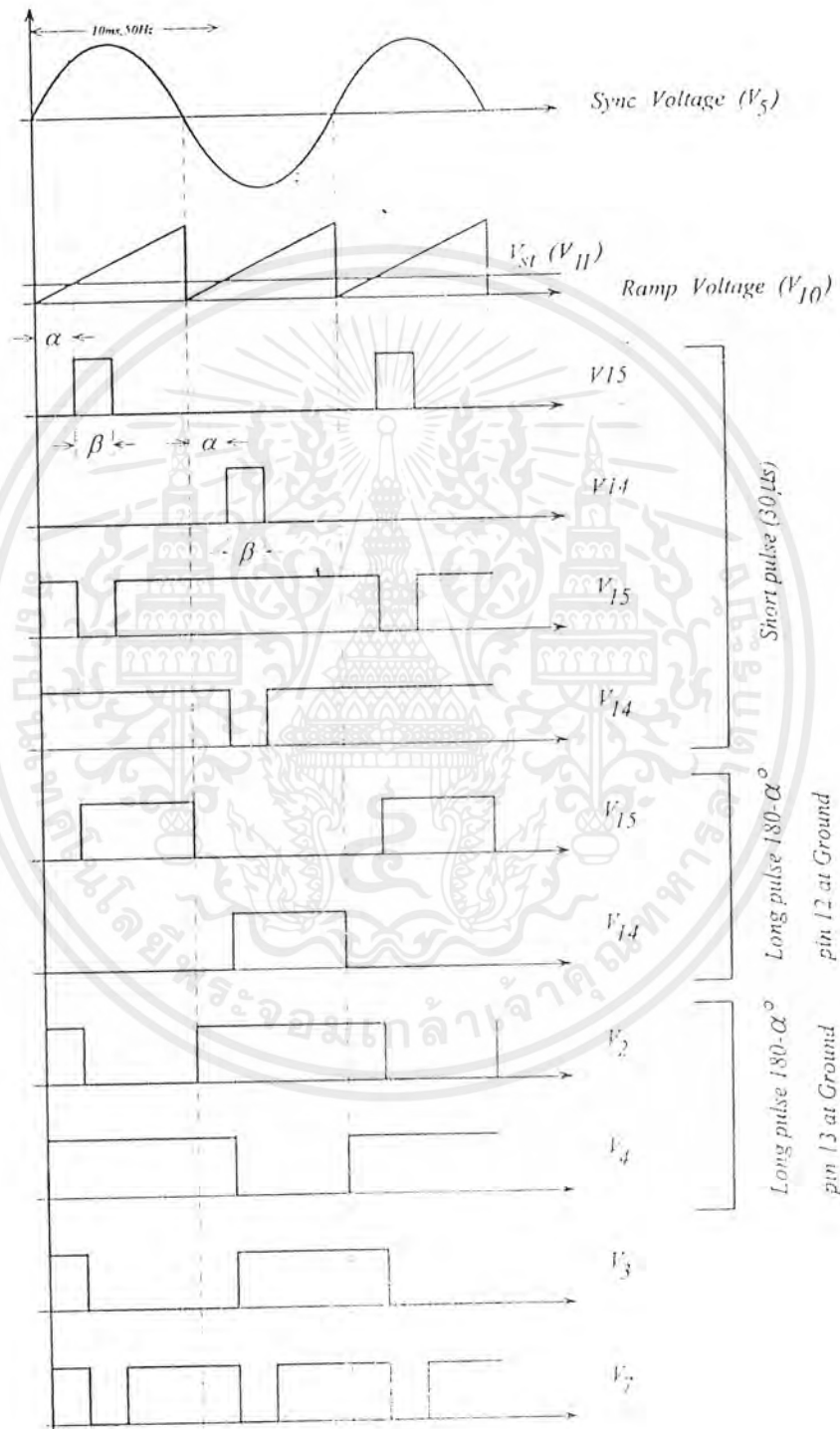
ในส่วนของการเปรียบเทียบสัญญาณนั้น จะเป็นการนำสัญญาณแรงดันลาดเอียง  $V_{10}$  หรือ  $V_{ramp}$  มาเปรียบเทียบกับสัญญาณแรงดันควบคุม (Control Voltage :  $V_{st}$ ) จากภายนอก (แรงดันไฟฟ้ากระแสตรง) โดยใช้หลักการของวงจรเปรียบเทียบ คือและถ้าหากสัญญาณแรงดันควบคุม มีค่าต่ำกว่าสัญญาณลาดเอียง สัญญาณลอจิกที่ได้จะมีค่าเท่ากับ 15 โวลต์ หรือเป็นลอจิกหนึ่ง ถ้าแรงดันควบคุมมีค่าสูงกว่าแรงดันลาดเอียง สัญญาณลอจิกที่ได้จะเป็นลอจิกศูนย์ ดังนั้นถ้าค่ายอดของแรงดันลาดเอียงมีค่า 10 โวลต์ การควบคุมมุมจุดชนวนเกด จะมีค่าเท่ากับ 18 องศาต่อ 1 โวลต์ ดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 การเปรียบเทียบแรงดันควบคุมและแรงดันลาดเอียง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5.1.8 แผนภาพสัญญาณพัลส์ของ TCA 785



รูปที่ 5.6 แผนภาพสัญญาณพัลส์ของ TCA 785

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สัญญาณที่นำมาใช้งานที่สำคัญคือ

1. ขา 11 เป็นสัญญาณแรงดันควบคุม (Control Voltage)
2. ขา 10 เป็นสัญญาณแรงดันลาดเอียง (Ramp Voltage) สามารถปรับค่าขอดจากค่า  $R_2$ ,
3. ขา 15 ให้สัญญาณจุดชนวนเกตที่ มุม  $\alpha$
4. ขา 14 ให้สัญญาณจุดชนวนเกตที่ มุม  $\alpha + 180$
5. ขา 2 เป็นสัญญาณกลับ ของขา 15
6. ขา 4 เป็นสัญญาณกลับ ของขา 14

### 5.1.9 ลักษณะของสัญญาณจุดชนวนเกต

สัญญาณจุดชนวนเกตสามารถปรับให้ความกว้างของพัลส์ได้ตามจุดประสงค์ที่ใช้งาน เมื่อต่อขา 12 ลงกราวด์จะทำให้สัญญาณจุดชนวนเกตมีความกว้างเท่ากับ  $\beta = 180 - \alpha$  ถ้าต่อตัวเก็บประจุที่ขา 12 กับกราวด์ จะทำให้มีความกว้างของสัญญาณตามตารางที่ 5.1 ส่วนสัญญาณขา 2 และ 4 เมื่อต่อขา 13 ลงกราวด์จะทำให้ได้สัญญาณพัลส์ที่กว้างเต็มที่

ตารางที่ 5.1 ค่าตัวเก็บประจุที่ต่อกับขา 12

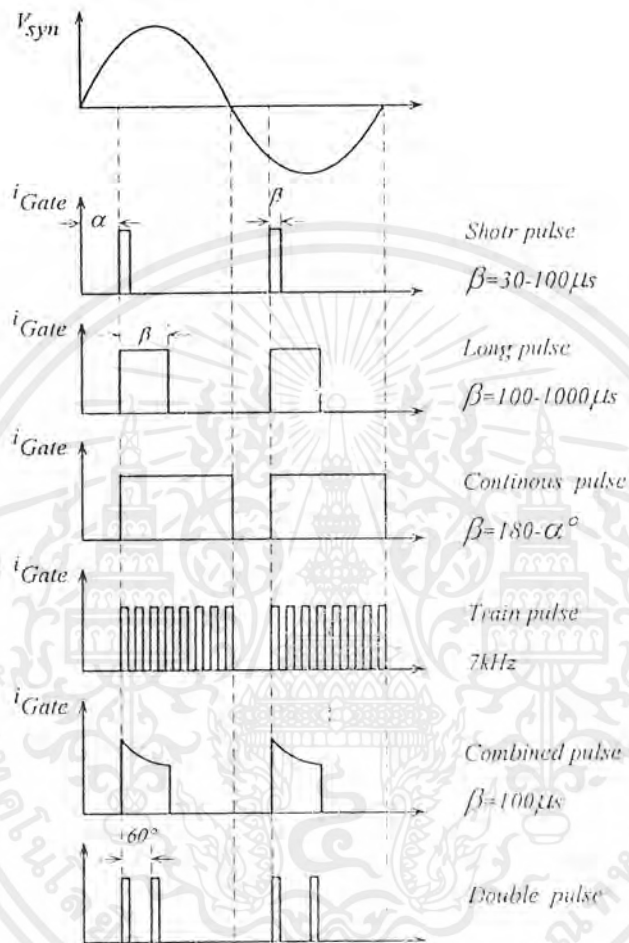
$C_{12}$	0	150	220	330	680	1000
Pulse Width - $\beta$ ( $\mu$ s)	30	93	137	205	422	620

ความกว้างของสัญญาณจุดชนวนเกต จะต้องออกแบบให้เหมาะสมกับชนิดของโหลดในวงจร ซึ่งมีโหลดหลายชนิด ดังตารางที่ 5.2

ตารางที่ 5.2 ความกว้างของสัญญาณจุดชนวนแบบต่าง ๆ กับชนิดของโหลด

Pulse type	Pulse Width - $\beta$	Load type
Short/single pulse	30 – 100 $\mu$ s	Resistive load
Long pulse	100 $\mu$ s – 1 ms	R-L load high current
Continuous pulse	180 - $\alpha$	High inductive load
Double pulse	30 – 100 $\mu$ s	Three phase bridge
Train pulse	7 kHz	R-L load , 3 phase bridge
Combined pulse	100 $\mu$ s – 1 ms	Series SCR , $di/dt = 1-3 \mu$ A/s

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 5.7 ลักษณะของสัญญาณจุดชนวนเกตแบบต่าง ๆ

สัญญาณจุดชนวนเกตแบบดับเบิลพัลส์ (Double Pulse) แบบต่อเนื่องความถี่สูง (Train Pulse) แบบ Combined Pulse ต้องออกแบบและใช้อุปกรณ์ภายนอกเพิ่มเติม เช่น หม้อแปลงพัลส์ (Pulse Transformer) วงจรสร้างความถี่สูง (7kHz) วงจรลอจิกเกต (เช่น AND Gate OR Gate) เป็นต้น ในหัวข้อต่อไปจะแสดงวิธีการใช้วงจรลอจิกเกตร่วมกับหม้อแปลงพัลส์ เพื่อสร้างสัญญาณจุดชนวนเกตแบบต่อเนื่องความถี่สูง (Train Pulse)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 5.1.10 ชุดควบคุมเฟสแบบเฟสเดียว (Single Phase Controller)

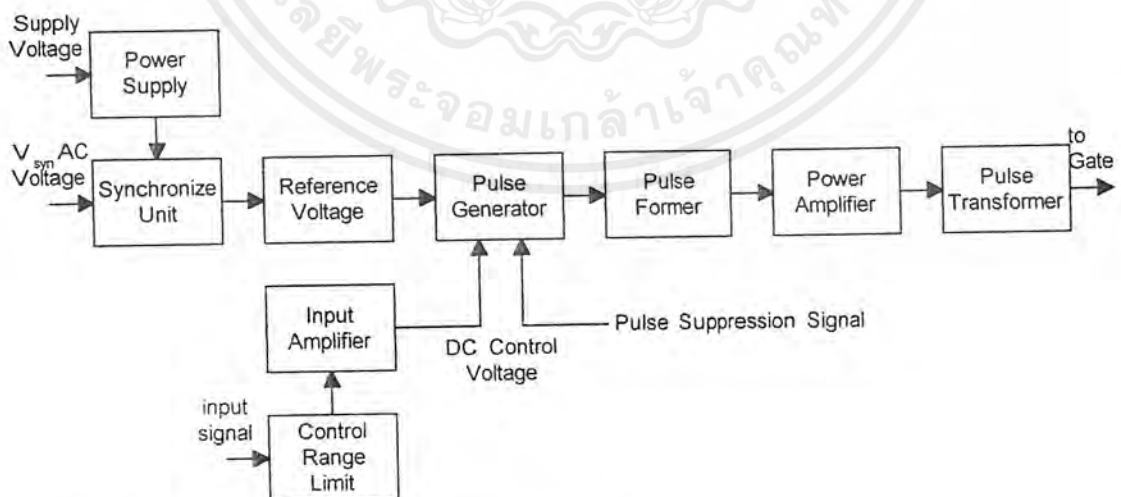
ในชุดควบคุมเฟสแบบเฟสเดียว มาประยุกต์ใช้ในการทดลองต่าง ๆ เช่น

- วงจรเรียงกระแสควบคุมได้แบบเฟสเดียว และสามเฟส สามารถควบคุมได้ทั้งแบบครึ่งเฟส และเต็มเฟส
- วงจรควบคุมมุมเฟสแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ แบบเฟสเดียวและสามเฟส
- จุดชนวนเกดไทรแอก ในวงจรควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ
- วงจรไซโคลคอนเวอร์เตอร์เฟสเดียว (มีอุปกรณ์เพิ่มเติม)
- วงจรขับเคลื่อนมอเตอร์แบบสี่ขั้วภาค (มีอุปกรณ์เพิ่มเติม)

ดังนั้นจะเห็นว่าชุดควบคุมเฟสที่สร้างขึ้น สามารถนำไปใช้งานได้เอนกประสงค์ เนื่องจากได้ออกแบบ ภาคจุดชนวนเกดให้สามารถขับเคลื่อนเอสซีอาร์ได้ถึงสัญญาณะ 2 ตัว และมีหม้อแปลงฟัลส์ รวมถึงสัญญาณะแรงดันควบคุมสามารถต่อจากภายนอก และยังสามารถควบคุมการกำเนิดฟัลส์จาก inhibit function ได้อีกด้วย

### 5.1.11 วงจรชุดควบคุมเฟส (Phase Control Circuit)

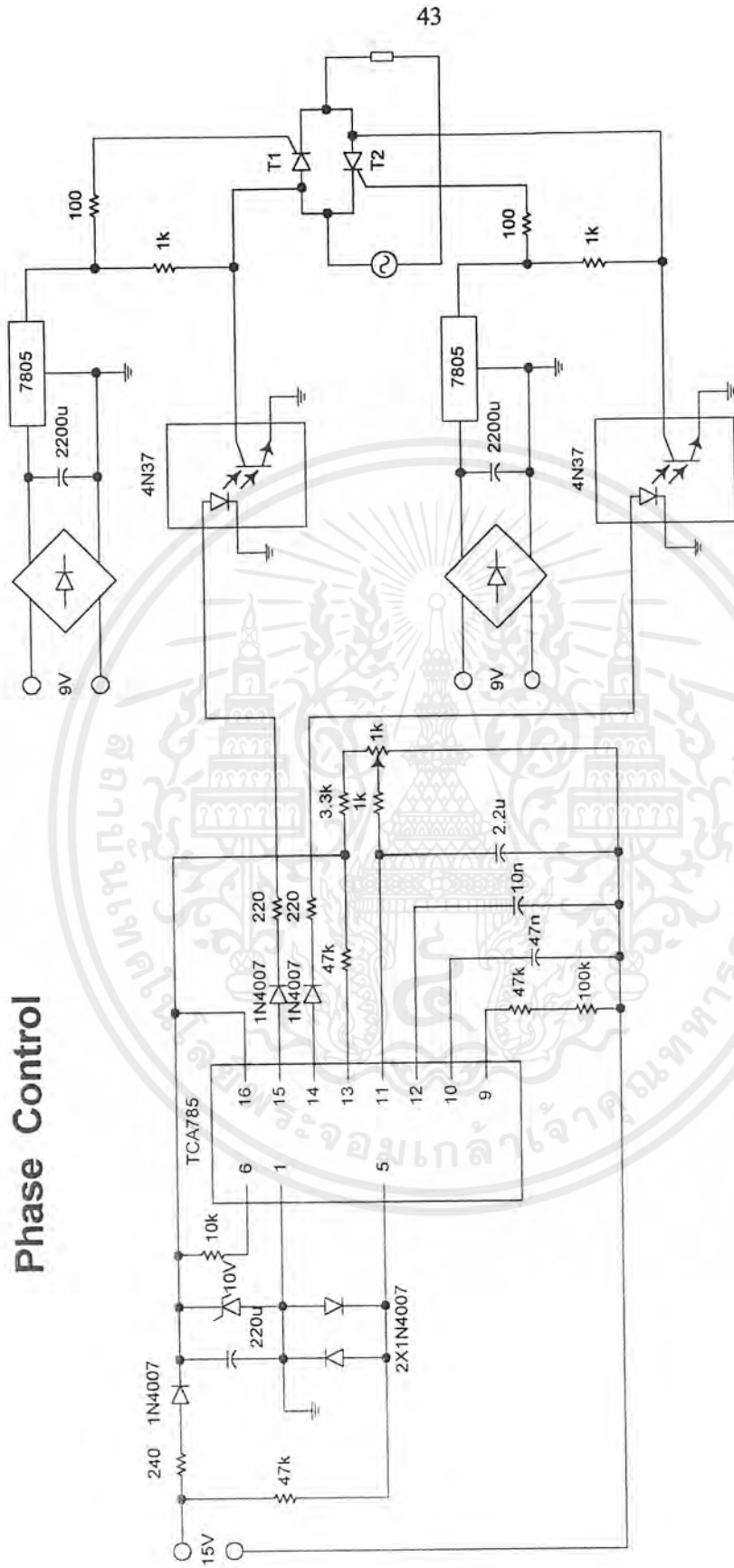
วงจรชุดควบคุมเฟส แบบเฟสเดียว ใช้ TCA 785 Integrated Phase Control สร้างสัญญาณะจุดชนวนเกด มีแผนภาพกรอบแสดงดังรูปที่ 5.8



รูปที่ 5.8 แผนภาพกรอบวงจรควบคุมเฟส แบบเฟสเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Phase Control



43

รูปที่ 5.9 วงจรควบคุมเฟสแบบเฟสเดียว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 5.9 สามารถแสดงภาคต่าง ๆ ของวงจรได้ 4 ภาคดังนี้

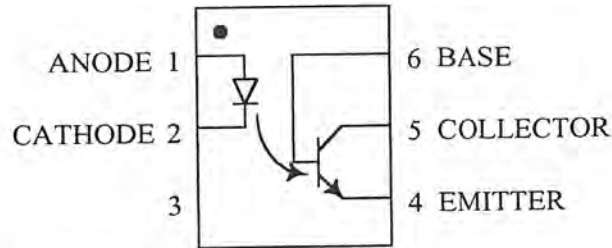
1. ภาครับสัญญาณแรงดันซิงโครไนซ์ (แรงดันอินพุต) ใช้หม้อแปลงขนาดเล็ก 220/15VAC เป็นตัวแยกโคคแรงดันอินพุตกับชุดควบคุม การต่อหม้อแปลงกับวงจรต้องตรวจวัดขั้วของหม้อแปลงให้ถูกต้อง
2. ภาคสร้างสัญญาณแรงดันลาดเอียง ต่อตัวต้านทานปรับได้สามขา  $R_0$  ปรับค่าขอกให้ได้ 10 โวลต์ เพื่อให้มีการควบคุมมุมจุดชนวนเกิดมีค่าประมาณ 18 องศาต่อ 1 โวลต์
3. ภาคสร้างแรงดันควบคุม ใช้ตัวต้านทานปรับค่าได้ควบคุมแรงดันระหว่าง 0-10 โวลต์ และยังมีฟังก์ชันสวิทช์คือเลื่อนแรงดันควบคุมไปอีก 1.66 โวลต์ เพื่อเลื่อนมุมจุดชนวนเกิดไปอีก 30 องศาจากแรงดันอินพุต ใช้สำหรับระบบแรงดันไฟฟ้าสามเฟส
4. ภาคขยายและแยกโคคสัญญาณจุดชนวนเกิด ใช้ออปโตไอโซเลทขยายสัญญาณพัลส์จาก TCA 785 ร่วมกับหม้อแปลงพัลส์ ซึ่งจะทำให้ขยายสัญญาณเกิดให้มีค่าขอกแรงดันเกิดสูงและแยกสัญญาณโคคเป็น 2 สัญญาณ สามารถนำไปจุดชนวนเกิดเอสซีอาร์ได้ 2 ตัว

#### 5.1.12 ตัวเชื่อมโยงทางแสง

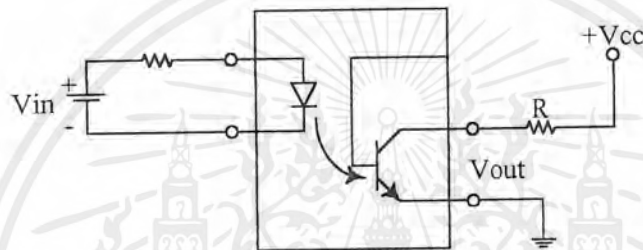
ตัวเชื่อมโยงทางแสง (Optical Couplers) คืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทางแสงตัวหนึ่งที่ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการเชื่อมโยงสัญญาณทางไฟฟ้าจากวงจรอินพุตกับวงจรเอาต์พุต โดยใช้แสง (Optical หรือ Opto) เป็นตัวกลางในการเชื่อมโยงแทนกระแสไฟฟ้า

ประโยชน์ของตัวเชื่อมโยงทางแสงก็คือ เป็นฉนวน (Isolator) ป้องกันระหว่างวงจรทางภาคอินพุตกับภาคเอาต์พุต เพื่อป้องกันอันตรายระหว่างวงจรสองวงจรที่ต้องส่งสัญญาณทางไฟฟ้าถึงกัน หรือนิยมนำไปใช้ในวงจรอินเทอร์เฟซ (Interfacing Circuits) ที่มีความแตกต่างของระดับแรงดันไบแอส หรือวงจรที่มีความแตกต่างของจุดดิน (Different Grounds)

โดยทั่วไปภาคอินพุตของตัวเชื่อมโยงทางแสงจะเป็น LED แต่ภาคเอาต์พุตของตัวเชื่อมโยงทางแสงมีหลายรูปแบบ เช่น ภาคเอาต์พุตเป็นโฟโตทรานซิสเตอร์ ตัวเชื่อมโยงทางแสงมีหลายแบบ เช่น ลักษณะของ ไอ.ซี. หรือแบบเป็นร่องตัวยู เพื่อตรวจจับการหมุนของจานหรือเพลามอเตอร์ เป็นต้น



รูปที่ 5.10 ภาคนำเข้าที่ผลิตเป็นโฟโตทรานซิสเตอร์



รูปที่ 5.11 วงจรตัวเชื่อมโยงทางแสง

การทำงานของตัวเชื่อมโยงทางแสง (Optical Coupler Operating) พิจารณาวงจรตัวเชื่อมโยงทางแสง ในรูปจะเห็นว่าทางอินพุต LED จะต่อกับแหล่งจ่ายไฟตรง ( $V_{in}$ ) เพื่อส่งแสงไปยังโฟโตทรานซิสเตอร์ทำให้โฟโตทรานซิสเตอร์ที่ภาคนำเข้าที่ผลิตทำงานได้เกิดกระแสไหลผ่านโหลด ( $R_L$ ) จะเห็นว่าวงจรภาคอินพุตและภาคนำเข้าที่ผลิตไม่จำเป็นต้องใช้แหล่งจ่ายชุดเดียวกัน

## 5.2 อินทิกรัลไซเคิลคอนโทรล

เริ่มต้นจากไอซี TL494 ซึ่งทำหน้าที่ผลิตสัญญาณฟันเลื่อย ไอซี TL494 คือวงจรควบคุมความกว้างของพัลส์ที่ความถี่คงที่ สัญญาณฟันเลื่อยเชิงเส้นที่เกิดขึ้นภายในนั้นมาจากการควบคุมโดยอุปกรณ์ 2 ตัว ซึ่งต่ออยู่ภายนอก นั่นก็คือ R และ C ซึ่งสามารถหาค่าความถี่เอาต์พุตได้จากสมการ

$$f = \frac{1.1}{R \cdot C} \quad (5.1)$$

ดังนั้นอุปกรณ์ R และ C ที่นำมาต่อภายนอกนั้น ถ้าพิจารณาแล้วจะเห็นได้ว่าค่า C นั้นไม่สามารถปรับเปลี่ยนค่าได้จึงจำเป็นต้องใช้เป็นค่าคงที่ ในส่วนของตัว R นั้นสามารถใช้แบบปรับค่าได้ ซึ่งเมื่อต้องการความถี่ที่ค่าใด ๆ ก็สามารถควบคุมได้โดยการปรับที่ตัว R

ถ้าหากว่าเรากำหนดให้ไอซี TL494 ผลิตสัญญาณเอาต์พุตที่มีความถี่เท่ากับ  $f$  ใด ๆ และใช้ค่า C คงที่ในที่นี้ใช้ค่าเท่ากับ  $100 \mu\text{F}$  ดังนั้นจึงสามารถหาค่าความต้านทานที่จะต้องใช้ได้ดังนี้

$$R = \frac{1.1}{100 \mu\text{F} \cdot f} \quad (5.2)$$

สัญญาณฟันเลื่อยที่ได้จาก TL494 ถูกนำไปเปรียบเทียบกับแรงดันไฟตรง เพื่อให้ได้พัลส์เอาต์พุตที่มีค่า duty cycle เท่ากับ 0.5 ดังนั้นการเปรียบเทียบของ 2 สัญญาณดังกล่าวจะทำให้สัญญาณฟันเลื่อยถูกแรงดันไฟตรงตัดแบ่งตรงบริเวณกึ่งกลางของสัญญาณฟันเลื่อยพอดี

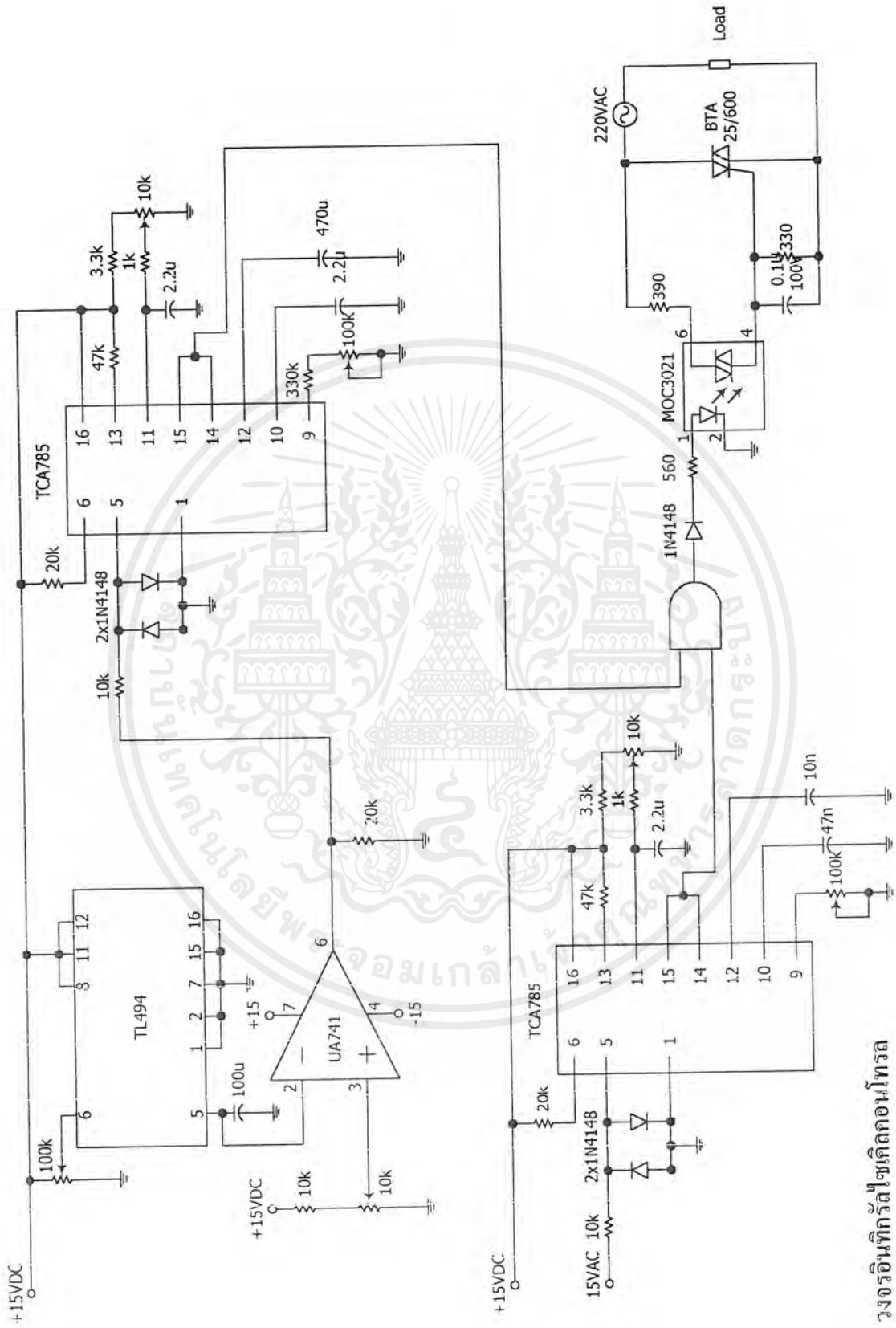
นำสัญญาณที่ได้จากการเปรียบเทียบในครั้งนี้นำไปเป็น  $V_{\text{syn}}$  ให้กับ TCA785 ตัวที่หนึ่ง ซึ่งจะทำหน้าที่ผลิตสัญญาณแบบต่อเนื่องที่สามารถปรับ duty cycle ภายในตัวมันเองได้ตั้งแต่ 0 จนถึง 1 สัญญาณเอาต์พุตที่ได้จาก TCA785 ตัวนี้นำไป AND กันกับ short pulse ที่มุมทริกเท่ากับศูนย์ ซึ่ง short pulse ดังกล่าวข้างต้นนั้นถูกผลิตมาจาก TCA785 ตัวที่สอง ที่ทำหน้าที่คล้ายกับเฟสคอนโทรล แต่จะคงค่ามุมทริกไว้ที่ศูนย์ตลอดและจะเป็น short pulse เท่านั้น

ภายหลังจากการ AND กันของสองสัญญาณดังกล่าว โดยการควบคุมสัญญาณแบบต่อเนื่องที่ duty cycle ต่าง ๆ จะได้สัญญาณทริกที่มุมศูนย์แบบ short pulse ซึ่งก็คือสัญญาณทริกแบบอินทิกรัลไซเคิลคอนโทรลนั่นเอง

สัญญาณทริกดังกล่าวจะนำไปเป็นสัญญาณเพื่อการจุดชนวนให้กับขาเกตของไทรแอก

เนื่องจากคุณสมบัติของไทรแอกนั้น สามารถนำกระแสได้ 2 ทิศทาง คือ ทั้งฟอร์เวิร์ดและรีเวิร์ส เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

# Integral Cycle Control



รูปที่ 5.12 วงจรอินทิกรัลไซเคิลคอนโทรล

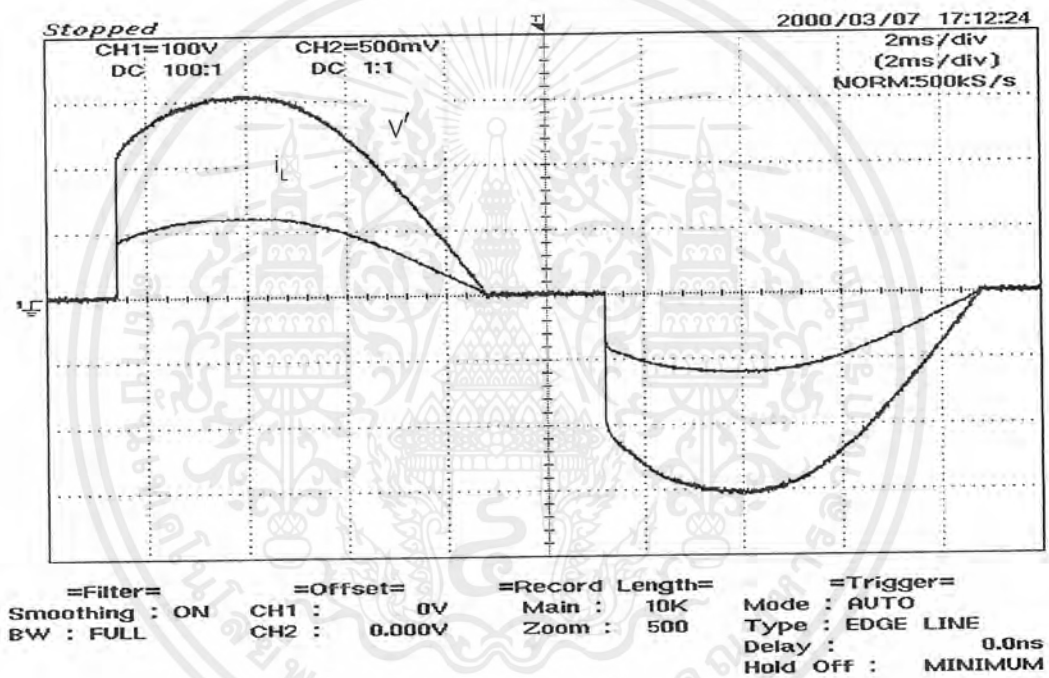
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### ผลการทดลองอินทิกรัลไอเกิดคอนโทรลและเฟสคอนโทรล

#### 6.1 ผลการทดลองการควบคุมกำลังไฟฟ้ากระแสสลับแบบเฟสคอนโทรล

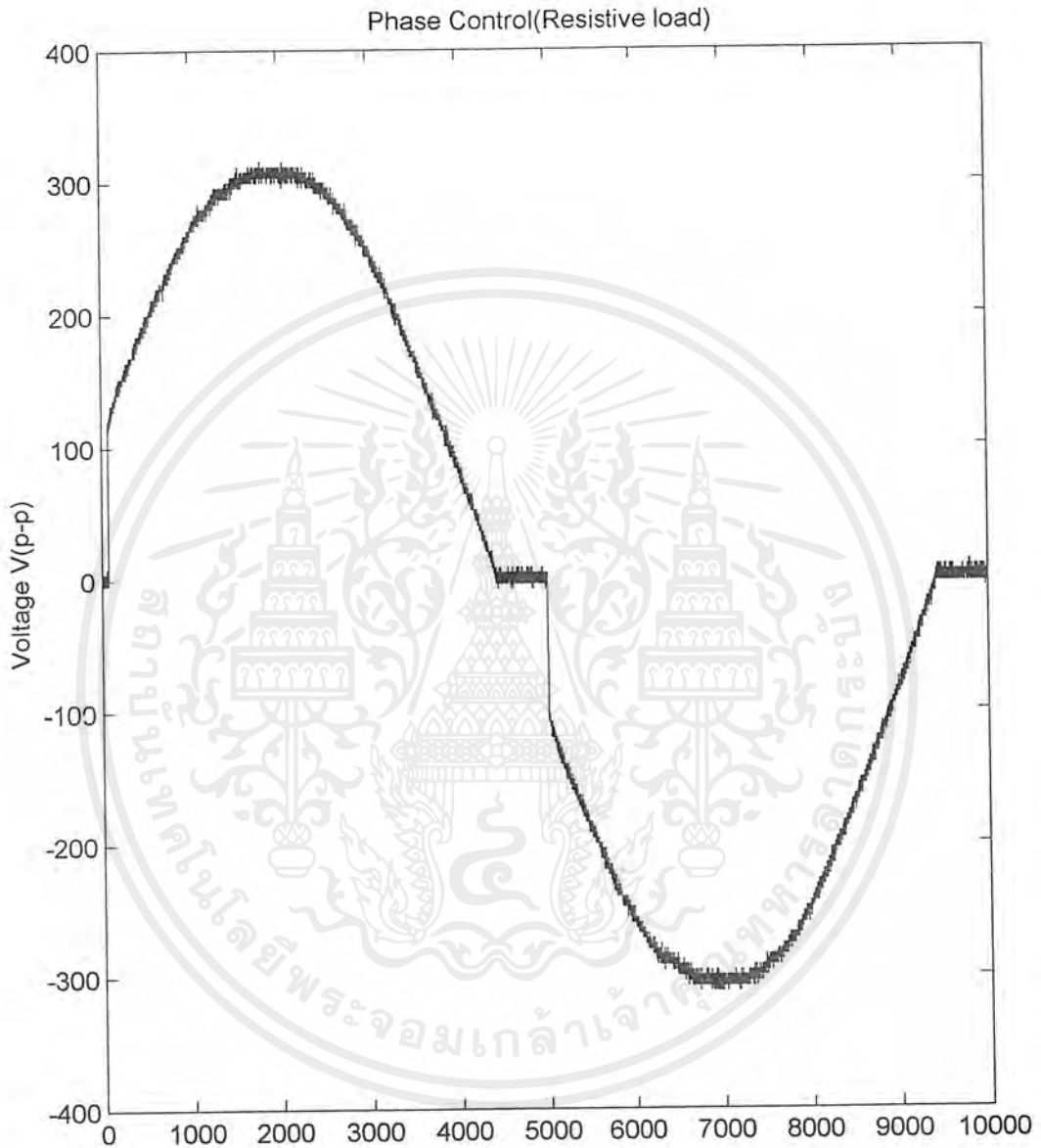
##### 6.1.1 ลักษณะรูปคลื่นของกระแสและแรงดัน



รูปที่ 6.1 แสดงรูปสัญญาณของกระแสและแรงดันที่ตกรวม โหลดความต้านทาน(Resistiv load)

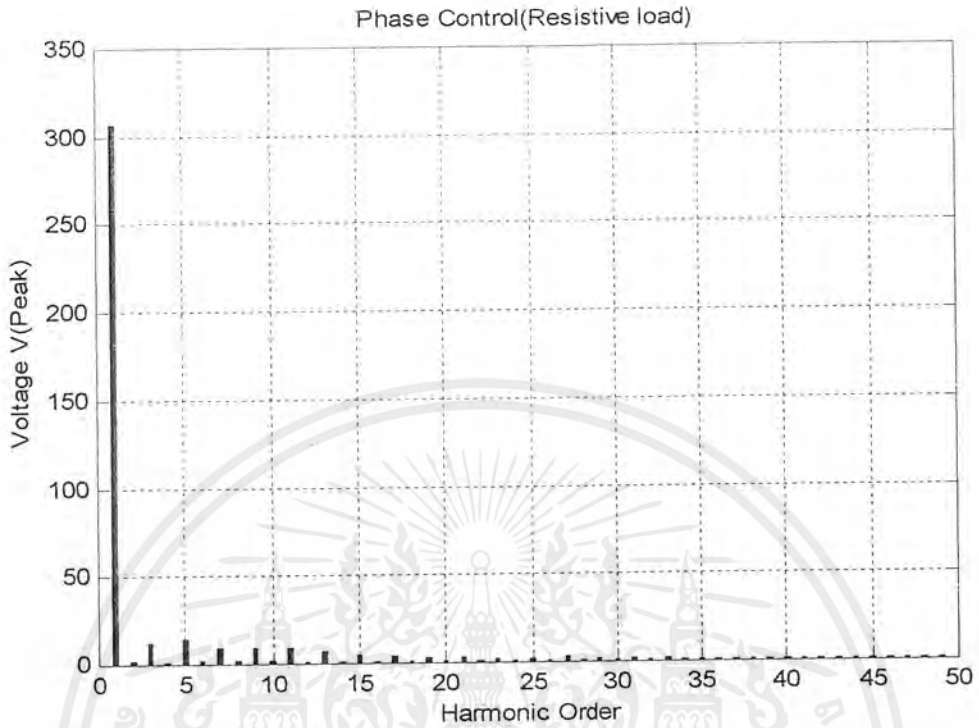
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.1.2 ผลของฮาร์โมนิกส์ในการควบคุมกำลังไฟฟ้าที่มุมเฟสต่างๆ

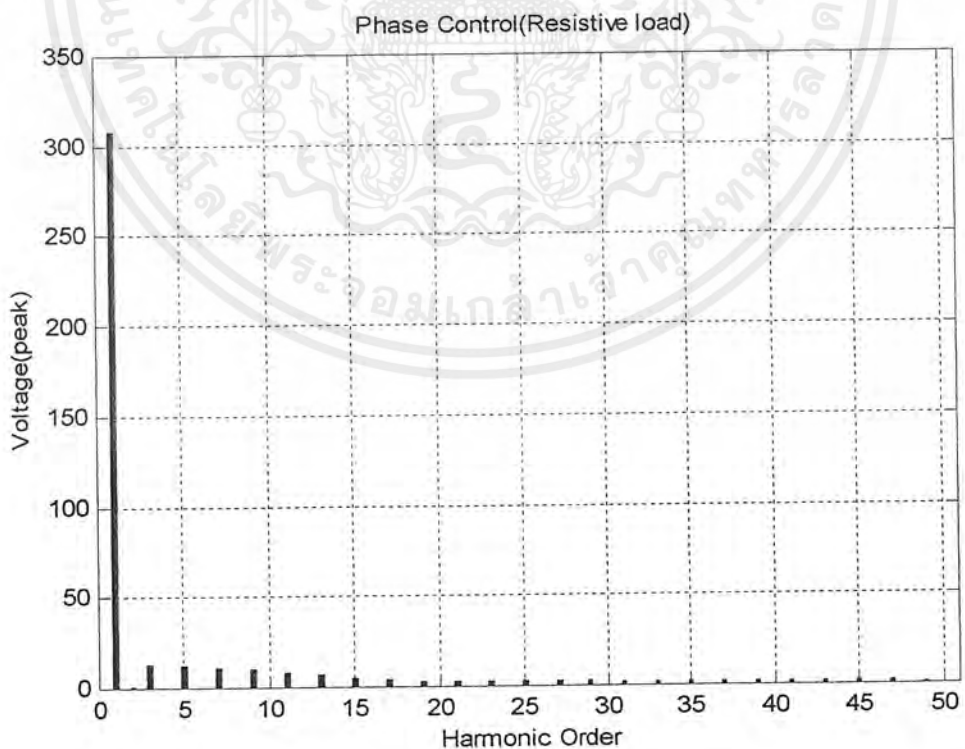


รูปที่ 6.2 แสดงสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมโหลดเมื่อมุมทริก ( $\psi$ )= $3\pi/25$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

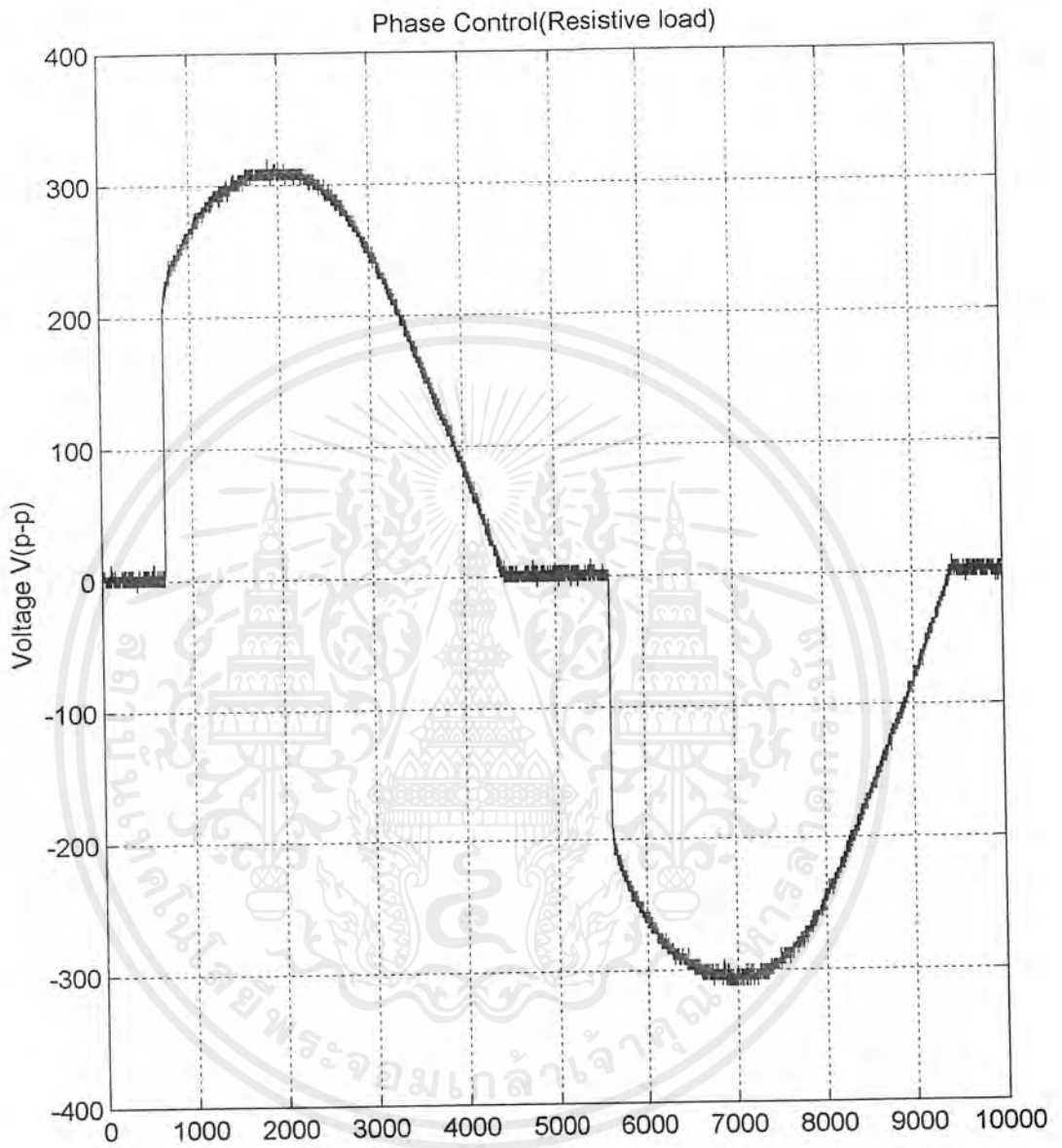


รูปที่ 6.3 กราฟการทดลองหา Amplitude Voltage ที่ลำดับฮาร์โมนิกส์ต่างๆเมื่อ  $\psi=3\pi/25$



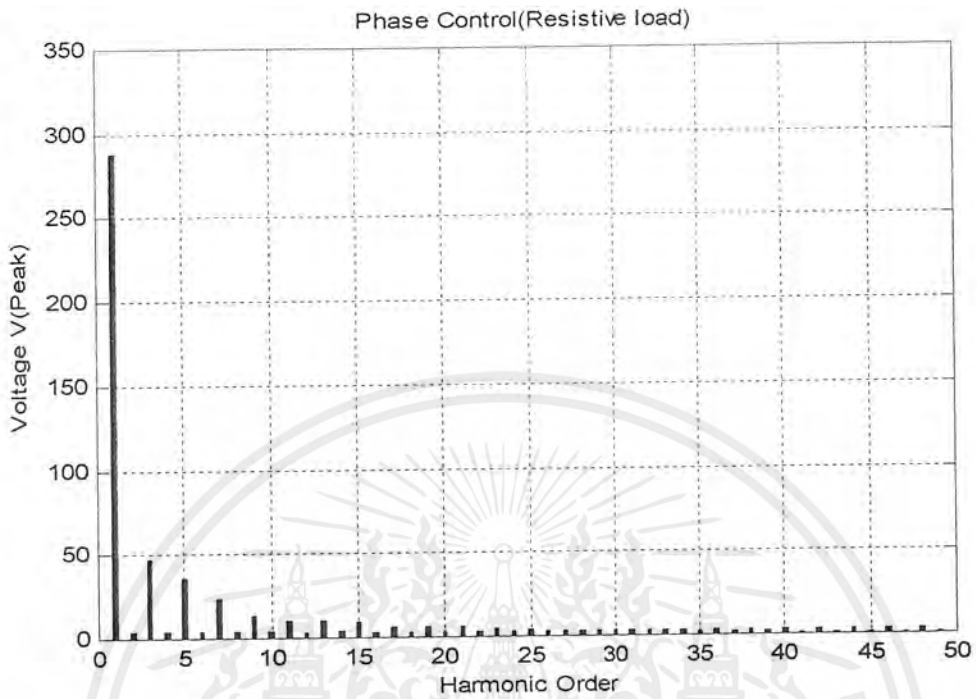
รูปที่ 6.4 กราฟ Simulation หา Amplitude Voltage ที่ลำดับฮาร์โมนิกส์ต่างๆเมื่อ  $\psi=3\pi/25$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

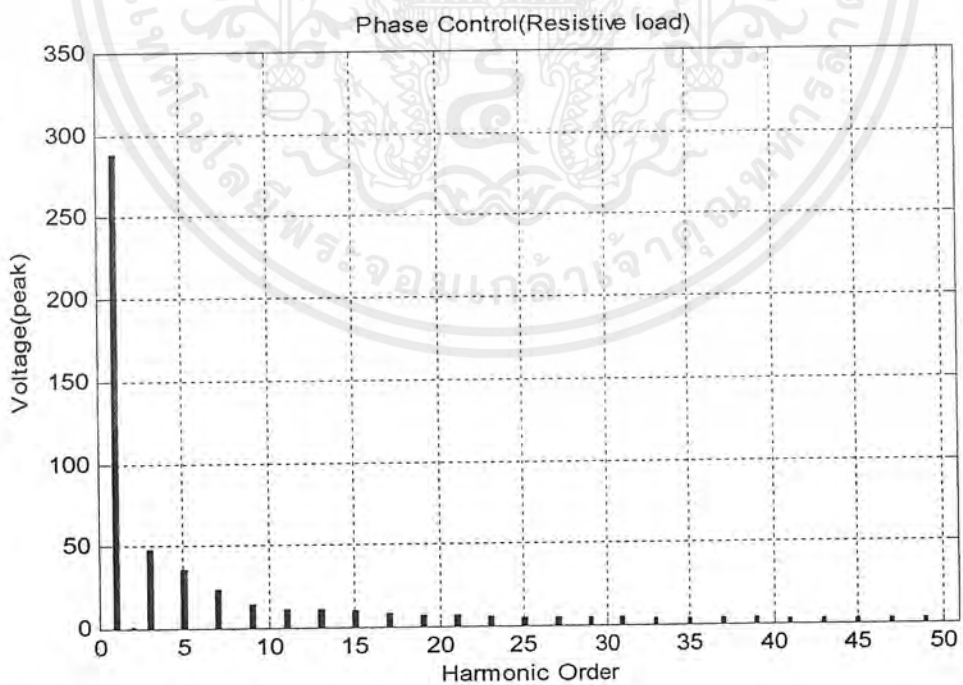


รูปที่ 6.5 แสดงสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมโหลดเมื่อนุมทริก ( $\psi$ )= $6\pi/25$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

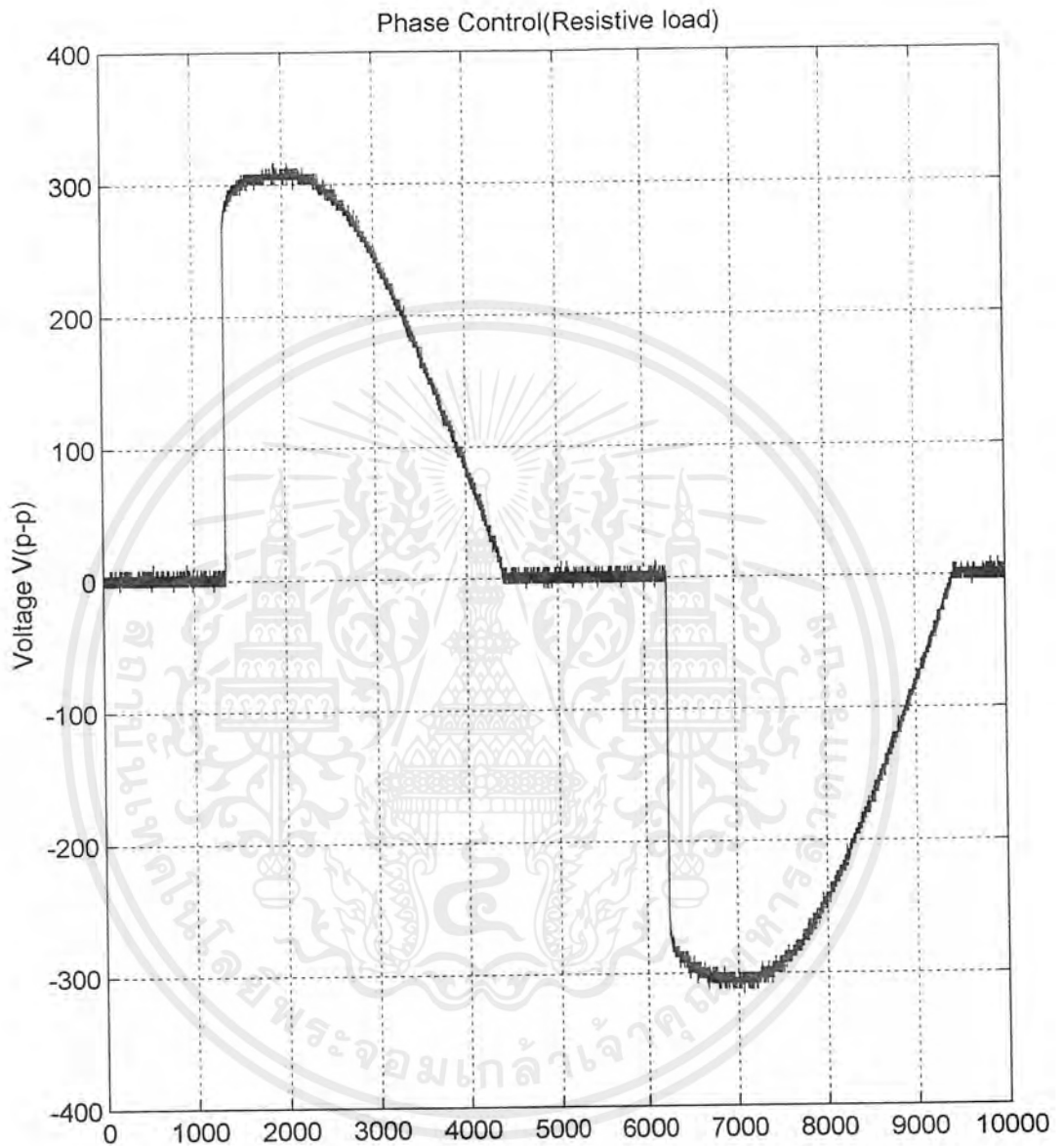


รูปที่ 6.6 กราฟการทดลองหา Amplitude Voltage ที่ลำดับฮาร์โมนิกส์ต่างๆเมื่อ  $\psi=6\pi/25$



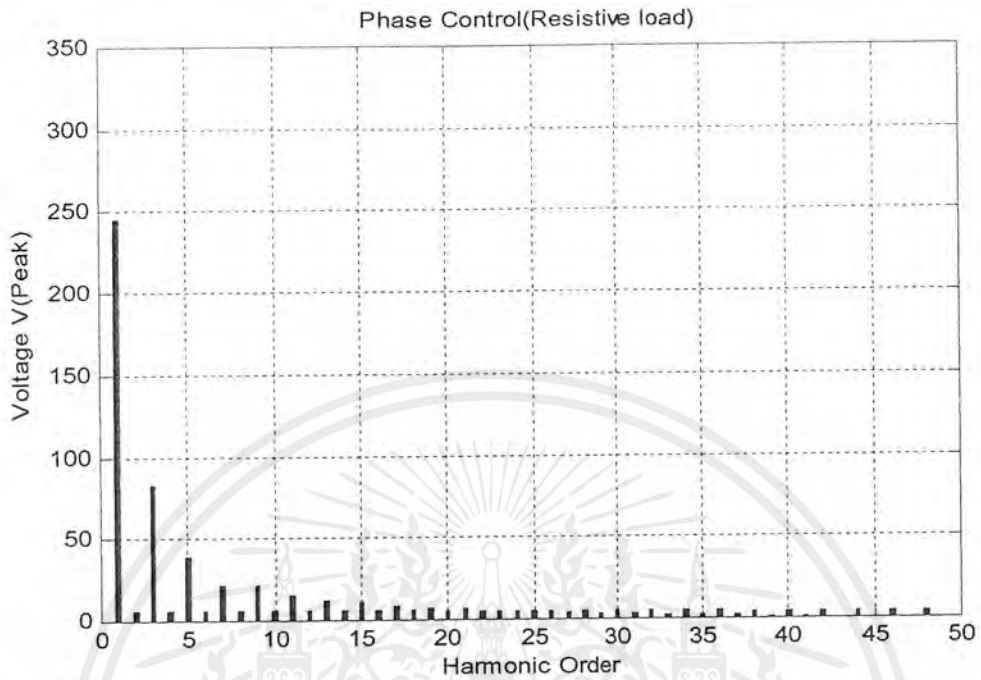
รูปที่ 6.7 กราฟ Simulation หา Amplitude Voltage ที่ลำดับฮาร์โมนิกส์ต่างๆเมื่อ  $\psi=6\pi/25$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

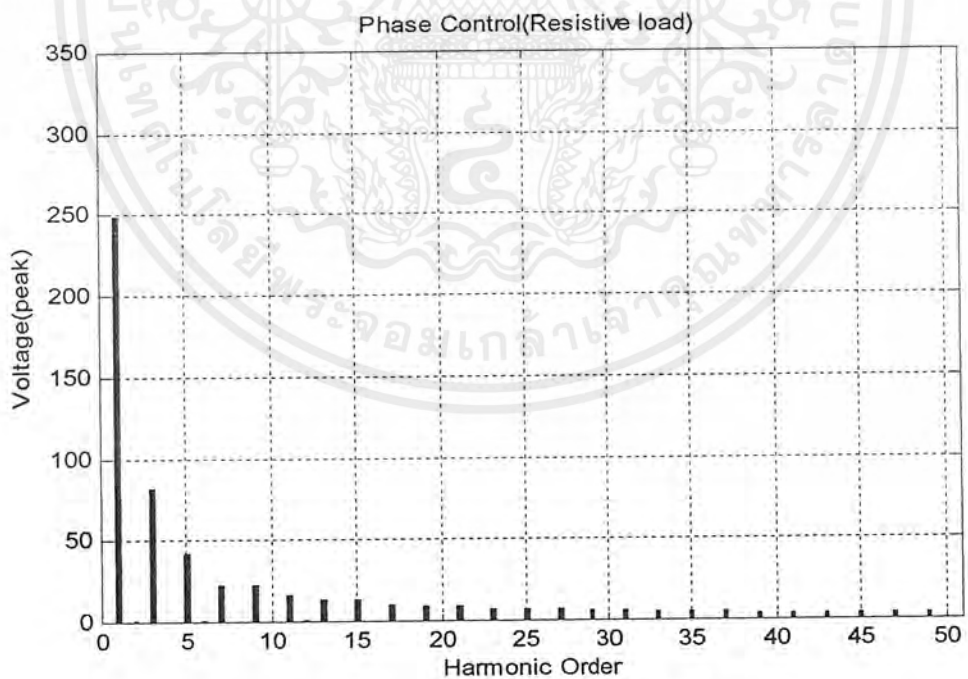


รูปที่ 6.8 แสดงสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมโหลดเมื่อมุมทริก ( $\mu$ )= $9\pi/25$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

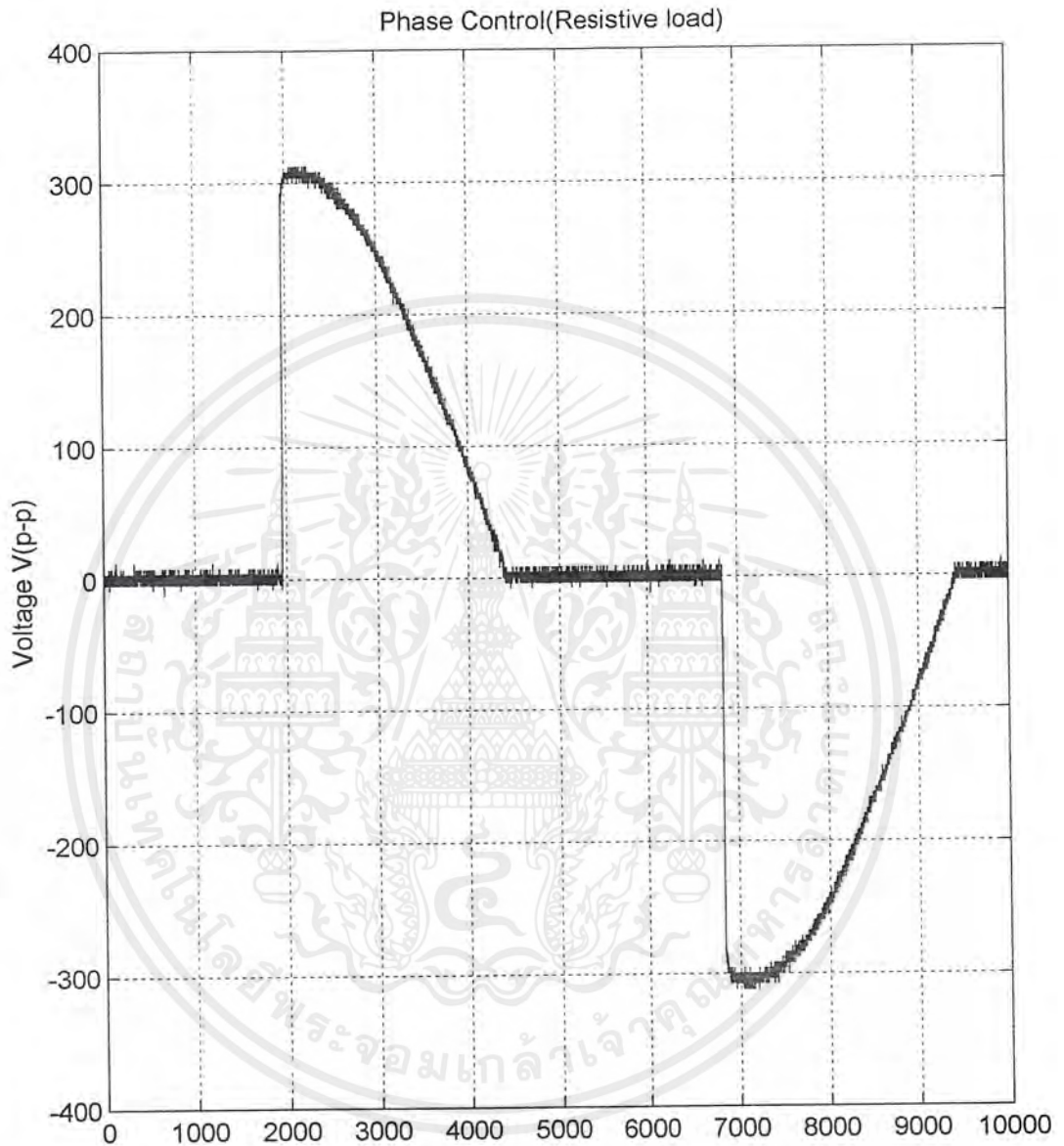


รูปที่ 6.9 กราฟการทดลองหา Amplitude Voltage ที่ลำดับฮาร์โมนิกส์ต่างๆเมื่อ  $\psi=9\pi/25$



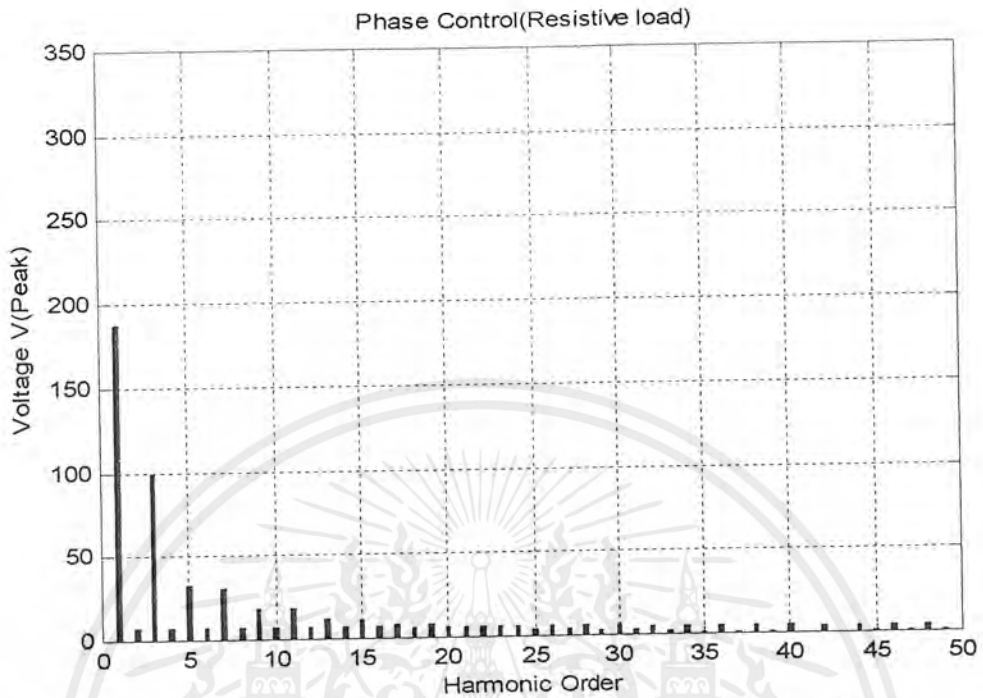
รูปที่ 6.10 กราฟ Simulation หา Amplitude Voltage ที่ลำดับฮาร์โมนิกส์ต่างๆเมื่อ  $\psi=9\pi/25$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

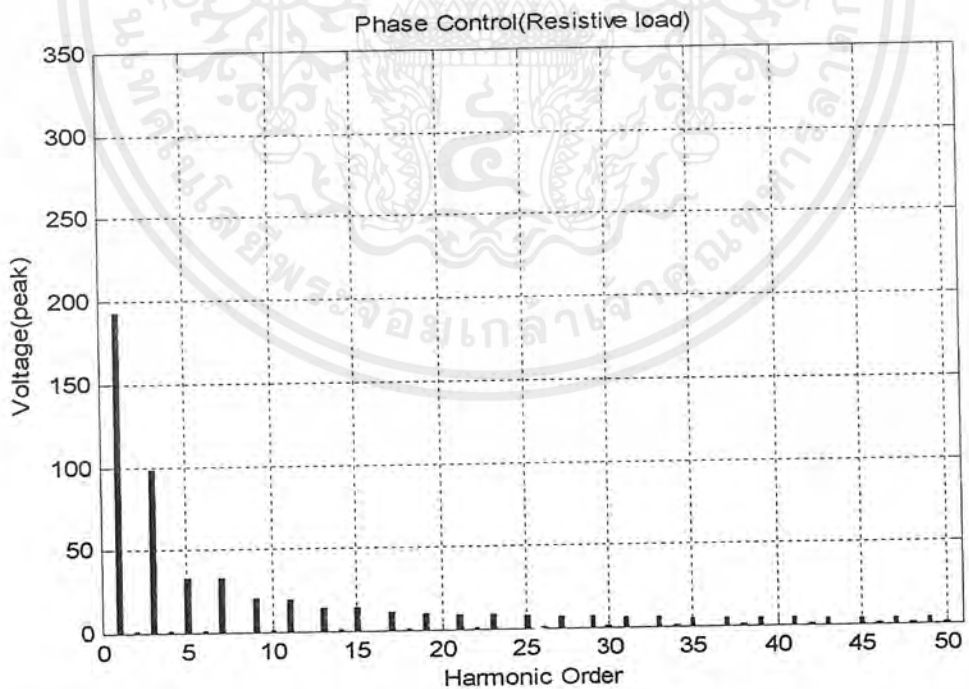


รูปที่ 6.11 แสดงสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมโหลดเมื่อมุมทริก ( $\psi$ ) =  $12\pi/25$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

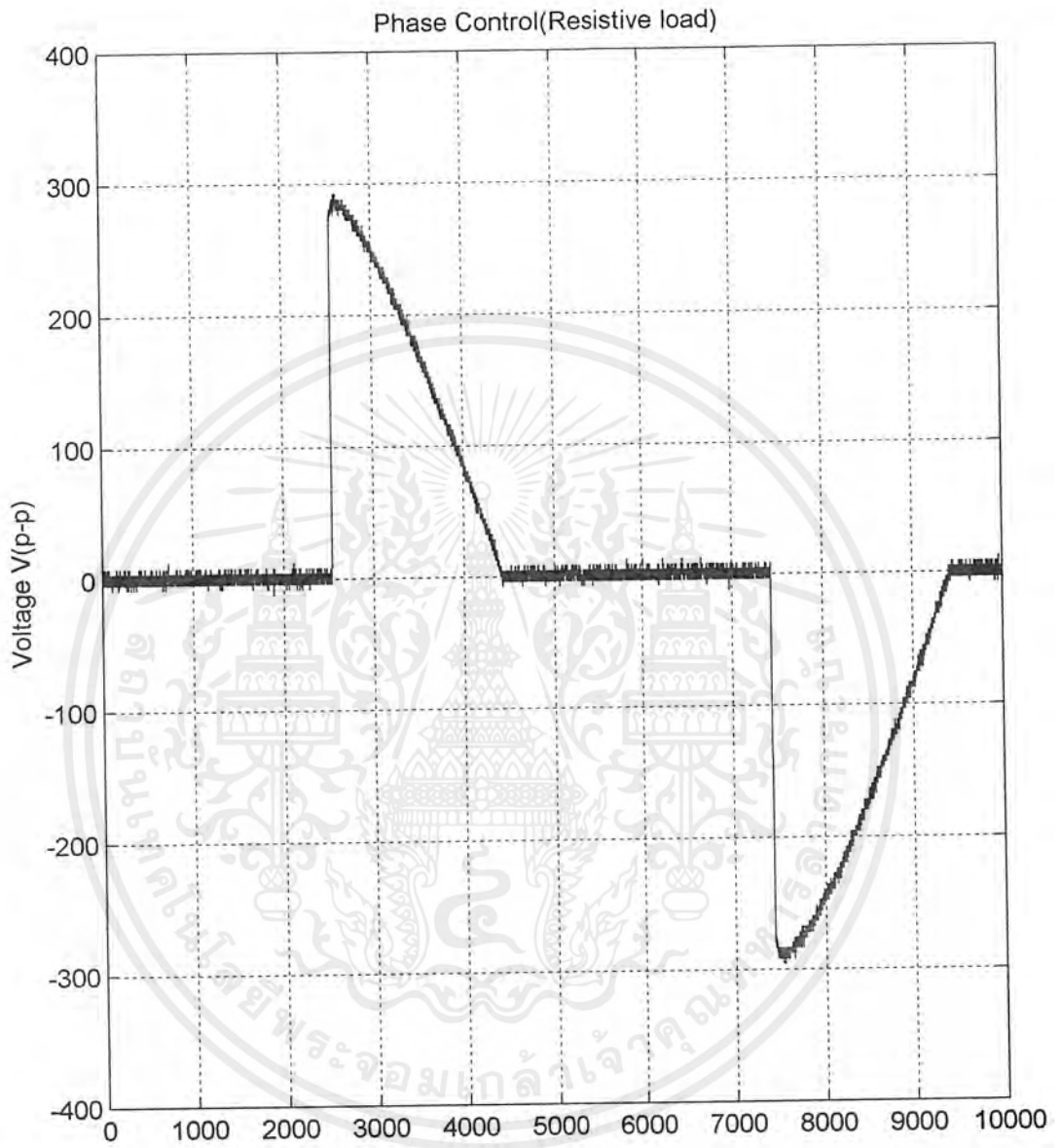


รูปที่ 6.12 กราฟการทดลองหา Amplitude Voltage ที่ลำดับฮาร์โมนิกส์ต่างๆเมื่อ  $\psi = 12\pi/25$



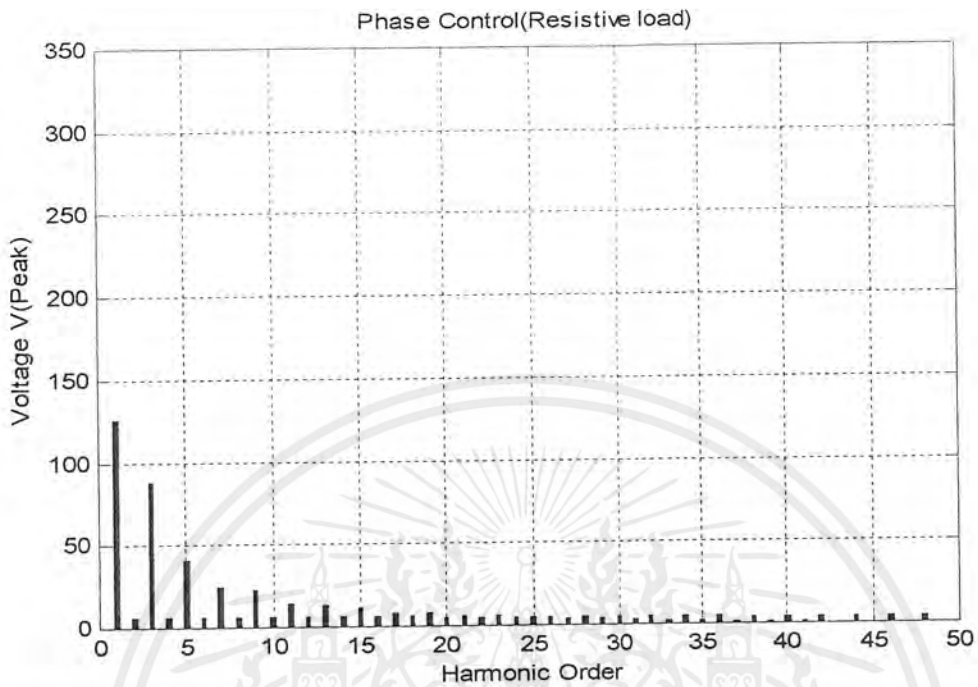
รูปที่ 6.13 กราฟ Simulation หา Amplitude Voltage ที่ลำดับฮาร์โมนิกส์ต่างๆเมื่อ  $\psi = 12\pi/25$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

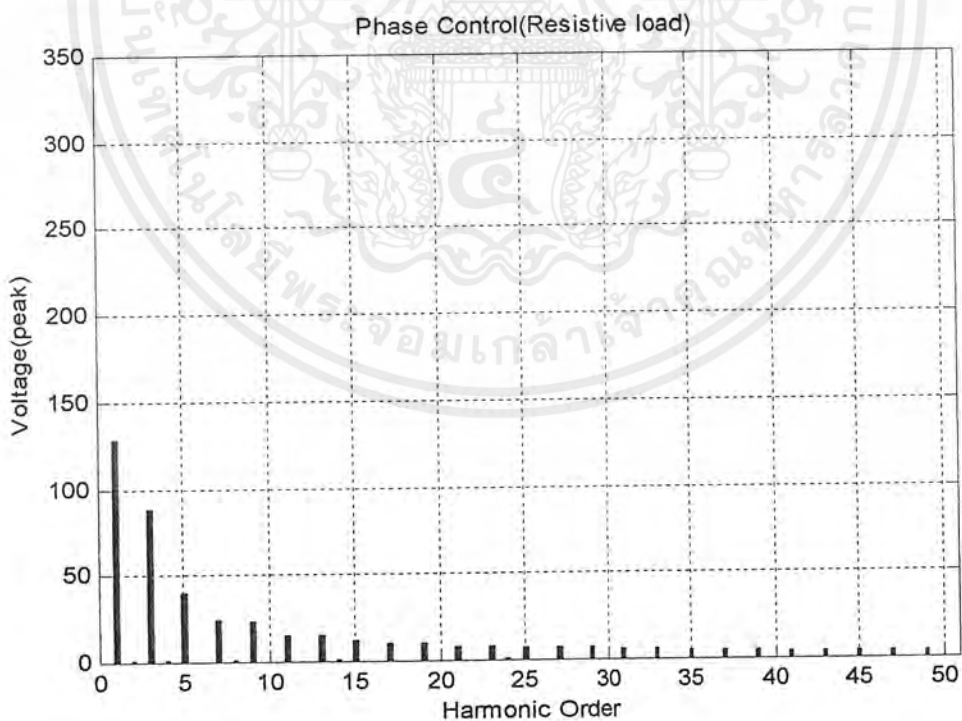


รูปที่ 6.14 แสดงสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อม โหลดเมื่อมุมทริก ( $\psi$ )= $15\pi/25$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

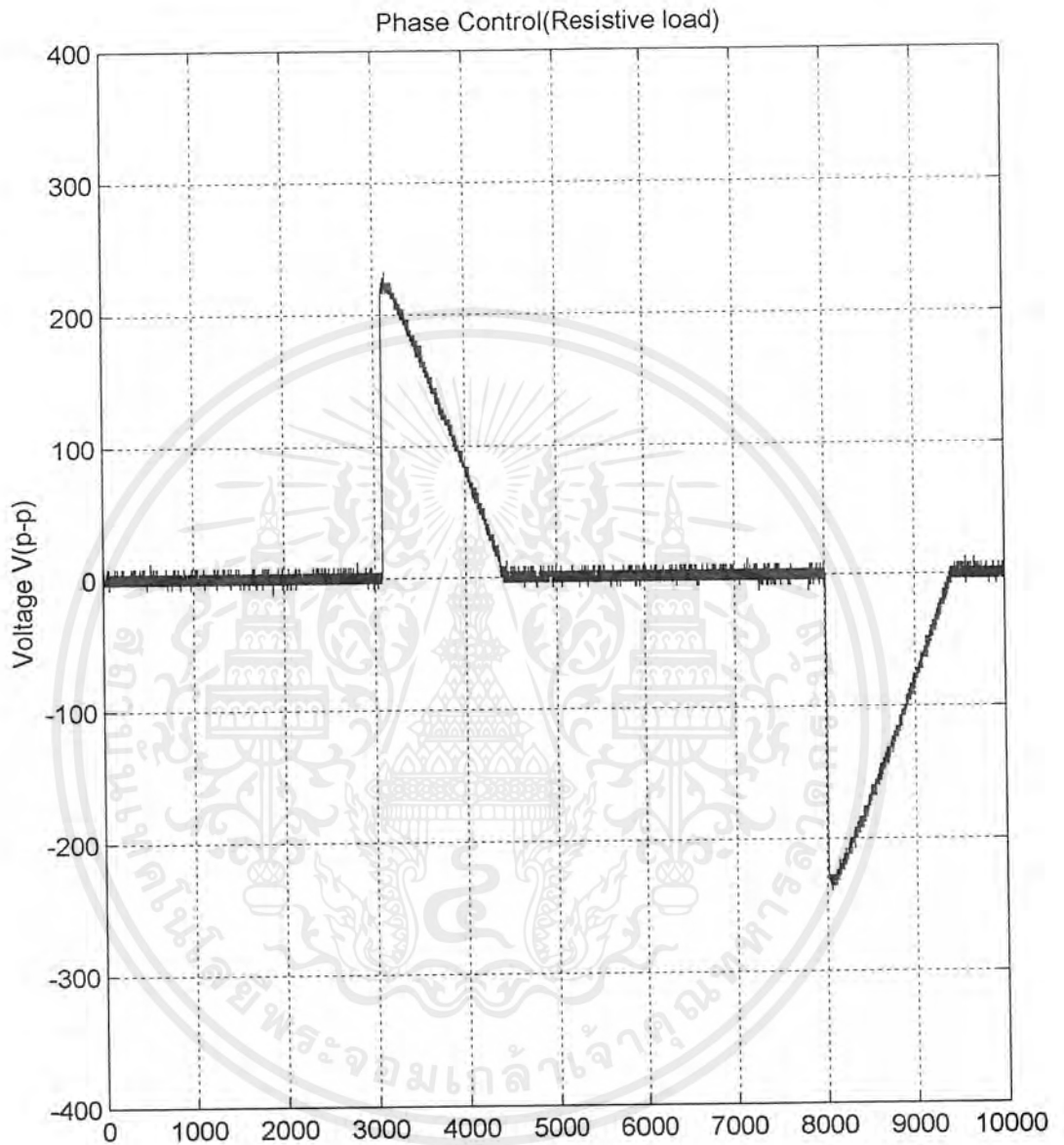


รูปที่ 6.15 กราฟการทดลองหา Amplitude Voltage ที่ลำดับฮาร์โมนิกส์ต่างๆเมื่อ  $\psi=15\pi/25$



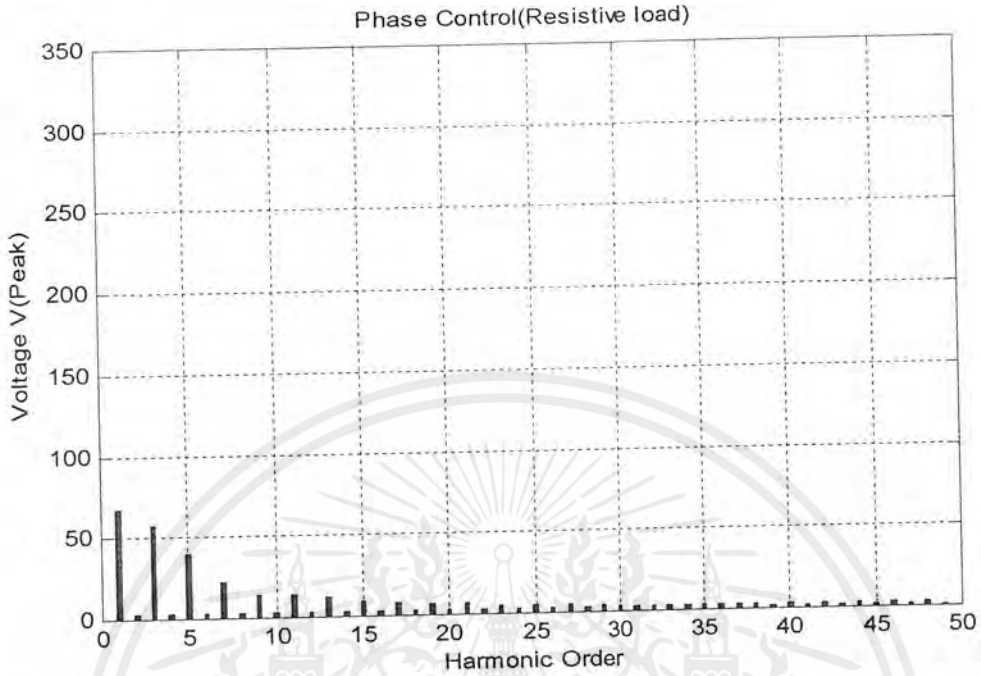
รูปที่ 6.16 กราฟ Simulation หา Amplitude Voltage ที่ลำดับฮาร์โมนิกส์ต่างๆเมื่อ  $\psi=15\pi/25$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

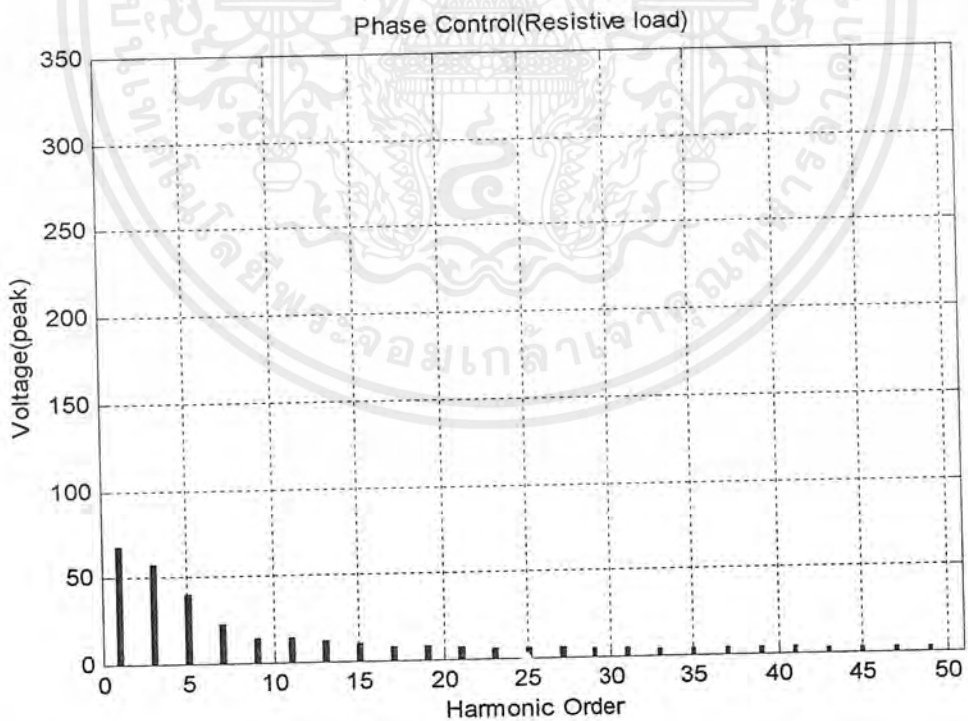


รูปที่ 6.17 แสดงสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมโหลดเมื่อมุมทริก ( $\psi$ ) =  $18\pi/25$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

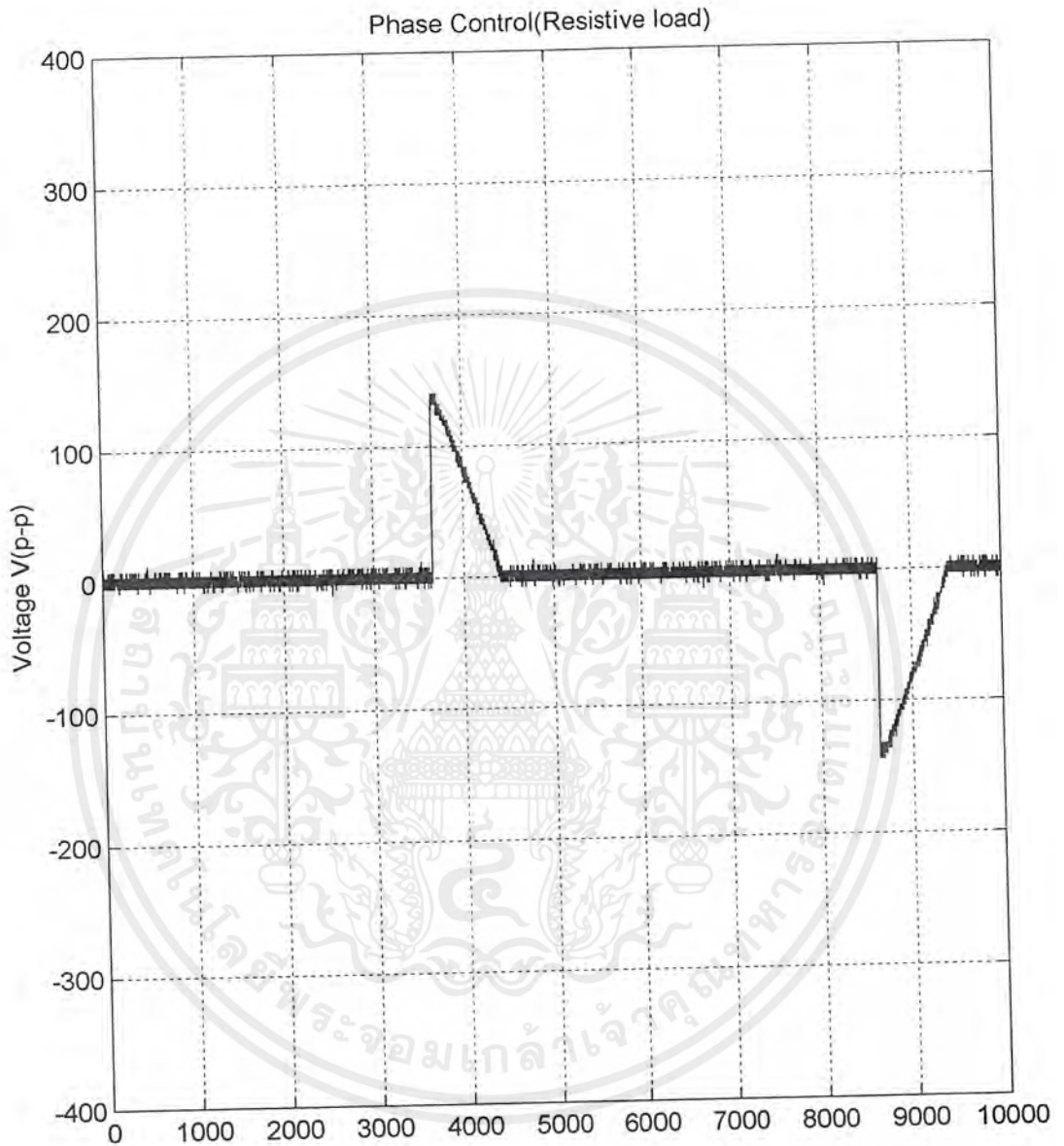


รูปที่ 6.18 กราฟการทดลองหา Amplitude Voltage ที่ลำดับฮาร์โมนิกส์ต่างๆเมื่อ  $\psi=18\pi/25$



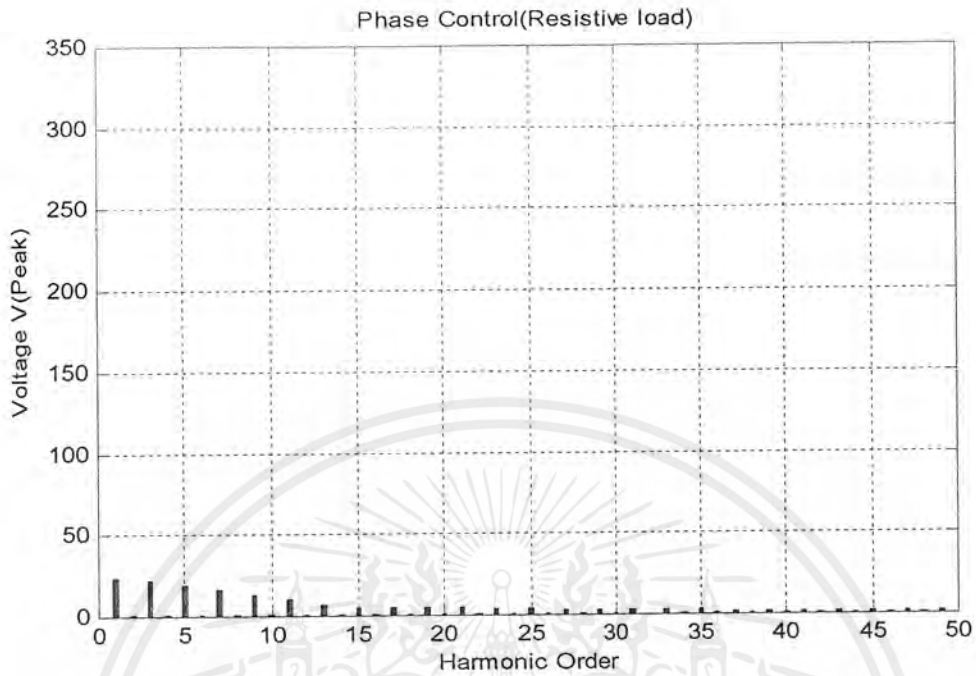
รูปที่ 6.19 กราฟ Simulation หา Amplitude Voltage ที่ลำดับฮาร์โมนิกส์ต่างๆเมื่อ  $\psi=18\pi/25$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

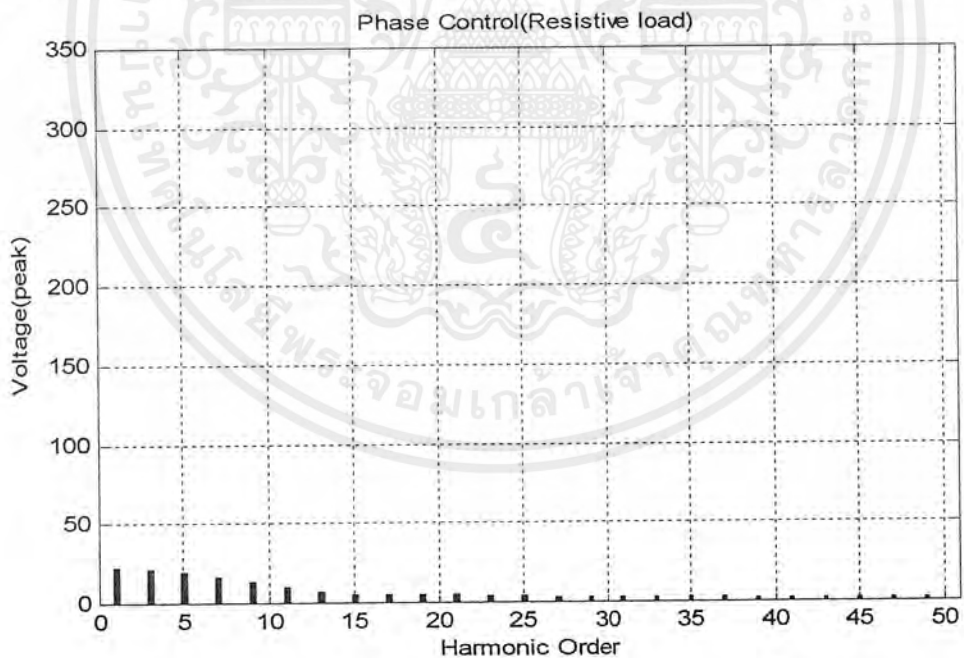


รูปที่ 6.20 แสดงสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อม โหลดเมื่อมุมทริก ( $\psi$ ) =  $21\pi/25$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

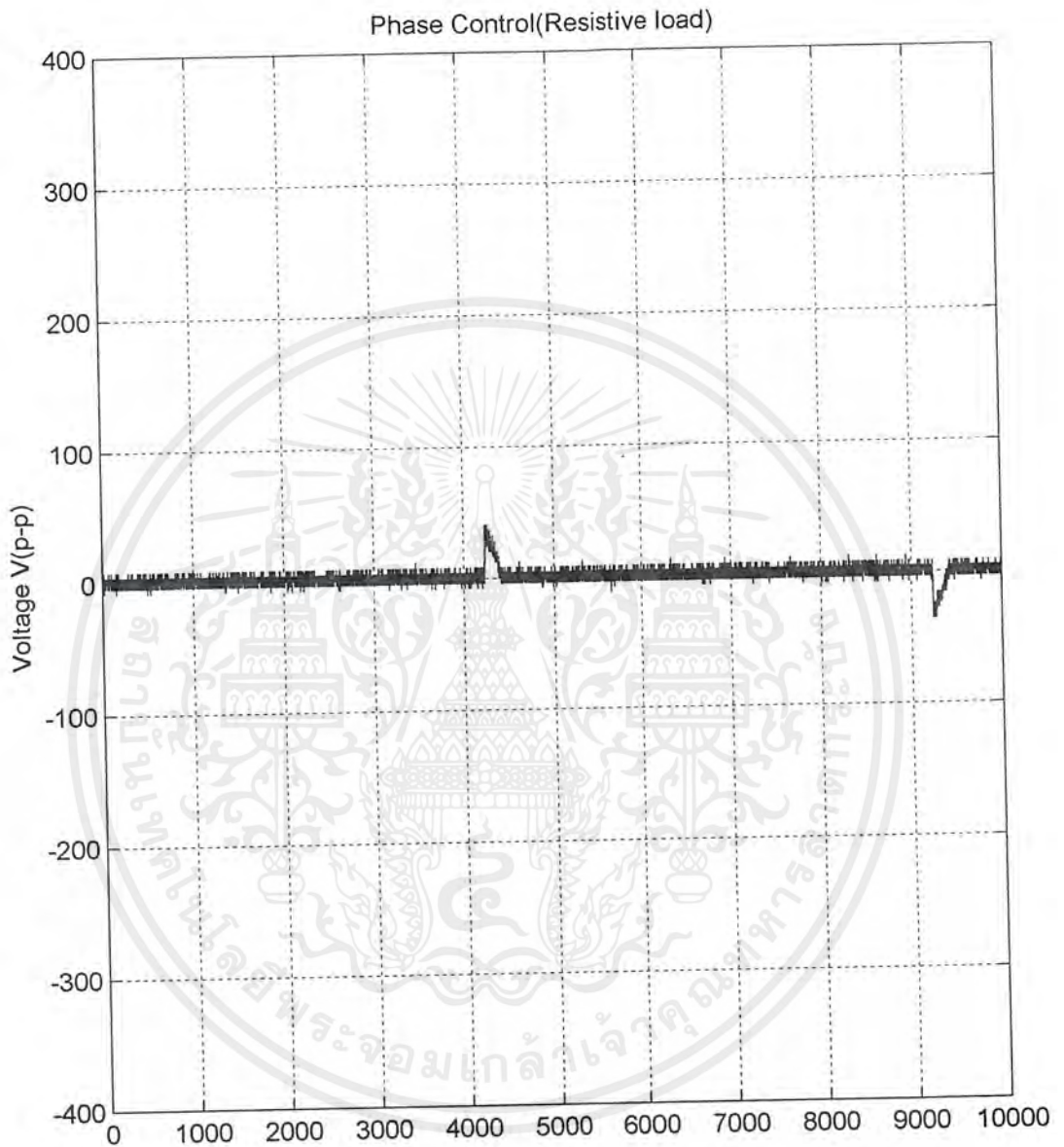


รูปที่ 6.21 กราฟการทดลองหา Amplitude Voltage ที่ลำดับฮาร์โมนิกส์ต่างๆเมื่อ  $\psi=21\pi/25$



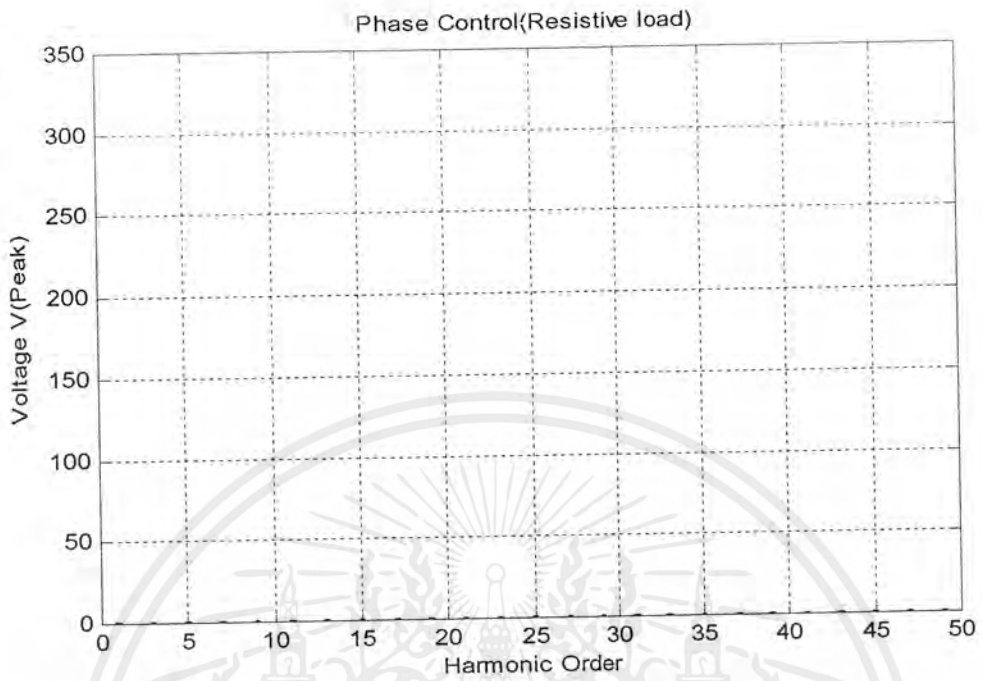
รูปที่ 6.22 กราฟ Simulation หา Amplitude Voltage ที่ลำดับฮาร์โมนิกส์ต่างๆเมื่อ  $\psi=21\pi/25$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

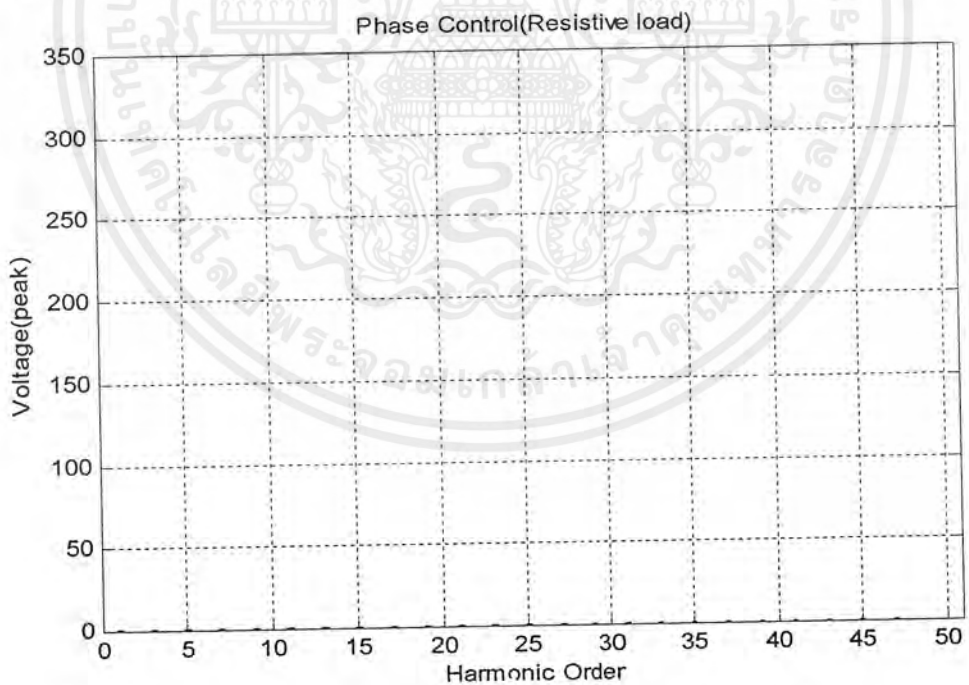


รูปที่ 6.23 แสดงสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อม โหลดเมื่อมุมทริก ( $\psi$ )= $24\pi/25$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



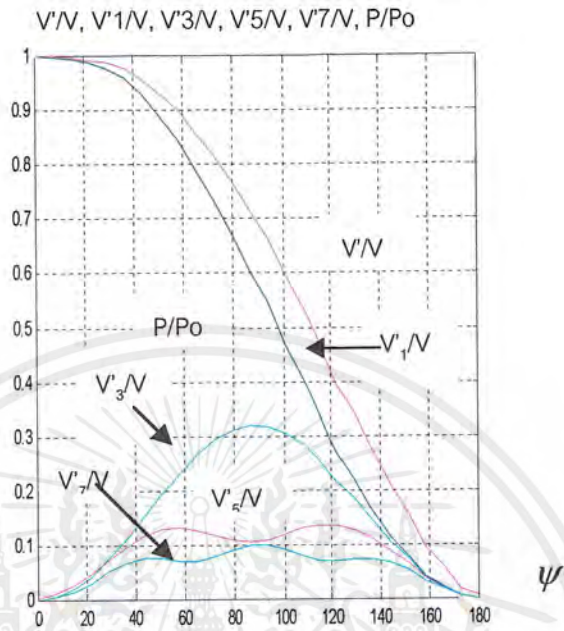
รูปที่ 6.24 กราฟการทดลองหา Amplitude Voltage ที่ลำดับฮาร์โมนิกส์ต่างๆเมื่อ  $\psi=24\pi/25$



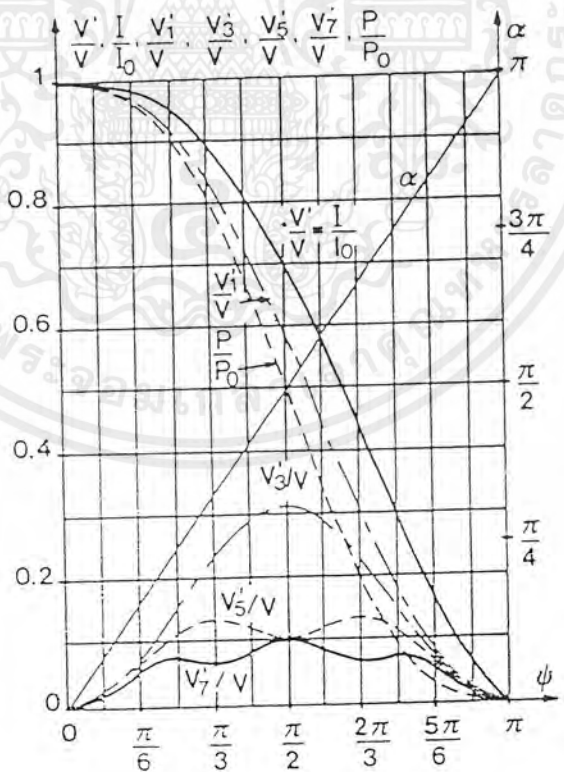
รูปที่ 6.25 กราฟ Simulation ท1 Amplitude Voltage ที่ลำดับฮาร์โมนิกส์ต่างๆเมื่อ  $\psi=24\pi/25$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1.3 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันที่ลำดับฮาร์โมนิกหลักและมุมทริก



รูปที่ 6.26 กราฟการทดลองคุณสมบัติของแรงดันที่ฮาร์โมนิกส์ต่างๆ



รูปที่ 6.27 กราฟ Simulation คุณสมบัติของแรงดันที่ฮาร์โมนิกส์ต่างๆ

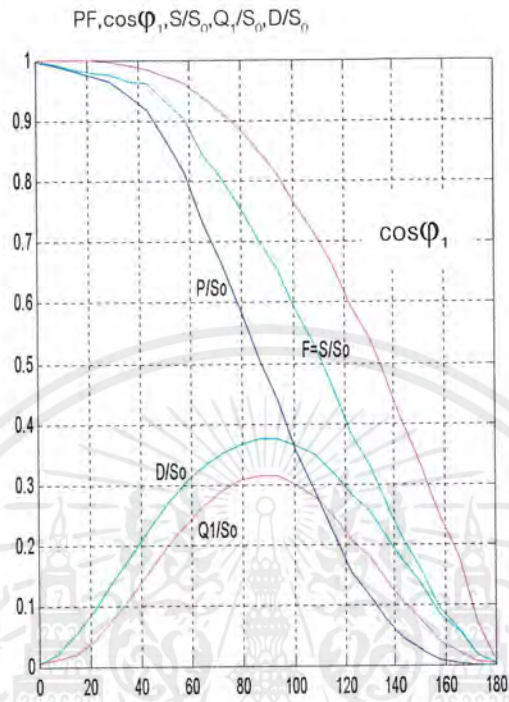
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.1 แสดงค่าแรงดันที่ได้การทดลองที่มุมพริกต่างๆ

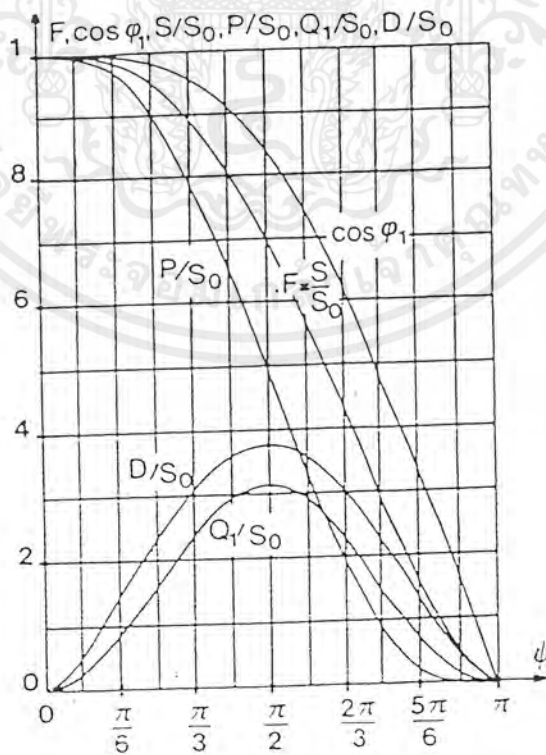
ลำดับที่	มุมพริก( $\psi$ )	V'1/V	V'3/V	V'5/V	V'7/V	V'/V
1	0	0.9986	0.0007	0.0016	0.0004	1
2	7.2	0.9982	0.0722	0.0082	0.006	0.9985
3	14.4	0.9942	0.0201	0.0259	0.0151	0.9958
4	21.6	0.9878	0.0411	0.0475	0.0306	0.9909
5	28.8	0.977	0.0756	0.0741	0.0521	0.9872
6	36	0.9582	0.1118	0.0978	0.0677	0.976
7	43.2	0.9277	0.1523	0.11669	0.0769	0.9558
8	50.4	0.8879	0.1936	0.12846	0.0771	0.9284
9	57.6	0.8449	0.2326	0.13157	0.0694	0.8985
10	64.8	0.7871	0.2679	0.1264	0.0692	0.8556
11	72	0.7346	0.2935	0.1185	0.0792	0.8172
12	79.2	0.6701	0.3101	0.1091	0.0912	0.7663
13	86.4	0.5468	0.3189	0.10547	0.0998	0.7136
14	93.6	0.6039	0.317	0.10932	0.1004	0.6659
15	100.8	0.4684	0.3033	0.1214	0.0904	0.5971
16	108	0.4047	0.2831	0.131	0.0785	0.5371
17	115.2	0.3393	0.254	0.1362	0.0701	0.4713
18	122.4	0.2659	0.2142	0.1343	0.0696	0.3932
19	129.6	0.2176	0.1836	0.1271	0.0725	0.339
20	136.8	0.1651	0.1451	0.1115	0.0733	0.2752
21	144	0.115	0.1061	0.0888	0.0673	0.2099
22	151.2	0.07625	0.0722	0.0642	0.0537	0.1534
23	158.4	0.03969	0.0383	0.0367	0.0335	0.0936
24	165.6	0.0221	0.0221	0.0212	0.0205	0.0604
25	172.8	0.0046	0.0044	0.0047	0.0046	0.0188
26	180	0.0008	0.0006	0.0002	0.0003	0.0046

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6.1.4 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าที่มุมทริกต่างๆ



รูปที่ 6.28 กราฟการทดลองหาค่ากำลังไฟฟ้าที่มุมทริกต่างๆ



รูปที่ 6.29 กราฟ Simulation หาค่ากำลังไฟฟ้าที่มุมทริกต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

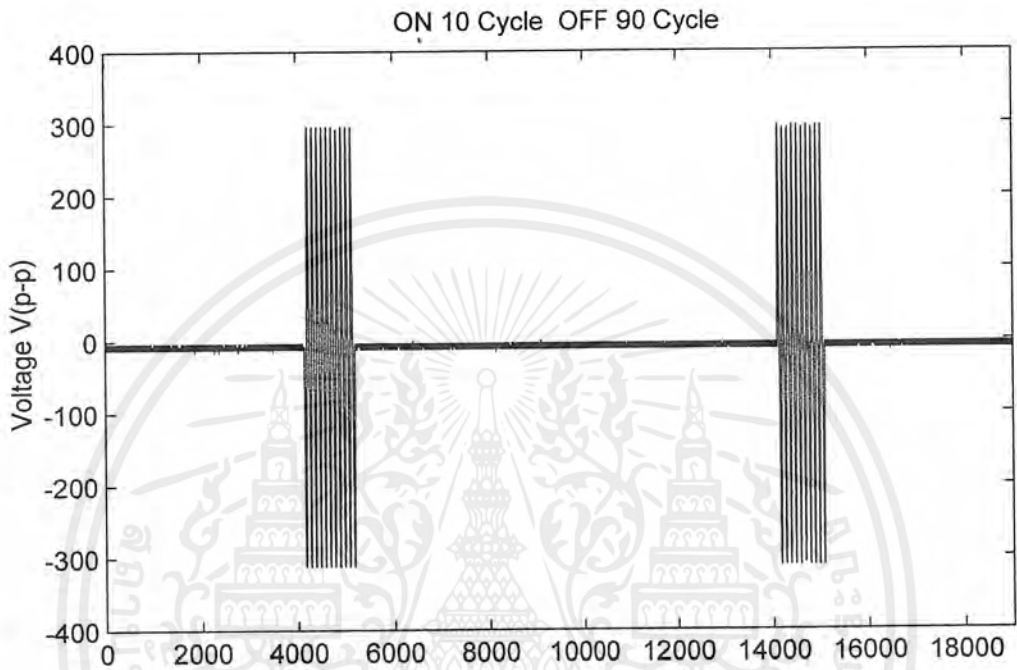
ตารางที่ 6.2 แสดงค่ากำลังไฟฟ้าที่มุมทริกต่าง ๆ

ลำดับที่	มุมทริก ( $\Psi$ )	P (watt)	S (VA)	D (Var)	$Q_1$ (Var)	$\cos\phi_1$
1	0	96.8658	96.8666	0.201	0.215	1
2	7.2	96.5522	96.585	0.2468	0.562	0.9998
3	14.4	95.2332	95.4045	5.3827	1.9198	0.9998
4	21.6	94.3063	94.8318	8.958	4.3761	0.9989
5	28.8	93.2698	94.564	3.4993	7.8008	0.9965
6	36	91.0698	93.4644	17.7802	12.2143	0.9925
7	43.2	88.9959	92.9987	22.2738	15.2434	0.9856
8	50.4	84.1644	90.2149	26.2233	19.6682	0.975
9	57.6	78.9537	80.3073	29.5734	22.6781	0.9611
10	64.8	70.7342	81.8319	32.0323	25.8277	0.9393
11	72	64.305	78.0569	34.1065	28.1867	0.9159
12	79.2	56.8269	73.2425	35.383	29.7187	0.8861
13	86.4	49.0712	68.1852	36.2286	30.4671	0.8495
14	93.6	42.6089	63.644	36.2551	30.3415	0.8646
15	100.8	34.2403	57.0996	35.3387	28.9679	0.7634
16	108	27.6892	51.347	33.7074	27.0856	0.7148
17	115.2	21.5234	44.499	31.0481	24.0787	0.6664
18	122.4	15.0328	37.288	27.457	20.2616	0.5958
19	129.6	11.1997	32.0884	24.5815	17.3201	0.543
20	136.8	7.4147	26.03	20.815	13.7585	0.4744
21	144	4.3218	18.8369	16.5656	10.0202	0.3961
22	151.2	2.2831	14.4615	12.5669	6.7821	0.319
23	158.4	0.8786	8.8238	7.9868	3.6466	0.2342
24	165.6	0.3694	5.7794	5.3763	2.0882	0.1742
25	172.8	0.0307	1.7917	1.7275	0.4743	0.0646
26	180	0.0209	0.2821	0.1784	0.221	0.021

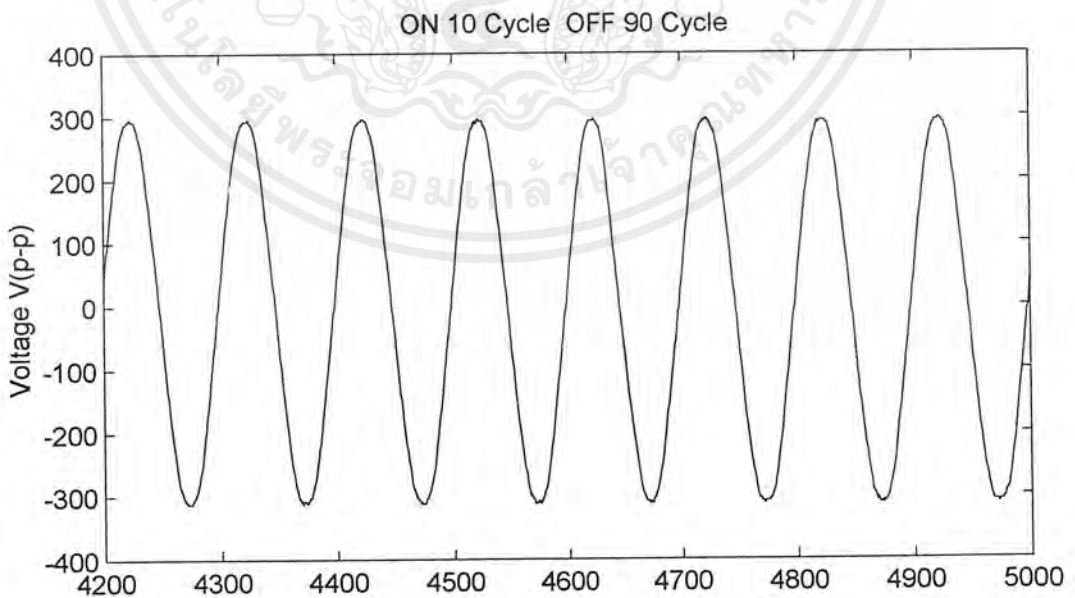
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 6.2 ผลการทดลองการควบคุมกำลังไฟฟ้ากระแสสลับแบบอินทิกรัลไซเคิลคอนโทรล

### 6.2.1 ผลของฮาร์โมนิกส์ในการควบคุมกำลังไฟฟ้า

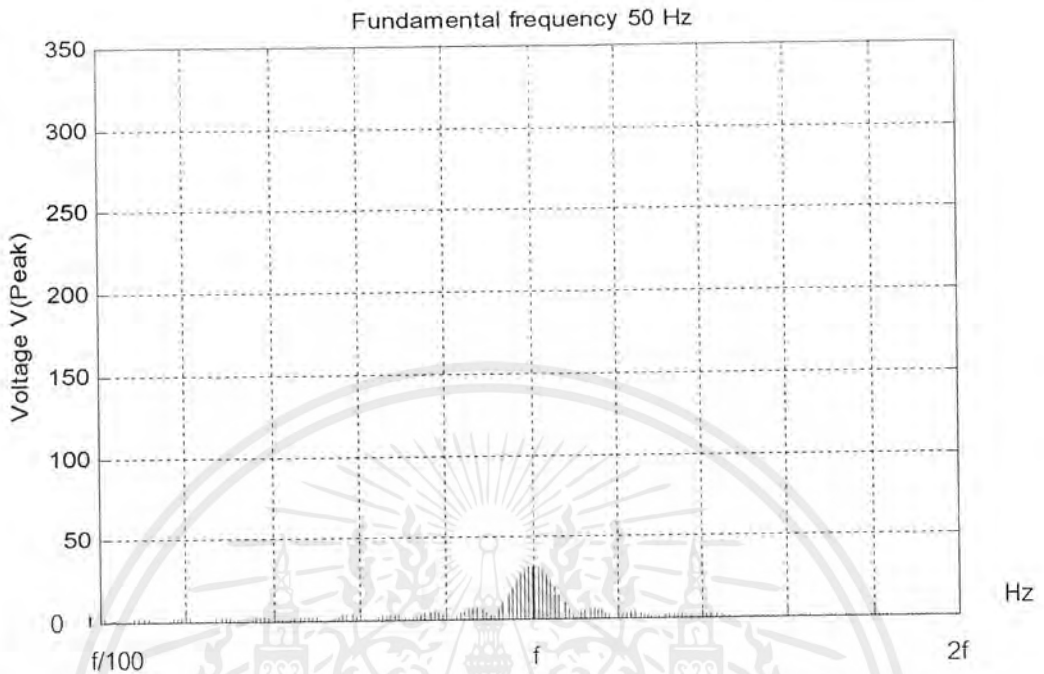


รูปที่ 6.30 แสดงสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมโหลดเมื่อ  $p=10$ ,  $p'=100$

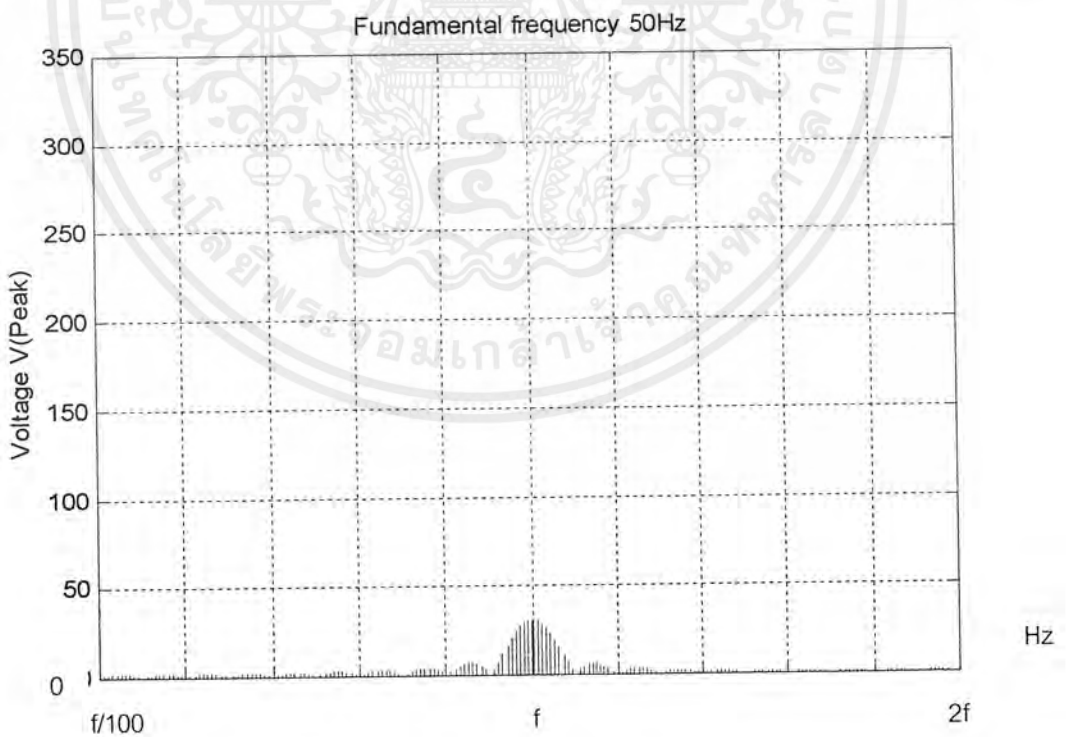


รูปที่ 6.31 แสดงการขยายแรงดันที่ตกคร่อมโหลดเมื่อ  $p=10$ ,  $p'=100$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

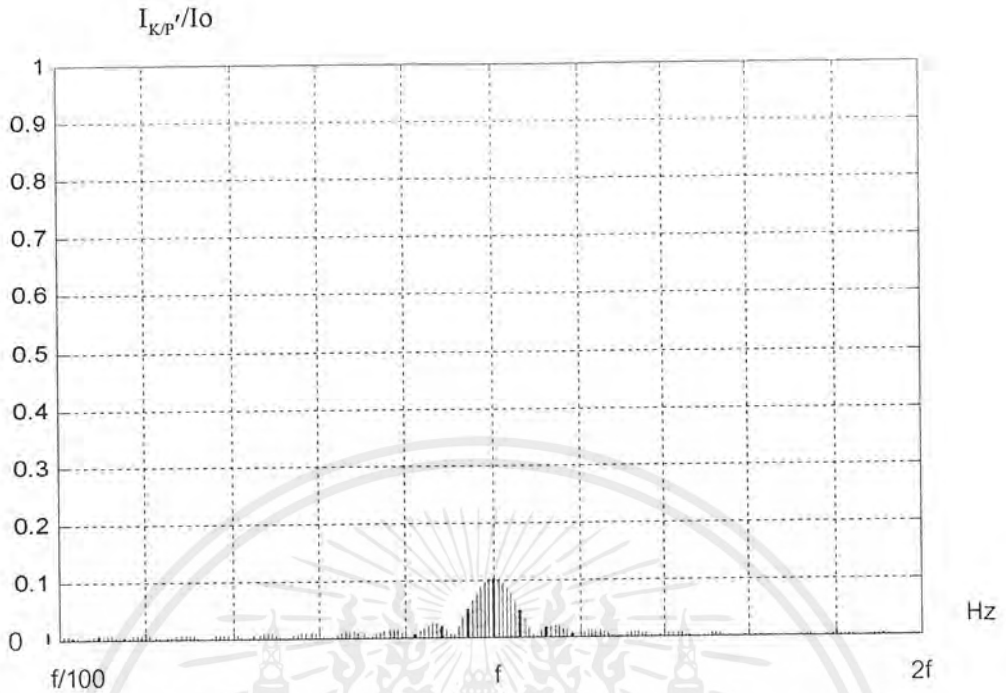


รูปที่ 6.32 กราฟทดสอบหา Amplitude Voltage ที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ต่างๆเมื่อ  $p = 10, p' = 100$

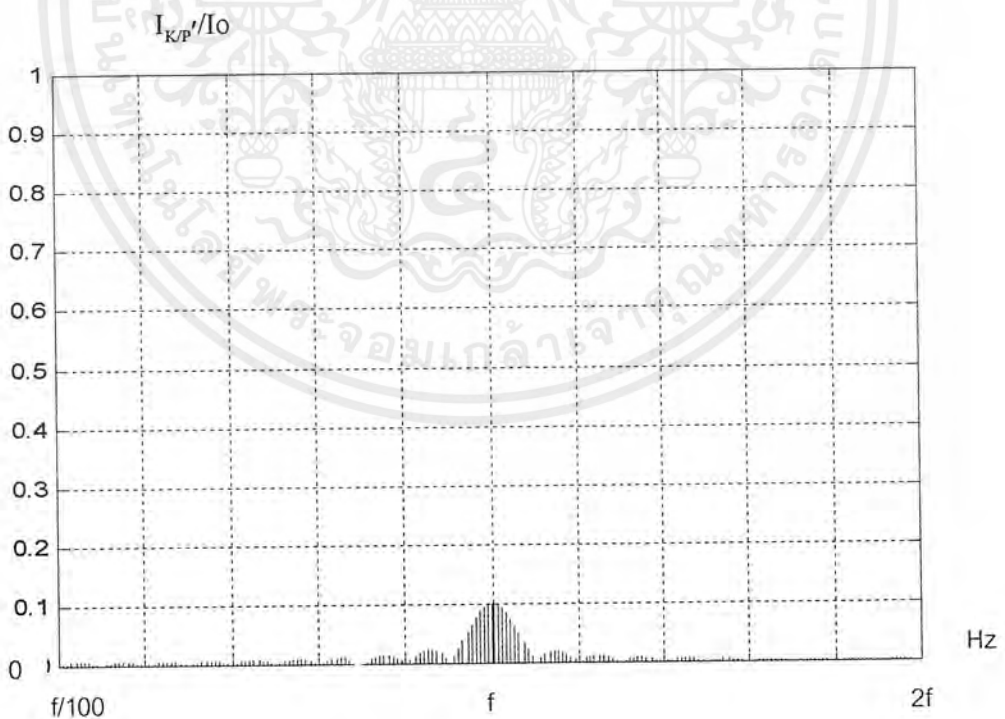


รูปที่ 6.33 กราฟ Simulation หา Amplitude Voltage ที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ต่างๆเมื่อ  $p=10, p'=100$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

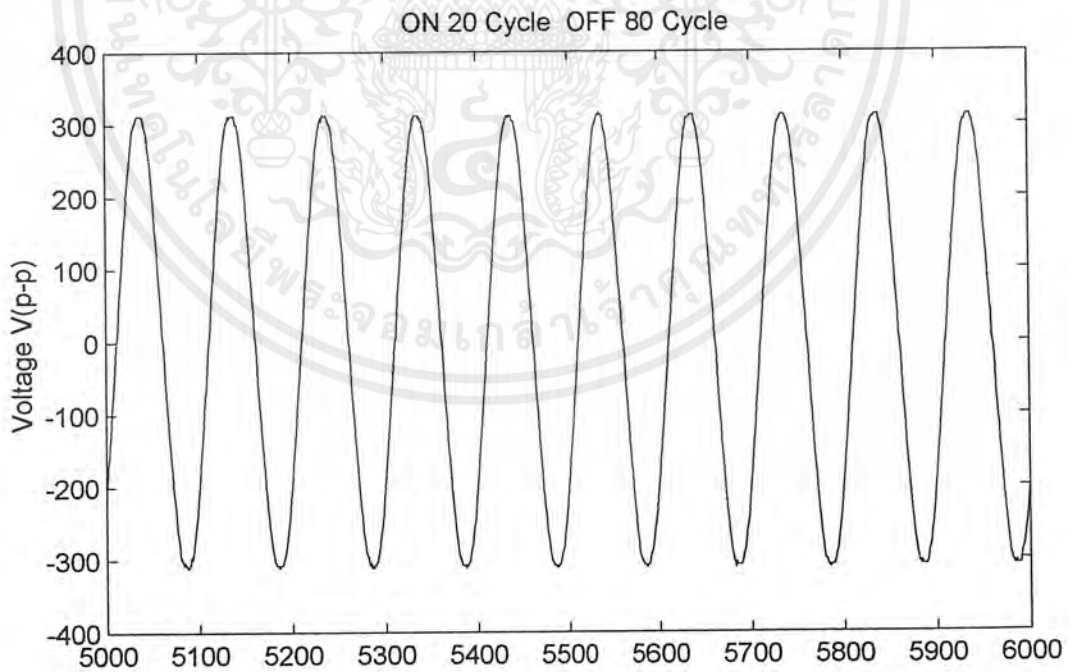
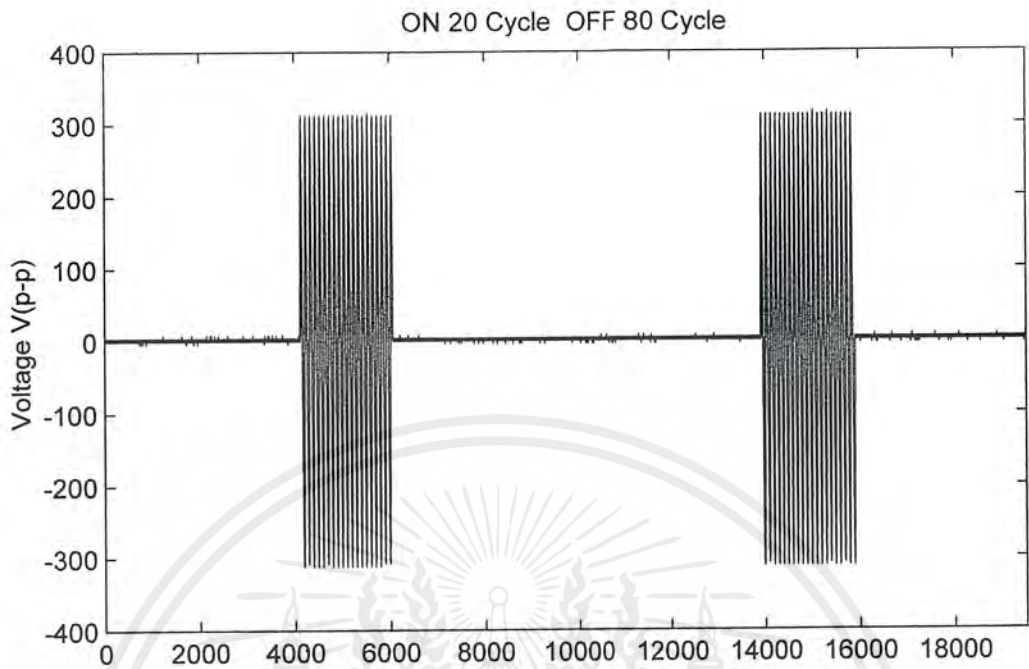


รูปที่ 6.34 กราฟการทดลองคุณลักษณะของกระแสที่ความถี่ต่างๆเมื่อ  $p=10, p'=100$

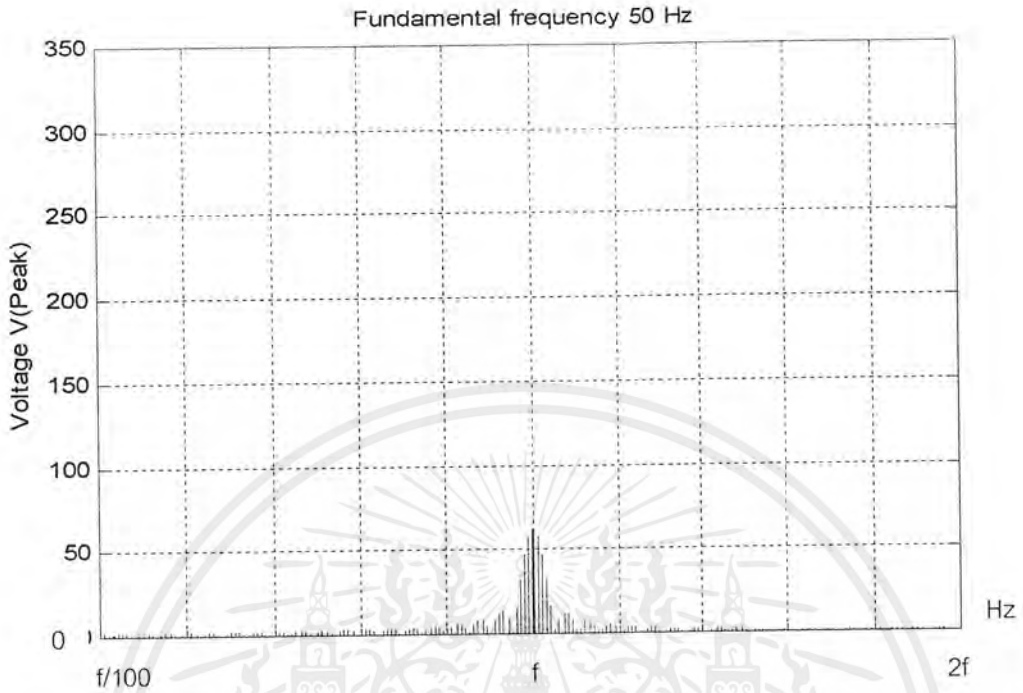


รูปที่ 6.35 กราฟ Simulation คุณลักษณะของกระแสที่ความถี่ต่างๆเมื่อ  $p=10, p'=100$

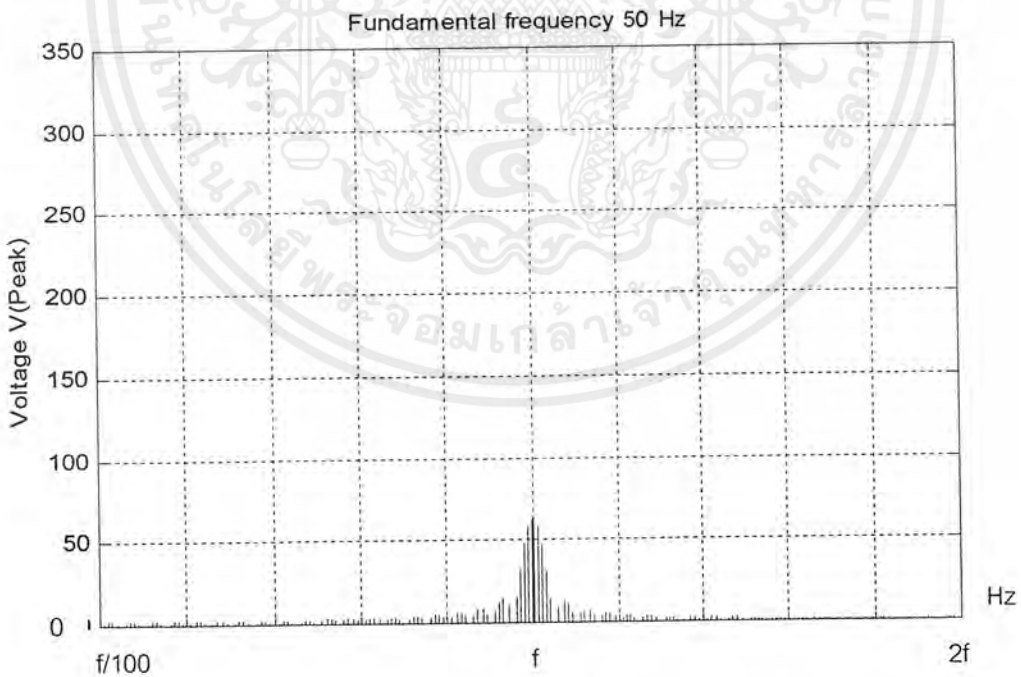
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

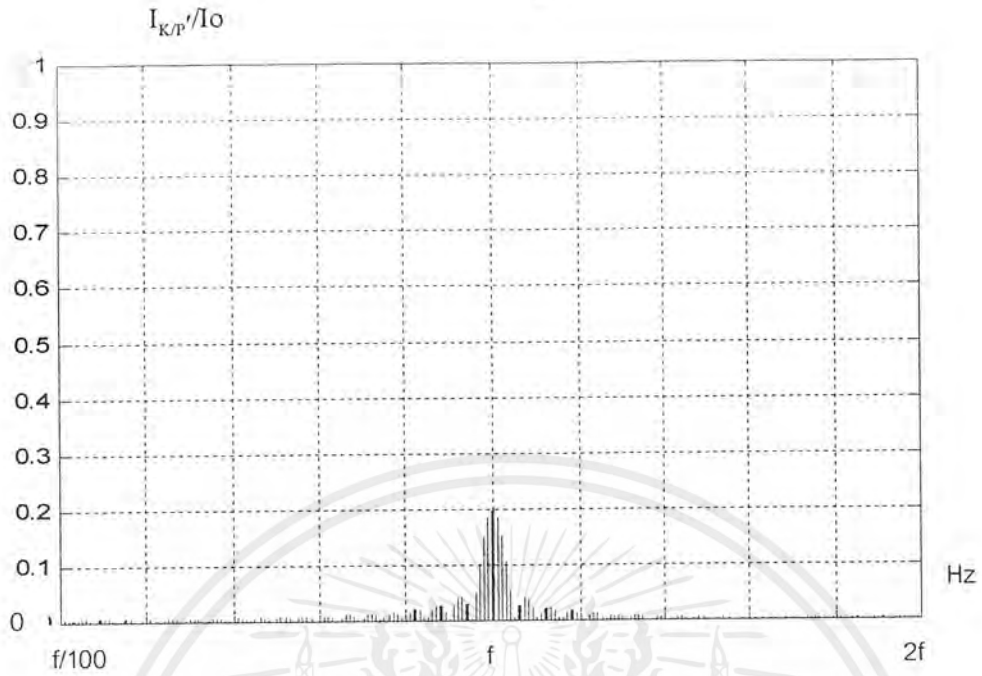


รูปที่ 6.38 กราฟทดลองหา Amplitude Voltage ที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ต่างๆเมื่อ  $p=20$ ,  $p'=100$

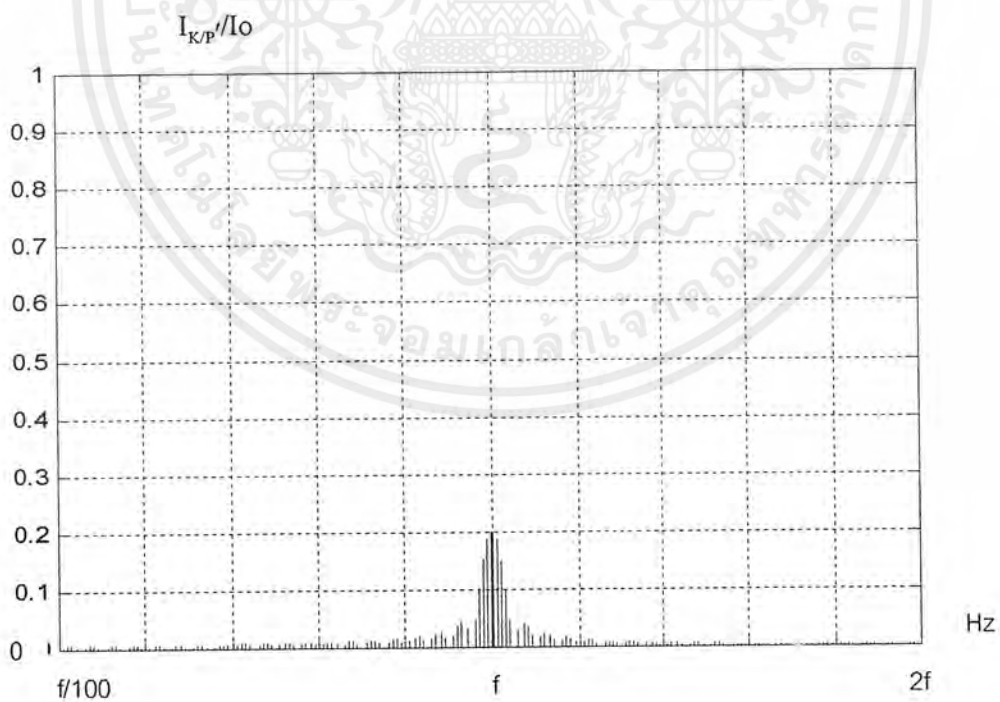


รูปที่ 6.39 กราฟ Simulation หา Amplitude Voltage ที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ต่างๆเมื่อ  $p=20$ ,  $p'=100$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

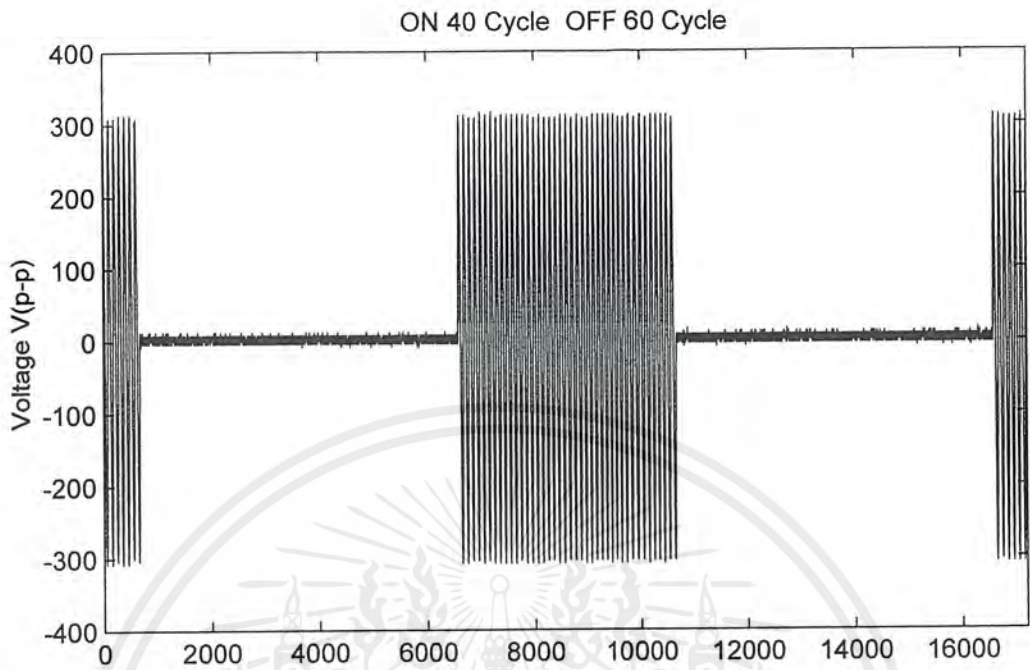


รูปที่ 6.40 กราฟการทดลองคุณลักษณะของกระแสที่ความถี่ต่างๆเมื่อ  $p=20, p'=100$

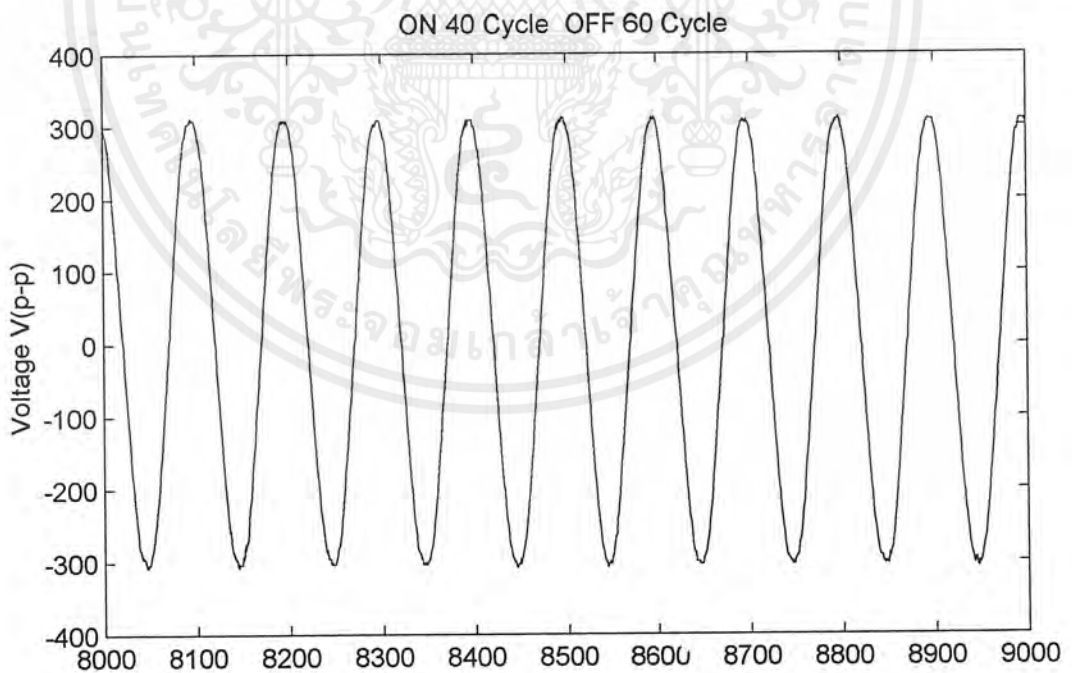


รูปที่ 6.41 กราฟ Simulation คุณลักษณะของกระแสที่ความถี่ต่างๆเมื่อ  $p=20, p'=100$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

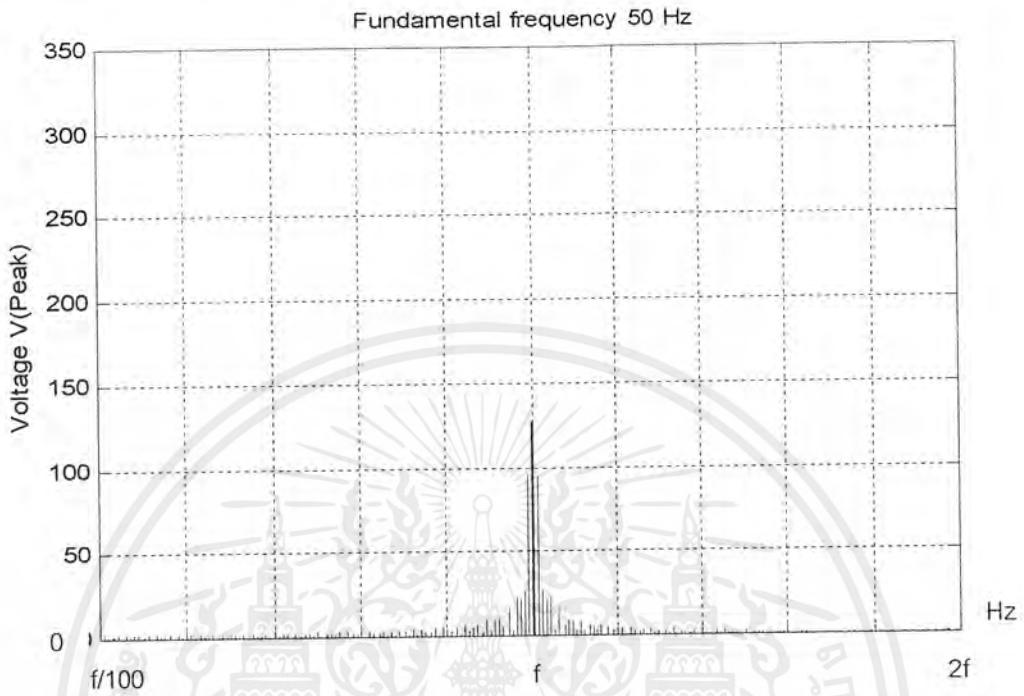


รูปที่ 6.42 แสดงสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมโหลดเมื่อ  $p=40$ ,  $p'=100$

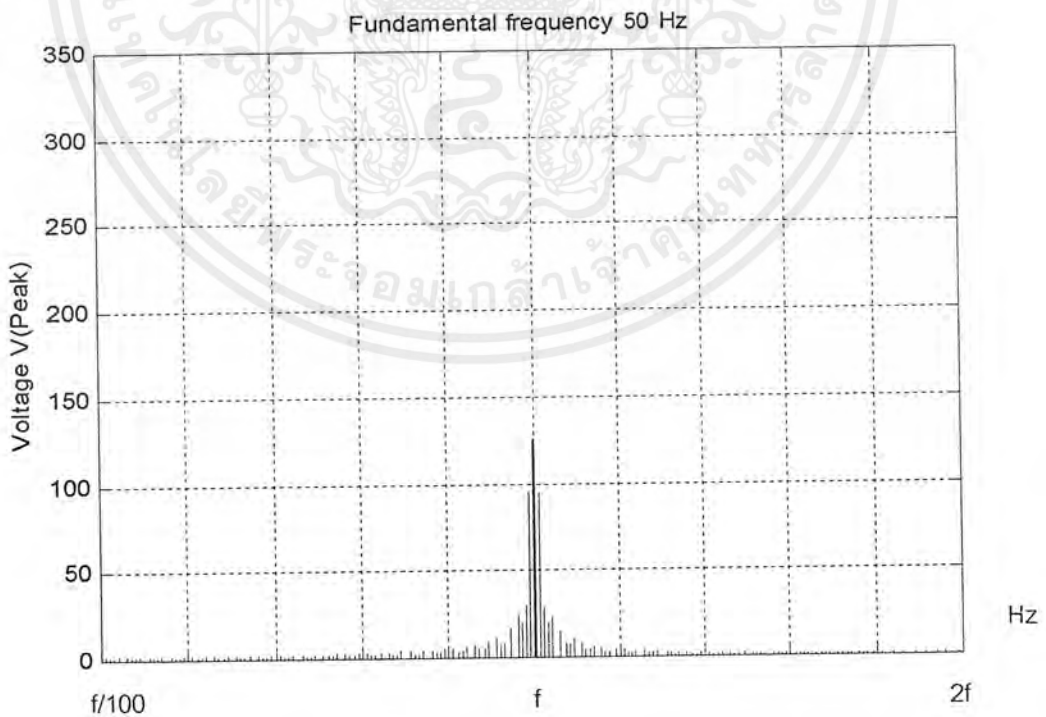


รูปที่ 6.43 แสดงการขยายแรงดันที่ตกคร่อมโหลดเมื่อ  $p=40$ ,  $p'=100$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

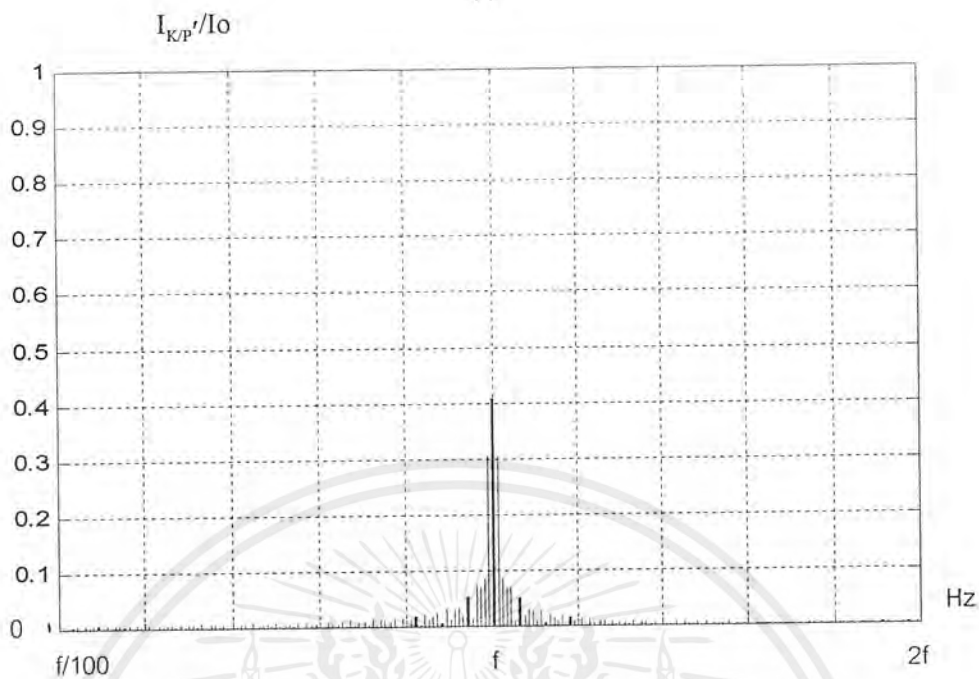


รูปที่ 6.44 กราฟทดลองหา Amplitude Voltage ที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ต่างๆเมื่อ  $p=40$ ,  $p'=100$

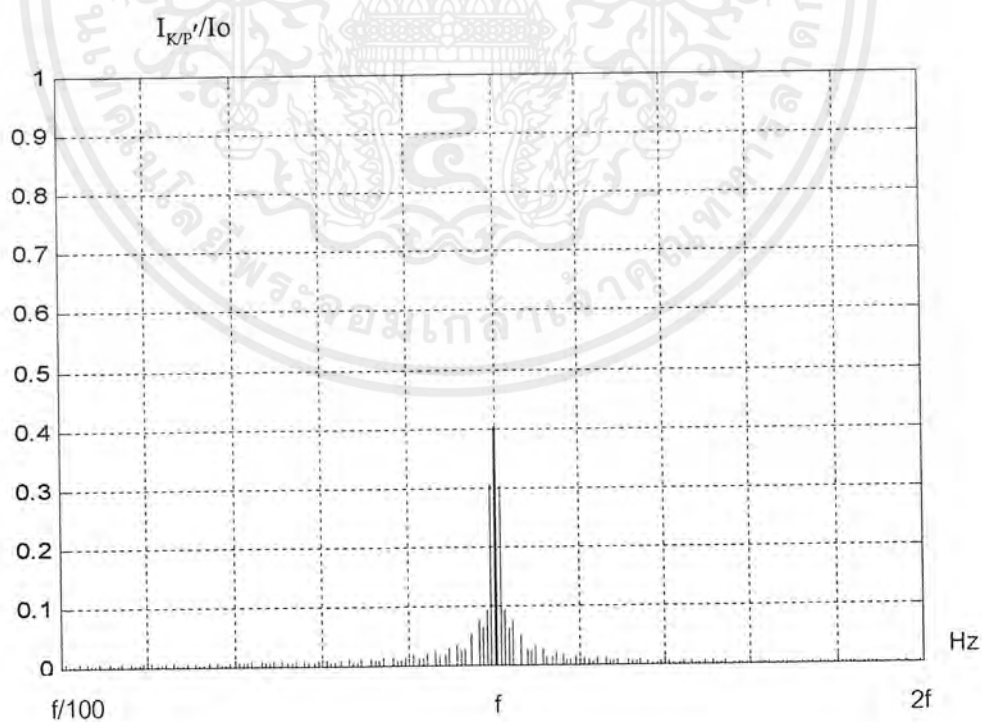


รูปที่ 6.45 กราฟ Simulation หา Amplitude Voltage ที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ต่างๆเมื่อ  $p=40$ ,  $p'=100$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

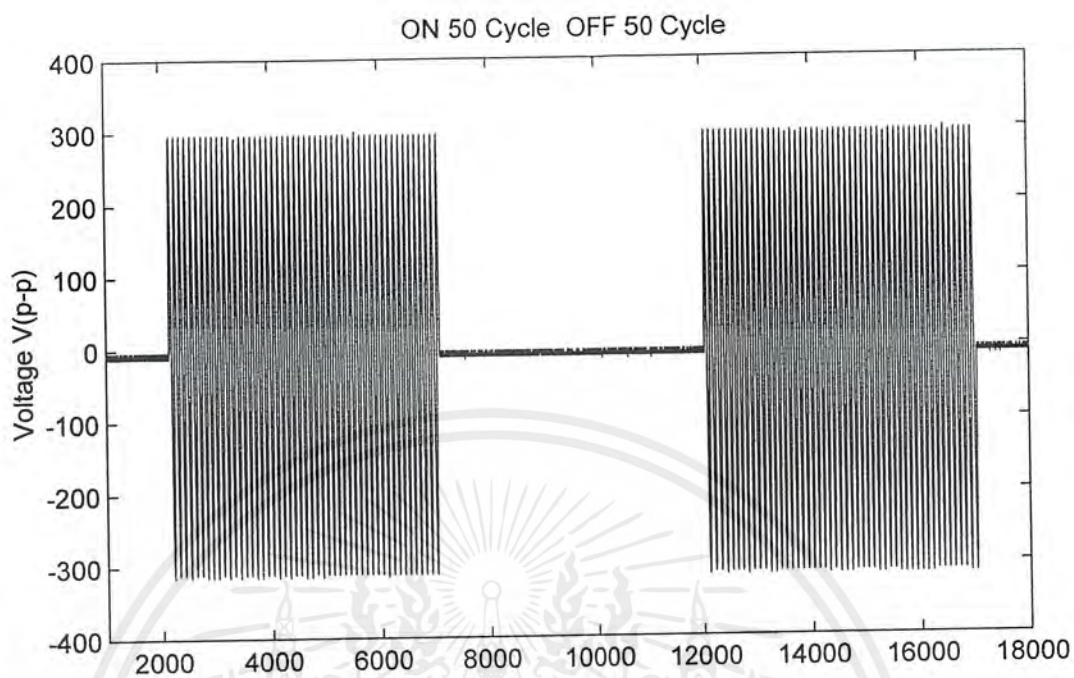


รูปที่ 6.46 กราฟการทดลองหาคุณลักษณะของกระแสที่ความถี่ต่างๆเมื่อ  $p=40, p'=100$

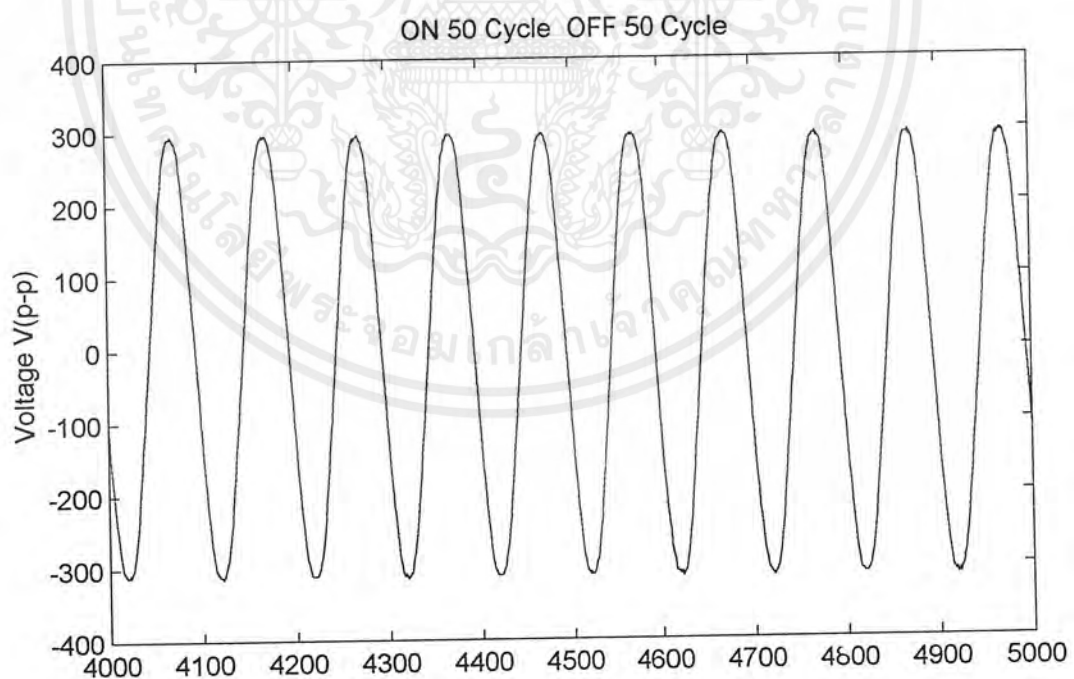


รูปที่ 6.47 กราฟ Simulation คุณลักษณะของกระแสที่ความถี่ต่างๆเมื่อ  $p=40, p'=100$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

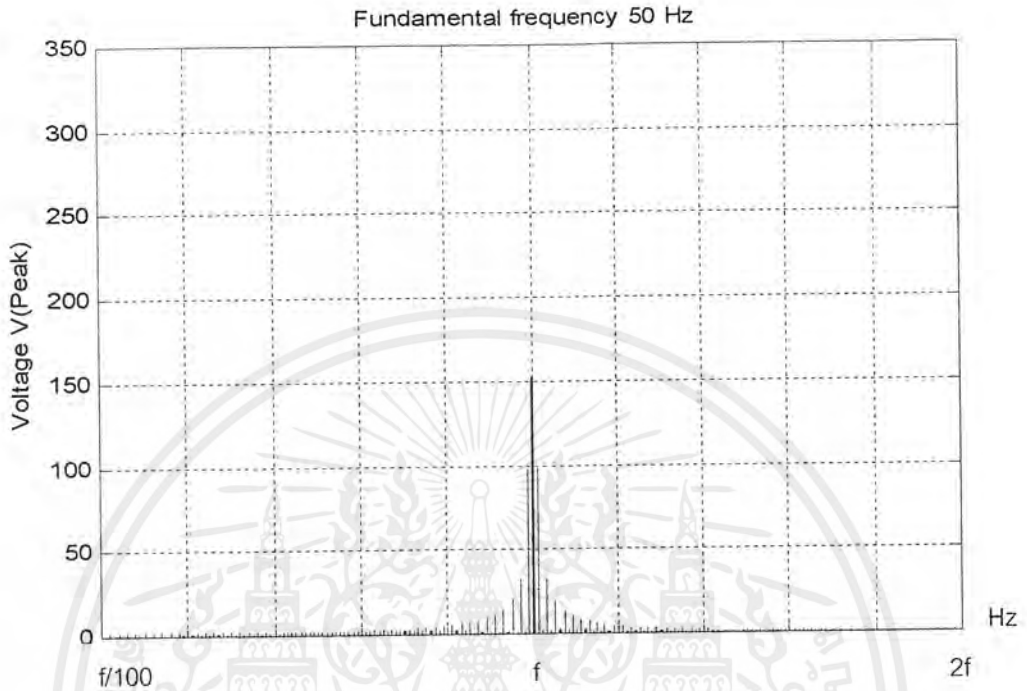


รูปที่ 6.48 แสดงสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมโหลดเมื่อ  $p=50$ ,  $p'=100$

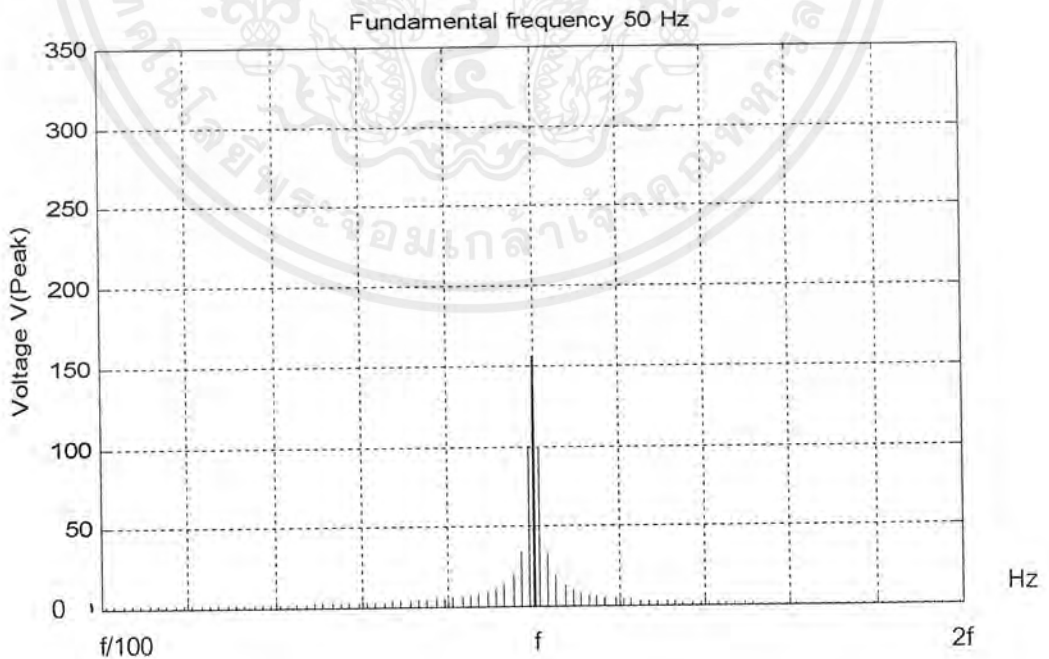


รูปที่ 6.49 แสดงการขยายแรงดันที่ตกคร่อมโหลดเมื่อ  $p=50$ ,  $p'=100$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

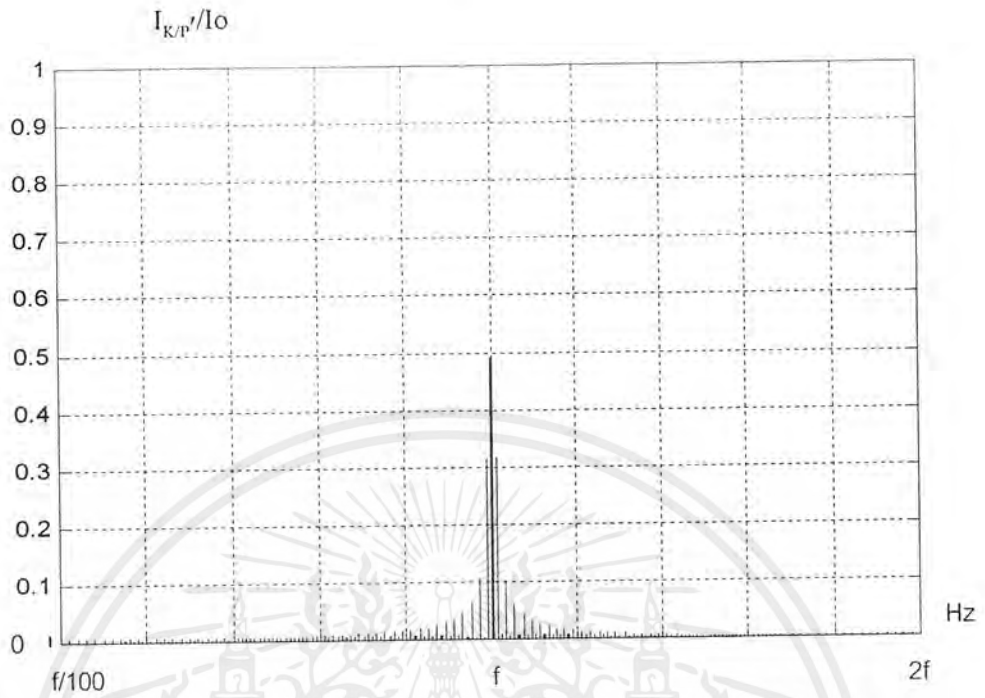


รูปที่ 6.50 กราฟทดลองหา Amplitude Voltage ที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ต่างๆเมื่อ  $p=50, p'=100$

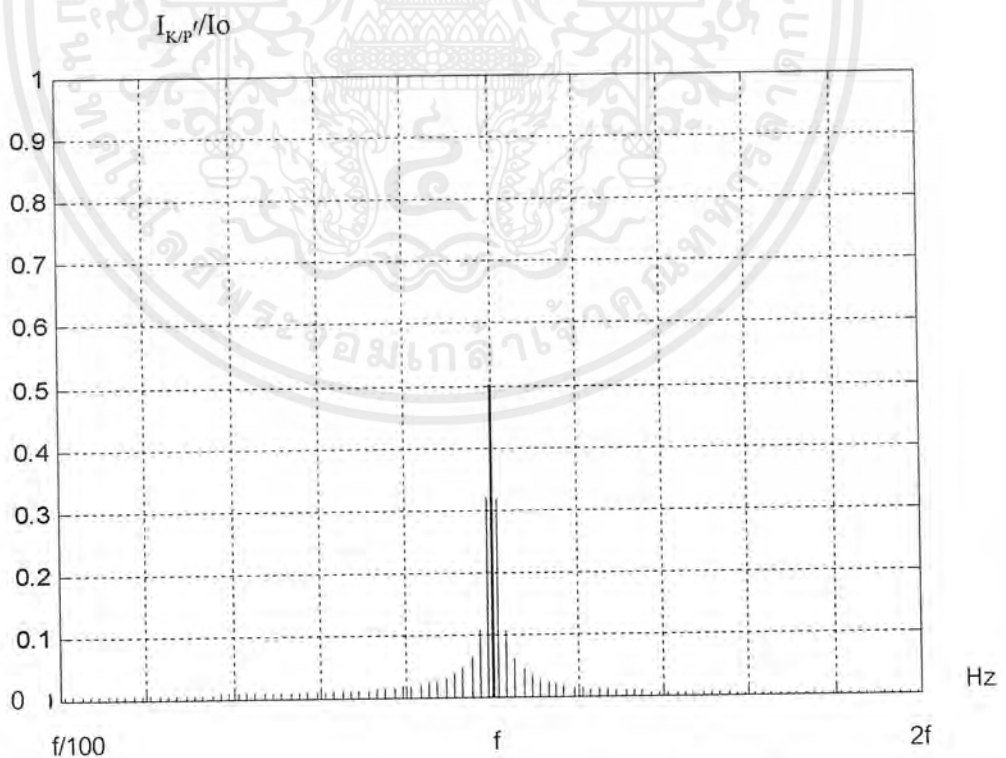


รูปที่ 6.51 กราฟ Simulation หา Amplitude Voltage ที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ต่างๆเมื่อ  $p=50, p'=100$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

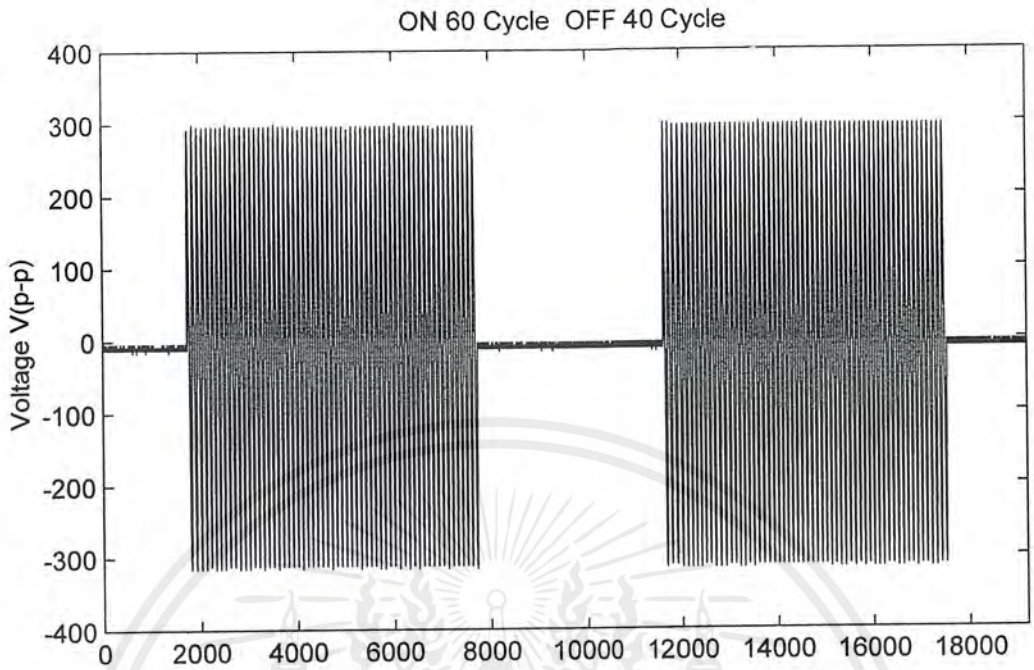


รูปที่ 6.52 กราฟการทดลองหาคุนลักษณะของกระแสที่ความถี่ต่างๆเมื่อ  $p=50, p'=100$

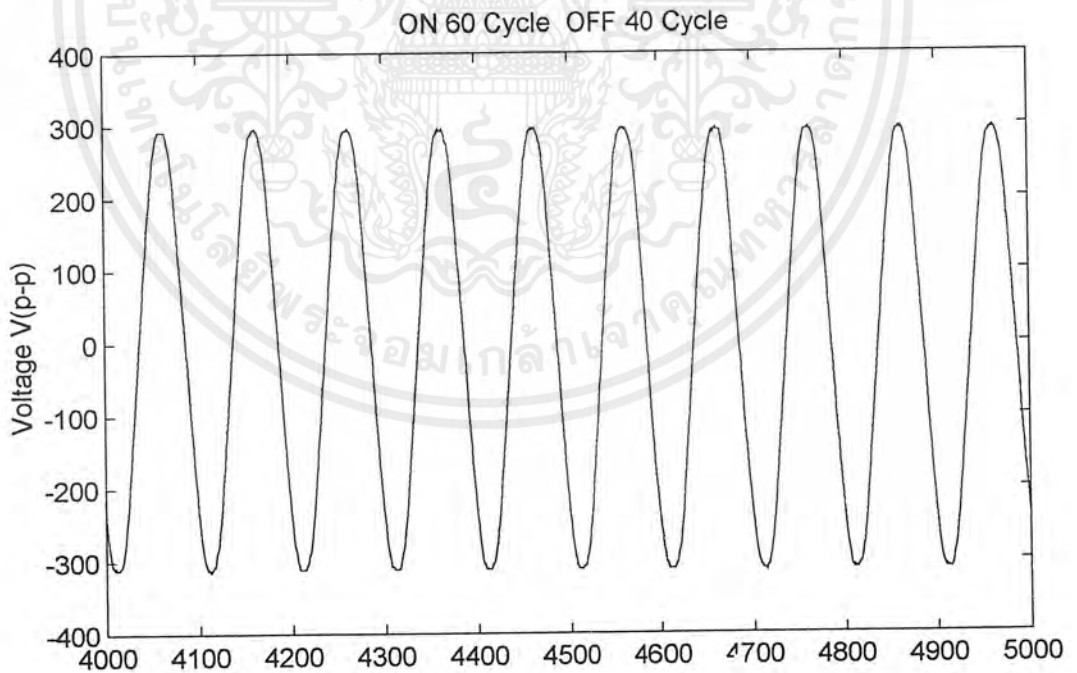


รูปที่ 6.53 กราฟ Simulation คุนลักษณะของกระแสที่ความถี่ต่างๆเมื่อ  $p=50, p'=100$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

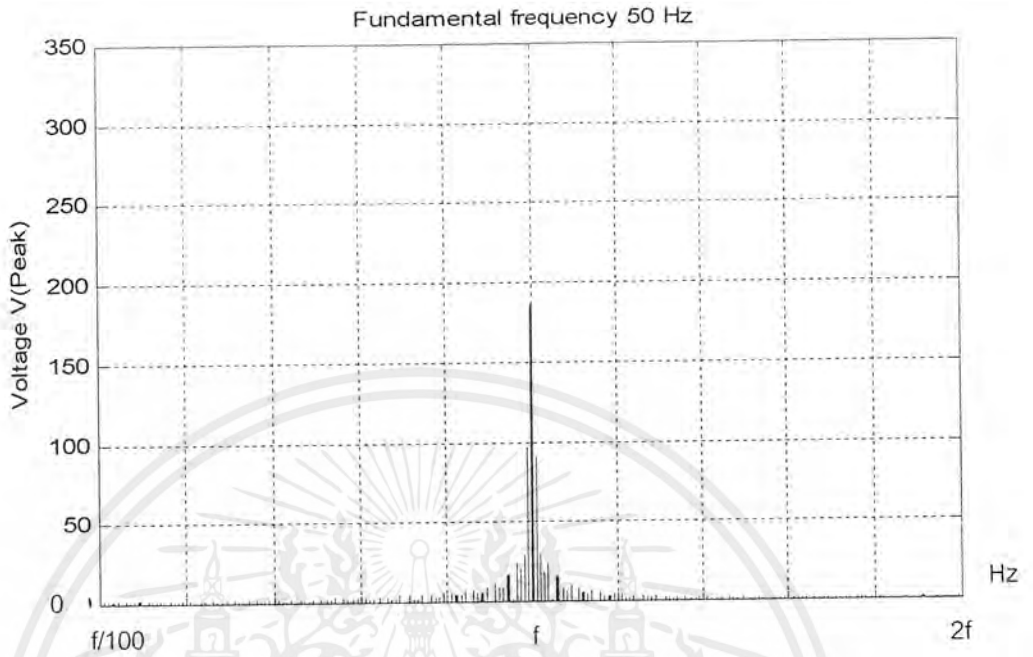


รูปที่ 6.54 แสดงสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อม โหลดเมื่อ  $p=60$ ,  $p'=100$

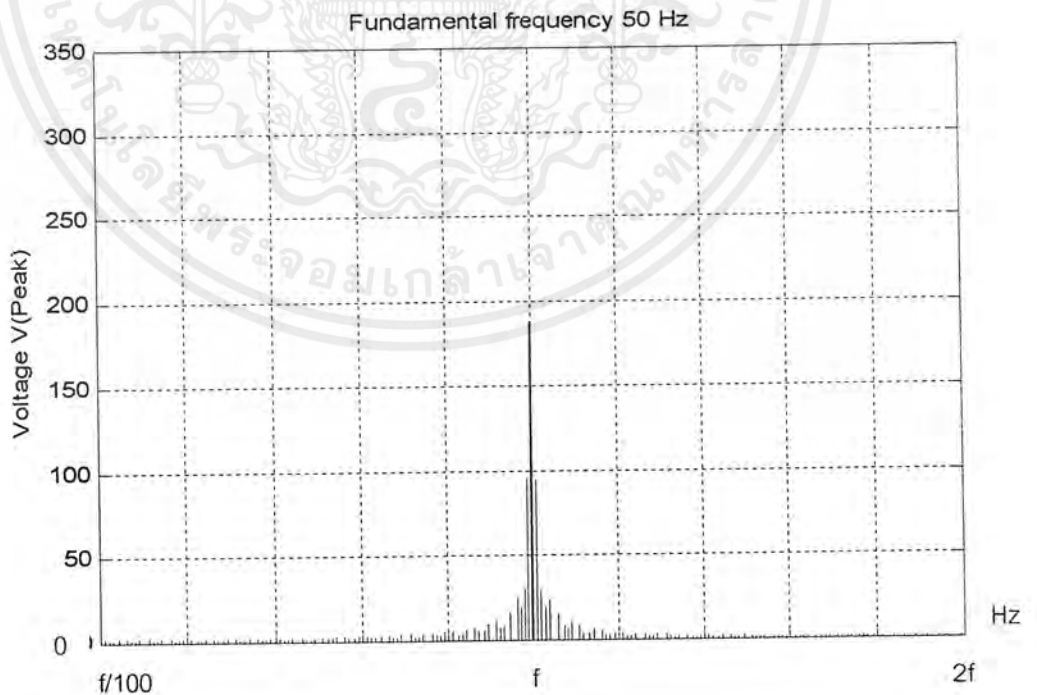


รูปที่ 6.55 แสดงการขยายแรงดันที่ตกคร่อมโหลดเมื่อ  $p=60$ ,  $p'=100$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

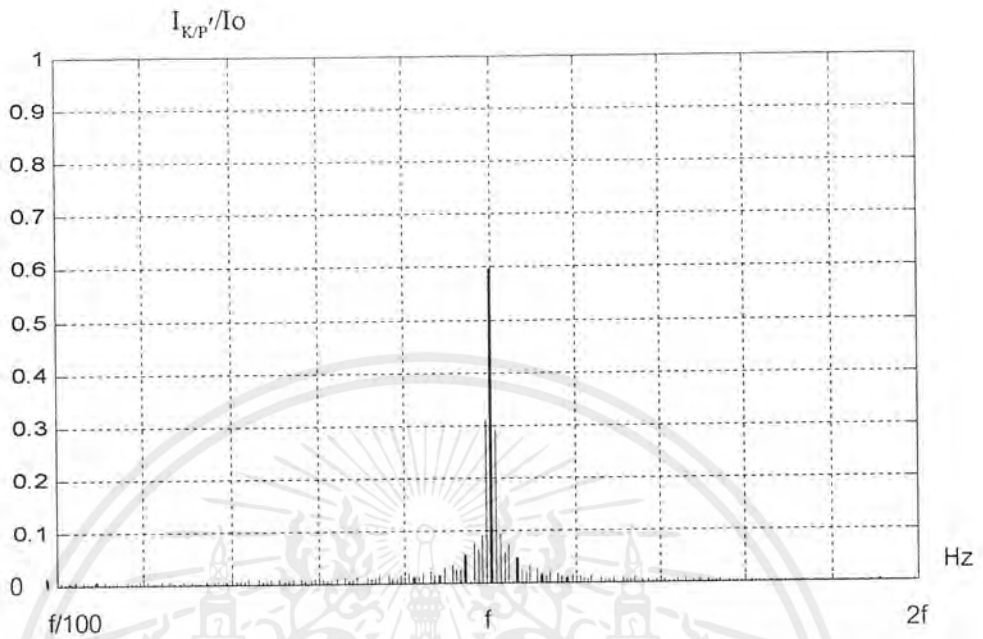


รูปที่ 6.56 กราฟทดลองหา Amplitude Voltage ที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ต่างๆเมื่อ  $p=60$ ,  $p'=100$

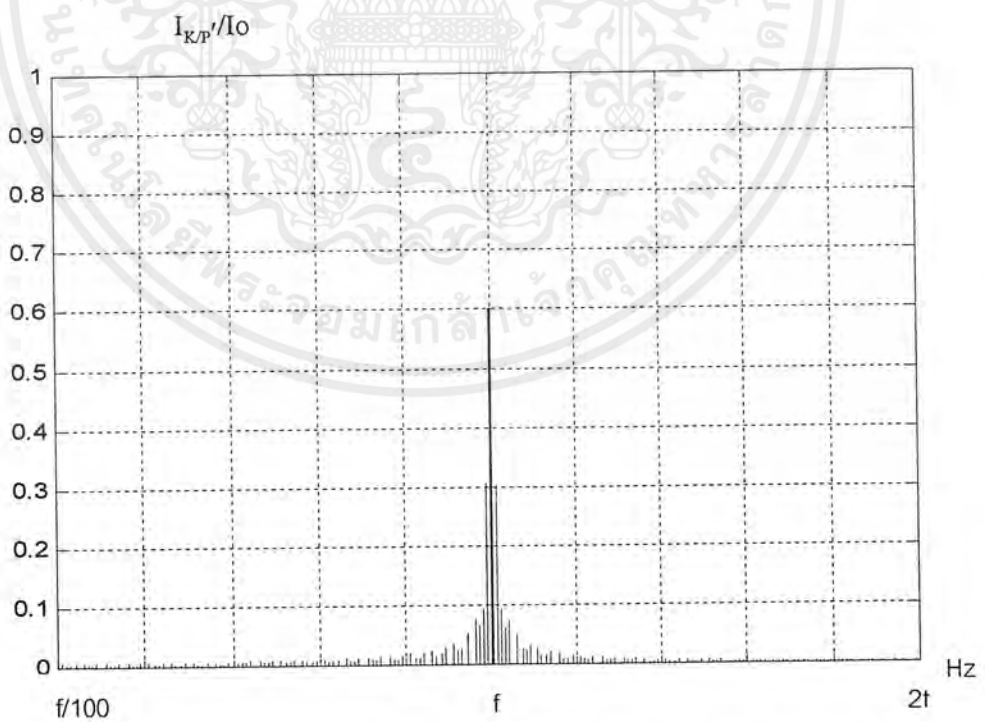


รูปที่ 6.57 กราฟ Simulation หา Amplitude Voltage ที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ต่างๆเมื่อ  $p=60$ ,  $p'=100$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

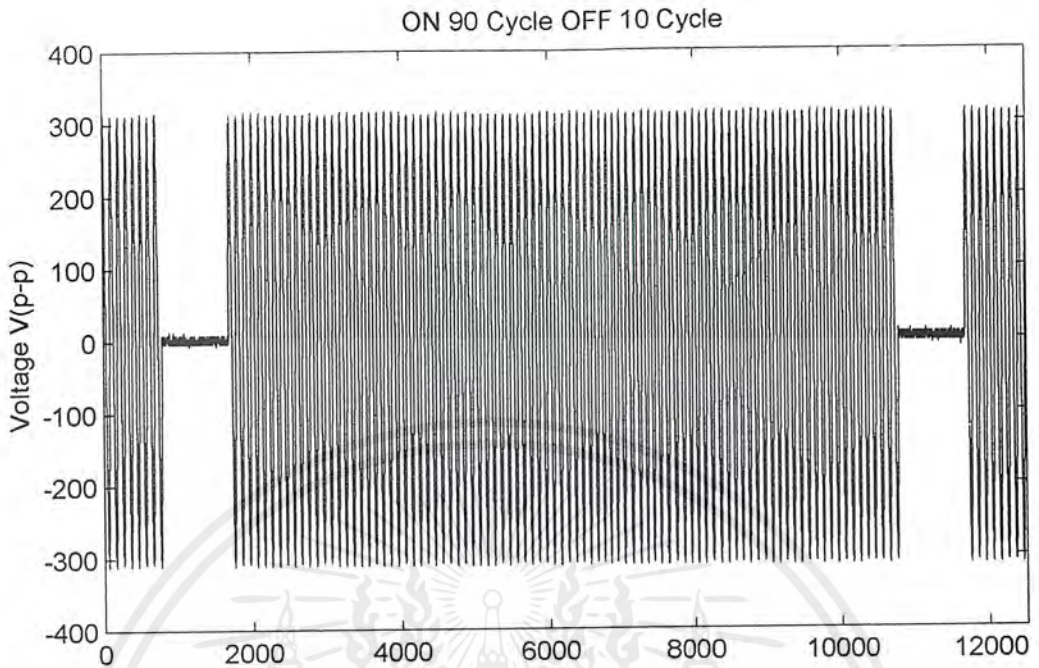


รูปที่ 6.58 กราฟการทดลองหาคุณลักษณะของกระแสที่ความถี่ต่างๆเมื่อ  $p=60, p'=100$

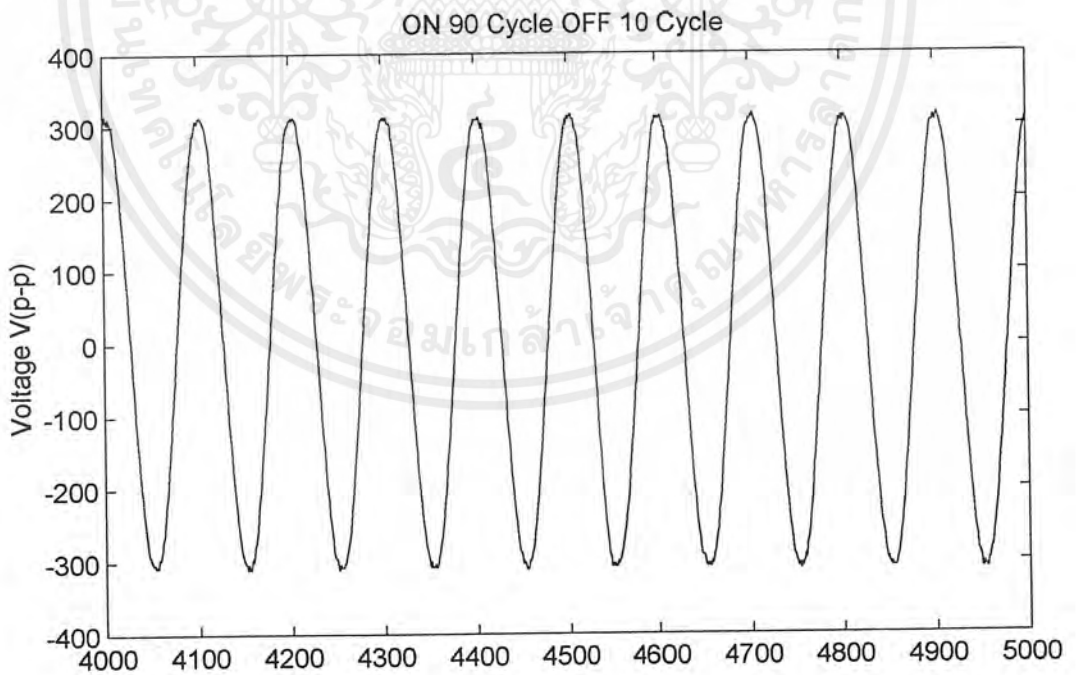


รูปที่ 6.59 กราฟ Simulation คุณลักษณะของกระแสที่ความถี่ต่างๆเมื่อ  $p=50, p'=100$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

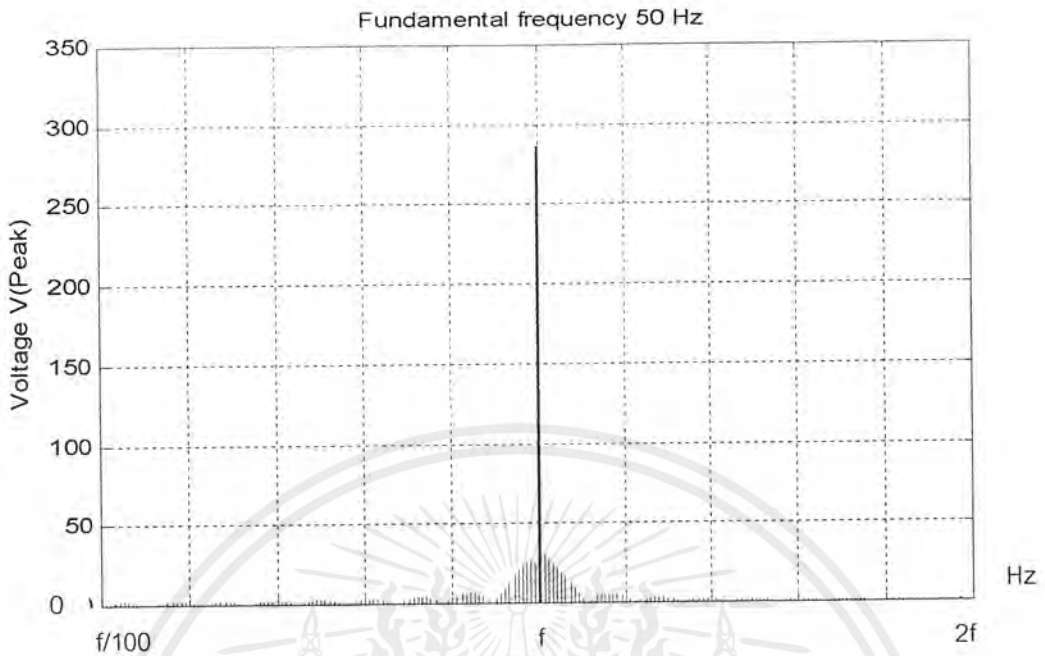


รูปที่ 6.60 แสดงสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมโหลดเมื่อ  $p=90, p'=100$

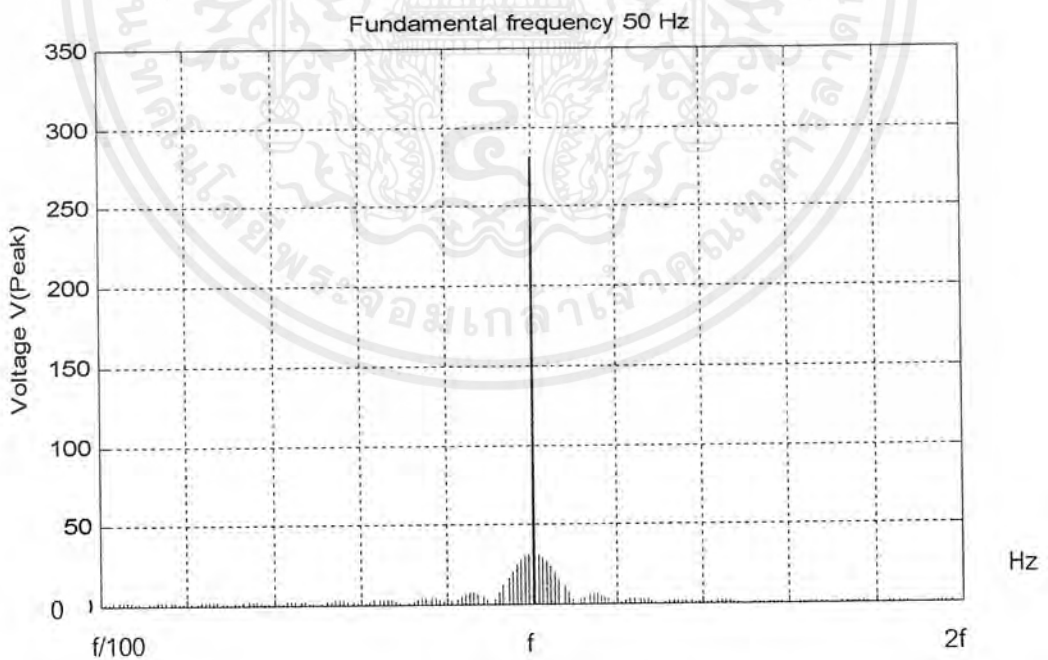


รูปที่ 6.61 แสดงการขยายแรงดันที่ตกคร่อมโหลดเมื่อ  $p=90, p'=100$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

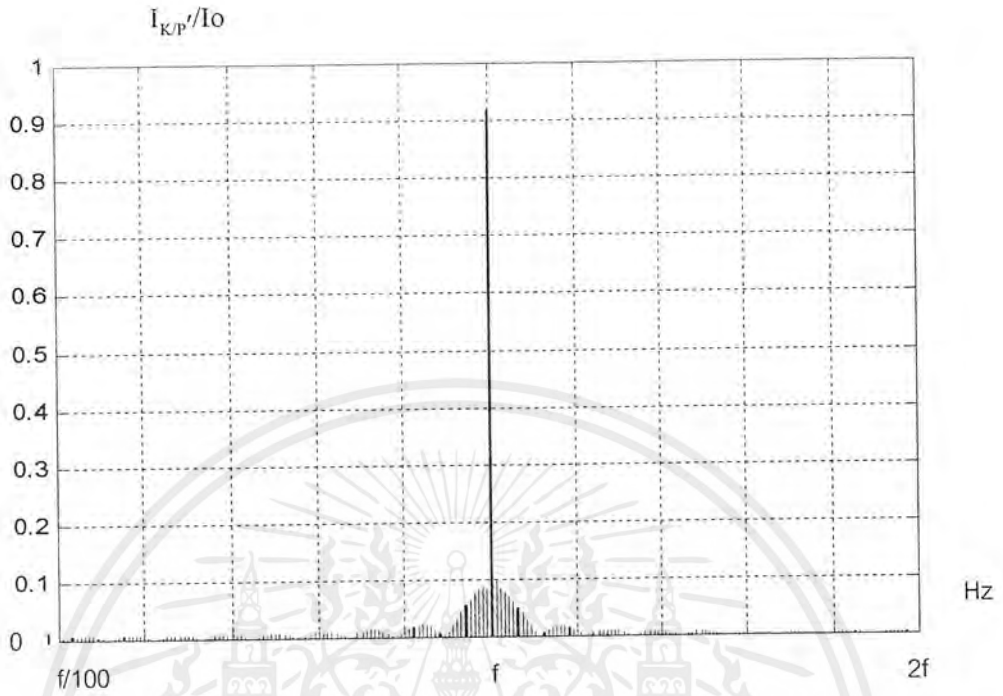


รูปที่ 6.62 กราฟทดลองหา Amplitude Voltage ที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ต่างๆเมื่อ  $p=90, p'=100$

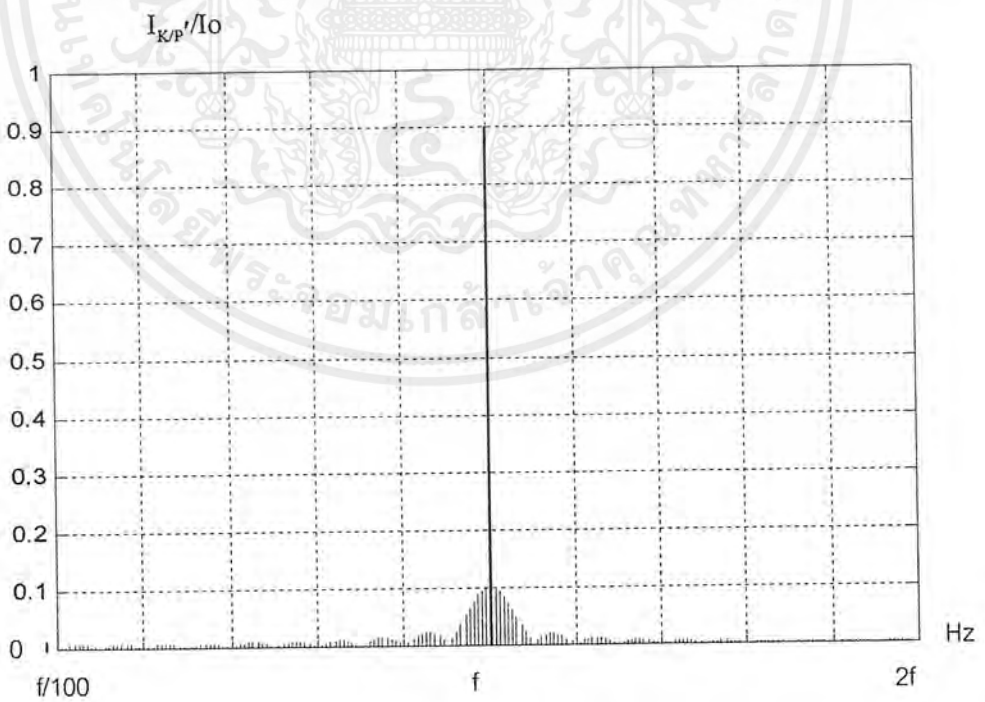


รูปที่ 6.63 กราฟ Simulation หา Amplitude Voltage ที่ความถี่ฮาร์โมนิกส์ต่างๆเมื่อ  $p=90, p'=100$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

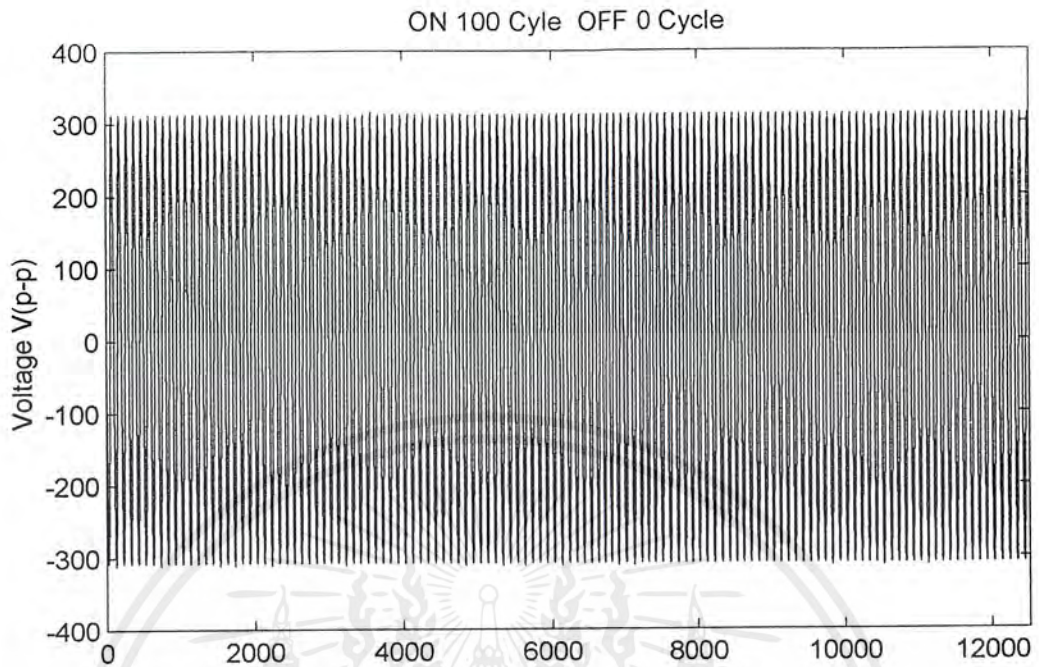


รูปที่ 6.64 กราฟการทดลองหาคุณลักษณะของกระแสที่ความถี่ต่างๆเมื่อ  $p=90, p'=100$

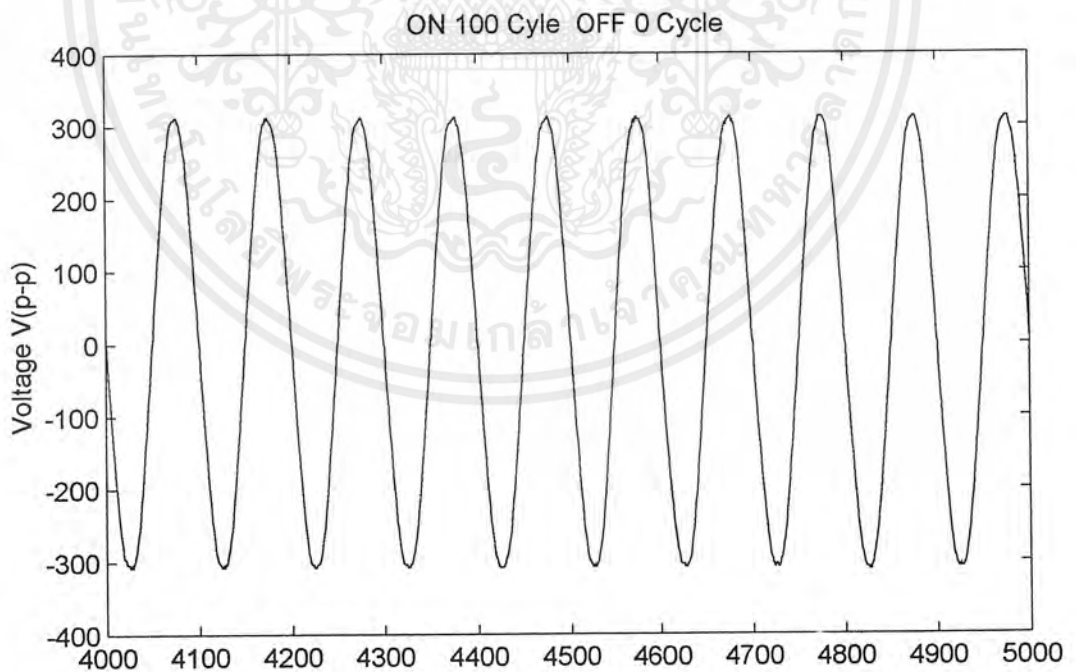


รูปที่ 6.65 กราฟ Simulation คุณลักษณะของกระแสที่ความถี่ต่างๆเมื่อ  $p=90, p'=100$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

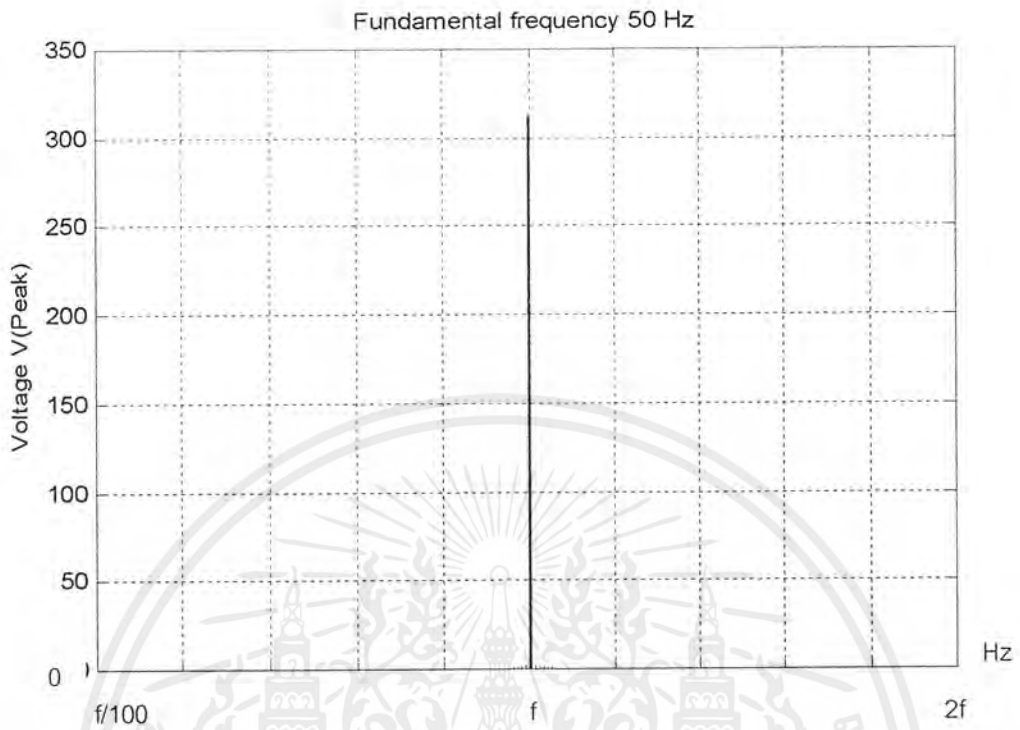


รูปที่ 6.66 แสดงสัญญาณแรงดันที่ตกคร่อมโหลดเมื่อ  $p=100, p'=100$

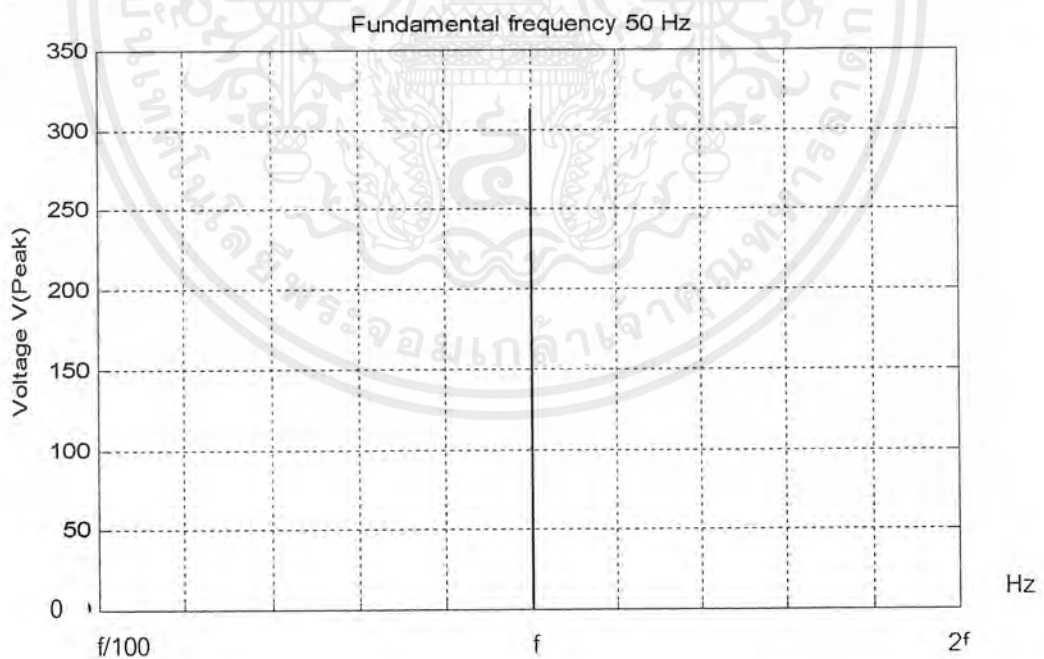


รูปที่ 6.67 แสดงการขยายแรงดันที่ตกคร่อมโหลดเมื่อ  $p=100, p'=100$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

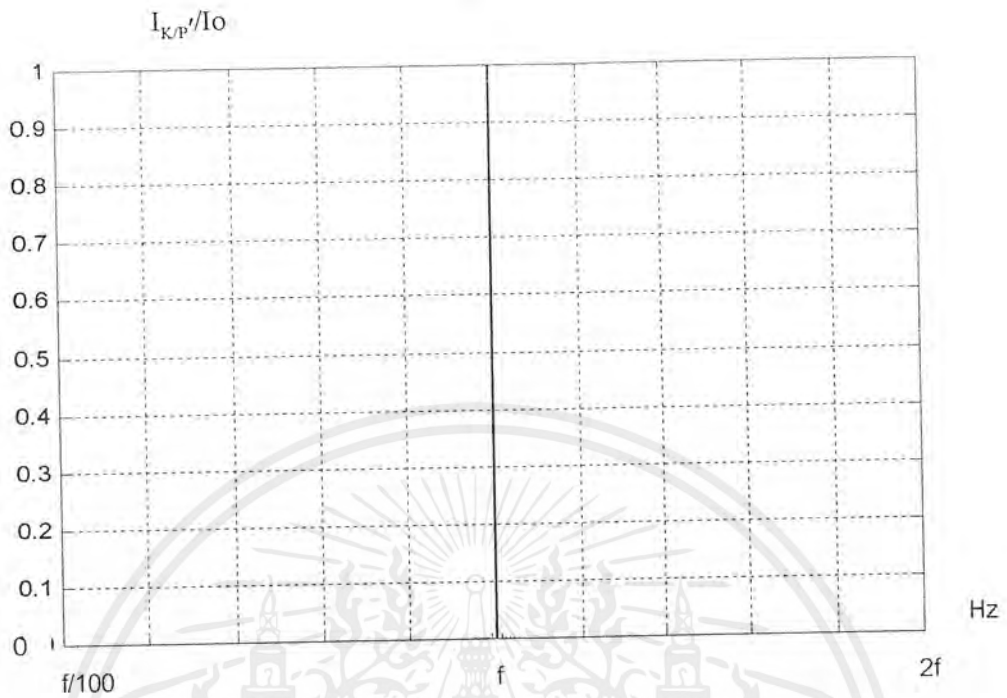


รูปที่ 6.68 การทดลองหา Amplitude Voltage ที่ความถี่ฮาร์โมนิกต่างๆเมื่อ  $p=100$ ,  $p'=100$

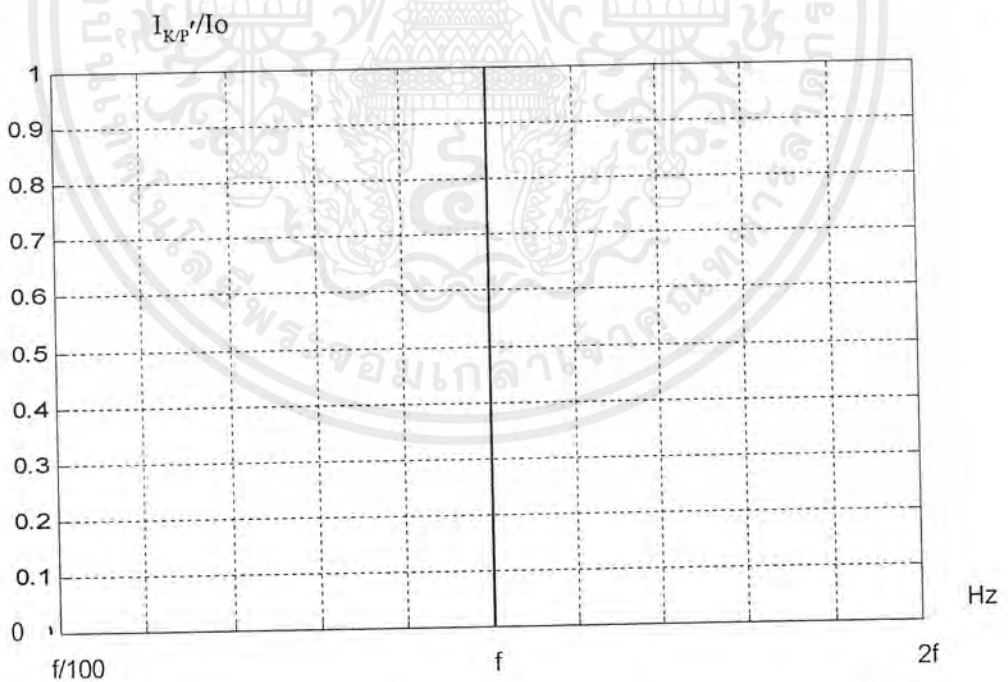


รูปที่ 6.69 กราฟ Simulation หา Amplitude Voltage ที่ความถี่ฮาร์โมนิกต่างๆเมื่อ  $p=100$ ,  $p'=100$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



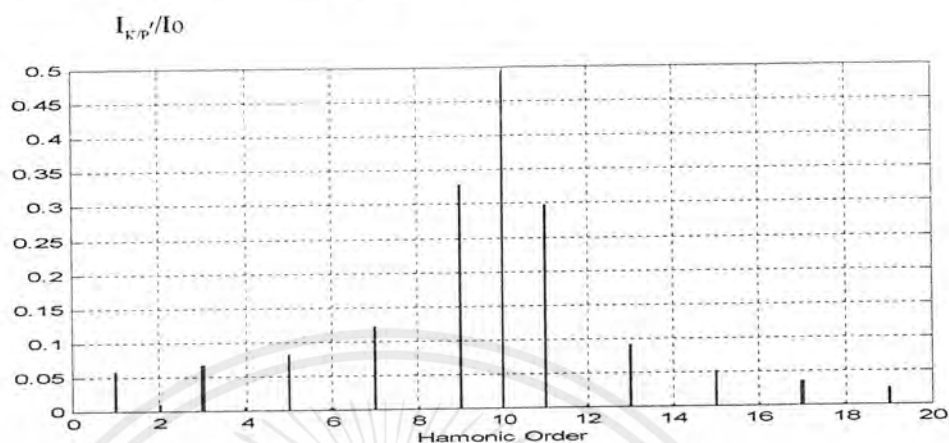
รูปที่ 6.70 กราฟการทดลองหาคุณลักษณะของกระแสที่ความถี่ต่างๆเมื่อ  $p=100, p'=100$



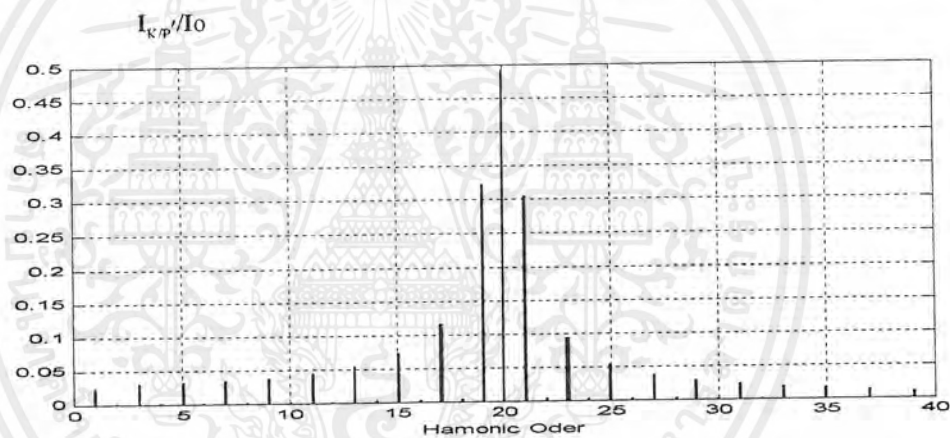
รูปที่ 6.71 กราฟ Simulation คุณลักษณะของกระแสที่ความถี่ต่างๆเมื่อ  $p=100, p'=100$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

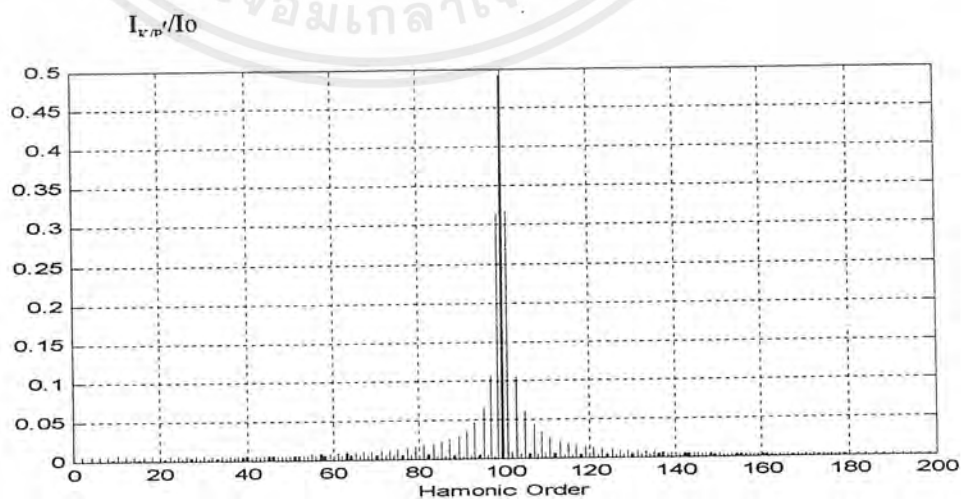
## 6.2.2 การเปรียบเทียบจำนวนฮาร์โมนิกส์ เมื่อ $p'$ ต่างๆ กัน



รูปที่ 6.72 แสดงจำนวน Harmonic ที่ Duty cycle( $\alpha$ ) = 0.5 ,  $p' = 10$



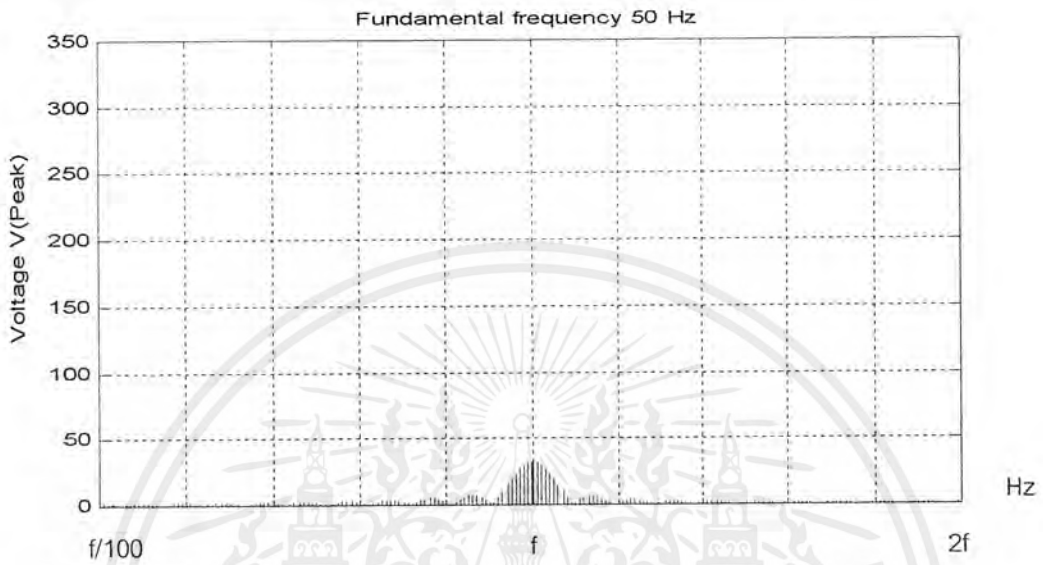
รูปที่ 6.73 แสดงจำนวน Harmonic ที่ duty cycle( $\alpha$ ) = 0.5 ,  $p' = 20$



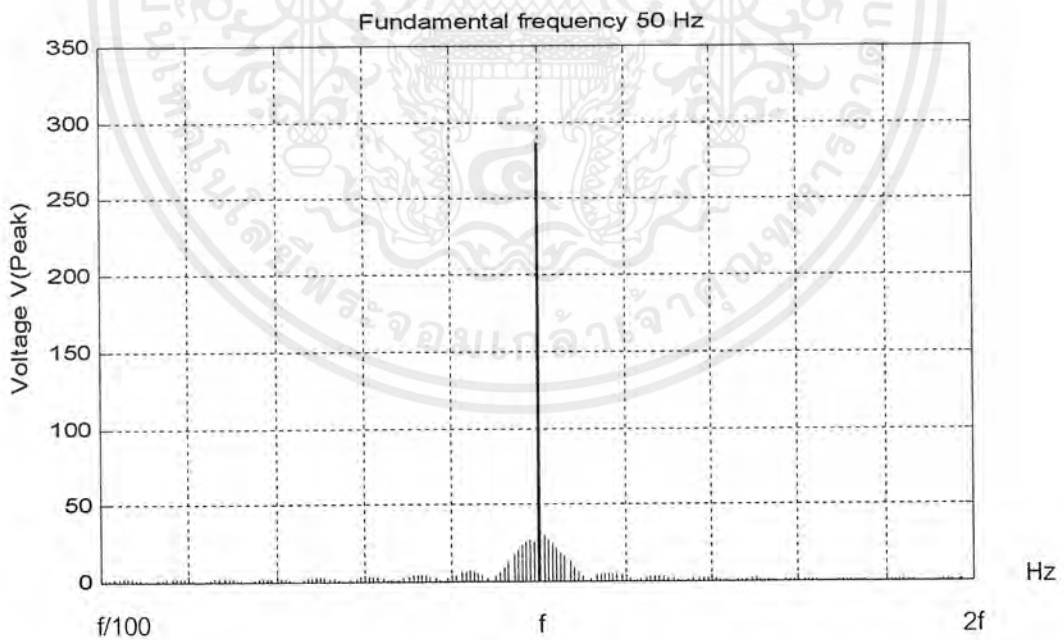
รูปที่ 6.74 แสดงจำนวน Harmonic ที่ duty cycle( $\alpha$ ) = 0.5 ,  $p' = 100$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.2.3 การเปรียบเทียบผลของฮาร์โมนิกส์ที่มีค่าเท่ากัน เมื่อค่า $p$ ต่างกัน

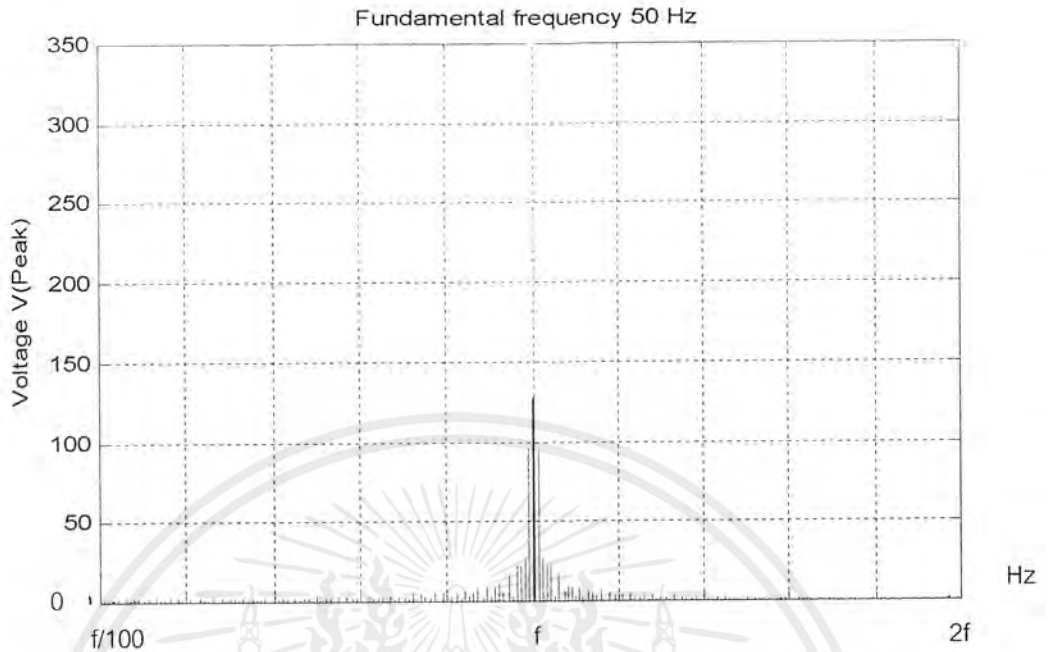


รูปที่ 6.75 กราฟแสดงลักษณะของฮาร์โมนิกส์เมื่อ Duty Cycle ( $\alpha$ )=0.1

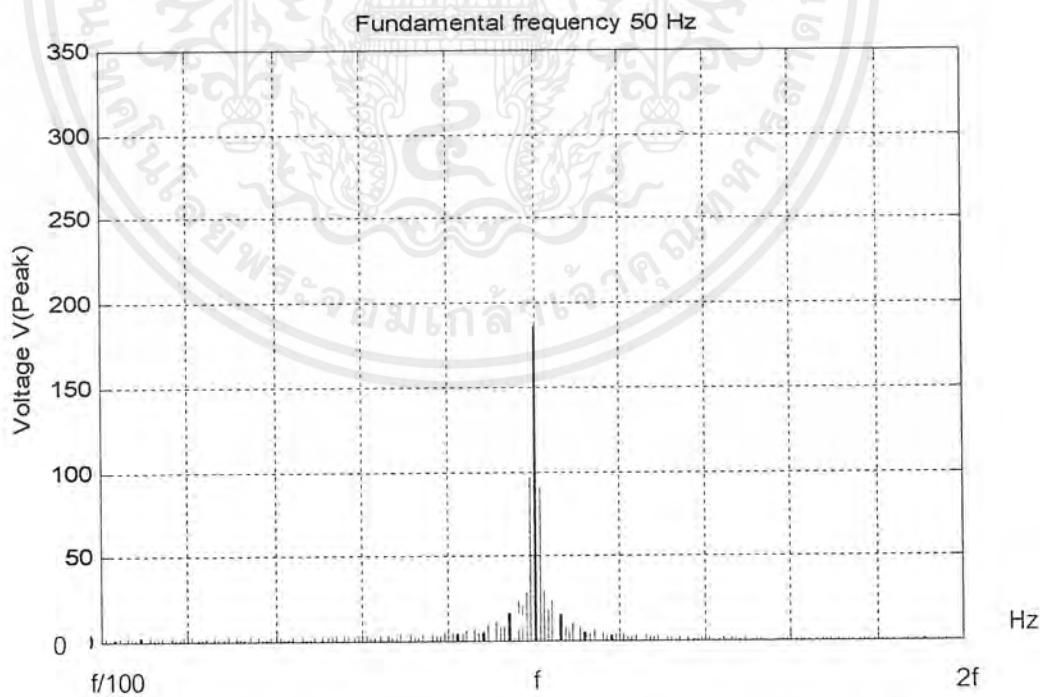


รูปที่ 6.76 กราฟแสดงลักษณะของฮาร์โมนิกส์เมื่อ Duty Cycle ( $\alpha$ )=0.9

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.77 กราฟแสดงลักษณะของฮาร์โมนิกส์เมื่อ Duty Cycle ( $\alpha$ )=0.4



รูปที่ 6.78 กราฟแสดงลักษณะของฮาร์โมนิกส์เมื่อ Duty Cycle ( $\alpha$ )=0.6

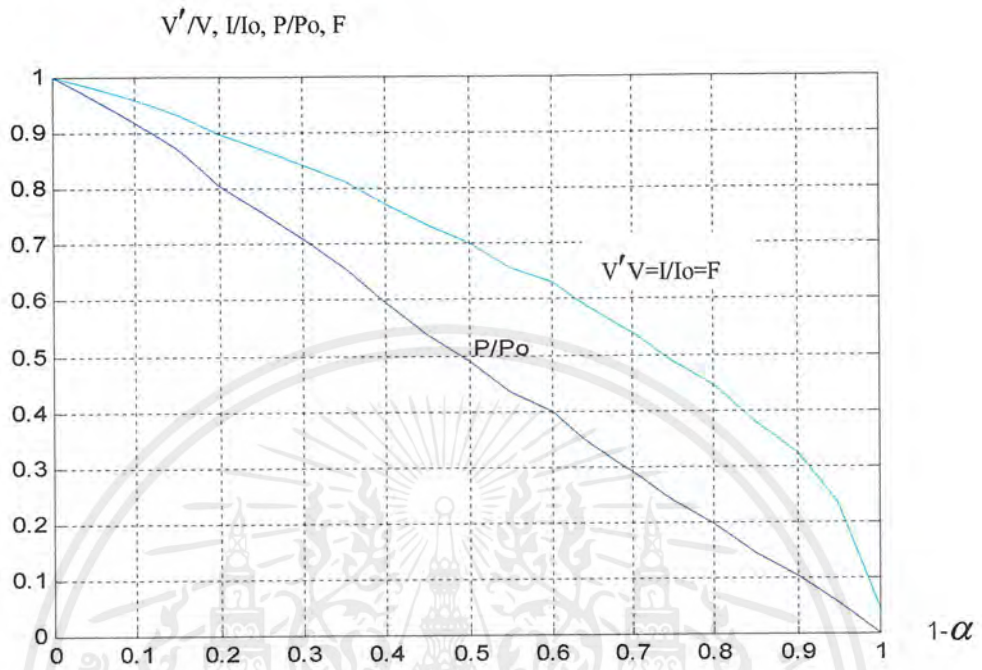
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 6.3 ผลการทดลองความสัมพันธ์ระหว่าง  $p$  และกำลังไฟฟ้า

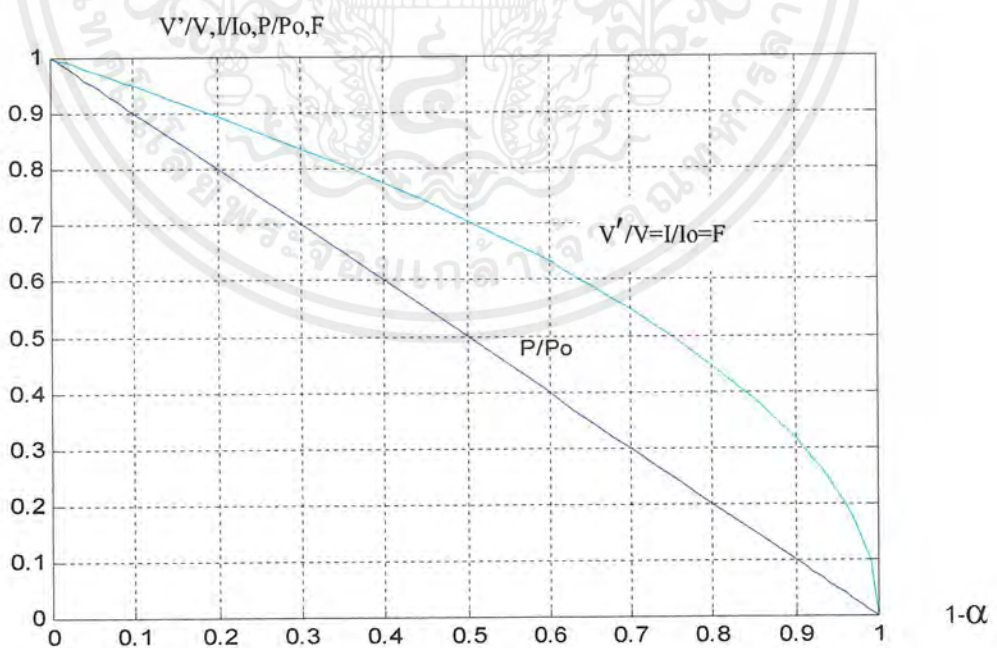
$p$	$V'(V_{rms})$	$I(A)$	$I(K=p')$	$V'(K=p')$	$P(watt)$	$S(VA)$	$D(Var)$	P.F
0	2.905	0.0058	0.0008	0.3937	0.1765	1.2793	1.2671	0.1379
5	52.659	0.1053	0.024	12.0048	5.2938	23.2266	22.6152	0.2279
10	71.606	0.1432	0.0457	22.8613	10.0803	31.5864	29.9347	0.3191
15	83.651	0.1673	0.0631	31.5259	13.9183	36.9023	34.1769	0.3772
20	98.627	0.1973	0.0871	43.5347	19.2121	43.5195	39.0492	0.4415
25	107.227	0.2145	0.1044	52.2152	23.0281	47.3134	41.3311	0.4867
30	119.051	0.2381	0.1281	64.0259	28.2557	52.519	44.2703	0.538
35	128.528	0.2571	0.1504	75.2142	33.1745	56.7099	45.9942	0.585
40	140.878	0.2818	0.1803	90.1481	39.7697	62.5181	47.7702	0.6398
45	150.802	0.3016	0.2045	102.2645	45.1077	68.0034	48.8972	0.6781
50	154.146	0.3083	0.2164	108.2192	47.7325	71.312	48.4363	0.7019
55	161.629	0.3233	0.2366	118.2774	52.1881	71.312	48.5984	0.7318
60	170.111	0.3402	0.2628	131.3856	57.9672	75.0398	47.6527	0.7725
65	179.431	0.3589	0.2901	145.0283	63.9889	79.1645	46.6094	0.8083
70	186.539	0.3731	0.3129	156.4665	69.018	82.2967	44.8248	0.8386
75	192.811	0.3856	0.3346	167.2897	73.8045	85.0539	42.2732	0.8677
80	196.378	0.3928	0.3457	172.8353	76.2529	86.642	41.1379	0.8801
85	207.517	0.415	0.3847	192.3492	84.8554	91.5388	34.3353	0.927
90	212.093	0.4242	0.4046	202.2947	89.2448	93.5681	28.1133	0.9538
95	217.195	0.4344	0.4233	211.6642	93.3696	95.8179	21.5218	0.9744
100	220.575	0.4412	0.4411	220.544	97.2958	97.3179	2.0739	0.9998

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.2.4 คุณสมบัติในการควบคุมกำลังไฟฟ้า

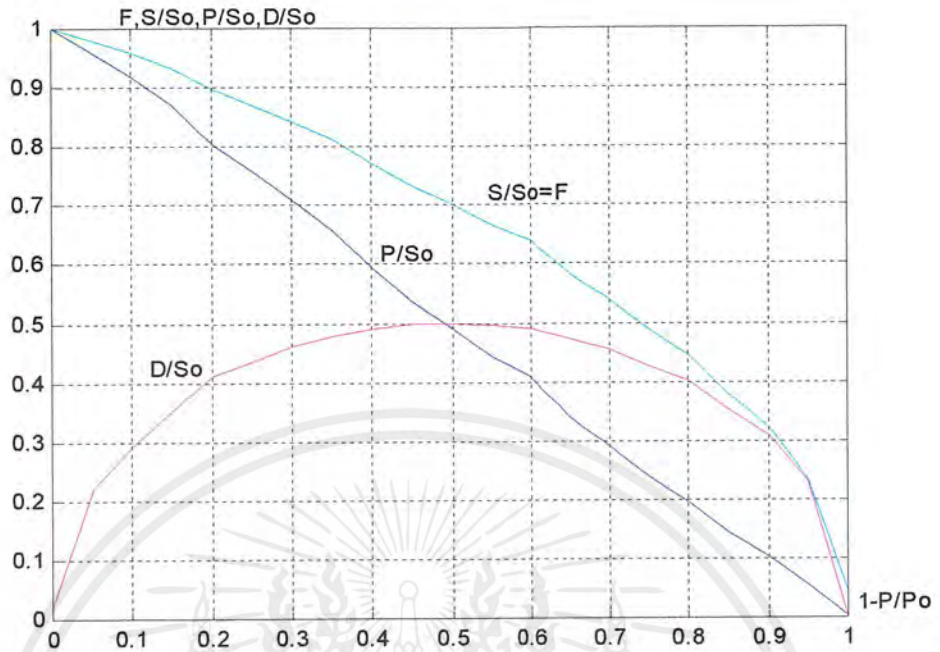


รูปที่ 6.79 การทดลอง การควบคุมกำลังไฟฟ้าในรูปฟังก์ชัน  $1-\alpha$

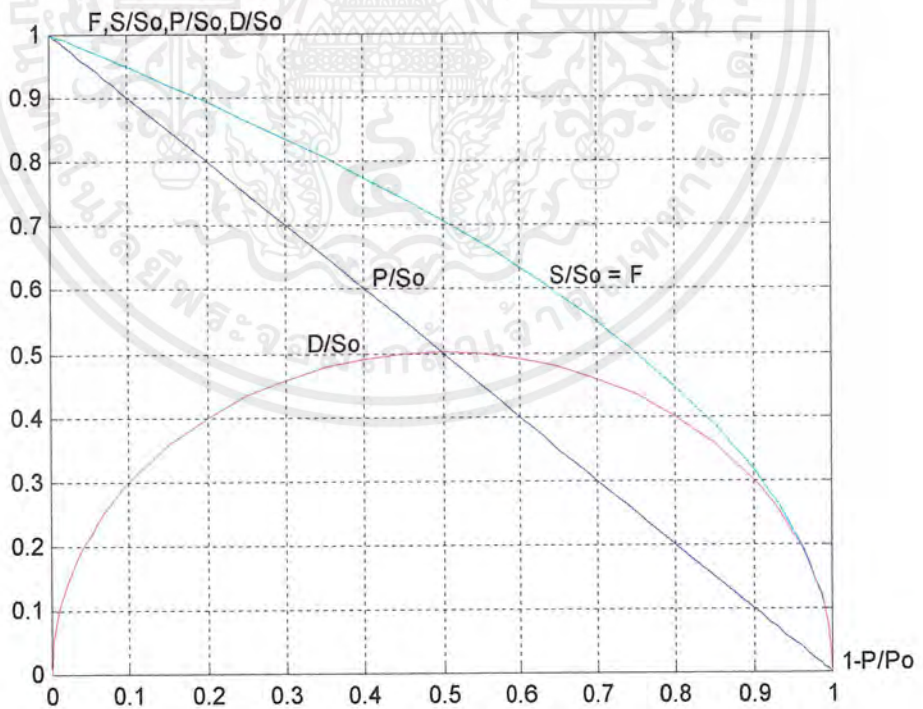


รูปที่ 6.80 กราฟ Simulation คุณสมบัติการควบคุมกำลังไฟฟ้าในรูปฟังก์ชัน  $1-\alpha$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



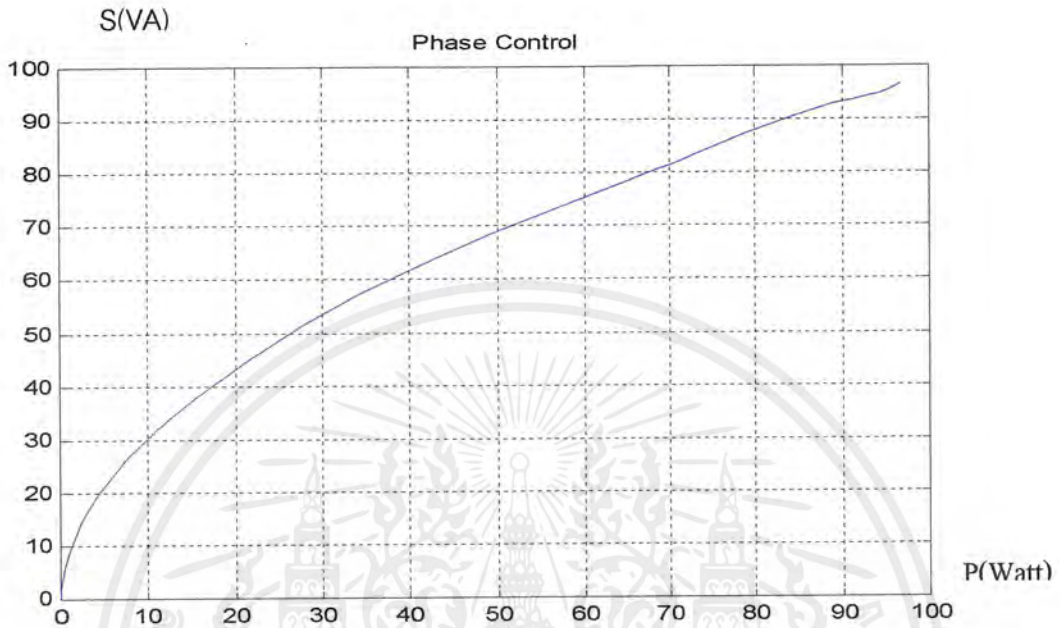
รูปที่ 6.81 กราฟทดลองคุณสมบัติกำลังไฟฟ้า (Power Characteristics)



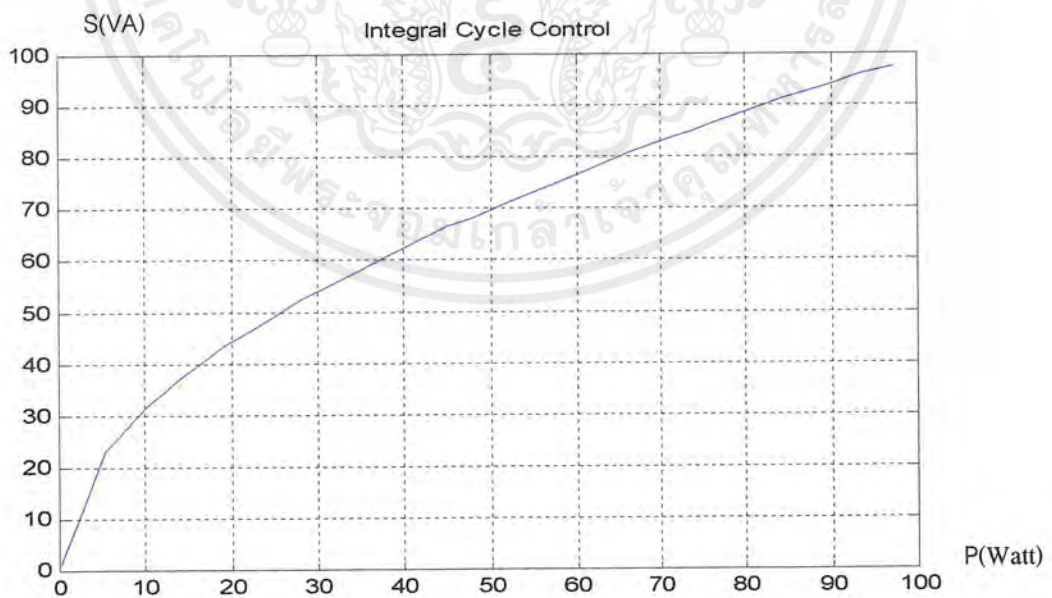
รูปที่ 6.82 กราฟ Simulation คุณสมบัติกำลังไฟฟ้า (Power Characteristics)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 6.3 การเปรียบเทียบระหว่างอินทิกรัลไซเคิลคอนโทรลและเฟสคอนโทรล

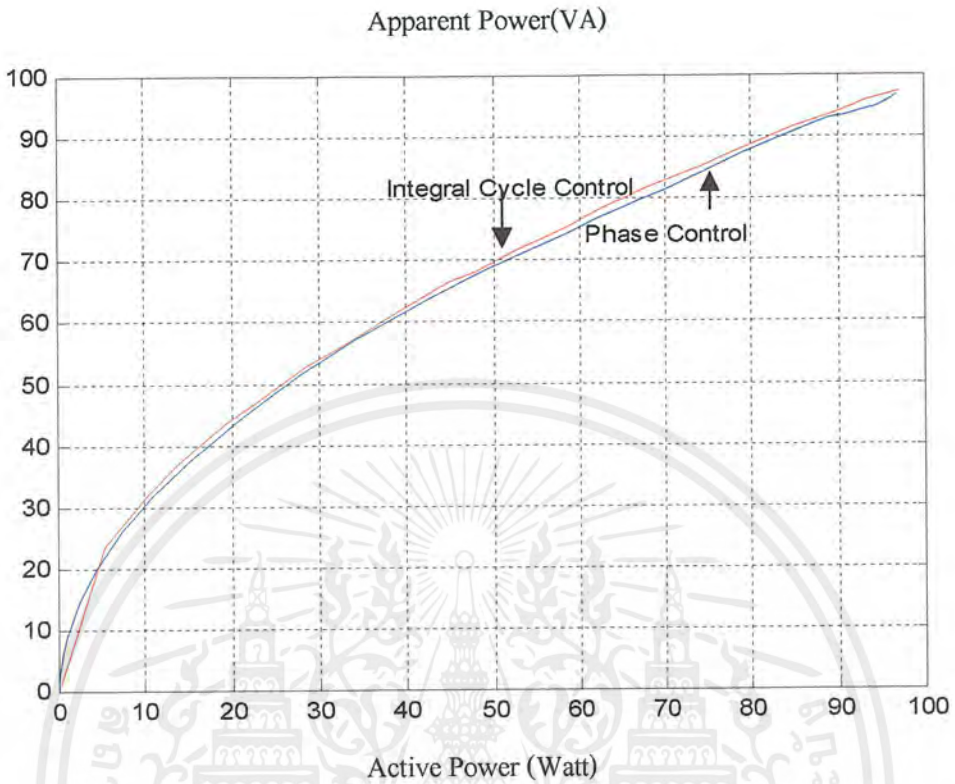


รูปที่ 6.83 ความสัมพันธ์ Active Power และ Apparent Power ของอินทิกรัลไซเคิลคอนโทรล

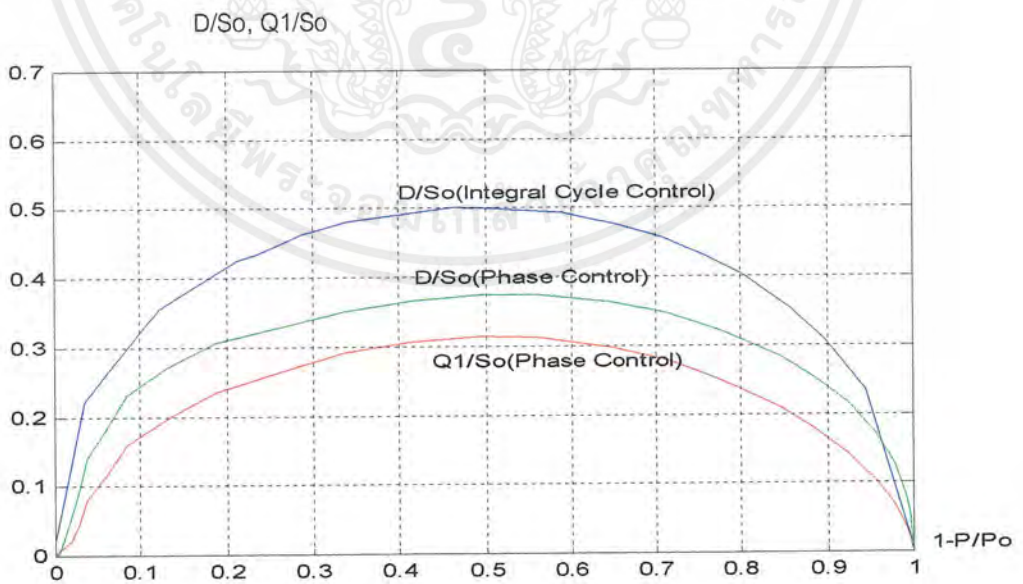


รูปที่ 6.84 ความสัมพันธ์ของกำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าของเฟสคอนโทรล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 6.85 การเปรียบเทียบ Active Power และ Apparent Power



รูปที่ 6.86 การเปรียบเทียบ Reactive Power เฟสคอนโทรลและอินทิกรัลไซเคิลคอนโทรล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

#### 6.2.4 สรุป

จากการทดลองการควบคุมกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ โดยใช้วิธีการปรับมุมทริกของเอสซีอาร์ (เฟสคอนโทรล) และแบบปรับจำนวนลูกคลื่น (อินทิกรัลไซเคิลคอนโทรล) สามารถสรุปได้ดังนี้

การควบคุมกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ โดยใช้วิธีอินทิกรัลไซเคิลคอนโทรล จะเกิดฮาร์มอนิกส์ที่มีความถี่สูงกว่าความถี่ของพินดาเมนทอลและเกิดซบฮาร์มอนิกส์ที่มีความถี่ต่ำกว่าความถี่พินดาเมนทอล โดยจำนวนอันดับของฮาร์มอนิกส์และซบฮาร์มอนิกส์ที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับค่า  $p'$  ถ้าจำนวนของ  $p'$  มากก็จะเกิดจำนวนอันดับของฮาร์มอนิกส์และซบฮาร์มอนิกส์มาก แต่จำนวน  $p'$  มากหรือน้อยค่าของความผิดเพี้ยนกำลังไฟฟ้า (D) จะมีค่าเท่ากันและการควบคุมแบบอินทิกรัลไซเคิลคอนโทรลจะไม่เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสีย (Q)

ส่วนการควบคุมกำลังไฟฟ้ากระแสสลับ โดยวิธีของเฟสคอนโทรลจะเกิดแรงดันฮาร์มอนิกส์ทำให้มีค่าความผิดเพี้ยนกำลังไฟฟ้า (D) และกำลังไฟฟ้าสูญเสีย (Q) ด้วย ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองของวงจรเฟสคอนโทรลและอินทิกรัลไซเคิลคอนโทรลมีแนวโน้มใกล้เคียงกับทางทฤษฎีที่ได้ศึกษามาและใกล้เคียงกับผลที่ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์แมทแลปในการวิเคราะห์

เมื่อเปรียบเทียบการควบคุมระหว่างแบบเฟสคอนโทรลและแบบอินทิกรัลไซเคิลคอนโทรล วงจรแบบอินทิกรัลไซเคิลคอนโทรลจะเกิดความผิดเพี้ยนกำลังไฟฟ้า (D) มากกว่าวงจรแบบเฟสคอนโทรล แต่วงจรแบบเฟสคอนโทรลจะเกิดค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสีย (Q) ด้วย เพราะฉะนั้นการที่จะให้เกิดกำลังไฟฟ้าจริงตกร่วมโหลดเท่ากัน ทั้งสองวงจรจะใช้ค่ากำลังไฟฟ้าที่ปรากฏใกล้เคียงกัน

# ภาคผนวก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก  
การคำนวณผลการทดลองโดยโปรแกรม MATLAB

Phase Control

```
clear all;close all;
```

```
n=50;
```

```
%-----
```

```
% voltage
```

```
%-----
```

```
r=1;
```

```
f=50;
```

```
cd c:\matlab\bin
```

```
load v90.csv
```

```
tt=500000/f;
```

```
a=fft(v90(1:tt));
```

```
b=abs(a);
```

```
c=b/(tt/2);
```

```
%-----
```

```
% current
```

```
%-----
```

```
cd c:\matlab\bin
```

```
load a90.csv
```

```
tt1=500000/f;
```

```
a1=fft(a90(1:tt1));
```

```
b1=abs(a1);
```

```
c1=b1/(tt1/2);
```

```
c11=c1/r;
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

%-----
% Voltage Source
%-----
cd c:\matlab\bin
load v0.csv
tt=500000/f;
a3=fft(v0(1:tt));
b3=abs(a3);
c3=b3/(tt/2);

%-----
% Find Angle between Voltage Source with current
%-----
V_a=(180/pi)*angle(a3(2));
I_a=(180/pi)*angle(a1(2));
fprintf(' ph_diff = %10.5f *\n',V_a-I_a);
ph_diff=V_a-I_a;

%-----
% Calculate Vrms,Irms,I(1)rms,SI,D,Power,QI,S
%-----
U=sqrt(sum(c3(1:n).^2))/sqrt(2);
Vrms=sqrt(sum(c(1:n).^2))/sqrt(2);
Irms=sqrt(sum(c11(1:n).^2))/sqrt(2);
Ihar=sqrt(sum(c11(3:n).^2))/sqrt(2);
Ih=(sum(c11(3:n).^2))/sqrt(2);
fprintf(' Vrms = %10.4f V\n',sqrt(sum(c(1:n).^2))/sqrt(2));
fprintf(' Irms = %10.4f A\n',sqrt(sum(c11(1:n).^2))/sqrt(2));
fprintf(' I(1)rms = %10.4f A\n',(c11(2))/sqrt(2));

I1=(c11(2))/sqrt(2);

```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

fprintf(' S1      = %10.4f VA\n',U*I1);
fprintf(' D       = %10.4f VA\n',U*Ihar);
fprintf(' Power    = %10.4f W\n',U*I1.*cos(pi/180*ph_diff));
fprintf(' Q1       = %10.4f VAR\n',U*I1.*sin(pi/180*ph_diff));

```

```
S1=U*I1;
```

```
D=U*Ihar;
```

```
P=U*I1.*cos(pi/180*ph_diff);
```

```
Q1=U*I1.*sin(pi/180*ph_diff);
```

```
fprintf(' S      = %10.4f VA\n',sqrt(P.^2+Q1.^2+D.^2));
```

```
S=sqrt(((P.^2)+(Q1.^2)+(D.^2)));
```

```
fprintf(' Power factor= %10.4f\n',P/S);
```

```
fprintf(' THD      = %10.4f *\n',sqrt(Ih/I1.^2));
```



## Integral Cycle Control

```
clear all;close all;
```

```
n=200;
```

```
%-----
```

```
% voltage
```

```
%-----
```

```
f=0.5;
```

```
r=500;
```

```
cd c:\matlab\bin;
```

```
load i10.csv
```

```
tt=5000/f;
```

```
a=fft(i10(1:tt));
```

```
b=abs(a);
```

```
c=b/(tt/2);
```

```
%-----
```

```
% Voltage Source
```

```
%-----
```

```
cd c:\matlab\bin;
```

```
load i100.csv
```

```
tt=5000/f;
```

```
a1=fft(i100(1:tt));
```

```
b1=abs(a1);
```

```
c1=b1/(tt/2);
```

```
%-----
```

```
%Calculate Vrms,Irms,Vrms(101),Irms(101),Power,S,D,P.f
```

```
%-----
```

```
Uo=sqrt(sum(c1(1:n).^2))/sqrt(2);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่จัดทำขึ้นเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
Io=Uo/r;
```

```
fprintf(' Vrms    = %10.4f V\n',sqrt(sum(c(1:n).^2))/sqrt(2));
```

```
Vrms=sqrt(sum(c(1:n).^2))/sqrt(2);
```

```
fprintf(' Irms    = %10.4f A\n',Vrms/r);
```

```
Irms=Vrms/r;
```

```
fprintf(' Vrms(101) = %10.4f V\n',(c(101))/sqrt(2));    %[V(101)=Vrms of fundamental  
voltage]
```

```
fprintf(' Irms(101) = %10.4f A\n',(c(101))/(sqrt(2)*r));    %[I(101)=Irms of fundamental  
current]
```

```
Vfundamental=(c(101))/sqrt(2);
```

```
Ifundamental=(c(101))/(sqrt(2)*r);
```

```
fprintf(' Power    = %10.4f W\n',Uo*Ifundamental);
```

```
fprintf(' S        = %10.4f VA\n',Uo*Irms);
```

```
S=Uo*Irms;
```

```
Power=Uo*Ifundamental;
```

```
fprintf(' D        = %10.4f VAR\n',sqrt((S.^2)-(Power.^2)));
```

```
fprintf(' Power factor = %10.4f *\n',Power/S);
```

```
fprintf(' THD     = %10.4f *\n',sqrt((Irms.^2-Ifundamental.^2)/Ifundamental.^2));
```

```
D=sqrt((S.^2)-(Power.^2));
```

```
So=Uo*Io;
```

```
Po=So;
```

```
fprintf(' Power/Po    = %10.4f *\n',Power/Po);
```

```
fprintf(' D/So        = %10.4f *\n',D/So);
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ข

### การ Simulation การควบคุมกำลังไฟฟ้าโดยโปรแกรม MATLAB

#### Phase Control

```
clear all;close all;
fm=50;
t=0:1/30000:2/fm;
A=0.25; %phase angle(A=0.5;phase angle=90 degree)
peak=311; %peak sinewave
%+++++
+++++
triangle=sawtooth(2*pi*fm*t+90*pi/180,0.5);
squarewave=A*square(2*pi*fm*t);
sinewave=sin(2*pi*fm*t+(A/tan(32*pi/180)));
for k=1:length(t);
    if squarewave(k)>0;
        if squarewave(k)>=triangle(k); x(k)=0;
        else x(k)=1.5*squarewave(k)/A;
        end
    else
        if squarewave(k)<=triangle(k); x(k)=0;
        else x(k)=1.5*squarewave(k)/A;
        end
    end
end

for k=1:length(t);
    if sinewave(k)>=0;
        if x(k)<=sinewave(k); y(k)=0;
        else y(k)=peak*sinewave(k);
        end
    end
end
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```

else
    if x(k)>=sinewave(k); y(k)=0;
    else y(k)=peak*sinewave(k);
    end
end
end
end

```

```

%+++++
+++++

```

```
figure(1)
```

```
plot(t,y)
```

```
samp=round(length(y)/2);
```

```
a=fft(y(1:samp))/fm;
```

```
b=abs(a);
```

```
c=b/(samp/fm/2);
```

```
figure(2)
```

```
bar(c(2:51),0.3);
```

```
grid
```

```
ylabel('Voltage(peak)');
```

```
xlabel('Harmonic Order');
```

```
title('Phase Control(Resistive load)');
```

```
axis([0 51 0 350])
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Integral Cicle Control

```
clear all;close all;
fm=50;
n=200;
t=0:1/1500:2*n/fm;
A=0.6; %A=0.01 sinewave 1 cycle
peak=221*sqrt(2);% peak sinewave
%+++++
+++++
triangle=sawtooth((1/n)*2*pi*fm*t+90*pi/180,0.5);
squarewave=A*square((1/n)*2*pi*fm*t);
sinewave=sin(2*pi*fm*t);
for k=1:length(t);
    if squarewave(k)>0;
        if squarewave(k)>=triangle(k); x(k)=-5;
        else x(k)=5*squarewave(k)/A;
        end
    else
        if squarewave(k)<=triangle(k); x(k)=-5;
        else x(k)=-5*squarewave(k)/A;
        end
    end
end
for k=1:length(t);
    if x(k)>=sinewave(k); y(k)=0;
    else y(k)=peak*sinewave(k);
    end
end
%+++++
```

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

```
figure(1)
plot(t,x,'--',t,squarewave,'.',t,triangle);
```

```
samp=round(length(y)/4);
a=fft(y(1:samp))/fm;
b=abs(a);
c=b/(samp/fm/2);
```

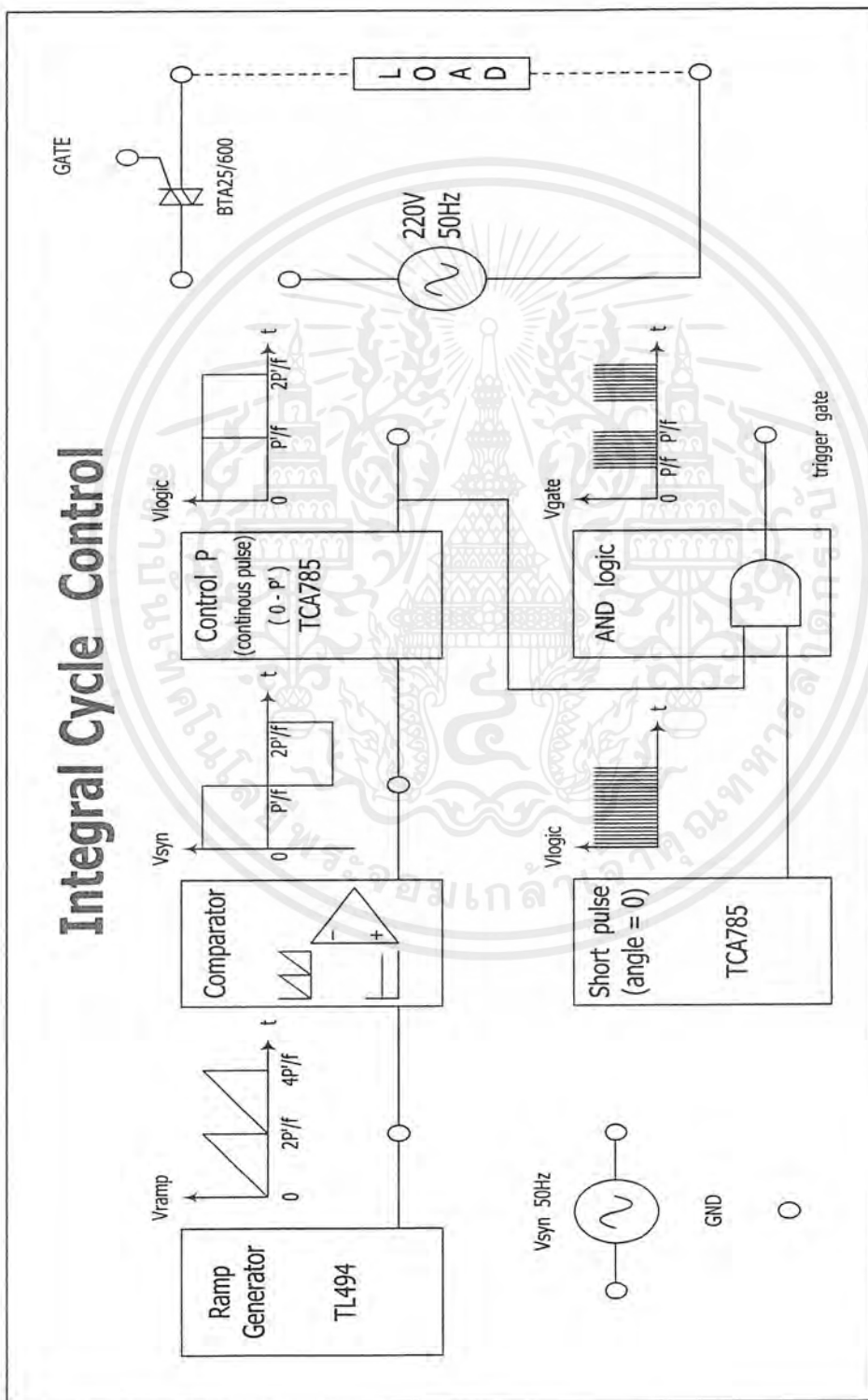
```
figure(2)
bar(c(2:200),0.001);
axis([0 200 0 350])
grid
ylabel('Voltage V(Peak) ');
title('Fundamental frequency 50 Hz')
```

```
figure(3)
plot(t,x,t,sinewave)
axis([0 0.4 -6 6])
```

```
figure(4)
plot(t,y)
```

ภาคผนวก ค  
 ใบบงานการทดลอง

1 ใบบงานการทดลองอินทิกรัลไซเคิลคอนโทรล



ชุดทดลองแบบอินทิกรัลไซเคิลคอนโทรล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
 ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ใบงานที่ 1 การหาคุณลักษณะของสัญญาณกระแสและแรงดัน

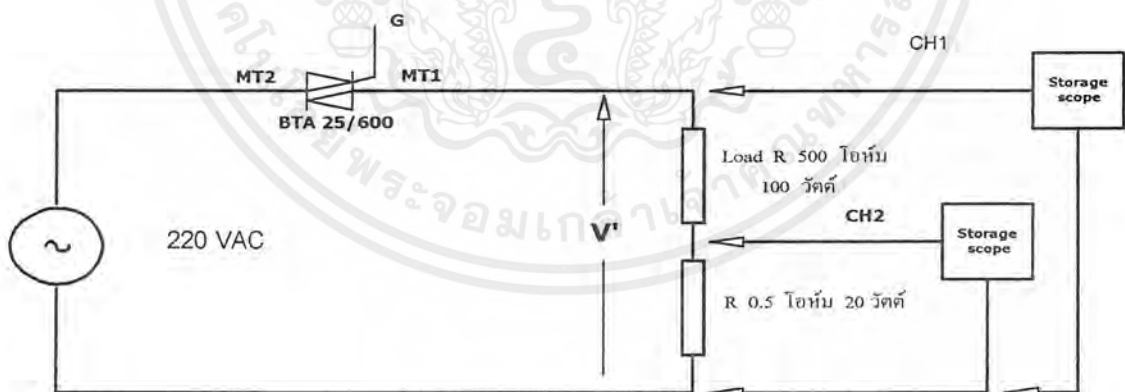
### วัตถุประสงค์

1. ศึกษาคุณลักษณะของสัญญาณกระแสและแรงดัน
2. บันทึกรูปคลื่นกระแสและแรงดันเอาต์พุต กับ โหลดตัวต้านทาน

### เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

	จำนวน
- ไทแร็ก (Triac BTA 25/600)	1
- โหลดตัวต้านทาน (Resistive Load $500\Omega$ )	1
- ชุดควบคุมอินทิกรัลไซเคิลคอนโทรล (Integral Cycle Control)	1
- แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ (Power Supply 220VAC)	1
- สตอเรจสโคป (Digital Storage scope)	1
- สายโพรบ 1:10 และ 1:100	1

### วงจรการทดลองที่ 1



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ลำดับขั้นตอนการทดลอง

- 1.1 ต่อวงจรการทดลองที่ 2 บนชุดทดลองอินทิกรัลไอซีเคิลคอนโทรล
- 1.2 ป้อนสัญญาณทริก Gate บนชุดทดลองให้กับไทรแอก
- 1.3 เปิดสวิตช์กำลัง ใช้ Channel Y1 วัดลักษณะสัญญาณแรงดันเอาต์พุต(V) Channel Y2 วัดลักษณะสัญญาณกระแส
- 1.4 ปรับ Duty Cycle( $\alpha$ ) = 0.25 , 0.5, 1.0 บันทึกลักษณะสัญญาณแรงดันเอาต์พุตและกระแสที่ค่า Duty Cycle ต่างๆ

สรุปผลการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ใบงานที่ 2 การควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแบบอินทิกรัลไซเคิลคอนโทรล

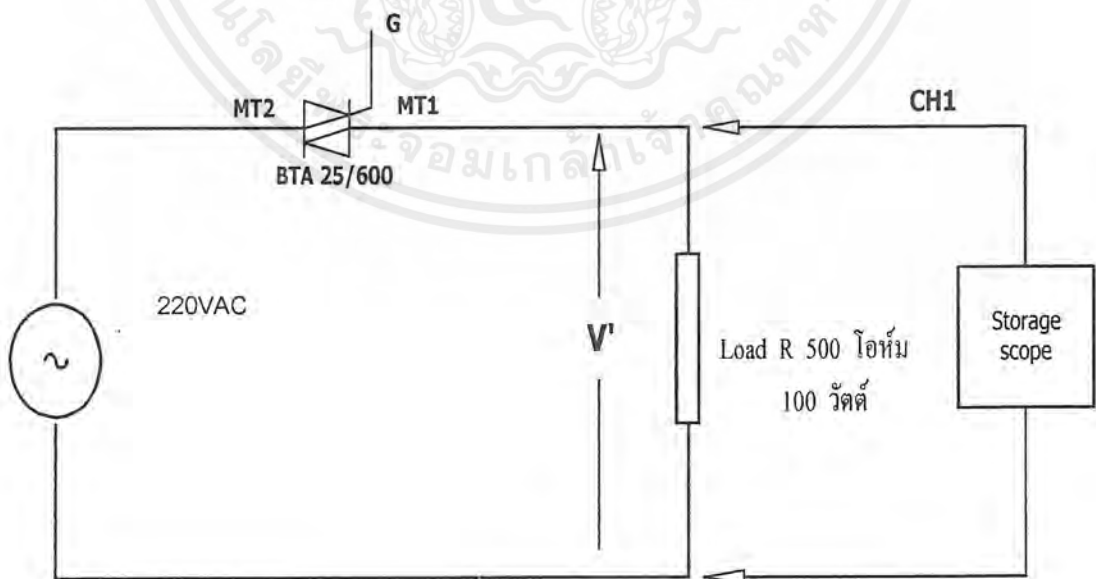
### วัตถุประสงค์

1. ศึกษาการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส แบบอินทิกรัลไซเคิลคอนโทรล
2. บันทึกรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุต กับ โหลดตัวต้านทาน
3. คำนวณคุณลักษณะการควบคุมแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับแบบอินทิกรัลไซเคิลคอนโทรล

### เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

	จำนวน
- ไตรแอก (Triac BTA 25/600)	1
- โหลดตัวต้านทาน (Resistive Load 500Ω)	1
- ชุดควบคุมแบบอินทิกรัลไซเคิลคอนโทรล	1
- แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ (Power Supply 220VAC)	1
- สคอเรจสคอป (Storage scope)	1
- สายโพรบ 1:100	2
- ดิจิตอลมัลติมิเตอร์ (Digital Multimeter)	1

### วงจรการทดลองที่ 2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

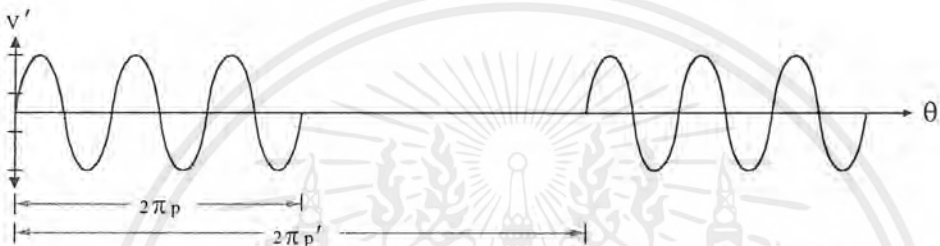
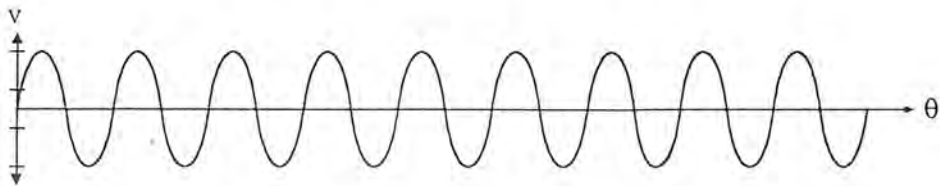
### ลำดับขั้นตอนการทดลอง

- 1.1 ต่อวงจรการทดลองที่ 2 บนชุดควบคุมอินทิกรัลไซเคิลคอนโทรล
- 1.2 ป้อนสัญญาณทริก Gate ให้กับไทรแอก
- 1.3 เปิดสวิตช์กำลัง ใช้ Channel Y1 วัดแรงดันเอาต์พุต( $V'$ )เทียบกับสัญญาณแรงดันอินพุต( $V$ ) โดยใช้ Channel Y2 วัด
- 1.4 ปรับ Duty Cycle =0, 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 บันทึกรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุต( $V'$ )เทียบกับแรงดันอินพุต( $V$ )



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.5 จากรูปด้านล่างให้คำนวณหาค่า  $t_{on}$ ,  $t_{off}$ ,  $T_S$ ,  $F_S$  ที่ Duty Cycle ( $\alpha$ ) = 0.25,  $f = 50$  Hz



$t_{on}$  = คาบเวลาสวิตช์เปิด (นำกระแส)

$t_{off}$  = คาบเวลาสวิตช์ปิด (ไม่นำกระแส)

$T_S$  = คาบเวลาเปิดและปิด ( $t_{on} + t_{off}$ )

$F_S$  = ความถี่รอบทำงาน

$t_{on} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ ms}$

$t_{off} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ ms}$

$T_S = \underline{\hspace{2cm}} \text{ ms}$

$F_S = 1/T_S = \underline{\hspace{2cm}} \text{ Hz}$

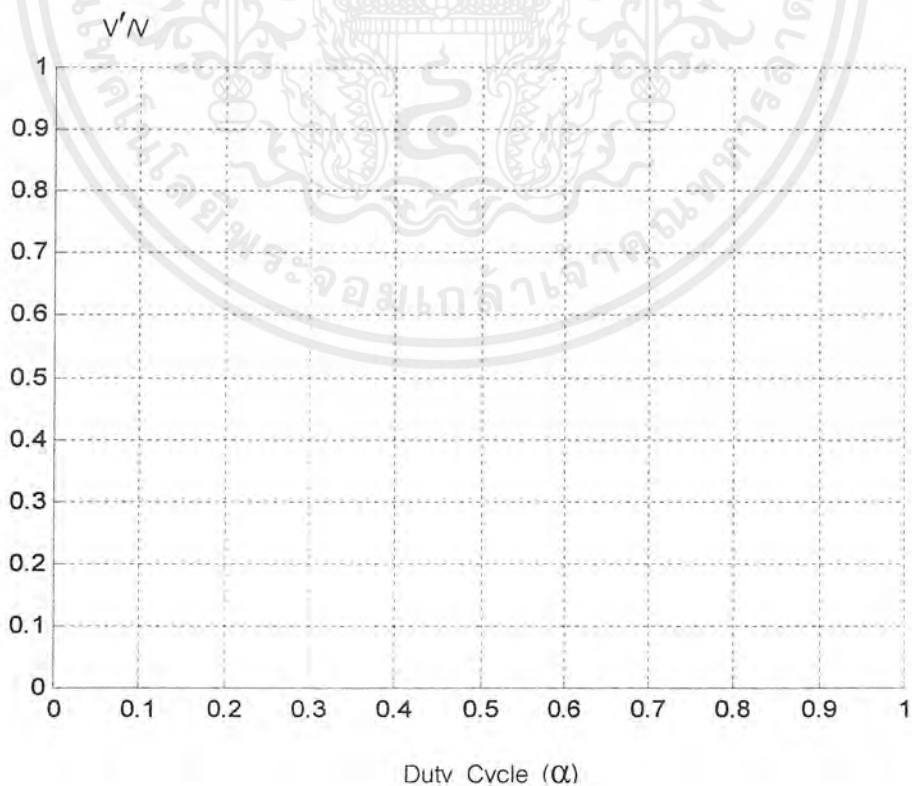
$\alpha = t_{on}/T_S = \underline{\hspace{2cm}}$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.6 ปรับค่ารอบการทำงาน Duty Cycle = 0.0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 บันทึก ค่าของแรงดัน  
เอาต์พุต ( $V'$ ) จำนวนค่าตามตาราง จากผลการทดลอง บันทึกผลลงตาราง

Duty Cycle( $\alpha$ )	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
$V'$ (โวลต์)						
$V'/V$						
$t_{on}$ (ms)						
$t_{off}$ (ms)						

1.7 พล็อตเส้นโค้งคุณลักษณะการควบคุม (Control Characteristic Curve)  $V'/V = f(\alpha)$



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.8 อธิบายคุณลักษณะการควบคุมแรงดันจากกราฟข้อ 1.5

### สรุปผลการทดลอง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### ใบงานที่ 3 การหา Power Characteristic

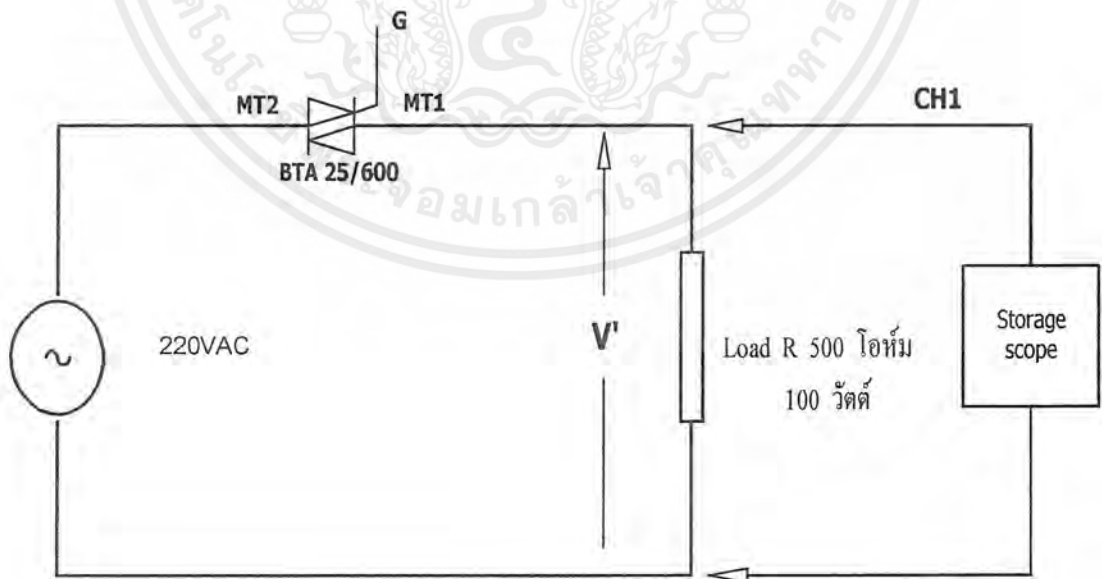
#### วัตถุประสงค์

1. ศึกษาคุณลักษณะของ S, P, D, PF เมื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบอินทิกรัลไซเคิลคอนโทรล
2. ศึกษาฮาร์โมนิกส์ที่เกิดขึ้นเมื่อควบคุมกำลังไฟฟ้าแบบอินทิกรัลไซเคิลคอนโทรลกับโหลดตัวต้านทาน

#### เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

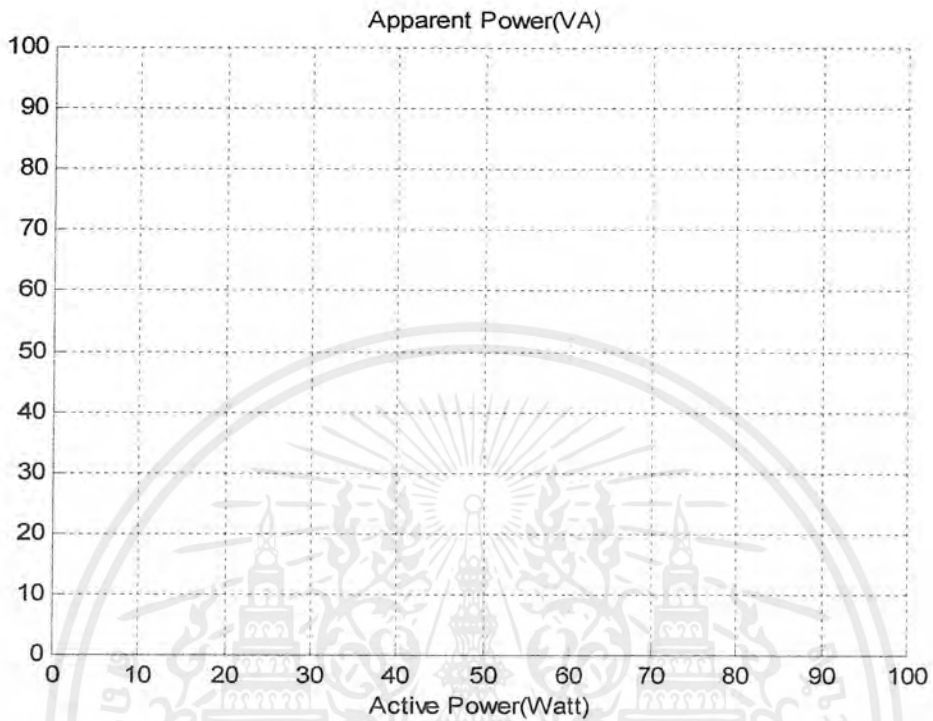
	จำนวน
- ไตรแอก(Triac BTA 25/600)	1
- โหลดตัวต้านทาน (Resistive Load 500Ω)	1
- ชุดควบคุมอินทิกรัลไซเคิลคอนโทรล(Integral Cycle Control)	1
- แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ(Power Supply 220VAC)	1
- สดอเรจสโคป (Digital Storage scope)	1
- สายโพรบ 1:100	1

#### วงจรการทดลองที่ 3

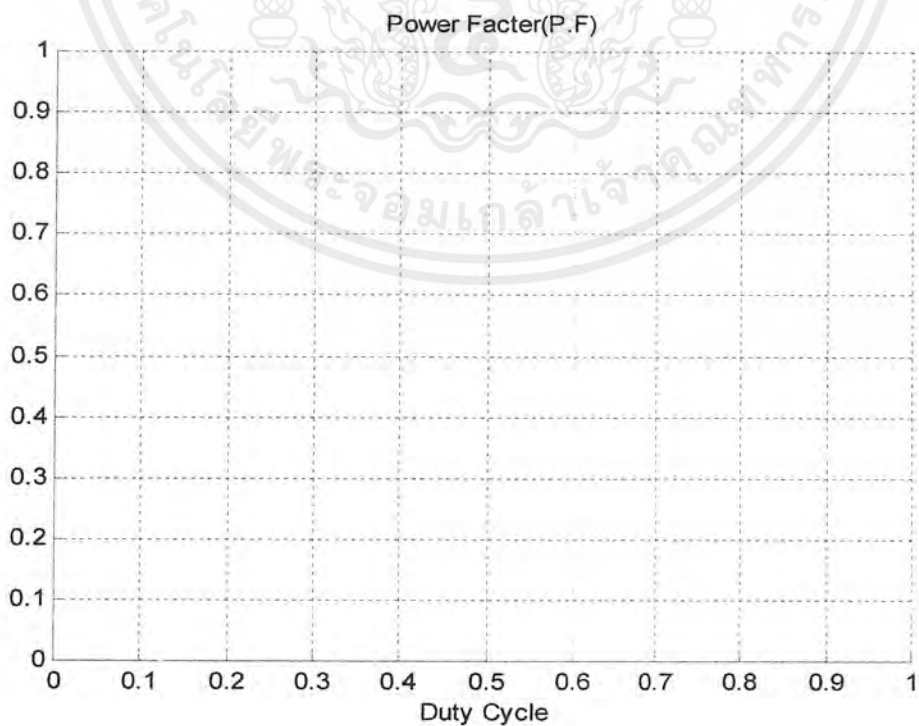


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 1.6 แสดงความสัมพันธ์ของ กำลังไฟฟ้าจริงและกำลังไฟฟ้าปรากฏ



### 1.7 แสดงความสัมพันธ์ของ Duty Cycle( $\alpha$ ) และ Power Factor(P.F)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

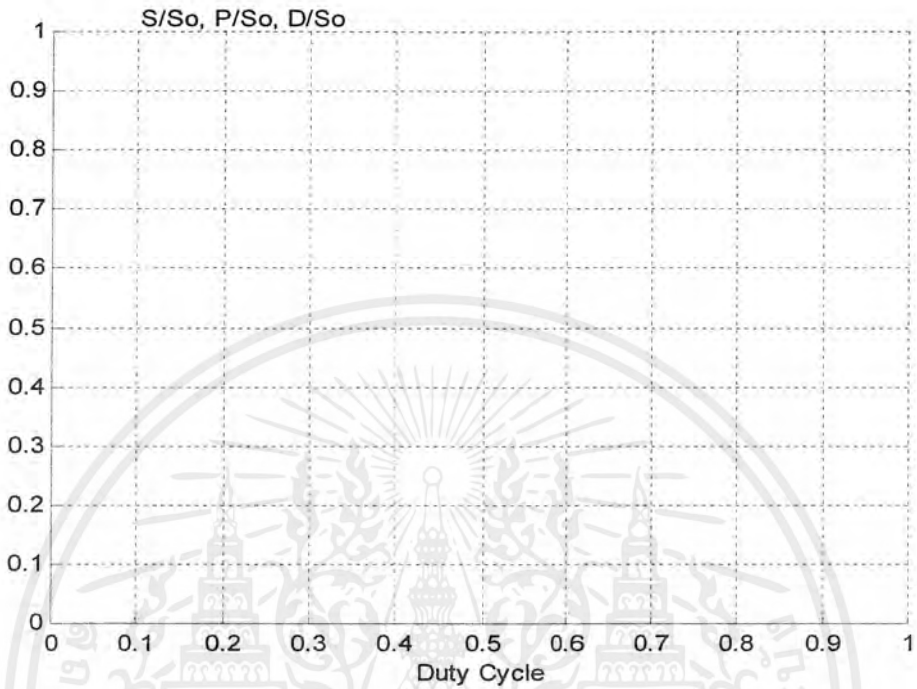
### ลำดับขั้นการทดลอง

- 1.1 ต่อวงจรการทดลองที่ 3 บนชุดควบคุมอินทิกรัลไซเคิลคอนโทรล
- 1.2 ป้อนสัญญาณทริก Gate บนชุดทดลองให้กับไทรแอก
- 1.3 เปิดสวิตช์กำลัง ใช้ Channel Y1 วัดแรงดันเอาต์พุต( $V'$ )
- 1.4 ปรับ Duty Cycle = 0,0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8,0.9,1.0 และตั้งชื่อไฟล์แต่ละครั้งแล้วบันทึกกลงแผ่น Floppy Disk
- 1.5 นำแผ่น Floppy Disk ที่บันทึกจากการปรับ Duty Cycle แต่ละครั้งไปวิเคราะห์หาค่า Power Characteristic โดยโปรแกรม MATLAB ซึ่งแสดงการหาดังภาคผนวก ก แล้วบันทึกผล

Duty Cycle	S(VA)	P(watt)	D(Var)	P.F
0				
0.1				
0.2				
0.3				
0.4				
0.5				
0.6				
0.7				
0.8				
0.9				
1				

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.8 แสดงความสัมพันธ์ของ Power Characteristic ที่ Duty Cycle ต่างๆ



สรุปผลการทดลอง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2. เฟสคอนโทรล

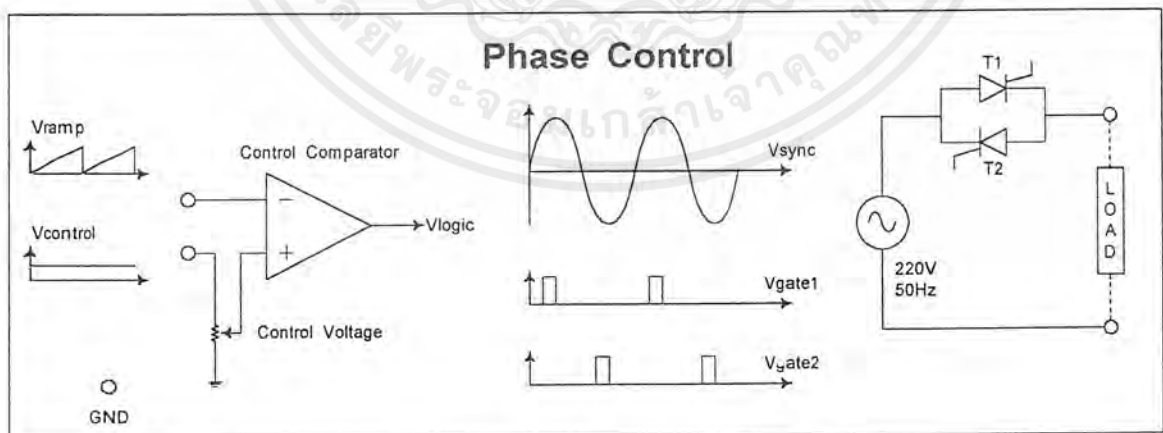
### วัตถุประสงค์

1. บันทึกลักษณะการควบคุมมุมจุดชนวนเกต สำหรับควบคุมเฟสไฟฟ้ากระแสสลับ
2. ลักษณะการควบคุมเกตของเอสซีอาร์
3. ศึกษาวงจรเรียงกระแสควบคุมได้แบบครึ่งคลื่นและแบบเต็มคลื่นเฟสเดียว
4. บันทึกลักษณะการควบคุม รูปคลื่นแรงดันที่มุมจุดชนวนเกตต่าง ๆ

### อุปกรณ์การทดลองและเครื่องมือวัด

โหลดตัวต้านทาน ขนาด $500 \Omega$	จำนวน	1	ตัว
ชุดควบคุมเฟส	จำนวน	1	ชุด
แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 220 V	จำนวน	1	ชุด
ดิจิตอลมัลติมิเตอร์	จำนวน	1	เครื่อง
สต่อเรจออกซิจิลโลสโคป	จำนวน	1	เครื่อง
โพรบ 1 : 1 , 10 : 1	จำนวน	1	เส้น
โพรบ 100 : 1	จำนวน	1	เส้น

การทดลองที่ 1 บันทึกลักษณะการควบคุมมุมจุดชนวนเกต สำหรับควบคุมเฟสไฟฟ้ากระแสสลับ  
วงจรการทดลอง

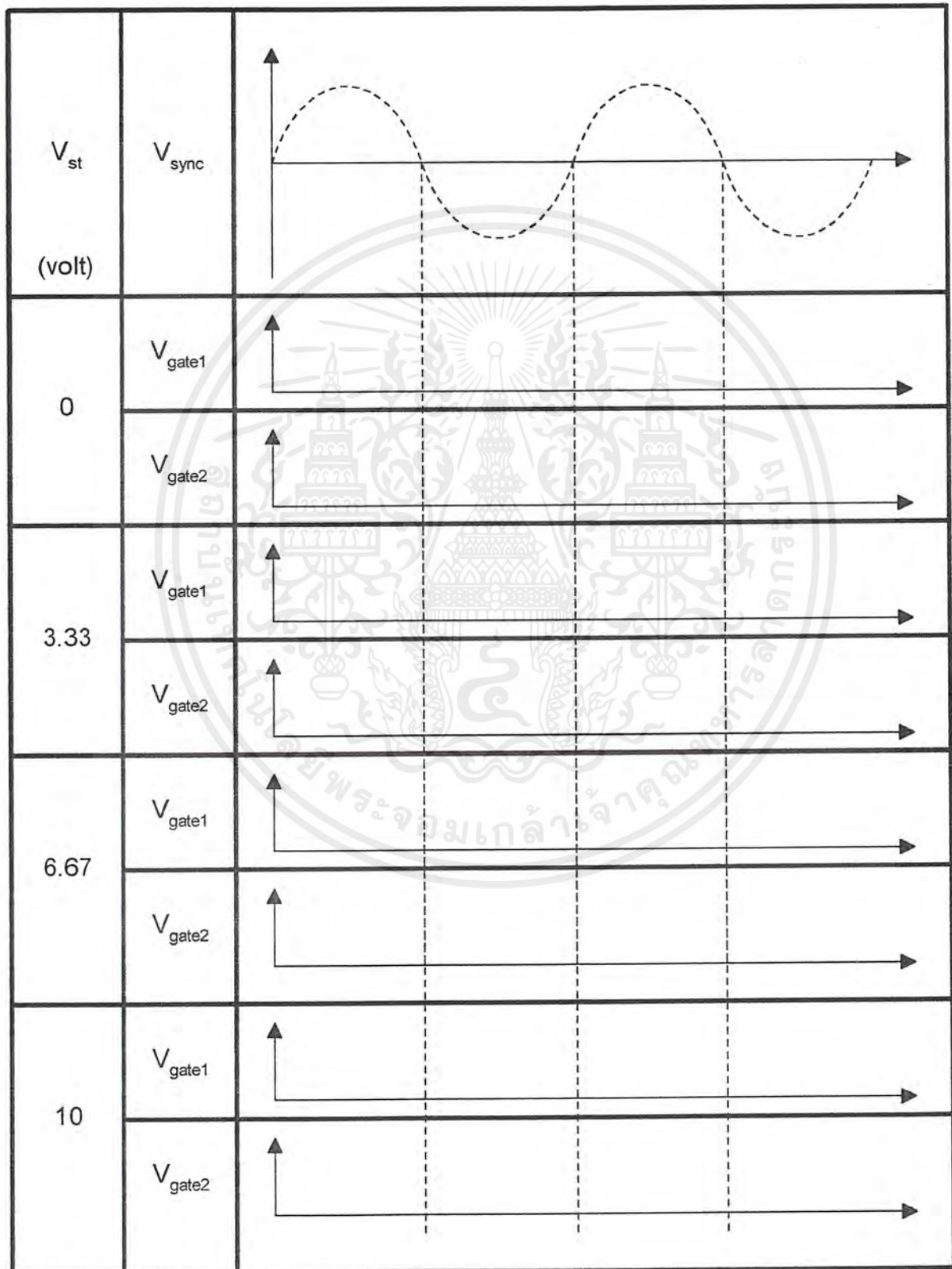


### ลำดับขั้นการทดลอง

1. ต่อแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ 220 โวลท์ 1 เฟส โดยปิดวงจรกำลังก่อน
2. ต่อคีย์โวลท์ดิจิตอลมัลติมิเตอร์วัดค่าแรงดันควบคุม (Control Voltage :  $V_{st}$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

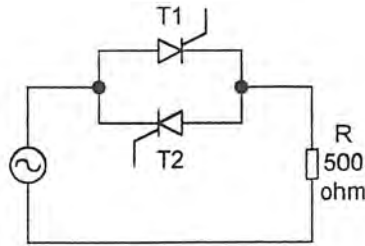
3. เปิดสวิทช์กำลัง ใช้แกนเนต 1 วัดแรงดันอินพุต ( $V_{sync}$ ) ปรับแรงดันควบคุม ( $V_{st}$ ) ตามตาราง และใช้แกนเนต 2 วัดสัญญาณเกต ( $V_{gate1}$ ,  $V_{gate2}$ ) ประมาณค่ามุมจุดชนวนเกต โดยเทียบกับแรงดันอินพุต ( $V_{sync}$ ) บันทึกรูปคลื่นสัญญาณจุดชนวนเกตทั้ง 2 สัญญาณเทียบกับแรงดันอินพุต ( $V_{sync}$ )



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



การทดลองที่ 2 บันทึกการเปลี่ยนแปลงแรงดัน ที่มุมจุดชนวนแตกต่างกัน  
 วงจรการทดลองที่



ลำดับขั้นตอนการทดลองที่

1. เปิดสวิตช์กำลัง ใช้แชนแนล 1 วัดแรงดันอินพุต ( $V_{sync}$ ) ป้อนสัญญาณจุดชนวนเกต gate1 เข้าที่ขาเกตของ T<sub>1</sub>
2. ใช้แชนแนล 2 วัดรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุต ปรับมุมจุดชนวนเกต 0, 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 องศา โดยประมาณมุมจุดชนวนเกตจากมุมเฟสที่เกิดขึ้นกับ โดยเทียบกับสัญญาณแชนแนล 1 ( $V_{sync}$ ) พร้อมทั้งวัดค่าแรงดันเอาต์พุตแล้วบันทึกค่าดังกล่าวและวาดรูปคลื่น

$V_{sync}$ (volt)		
angle (degree)	$V_{load}$ (volt)	
0		
30		
60		

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$V_{\text{sync}}$ (volt)		
angle (degree)	$V_{\text{load}}$ (volt)	
90		
120		
150		
180		

3. ปรับมุมจุดชนวนเกต 0 องศา อธิบายผลที่เกิดขึ้นกับแรงดันเอาต์พุต

---



---

4. ปรับมุมจุดชนวนเกต 180 องศา อธิบายผลที่เกิดขึ้นกับแรงดันเอาต์พุต

---



---

5. ปรับมุมจุดชนวนเกตระหว่าง 0-180 องศา อธิบายผลที่เกิดขึ้นกับแรงดันเอาต์พุต

---



---

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ป้อนสัญญาณจุดชนวนเกต gate2 เข้าที่ขาเกตของ  $T_2$  ปรับมุมจุดชนวนเกต 0, 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 องศา อธิบายผลที่เกิดขึ้นกับแรงดันเอาต์พุต

---



---



---



---



---

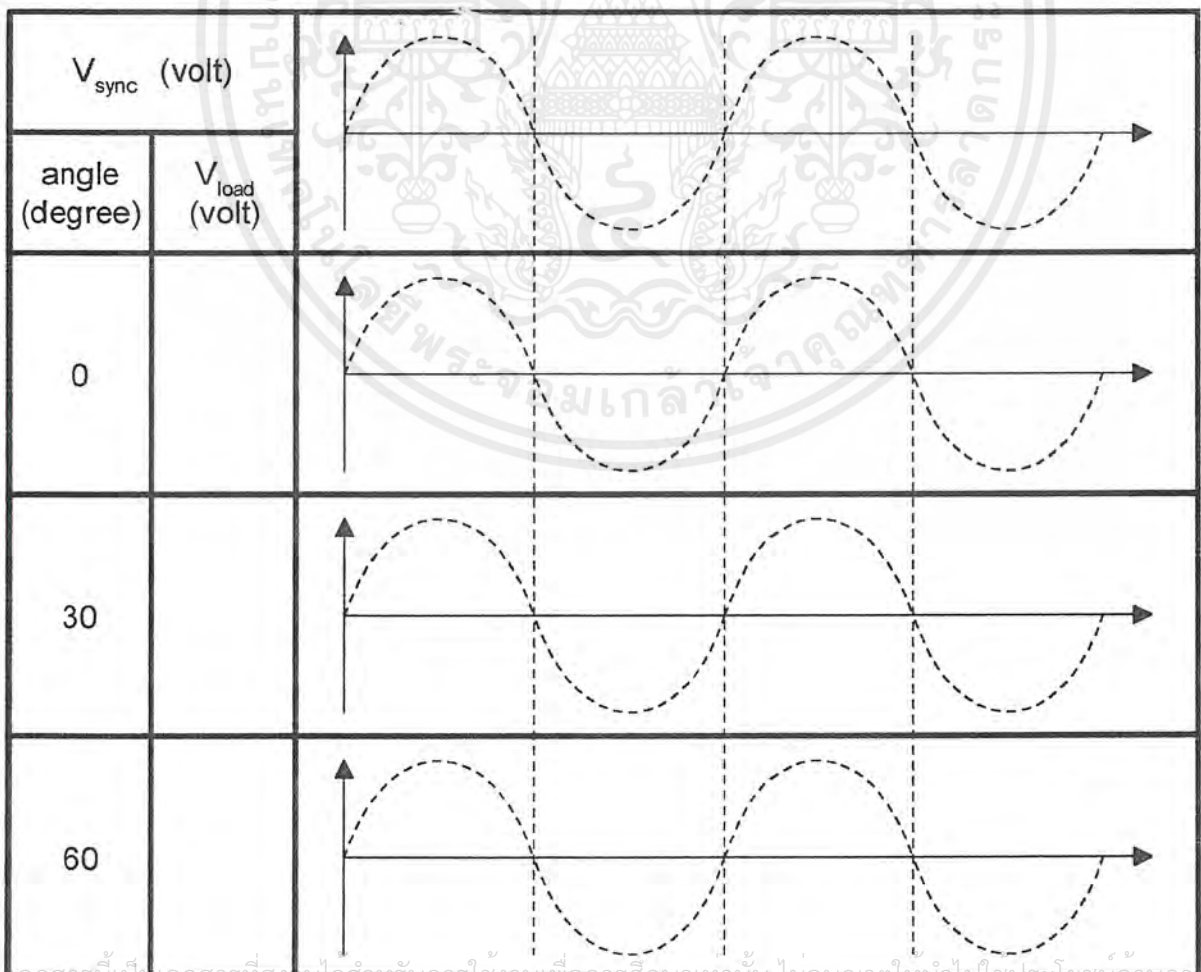


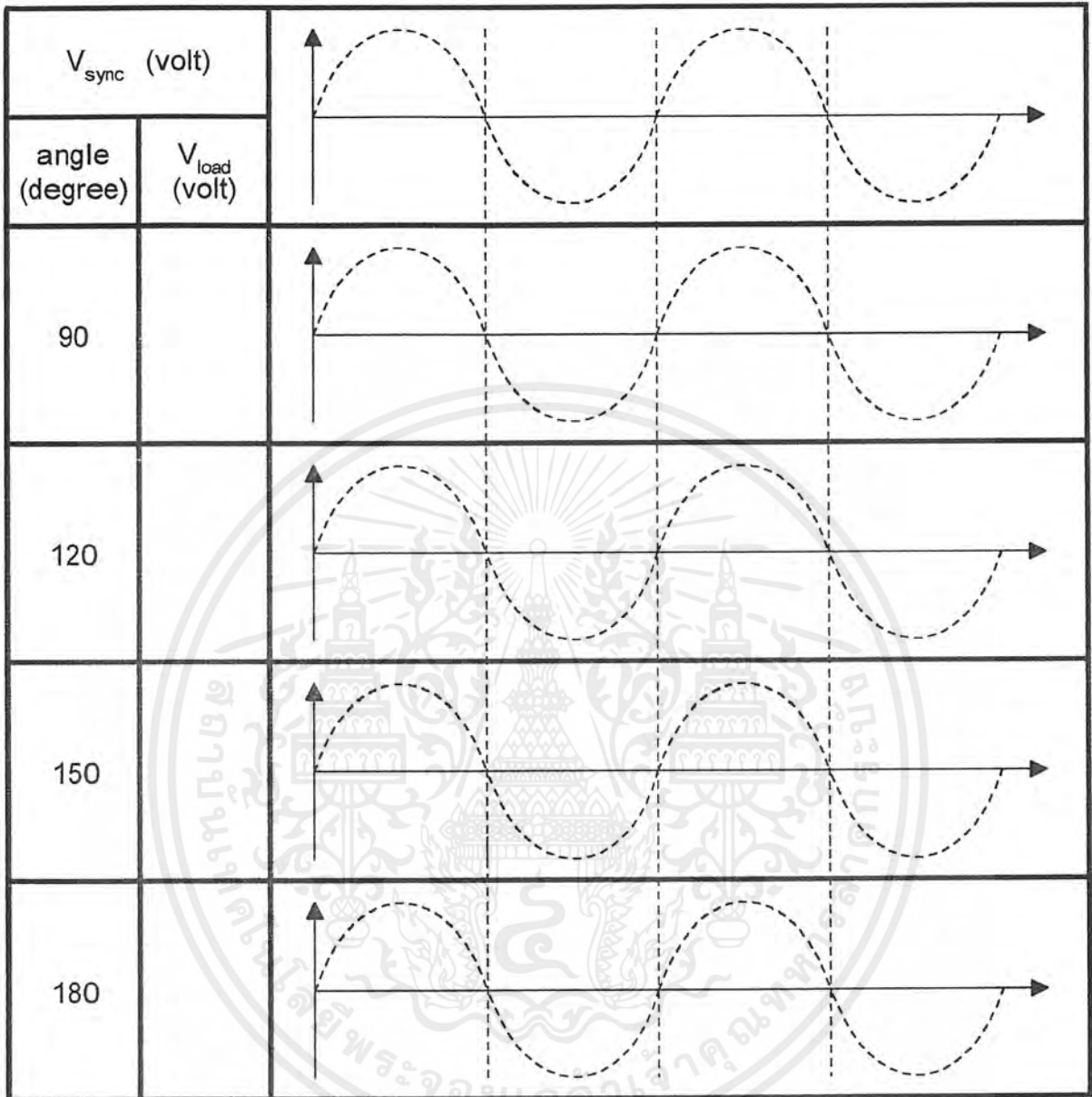
---



---

7. ป้อนสัญญาณจุดชนวนเกต gate1 และ gate2 เข้าที่ขาเกตของ  $T_1$  และ  $T_2$  ใช้แชนแนล 2 วัดรูปคลื่นแรงดันเอาต์พุต ปรับมุมจุดชนวนเกต 0, 30, 60, 90, 120, 150 และ 180 องศาโดยประมาณมุมจุดชนวนเกตจากมุมเฟสที่เกิดขึ้นกับ โดยเทียบกับสัญญาณแชนแนล 1 ( $V_{sync}$ ) พร้อมทั้งวัดค่าแรงดันเอาต์พุตแล้วบันทึกค่าดังกล่าวและวาดรูปคลื่น





8. นำผลที่ได้จากการทดลองทั้ง 3 กรณี มาทำการเปรียบเทียบกัน เพื่อศึกษาให้เห็นถึงความแตกต่างของ คุณลักษณะต่าง ๆ เท่าที่จะสามารถทำได้ เช่น ลักษณะของรูปคลื่นที่มุมพิกต่าง ๆ , ค่าของแรงดันแฮตต์ พุคที่มุมพิกต่าง ๆ เป็นต้น

---



---



---



---

9. สรุปผลการทดลอง

**หมายเหตุ**

10. คุณลักษณะต่าง ๆ เช่น ตัวประกอบกำลัง, กำลังไฟฟ้าจริง, กำลังไฟฟ้าที่ปรากฏ, กำลังไฟฟ้าสูญเสีย, ความผิดเพี้ยนของกำลังไฟฟ้า, ฮาร์มอนิกส์ที่ความถี่ต่าง ๆ เป็นต้น นั้นสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้ที่ภาคผนวก ก เพราะเนื่องจากว่าค่าต่าง ๆ ดังกล่าวนั้นจะสามารถหาได้จากการใช้โปรแกรมทางคอมพิวเตอร์ เช่น แมทแลป ได้เท่านั้น แล้วส่วนใบงานฉบับนี้นั้นได้รวบรวมขึ้นมาเพื่อใช้ควบคู่กับชุดทดลองของโครงการหนึ่ง ซึ่งเป็นโครงการที่ศึกษาเกี่ยวกับโพลชนิดตัวต้านทานที่มีค่าเท่ากับ 500 โอห์ม เนื่องจากว่าสัญญาณทริกดังกล่าวได้ถูกออกแบบไว้ในลักษณะแบบ short pulse แต่ถ้าต้องการที่จะประยุกต์ใช้งานกับโพลที่มีขนาดต่าง ๆ หรือชนิดอื่น ๆ นั้น ก็ให้ขึ้นอยู่กับพิจารณาของผู้ใช้อีกครั้งหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการนี้สำเร็จได้ก็เนื่องจากได้รับการสนับสนุนจาก วิทยาลัยเทคนิคมินบุรี, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ตลอดจนได้รับการช่วยเหลือจากเพื่อนๆทุกคน  
สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคณาจารย์ทุกท่านที่อบรมสั่งสอน  
ให้ความรู้แก่นักศึกษาเพื่อที่จะนำไปใช้ในทางที่ถูกต้องและเป็นกำลังสำคัญในการพัฒนาประเทศ  
ชาติต่อไป



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] Power Electronics, John Wiley & Sons,1989.
- [2] Power Electronics, Kjeld Thorborg
- [3] นภัทร วจินเทพินทร์, ทฤษฎีและการออกแบบวงจรพัลส์,บริษัทสกายบุ๊กส์ จำกัด,2538.
- [4] ชัยวัฒน์, คู่มืออิเล็กทรอนิกส์ บริษัท ซีเอ็ดยูเคชั่น จำกัด (มหาชน),2538.
- [5] เตาอบควบคุมอุณหภูมิ, วิทยานิพนธ์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าลาดกระบัง, 2536.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหาและต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้