

# กรณีศึกษาการออกแบบวงจรกรอง ฮาร์มอนิกแบบพาสซีฟโดยใช้วงจร 6 พัลส์เฟสคอนโทรลคอนเวอร์เตอร์

อาทิตย์ พัฒนพงศ์ชัย

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
Email : Artite\_kmitl@hotmail.com

รศ. พิพัฒน์ เลหาสงคราม

ภาควิชาวิศวกรรมการวัดคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
Email : klpipat@kmitl.ac.th

## บทคัดย่อ

บทความนี้เสนอวิธีการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 และ 7 แบบจูนฟิลเตอร์และไลน์รีแอคเตอร์ โดยใช้โปรแกรม *PSpice* ในการทดสอบตัวกรองและสร้างโหลดจริง (วงจร 6 พัลส์เฟสคอนโทรลคอนเวอร์เตอร์) เพื่อทำการทดลอง รูปคลื่นที่ได้จากการทดลองนำมาวิเคราะห์สเปกตรัมของกระแส แรงดันไฟฟ้า และค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกทั้งหมด (total harmonic distortion : THD) โดยใช้โปรแกรม *MathLAB* ผลการทดลองพบว่า ทั้ง 2 วิธี มีลักษณะสเปกตรัมของกระแสและแรงดันไฟฟ้าไม่แตกต่างกัน

# Case study of power harmonic passive filters design by using 6-pulse phase-controlled Converter

**Artite Pattanapongchai**

Department of Electrical Engineering,  
Faculty of Engineering  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

**Pipat Laohasongkram**

Associate Professor  
Department of Instrument Engineering  
Faculty of Engineering  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

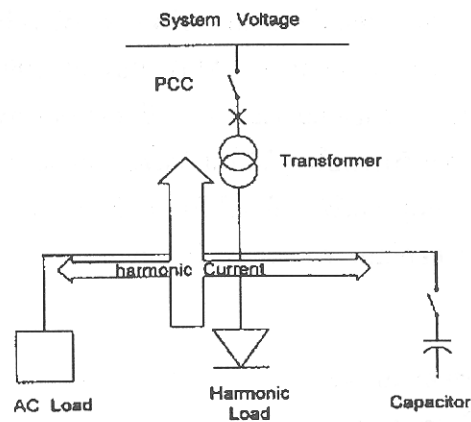
## Abstract

This paper presented the 5<sup>th</sup> and 7<sup>th</sup> power-harmonic filters using the tune and the line reactor design. *PSpice* program is used for simulating the filters and making the real load (using 6-pulse phase controlled converter) for experiment. Resulting waveform from the experiment can be used to analyze current, voltage spectrum, and THD (Total Harmonic Distortion) by using *MathLAB* program. It is found that these methods make an insignificant difference in current and voltage spectrum.

## บทนำ

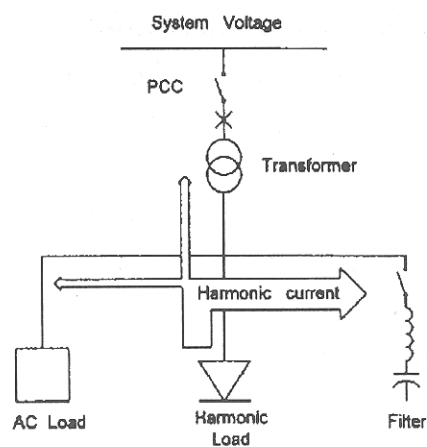
ในปัจจุบันแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกในระบบไฟฟ้ามีด้วยกันหลายอย่างเช่น จากอุปกรณ์ไฟฟ้าประเภท Static Power Converter ที่เริ่มใช้กันแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม โหลดที่เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกเหล่านี้ก่อให้เกิดความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นกระแสและแรงดัน ความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้ามีค่าประมาณ 5% ส่วนกระแสอาจเกิดความผิดเพี้ยนได้มากถึง 40% (Noshirwan K.M. and Alexander K., 2000) ระบบไฟฟ้าโดยทั่วไปที่มีการใช้โหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น และมีการต่อตัวเก็บประจุเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังของระบบไฟฟ้า ซึ่งอาจเกิดสภาวะการเท่ากันของความถี่ธรรมชาติของระบบไฟฟ้ากำลังกับความถี่ของกระแสฮาร์โมนิกที่ไหลในระบบ ทำให้เกิดการขยายของ

กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลในระบบ จนเกินค่ากระแสพิสัยของอุปกรณ์ ทำให้อุปกรณ์เสียหาย  
ได้ และยังทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกไหลเข้าไปในระบบดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ติดตั้งตัวเก็บประจุในระบบ

การแก้ปัญหาที่เกิดขึ้นสามารถทำได้ โดยการติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก  
ชนิดกรองเดียวเข้ากับระบบไฟฟ้า (Alexander K. and Noshirwan K.M., 1994) ซึ่ง  
ทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกส่วนน้อยเท่านั้นที่ไหลในระบบไฟฟ้า และมีค่าไม่เกินค่ามาตรฐาน  
ฮาร์มอนิกที่กำหนดไว้ (สมพร ะวังจุ และไชยะ แซ่มซ้อย 2542) ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก  
ชนิดเดียวในระบบ

การออกแบบตัวกรองฮาร์โมนิกแบบพาสซีฟที่เหมาะสม ฟิลเตอร์ที่เป็นตัวกรองทำงานโดยอาศัยการปรับความถี่เพื่อให้ค่ารีแอคแตนซ์ของตัวเหนี่ยวนำมีค่าเท่ากับรีแอคแตนซ์ของตัวเก็บประจุ หลักการออกแบบ (A. Kusko and S.M. Peeran, 1990) นำมาใช้กับระบบ 6 พัลส์เฟสคอนโทรลคอนเวอร์เตอร์สำหรับไดร์ฟดีซีมอเตอร์ และใช้โปรแกรม *PSpice* ในการทดสอบการกรอง (M.H. Rashid, 1993) และแสดงลักษณะของกระแสฮาร์โมนิกในการทดลองที่สภาวะต่างๆ ซึ่งจากหลักการดังกล่าวสามารถที่จะนำมาออกแบบตัวกรองสำหรับระบบใดๆ ได้ โดยฟิลเตอร์ที่ออกแบบสำหรับงานหนึ่งๆ ไม่ใช่แบบที่สามารถใช้กับงานทุกงานได้ ถ้าจะใช้ฟิลเตอร์ทำงานได้จะต้องวิเคราะห์ฮาร์โมนิกของระบบทุกครั้งที่จะออกแบบ ค่ากระแสฮาร์โมนิก และข้อมูลต่างๆ ต้องใช้ค่าจริงที่วัดได้เสมอ

ข้อดีของการออกแบบด้วยวิธีนี้คือ สามารถที่จะออกแบบฟิลเตอร์สำหรับระบบใดๆ ได้โดยมีความถูกต้องของการออกแบบสูง เนื่องจากการออกแบบแต่ละครั้งจะทำการจำลองระบบในโปรแกรม *PSpice* ก่อนและทำการทดสอบการกรอง และถ้าหากมีผลการกรองที่ดี ก็สามารถที่จะนำมาใช้กับระบบจริงได้

## การสร้างระบบสำหรับเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิก

### การออกแบบและคำนวณค่าส่วนประกอบของวงจรกรองฮาร์โมนิก

#### การสร้างระบบที่ใช้เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิก

สร้างระบบวงจร 6 พัลส์เฟสคอนโทรลคอนเวอร์เตอร์เพื่อใช้ในการขับเคลื่อนดีซีมอเตอร์เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์โมนิกเข้าสู่ระบบในการจุดฉนวนเกิดให้กับ 6 พัลส์เฟสคอนโทรลเวอร์เตอร์นั้น ต้องใช้ไฟกระแสสลับ 3 เฟส จ่ายเข้าวงจรรวม *TCA 785* จำนวน 3 ตัว วงจรรวม *TCA 785* จะสร้างสัญญาณพัลส์ออกมาที่ขา 14 และ 15 นำมาต่อเข้าวงจรแยกกราวด์และขยายกระแสโดยต่อเข้าที่ขา 1 ของออปโตเบอร์ด *4N25* เพื่อทำการแยกกราวด์และใช้ *BD 139* ต่อดาร์ลิงตันเพื่อขยายกระแส เพื่อให้เป็นสัญญาณเกิดให้กับไทรสเตอร์ทั้ง 6 ตัว

### การคำนวณค่าส่วนประกอบของวงจรกรองกระแสฮาร์มอนิก

#### ขั้นตอนในการคำนวณค่าไลเนอร์แอกเตอร์

1. ต้องรู้ค่าพิกัดกำลังที่ใช้ในการขับโหลดมีขนาดเท่าไร (kVA) และขนาดของแรงดันที่ใช้ในการขับโหลดมีค่าขนาดเท่าไร (volt)
2. เมื่อรู้ค่าพิกัดกำลังและขนาดแรงดันที่ใช้กับระบบแล้วนำมาคำนวณค่ากระแสไฟฟ้าในระบบได้จากสมการ

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}V} \quad (1)$$

3. นำค่าที่ได้มาคำนวณอิมพีแดนซ์ของระบบโดยสมการ

$$Z = \frac{V/\sqrt{3}}{I} \quad \text{หรือ} \quad Z = \frac{V^2}{VA} \quad (2)$$

4. คำนวณค่ารีแอกเตอร์ โดยที่ค่ารีแอกเตอร์นั้นประมาณ 3%–5% ของอิมพีแดนซ์ของระบบ

$$\%X_L = 3\% \rightarrow 5\%(Z) \quad (3)$$

5. นำค่าที่ได้มาคำนวณค่าอินดักแตนซ์ (L) จากสมการ

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} \quad (4)$$

#### ขั้นตอนการคำนวณค่าส่วนประกอบของวงจรกรองฮาร์มอนิก

1. กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบไฟฟ้าที่ติดตั้งตัวกรองฮาร์มอนิกว่ามีค่าเท่าใด
2. กำหนดค่ากำลังงานรีแอกทีฟที่ระบบต้องการ

$$Q_{com} = kW (\tan \theta_1 - \tan \theta_2) \quad (5)$$

$Q_{com}$  คือ กำลังงานรีแอกทีฟที่ระบบต้องการ (kVAr)

$kW$  คือ กำลังงานจริงของระบบของโหลดรวมทั้งหมด (kW)

$\theta_1$  คือ มุมของตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเดิม

$\theta_2$  คือ มุมของตัวประกอบกำลังไฟฟ้าใหม่

3. วิเคราะห์ข้อมูลกระแสฮาร์โมนิกที่ไหลในระบบที่ได้จากการวัดจริง หรือ การประเมิน และทำการกำหนดจำนวนชุดตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกในระบบ
4. ทำการแบ่งค่า  $Q_{com}$  ออกเป็นส่วนตามจำนวนชุดของตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกที่ได้กำหนดไว้โดยอาศัยข้อมูลขนาดกระแสฮาร์โมนิกที่ไหลในระบบ และขนาดของภาระในระบบไฟฟ้า
5. กำหนดจุดปรับคลื่น (tuning point) ของตัวกรองกระแสฮาร์โมนิกในแต่ละลำดับ
6. กำหนดขนาดพิกัดแรงดันของตัวเก็บประจุ

$$V_{Cr} \geq \frac{n_h^2}{n_h^2 - 1} \times V_{sys} \quad (6)$$

$V_{sys}$  คือ แรงดันระบบที่ตัวกรองต่อคร่อมอยู่ (โวลต์)

$n_h$  คือ ค่าจุดปรับคลื่นของตัวกรอง

$V_{Cr}$  คือ แรงดันพิกัดของตัวเก็บประจุ (โวลต์)

7. กำหนดขนาดกำลังงานรีแอกทีฟพิกัดของตัวเก็บประจุ ที่ต้องใช้ในตัวกรองแต่ละลำดับ

$$Q_{Cr} = \frac{Q_{Com}}{\left[ \frac{n_h^2}{n_h^2 - 1} \right] \times \left[ \frac{V_{Sys}}{V_{Cr}} \right]^2} \quad (7)$$

$V_{sys}$  คือ แรงดันระบบที่ตัวกรองต่ออยู่ (โวลต์)

$n_h$  คือ ค่าจุดปรับคลื่นของตัวกรอง

$V_{Cr}$  คือ แรงดันพิกัดของตัวเก็บประจุ (โวลต์)

$Q_{com}$  คือ กำลังงานรีแอกทีฟชดเชยจ่ายให้ระบบ (kVAr)

$Q_{Cr}$  คือ กำลังงานรีแอกทีฟพิกัดตัวเก็บประจุ (kVAr)

8. หาค่าตัวเก็บประจุ ค่าตัวเหนี่ยวนำ และค่าความต้านทาน

$$X_c = \frac{V_{cr}^2}{Q_{cr} \times 10^3} \quad (8)$$

$$C = \frac{1}{2\pi f \times X_c} \quad (9)$$

$$L = \frac{X_c}{2\pi f \times n_h^2} \quad (10)$$

$$R = \frac{X_L}{Q_F} \text{ ที่ } n_h^2 \quad (11)$$

$V_{Cr}$  คือ แรงดันที่พิกัดของตัวเก็บประจุ (โวลต์)

$Q_{Cr}$  คือ กำลังงานรีแอกทีฟพิกัดของตัวเก็บประจุ (kVAr)

$n_h$  คือ ค่าจุดปรับคลื่นของตัวกรอง

$Q_F$  คือ ตัวประกอบคุณภาพของตัวกรอง

หมายเหตุ ค่า  $R$   $L$  และ  $C$  เป็นค่าต่อเฟส

9. ติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกเข้ากับระบบแล้ววิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิกในส่วนต่างๆ ของระบบไฟฟ้าใหม่ และตรวจสอบการทำงานของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก
- ตรวจสอบตัวเก็บประจุว่าทำงานเกินพิกัดหรือไม่
  - ตรวจสอบขนาดกระแสรวมที่ไหลผ่านตัวเหนี่ยวนำ

$$I_{RMS,Li} = \sqrt{(I_{fi,l} \times 1.1)^2 + \sum_{h=2}^n I_{Fi,h}^2} \quad (12)$$

$I_{Fi,l}$  คือ กระแสไหลผ่านตัวกรองที่  $i$  ที่ความถี่หลักมูล (A)

$I_{Fi,h}$  คือ กระแสฮาร์มอนิกไหลผ่านตัวกรองที่  $i$  ที่ความถี่ฮาร์มอนิก (A)

$I_{RMS,Li}$  คือ กระแสรวมที่ไหลผ่านตัวกรองทั้งหมด (A)

- ตรวจสอบขนาดกระแสฮาร์มอนิกและแรงดันฮาร์มอนิกอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนดหรือไม่

- ง. ทดสอบการทำงานตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก เมื่อตัวแปรต่างๆ ของระบบเปลี่ยนไป

### การทดลองและผลการทดลอง

#### อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ออสซิลโลสโคปแบบดิจิตอล 1 เครื่อง และโพรบ  $\times 100$
2. ดีซีมอเตอร์ พิกัดขนาด  $1.5kW$  130 โวลต์ดีซี Amps.  $15A$  ที่ 1800 r.p.m. ต่อบางแบบซันส์ วัดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของดีซีมอเตอร์จากเครื่องวัดพารามิเตอร์ของ Siemens
3. DC Generator มีพิกัด  $700W$  Field Volt  $80V$  Arm.Volt  $70V$  Torque  $68\text{ kg-cm}$
4. แผงโหลดหลอดไฟ 2 แผง
5. วาริแอค 3 เฟส และ 1 เฟส อย่างละ 1 ตัว
6. เครื่องวัดสัญญาณกระแส (LEM) พิกัด  $15A$
7. ดิจิตอลมิเตอร์ แอมป์มิเตอร์ วัดดีเอ็มเตอร์
8. ชุดตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 และ 7 ชุดไลเนอร์แอคเตอร์

#### ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

ในการทดลองใช้การจำลองระบบ 6 พัลส์เฟสคอนโทรลคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ขับเคลื่อนดีซีมอเตอร์เป็นโหลดของฟีดเตอร์ และทำการทดสอบตัวกรองด้วยโปรแกรม PSpice จากนั้นทำการสร้างโหลดจริงเพื่อทำการทดลอง โดยทำการทดลองที่สภาวะ

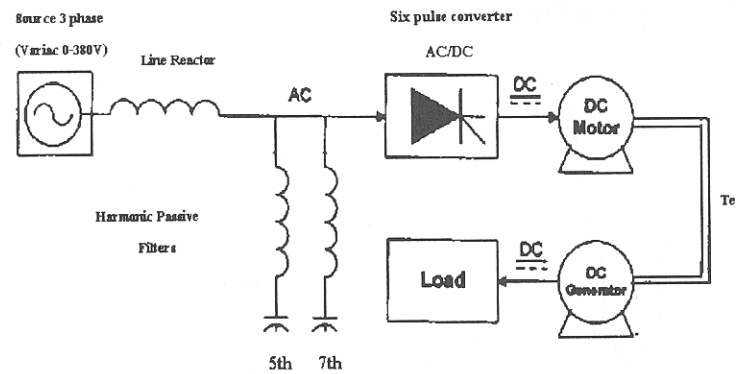
1. ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 และ 7 ที่มุมทริก SCR  $0^\circ$
2. ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 และ 7 และไลเนอร์แอคเตอร์ที่มุมทริก SCR  $0^\circ$
3. ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 และ 7 และไลเนอร์แอคเตอร์ที่มุมทริก SCR  $30^\circ$

แรงดันที่ใช้ในระบบ 100 โวลต์ พิกัดกำลังที่ปรากฏในระบบ (S) 3,300 โวลต์-แอมป์ กำหนดขนาดไลเนอร์แอคเตอร์ได้  $0.30\text{ mH}$  กำหนดขนาดตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 และ 7 ได้

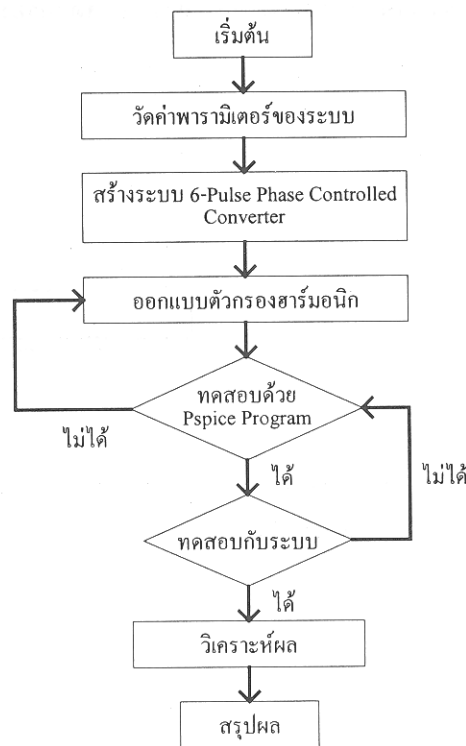
ก.  $C_5 = 240(\mu F)/\text{phase}$   $L_5 = 1.84(\text{mH})/\text{phase}$

ข.  $C_7 = 150(\mu F)/\text{phase}$   $L_7 = 1.38(\text{mH})/\text{phase}$

ส่วนค่าความต้านทานของตัวกรองที่คำนวณได้มีค่าน้อยมากบันทึกผลรูปคลื่น  
กระแสไลน์ ( $I_a, I_b, I_c$ ) และแรงดันเฟส ( $V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}$ )



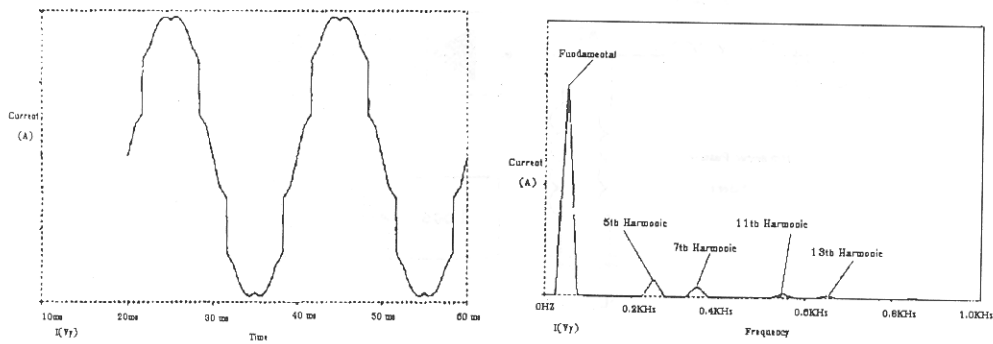
รูปที่ 3 ซิงเกิลไลน์ไดอะแกรมของระบบที่ใช้ทำการทดลอง



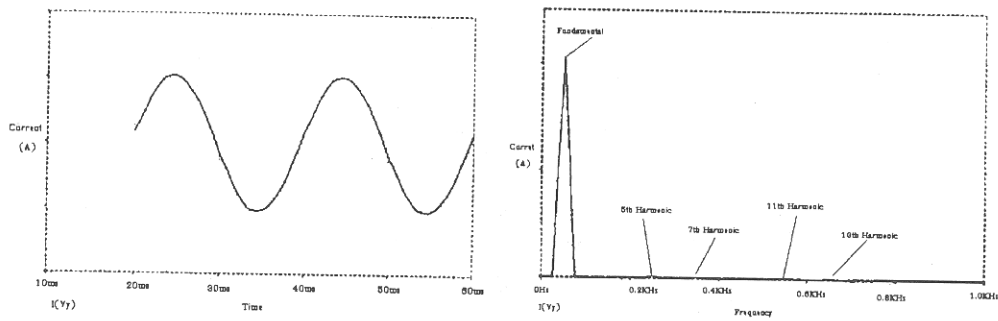
รูปที่ 4 ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

## ผลการทดลอง

ผลการทดลองใช้โปรแกรม *PSpice* ในการทดสอบตัวกรอง มีรายละเอียดดังแสดงในรูปที่ 5 และรูปที่ 6 ดังต่อไปนี้

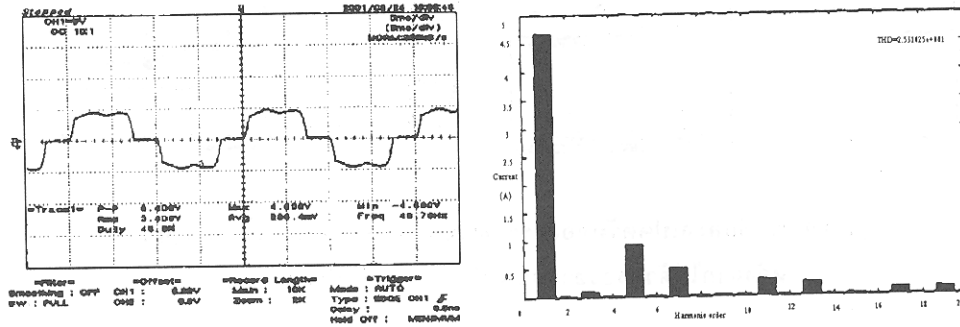


รูปที่ 5 กราฟและสเปกตรัมกระแสก่อนใส่ตัวกรอง

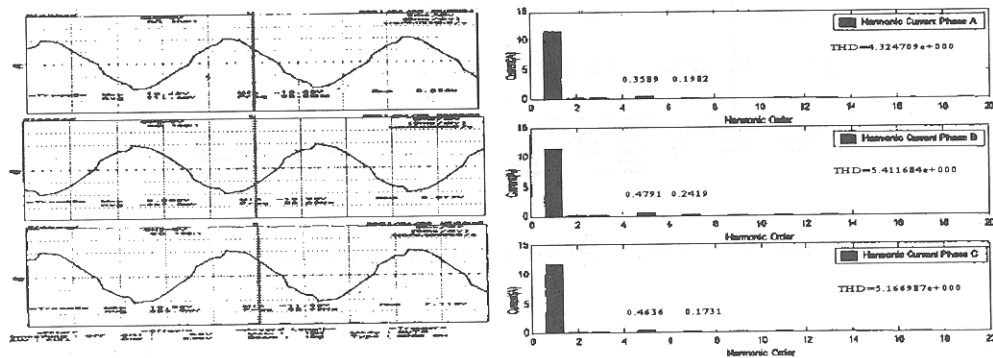


รูปที่ 6 กราฟกระแสและสเปกตรัมกระแสหลังใส่ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5, 7 และไลเนอร์แอกเตอร์

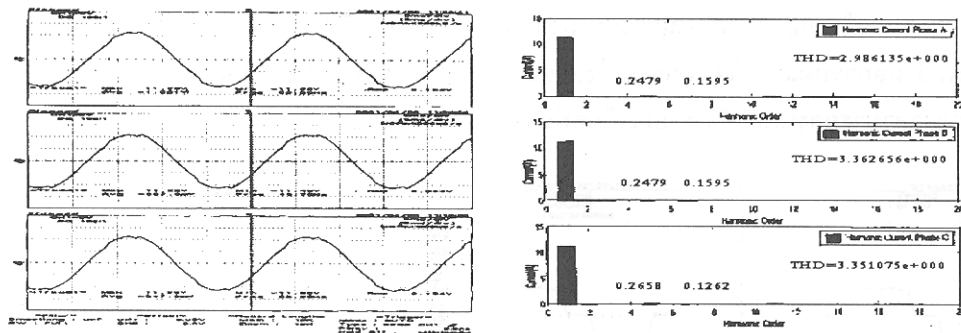
ในขณะเดียวกันในการประมวลผลการทดลองที่ได้จากการสร้างระบบจริง จะพบว่าผลการทดลองที่ได้มีลักษณะดังแสดงในรูปที่ 7 ถึงรูปที่ 12 ซึ่งจากผลการทดลองดังกล่าวสามารถสรุปผลได้ดังรายละเอียดที่แสดงในหัวข้อต่อไป



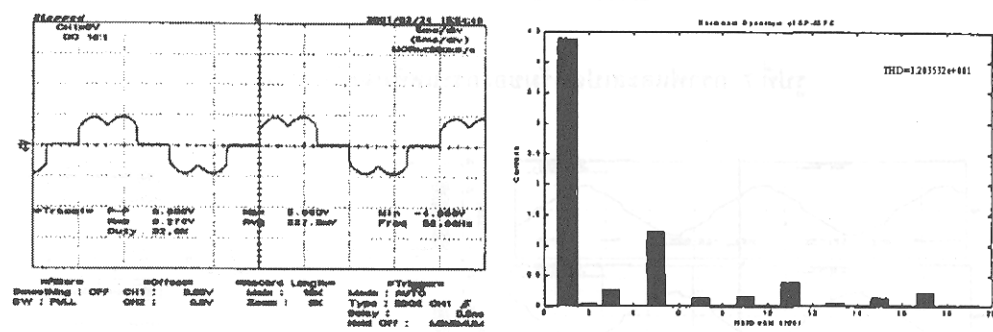
รูปที่ 7 กราฟและสเปกตรัมของกระแสที่มุมทริก SCR  $0^\circ$



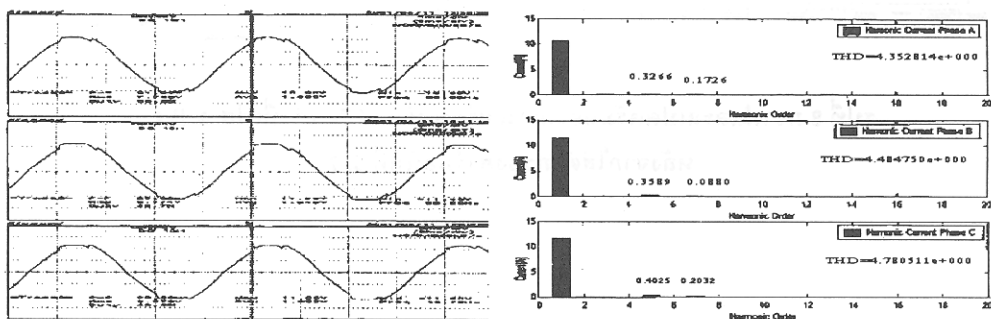
รูปที่ 8 กราฟและสเปกตรัมของกระแสที่มุมทริก SCR  $0^\circ$  ที่เฟส A,B,C  
หลังจากใส่ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5, 7



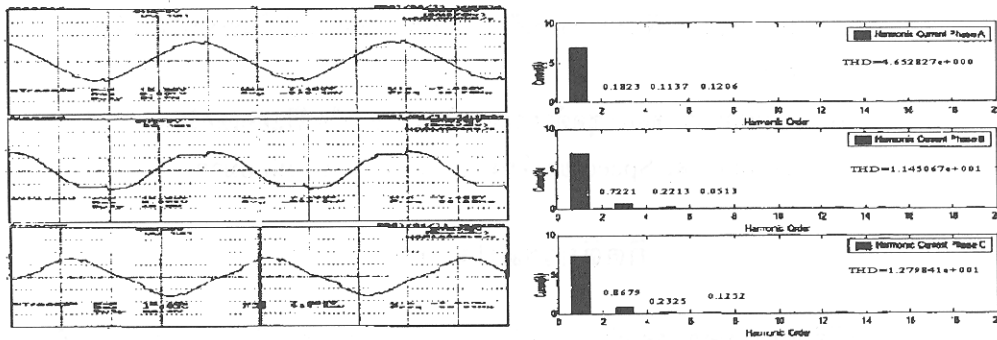
รูปที่ 9 กราฟและสเปกตรัมของกระแสที่มุมทริก SCR 0° ที่เฟส A,B,C  
หลังจากใส่ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5, 7 และไลน์รีแอคเตอร์



รูปที่ 10 กราฟและสเปกตรัมของกระแสที่มุมทริก SCR 30°



รูปที่ 11 กราฟและสเปกตรัมของกระแสที่มุมทริก SCR 30° ที่เฟส A,B,C  
หลังจากใส่ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 และไลน์รีแอคเตอร์



รูปที่ 12 กราฟและสเปกตรัมของกระแสที่มุมทริก SCR 30° ที่เฟส A, B, C  
หลังจากใส่ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 7 และ ไลน์แอกเตอร์

### วิจารณ์และสรุปผลการทดลอง

- 1) จากการใช้โปรแกรม PSpice จำลองระบบการทำงานของตัวกรองฮาร์มอนิกพบว่า ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ออกแบบไว้สามารถกรองฮาร์มอนิกออกจากระบบได้ โดยสังเกตได้จากกราฟกระแสไลน์และแรงดันที่เป็นไซน์มากขึ้นและฮาร์มอนิกที่ 5 และ 7 ลดลง
- 2) จากการทดลองกับระบบ 6 พัลส์เฟสคอนโทรลคอนเวอร์เตอร์ที่สร้างขึ้นพบว่าระบบสามารถซัพดีซีมอเตอร์ได้อยู่ในช่วงมุมจุดชนวนเกต (มุมทริก)  $0^\circ - 90^\circ$  และเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกตามสมการคุณลักษณะ  $n=pk \pm 1$  คือ เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกที่ 5, 7, 11, 13, 17, 19, ...
- 3) หลังใส่ตัวกรองฮาร์มอนิกที่ 5 และ 7 ขนานเข้าไปในระบบสามารถลดฮาร์มอนิกลงได้ โดยสามารถลดได้ทั้งกระแสฮาร์มอนิก แรงดันฮาร์มอนิก และค่า THD และเมื่อใส่ไลน์แอกเตอร์ร่วมกับตัวกรองฮาร์มอนิกพบว่าสามารถลดกระแสฮาร์มอนิก แรงดันฮาร์มอนิกและค่า THD ได้ดีกว่าใส่เฉพาะตัวกรองฮาร์มอนิกเพียงอย่างเดียว โดยไลน์แอกเตอร์จะสามารถช่วยลดฮาร์มอนิกลำดับที่สูงๆ ได้
- 4) ในการทดลองพบว่า เมื่อปรับมุมจุดชนวนเกตเพิ่มขึ้นทำให้คุณภาพการกรองลดลง ต้องทำการปรับค่าตัวกรองใหม่

- 5) จากการทดลองพบว่า ถ้าใช้ตัวกรองฮาร์โมนิกเฉพาะตัวกรองฮาร์โมนิกที่ 5 หรือ 7 เพียงตัวกรองเดียว แก้ปัญหาฮาร์โมนิกในระบบได้ไม่ดีเท่าที่ควร
- 6) จากผลการทดลอง ชุดตัวกรองฮาร์โมนิกและไลเนอร์แอกเตอร์มีผลทำให้ค่า Torque และ Speed ของดีซีมอเตอร์เปลี่ยนแปลงน้อยมาก

### กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ รศ.ศุภี บรรจงจิตร อาจารย์เชาว์ ชมภูอินไหว และอาจารย์ชาย ชมภูอินไหว สำหรับคำแนะนำในเรื่องการทดลองและการใช้เครื่องมือ คุณอัครเดช พรหมชน และคุณศุภกิจ ฉั่วเจริญ ที่ช่วยเหลือในการทดลอง รุ่งพินีสติปริญญาโท สาขาไฟฟ้ากำลัง ที่แนะนำในการสร้างวงจรที่ใช้ในการทดลองวงจรต่างๆ ตลอดจนภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือในการทดลอง

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Noshirwan K.Medora and Alexander Kusko "Computer-Aided Design and Analysis of Power-Harmonic Filter" IEEE Trans on Industry Application vol.36 pp.604-613, Mar/Apr 2000.
- [2] Alexander Kusko and Noshirwan K.Medora "Switching of Power Harmonic Filter" in Conf. Rec. 29<sup>th</sup> IEEE-IAS Annual Meeting, Denver CO., Oct.2-5, 1994, pp.941-951
- [3] S.D.Upadhye and Prof. Y.R Atre "Determination of the design parameters of passive harmonic filters using nonlinear optimization" IEEE 0-7803-4509-6/98/1998.
- [4] A.Kusko and S.M Peeran "Design of Power Harmonic Filters" Power Quality Conferenec, November 13-15,1990.
- [5] M.H. Rashid, "Spice for Power Electronics and Electric" Power Englewood Cliffs, NJ:Prentice-Hall, 1993.
- [6] สมพร สะวังจุ และไชยะ แซ่มซ้อย "การออกแบบที่เหมาะสมที่สุดของตัวกรองฮาร์โมนิกขนกรองเดี่ยว" เอกสารประกอบการสัมมนาวิศวกรรมไฟฟ้ากำลังปี 2000 24-26 พฤศจิกายน 2542

- [7] ชัยยง แก้วมงคล, นภัทร วัฒนเทพินทร์ “อิเล็กทรอนิกส์กำลัง 1 (วงจรคอนเวอร์เตอร์)” บริษัท สายบุ๊คส์ จำกัด 335 หน้า พฤษภาคม 2540
- [8] รศ.ดร.มนัส สังวรศิลป์ และวรรตริ ภัทรอมรกุล “คู่มือการใช้งาน MATLAB ฉบับสมบูรณ์” อินโฟ-เพรส 508 หน้า เมษายน 2543

ตารางที่ 1  
เปอร์เซ็นต์ของกระแสแรงดันฮาร์โมนิกที่ 5 และ 7 ค่า  $THD_i$  (%),  $THD_v$  (%) ที่มุมทริก SCR 0° ที่ 50% พิกัด Rated load

| Test Condition                                                                   | 5 <sup>th</sup><br>Harmonic<br>Current<br>(%) | 7 <sup>th</sup><br>Harmonic<br>Current<br>(%) | $THD_i$ (%) |            |            | 5 <sup>th</sup><br>Harmonic<br>Voltage<br>(%) | 7 <sup>th</sup><br>Harmonic<br>Voltage<br>(%) | $THD_v$ (%) |             |             | Torque<br>(N.m) | Speed<br>(rpm) |
|----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------|------------|------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-----------------|----------------|
|                                                                                  |                                               |                                               | Phase<br>A  | Phase<br>B | Phase<br>C |                                               |                                               | Phase<br>AB | Phase<br>BC | Phase<br>AC |                 |                |
| No Filters                                                                       | 19.80                                         | 10.83                                         | 25.31       | 26.51      | 28.23      | 2.50                                          | 2.40                                          | 4.40        | 4.67        | 4.33        | 2               | 1456           |
| 5 <sup>th</sup> and 7 <sup>th</sup> Tuned<br>Harmonic Filter                     | 3.08                                          | 1.70                                          | 4.32        | 5.41       | 5.16       | 0.72                                          | 1.07                                          | 2.54        | 2.80        | 2.40        | 2               | 1449           |
| 5 <sup>th</sup> and 7 <sup>th</sup> Tuned<br>Harmonic Filter and Line<br>Reactor | 2.24                                          | 1.31                                          | 2.98        | 3.26       | 3.35       | 0.23                                          | 0.50                                          | 1.45        | 1.44        | 1.40        | 2               | 1452           |

ตารางที่ 2  
เปอร์เซ็นต์ของกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกที่ 5 และ 7 ค่า  $THD_i$  (%),  $THD_v$  (%) ที่มุมทริก SCR  $30^\circ$  ที่ 50% พิกัด Rated load

| Test Condition                                            | 5 <sup>th</sup><br>Harmonic<br>Current<br>(%) | 7 <sup>th</sup><br>Harmonic<br>Current<br>(%) | $THD_i$ (%) |            |            | 5 <sup>th</sup><br>Harmonic<br>Voltage<br>(%) | 7 <sup>th</sup><br>Harmonic<br>Voltage<br>(%) | $THD_v$ (%) |             |             | Torque<br>(N.m) | Speed<br>(rpm) |
|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------|------------|------------|-----------------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|-----------------|----------------|
|                                                           |                                               |                                               | Phase<br>A  | Phase<br>B | Phase<br>C |                                               |                                               | Phase<br>AB | Phase<br>BC | Phase<br>AC |                 |                |
| No Filters                                                | 20.54                                         | 11.23                                         | 32.03       | 33.10      | 33.23      | 2.65                                          | 2.54                                          | 9.01        | 9.12        | 9.05        | 2.7             | 1942           |
| 5 <sup>th</sup> Tuned Harmonic<br>filter and Line reactor | 3.02                                          | 1.60                                          | 4.35        | 4.48       | 4.78       | 0.98                                          | 0.44                                          | 3.00        | 3.43        | 3.10        | 2.7             | 1934           |
| 7 <sup>th</sup> Tuned Harmonic<br>filter and Line reactor | 3.13                                          | 0.73                                          | 4.65        | 11.45      | 12.80      | 0.47                                          | 0.75                                          | 3.17        | 3.70        | 3.22        | 2.7             | 1945           |