

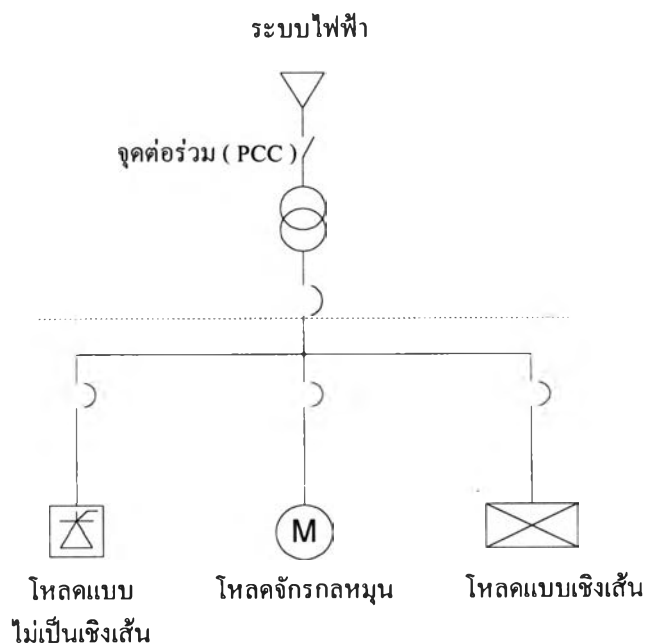
บทที่ 5

ผลการคำนวณและตัวอย่างการวิเคราะห์

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้เสนอวิธีการคำนวณหาขนาดของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก ที่เหมาะสมกับระบบ และมีราคาต่ำที่สุด โดยการทำให้เป็นโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อให้เกิดความสะดวกแก่ผู้ใช้งาน โดยได้ใช้โปรแกรม วิชาลเบสิก รุ่น เอนเตอร์ไพรส์ เวอร์ชัน 5.0 (Microsoft Visual Basic 5.0 Enterprise) เป็นเครื่องมือในการพัฒนา โปรแกรมคอมพิวเตอร์นี้ให้ขีดความสามารถดีพอสมควร โดยเฉพาะเป็นภาษาที่ง่ายต่อการทำงานของโปรแกรม สะดวก เข้าใจง่าย และตอบสนองต่อการทำงานของผู้ใช้โปรแกรมได้ตามความต้องการ ในบทนี้จะขอก้าวถึงโครงสร้างการทำงาน ของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ รวมถึงผลการคำนวณและการวิเคราะห์ของระบบทดสอบ โดยใช้ระบบจำลองของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น

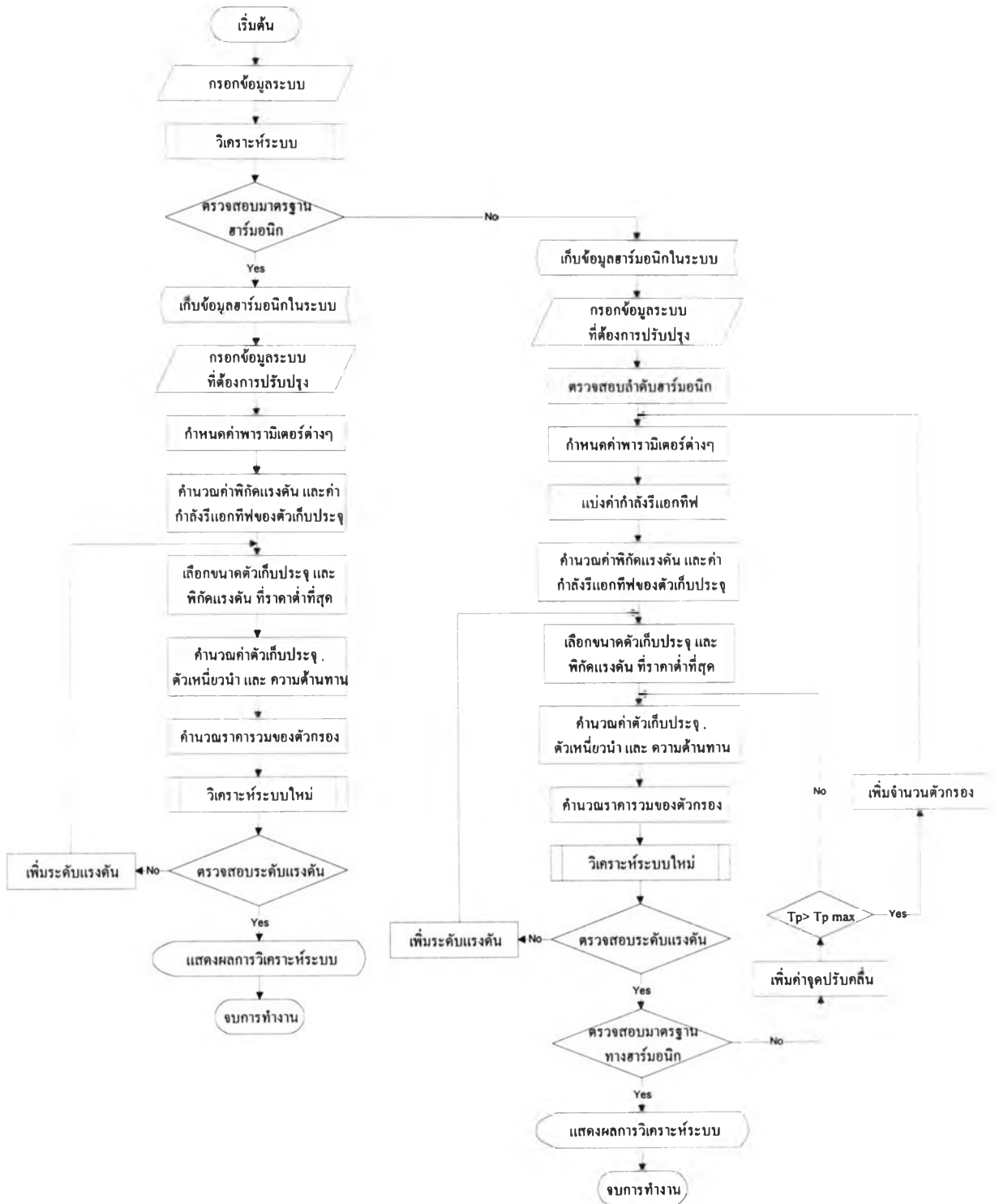
5.1 โครงสร้างการทำงาน ของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

โปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ที่พัฒนาขึ้น ผู้ใช้จะต้องใส่ข้อมูลระบบ ข้อมูลหม้อแปลง และ ข้อมูลโหลดทั้งหมดตามแผนภาพเส้นเดี่ยว (Single Line Diagram) ดังรูปที่ 5.1 ซึ่งเป็นระบบที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ลงบนหน้าจอกอมพิวเตอร์ในส่วนที่รับข้อมูลโดยตรง



รูปที่ 5.1 แผนภาพเส้นเดี่ยวของระบบที่ทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์ จะทำการวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าเดิมก่อนเพื่อหาการไหลของกระแสฮาร์มอนิกในส่วนต่างๆ ของระบบ แล้วทำการพิจารณาผลการวิเคราะห์ที่ได้เปรียบเทียบกับมาตรฐานฮาร์มอนิก หลังจากนั้นจึงทำการออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดกรองเดี่ยว โครงสร้างการทำงานของโปรแกรมสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 5.2



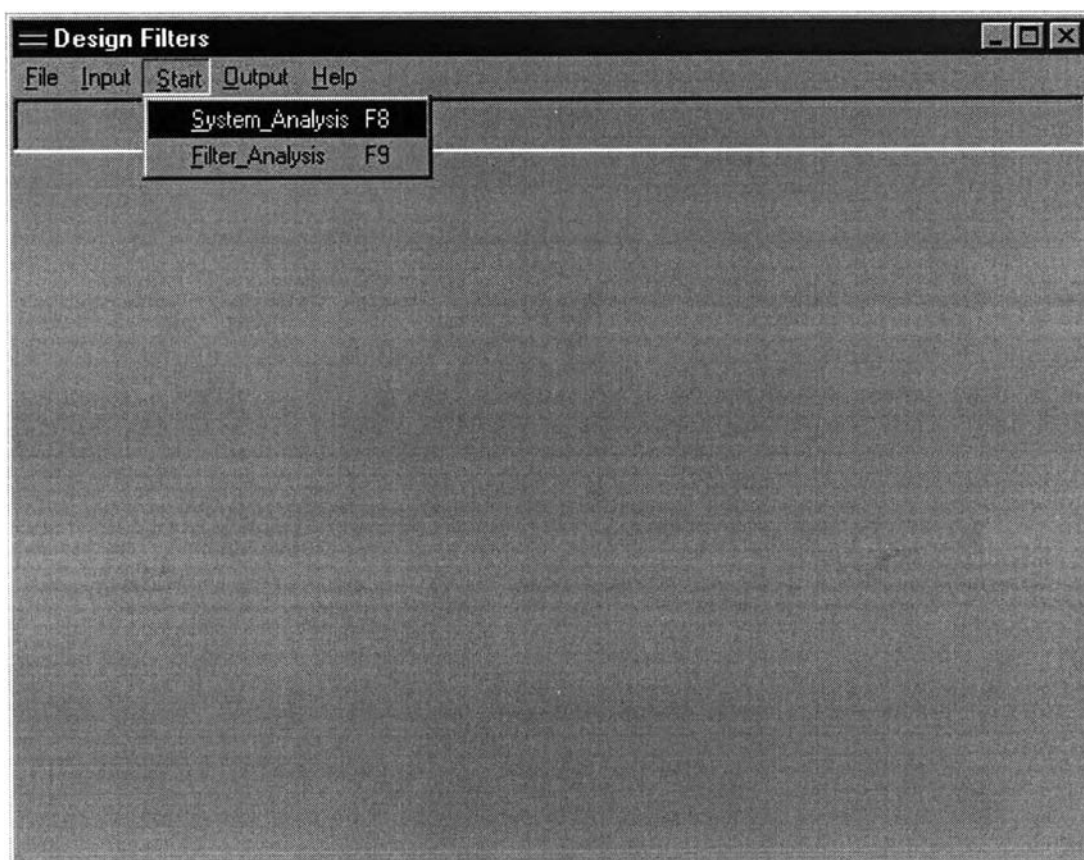
รูปที่ 5.2 โครงสร้างการทำงานของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

5.2 การป้อนข้อมูลเข้าสู่ระบบ

ข้อมูลของระบบไฟฟ้าแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ส่วนแรก คือ ข้อมูลของระบบ ข้อมูลหม้อแปลง ข้อมูลโหลด ส่วนที่สอง คือ ข้อมูลเกี่ยวกับราคาตัวเก็บประจุ ราคาตัวเหนี่ยวนำ ค่าตัวประกอบกำลังที่ต้องการ เป็นต้น ซึ่งข้อมูลทั้งหมดได้จากการป้อนข้อมูลของผู้ใช้ และจะถูกเก็บไว้ในหน่วยความจำของคอมพิวเตอร์ เพื่อนำไปสร้างตัวแทนของระบบ

5.2.1 ข้อมูลของระบบไฟฟ้า ข้อมูลหม้อแปลง และข้อมูลโหลด

การวิเคราะห์ระบบไฟฟ้าในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จะคิดว่าจะระบบอยู่ในสถานะที่สมดุลกันทั้งสามเฟสจึงใช้แบบจำลองหนึ่งเฟสเป็นตัวแทนของระบบไฟฟ้าในการวิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิก ในระบบ การป้อนข้อมูลจะต้องทำการเรียกโปรแกรม ซึ่งมีหน้าจอหลักดังรูปที่ 5.3 แล้วจึงทำการป้อนข้อมูลต่างๆ ในระบบ โดยผ่านหน้าจอรับค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.3 หน้าจอหลักของตัวโปรแกรม

Input Data

System and Filters Data

System Data Input Filters Data Input

Utility System Data

1 S_sc 100 MVA
Vsystem 12 kV
X/R Ratio 10

Power Transformer

2 S_Tr 2 MVA
High Side 12 kV
Low Side 400 V
Winding Loss 30 KW
%Z 7

Base System

3 S_base 10 MVA
Vbase (HV) 12 kV
Vbase (LV) 400 V

Operating Voltage

V_Operate 380 V

Reference

6 Thai Utility Regulation
 IEC 1000-2-2,1000-2-4
 IEEE 519

Load

AC Load

4 P_Load 250 kW
P.F. 0.65 pu

Motor Load

P_Motor 300 kW
P.F. 0.7 pu
Efficiency 90 %
I Lock rotor 6 เท่าของ Im1

Harmonic Load

5 Input Harmonic Current

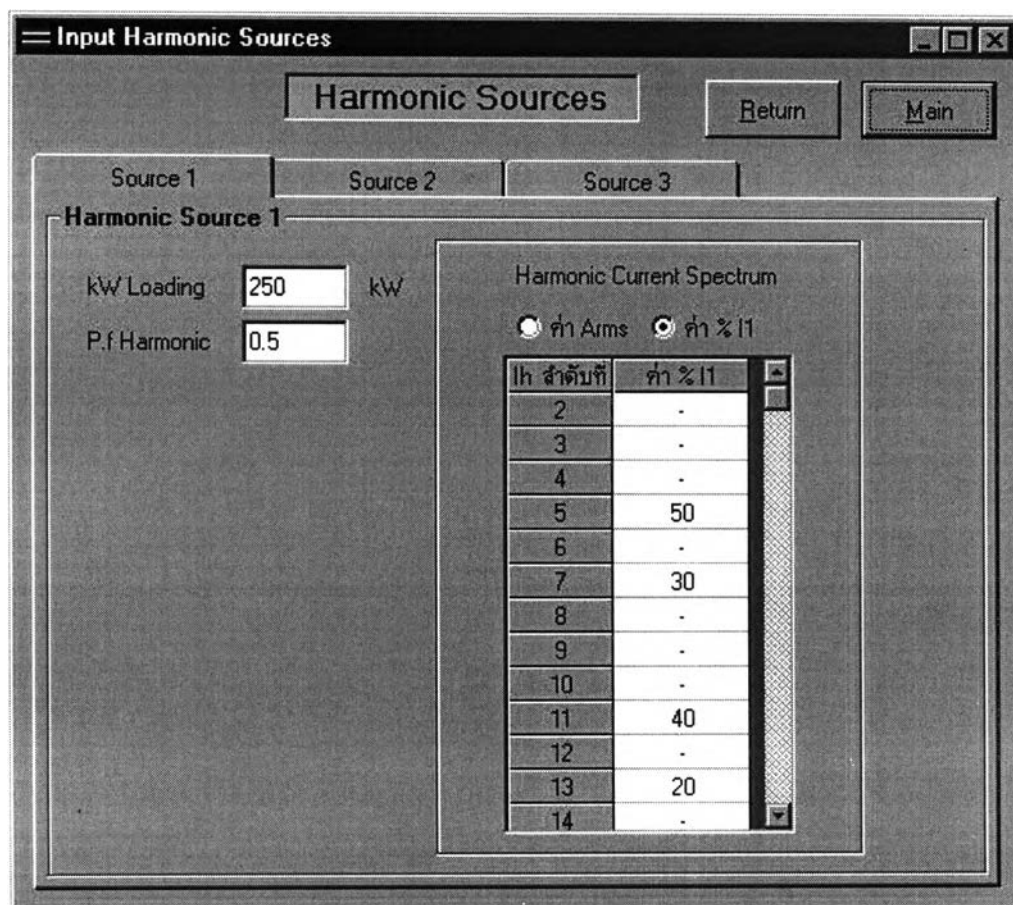
Main

รูปที่ 5.4 หน้าจอรับข้อมูลต่างๆ ของตัวโปรแกรม

จากรูปที่ 5.4 จะเห็นได้ว่าหน้าจอร์ับค่าพารามิเตอร์นี้ต้องใส่ข้อมูลทั่วไป ของโรงงานอุตสาหกรรมที่จะทำการติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก ซึ่งข้อมูลที่ต้องทราบมีดังนี้

1. ข้อมูลของระบบไฟฟ้าที่โรงงานอุตสาหกรรมต่ออยู่
2. ข้อมูลของหม้อแปลงไฟฟ้าที่ใช้ในโรงงาน
3. ข้อมูลฐานของระบบ (สามารถกำหนดเองได้)
4. ข้อมูลของโหลดที่เป็นเชิงเส้น และโหลดมอเตอร์
5. ช่องรับข้อมูลของโหลดที่เป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก
6. เลือกมาตรฐานที่ใช้เป็นข้อกำหนดในการออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก

เมื่อต้องการใส่ข้อมูลของโหลดที่เป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกให้กดปุ่มที่หมายเลข 5 ซึ่งจะปรากฏหน้าจอร์ับข้อมูลโหลดที่เป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกดังรูปที่ 5.5



รูปที่ 5.5 หน้าจอร์ับข้อมูลโหลดที่เป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก

การใส่ข้อมูลกระแสฮาร์มอนิกสามารถใส่เป็นค่ากระแสฮาร์มอนิก หรือเป็นเปอร์เซ็นต์ของกระแสที่ความถี่มูลฐานของโหลดที่เป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก โหลดที่เป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกที่ต่ออยู่กับระบบไฟฟ้า ในโปรแกรมนี้ได้กำหนดให้มี 3 ตัว

5.2.2 ข้อมูลสำหรับการออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก

ก่อนที่จะทำการออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก ต้องใส่ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบตัวกรอง เช่น ขนาด และราคาของตัวเก็บประจุ ค่าตัวประกอบกำลังที่ต้องการเป็นต้น การป้อนข้อมูลเหล่านี้ โดยผ่านหน้าจอ ดังรูปที่ 5.6

System and Filters Data

System Data Input | Filters Data Input

General Parameter

Expected P.F. pu

Filter Q-Factor

Range of Tuning Point

| Order | Lower | Upper |
|-------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| 5 th | <input type="text" value="4.5"/> | <input type="text" value="4.9"/> |
| 7 th | <input type="text" value="6.5"/> | <input type="text" value="6.9"/> |
| 11 th | <input type="text" value="10.5"/> | <input type="text" value="10.9"/> |
| 13 th | <input type="text" value="12.5"/> | <input type="text" value="12.9"/> |
| <input type="text"/> th | <input type="text"/> | <input type="text"/> |

Cost of Filter Components

รูปที่ 5.6 หน้าจอรับข้อมูลเกี่ยวกับตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก

ข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำที่ต้องใช้ในการออกแบบตัวกรองนั้น จะมีที่ลำดับฮาร์มอนิกที่ 5 , 7 , 11 , 13 และลำดับที่ผู้ใช้ต้องการกรอง การป้อนข้อมูลโดยการกดที่หมายเลข 9 ซึ่งจะแสดงหน้าจอรับข้อมูลที่ระดับแรงดันที่ 400 และ 525 Volt ดังรูปที่ 5.7 และ รูปที่ 5.8 ตามลำดับ

Input Cost Capacitor and Inductor : D:\Users\Woo\CostCL5_... [X]

Data of Capacitor and Inductor [Return]

5 th 7 th 11 th 13 th Other th

Voltage 400 V Number of Capacitors 14

| ขนาดที่ | Cap(KVAR) | Cap(บาท) | L(บาท) |
|---------|-----------|----------|--------|
| 1 | 5 | 5700 | 16000 |
| 2 | 10 | 6200 | 16500 |
| 3 | 15 | 8600 | 17500 |
| 4 | 20 | 10100 | 20000 |
| 5 | 25 | 11500 | 23000 |
| 6 | 30 | 12900 | 25500 |
| 7 | 40 | 16700 | 27500 |
| 8 | 45 | 18200 | 30000 |
| 9 | 50 | 18400 | 33000 |
| 10 | 60 | 25000 | 35000 |
| 11 | 70 | 29600 | 36500 |
| 12 | 75 | 30800 | 38000 |
| 13 | 80 | 31600 | 39000 |
| 14 | 100 | 40000 | 41000 |

[Load] [Save]

รูปที่ 5.7 หน้าจอรับข้อมูลตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำที่แรงดัน 400 Volt

Input Cost Capacitor and Inductor : D:\Users\Woo\CostCL5_... [X]

Data of Capacitor and Inductor [Return]

5 th 7 th 11 th 13 th Other th

Voltage 525 V Number of Capacitors 11

| ขนาดที่ | Cap(KVAR) | Cap(บาท) | L(บาท) |
|---------|-----------|----------|--------|
| 1 | 10 | 6800 | 34000 |
| 2 | 20 | 10700 | 35000 |
| 3 | 30 | 16200 | 37000 |
| 4 | 40 | 20700 | 38000 |
| 5 | 50 | 25400 | 40000 |
| 6 | 60 | 29300 | 43000 |
| 7 | 70 | 33200 | 45000 |
| 8 | 80 | 36300 | 53000 |
| 9 | 90 | 46900 | 64000 |
| 10 | 100 | 51600 | 67000 |
| 11 | 120 | 60000 | 76000 |

[Load] [Save]

รูปที่ 5.8 หน้าจอรับข้อมูลตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำที่แรงดัน 525 Volt

5.3 การแสดงผลของโปรแกรมคอมพิวเตอร์

การแสดงผลการวิเคราะห์ของโปรแกรมทั้งหมดจะแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

5.3.1 ผลการวิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิกในระบบ

ในส่วนการวิเคราะห์หาการไหลของกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า ทั้งก่อนติดตั้งและหลังติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกเข้าในระบบ จะเป็นการแสดงผลขนาดของแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลในส่วนต่างๆ ของระบบ ทั้งด้านแรงดันสูง และด้านแรงดันต่ำ ดังรูปที่ 5.9 ถึง รูปที่ 5.12

| h | Low Voltage Side | | | | | High Voltage Side | | | |
|----|------------------|----------|------------|-----------|-------|-------------------|--------------|-------|------------|
| | IhTotal(A) | Ihsys(A) | IhMotor(A) | IhLoad(A) | Vh | | Ih | | Limite (A) |
| | | | | Vrms(V) | (%) | Ihsys(A) | (%) | | |
| 1 | 2055.02 | - | - | - | 380 | 100 | 68.50 | 100 | - |
| 2 | - | - | - | - | - | - | - | - | 13 |
| 3 | - | - | - | - | - | - | - | - | 8 |
| 4 | - | - | - | - | - | - | - | - | 6 |
| 5 | 379.84 | 328.03 | 45.77 | 20.61 | 20.08 | 5.28 | 10.93 | 15.96 | 10 |
| 6 | - | - | - | - | - | - | - | - | 4 |
| 7 | 227.90 | 196.54 | 27.44 | 17.06 | 16.83 | 4.43 | 6.55 | 9.56 | 8 |
| 8 | - | - | - | - | - | - | - | - | 3 |
| 9 | - | - | - | - | - | - | - | - | 3 |
| 10 | - | - | - | - | - | - | - | - | 3 |
| 11 | 303.87 | 260.99 | 36.46 | 35.30 | 35.12 | 9.24 | 8.70 | 12.70 | 7 |
| 12 | - | - | - | - | - | - | - | - | 2 |
| 13 | 151.93 | 130.15 | 18.18 | 20.77 | 20.70 | 5.45 | 4.34 | 6.33 | 6 |
| 14 | - | - | - | - | - | - | - | - | 2 |
| 15 | - | - | - | - | - | - | - | - | 2 |
| 16 | - | - | - | - | - | - | - | - | 2 |
| 17 | - | - | - | - | - | - | - | - | 2 |
| 18 | - | - | - | - | - | - | - | - | 1 |

Reference by Thai Utility Regulation

รูปที่ 5.9 ผลวิเคราะห์ระบบก่อนติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก

Output Data System

Output System Data

Result of System [without filters] Result of System [with filters]

Table : Harmonic Current Flow before installation of Harmonic Filter

| h | Low Voltage Side | | High Voltage Side | | | | | |
|----|------------------|------|-------------------|-------|------------|---------|------|----------|
| | Vh | | Ih | | | Vh | | |
| | Vrms(V) | (%) | Ihsys(A) | (%) | Limite (A) | Vrms(V) | (%) | % Limite |
| 1 | 380 | 100 | 68.50 | 100 | - | 12000 | 100 | - |
| 2 | - | - | - | - | 13 | - | - | 1.75 |
| 3 | - | - | - | - | 8 | - | - | 3 |
| 4 | - | - | - | - | 6 | - | - | 1.75 |
| 5 | 20.08 | 5.28 | 10.93 | 15.96 | 10 | 135.71 | 1.13 | 3 |
| 6 | - | - | - | - | 4 | - | - | 1.75 |
| 7 | 16.83 | 4.43 | 6.55 | 9.56 | 8 | 113.82 | 0.95 | 3 |
| 8 | - | - | - | - | 3 | - | - | 1.75 |
| 9 | - | - | - | - | 3 | - | - | 3 |
| 10 | - | - | - | - | 3 | - | - | 1.75 |
| 11 | 35.12 | 9.24 | 8.70 | 12.70 | 7 | 237.51 | 1.98 | 3 |
| 12 | - | - | - | - | 2 | - | - | 1.75 |
| 13 | 20.70 | 5.45 | 4.34 | 6.33 | 6 | 139.97 | 1.17 | 3 |
| 14 | - | - | - | - | 2 | - | - | 1.75 |
| 15 | - | - | - | - | 2 | - | - | 3 |
| 16 | - | - | - | - | 2 | - | - | 1.75 |
| 17 | - | - | - | - | 2 | - | - | 3 |
| 18 | - | - | - | - | 1 | - | - | 1.75 |

Reference by Thai Utility Regulation

Print Main

รูปที่ 5.10 ผลวิเคราะห์ระบบก่อนติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก(ต่อ)

Output Data System

Output System Data

Result of System [without filters] Result of System [with filters]

Table : Harmonic Current Flow after installation of Harmonic Filter

| h | Low Voltage Side | | | | | | | | |
|----|------------------|----------|------------|-----------|---------|------|------------|---------|----------|
| | IhTotal(A) | Ihsys(A) | IhMotor(A) | IhLoad(A) | Vh | | 5th Filter | | Ihsys(A) |
| | | | | | Vrms(V) | (%) | Vc rms(V) | Arms(A) | |
| 1 | 1625.06 | - | - | - | 380 | 100 | 399.74 | 602.88 | 54.17 |
| 2 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 3 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 4 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 5 | 379.84 | 121.77 | 16.99 | 7.65 | 7.45 | 1.96 | 31.67 | 238.85 | 4.06 |
| 6 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 7 | 227.90 | 126.97 | 17.73 | 11.02 | 10.88 | 2.86 | 7.66 | 80.86 | 4.23 |
| 8 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 9 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 10 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 11 | 303.87 | 188.69 | 26.36 | 25.52 | 25.39 | 6.68 | 5.10 | 84.67 | 6.29 |
| 12 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 13 | 151.93 | 95.64 | 13.36 | 15.27 | 15.21 | 4.00 | 2.07 | 40.60 | 3.19 |
| 14 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 15 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 16 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 17 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 18 | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

Reference by Thai Utility Regulation

Print Main

รูปที่ 5.11 ผลวิเคราะห์ระบบหลังติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก

Output Data System

Output System Data

Result of System (without filters) Result of System (with filters)

Table : Harmonic Current Flow after installation of Harmonic Filter

| h | Low Voltage Side | | High Voltage Side | | | | | |
|----|------------------|---------|-------------------|-------|------------|---------|------|----------|
| | 5th Filter | | Ih | | | Vh | | |
| | Vc rms(V) | Arms(A) | Ihsys(A) | (%) | Limite (A) | Vrms(V) | (%) | % Limite |
| 1 | 399.74 | 602.88 | 54.17 | 100 | - | 12000 | 100 | - |
| 2 | - | - | - | - | 13 | - | - | 1.75 |
| 3 | - | - | - | - | 8 | - | - | 3 |
| 4 | - | - | - | - | 6 | - | - | 1.75 |
| 5 | 31.67 | 238.85 | 4.06 | 7.49 | 10 | 50.38 | 0.42 | 3 |
| 6 | - | - | - | - | 4 | - | - | 1.75 |
| 7 | 7.66 | 80.86 | 4.23 | 7.81 | 8 | 73.53 | 0.61 | 3 |
| 8 | - | - | - | - | 3 | - | - | 1.75 |
| 9 | - | - | - | - | 3 | - | - | 3 |
| 10 | - | - | - | - | 3 | - | - | 1.75 |
| 11 | 5.10 | 84.67 | 6.29 | 11.61 | 7 | 171.71 | 1.43 | 3 |
| 12 | - | - | - | - | 2 | - | - | 1.75 |
| 13 | 2.07 | 40.60 | 3.19 | 5.89 | 6 | 102.86 | 0.86 | 3 |
| 14 | - | - | - | - | 2 | - | - | 1.75 |
| 15 | - | - | - | - | 2 | - | - | 3 |
| 16 | - | - | - | - | 2 | - | - | 1.75 |
| 17 | - | - | - | - | 2 | - | - | 3 |
| 18 | - | - | - | - | 1 | - | - | 1.75 |

Reference by Thai Utility Regulation

Print Main

รูปที่ 5.12 ผลวิเคราะห์ระบบหลังติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก(ต่อ)

5.3.2 ผลขนาดของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกที่ลำดับต่างๆ

ผลการวิเคราะห์ที่ได้จากโปรแกรม จะแสดงขนาดของกำลังรีแอกทีฟขดขย ขนาดของตัวเก็บประจุ จำนวนที่ต้องใช้ ราคา ระดับแรงดัน และตัวเหนี่ยวนำ เป็นต้น ดังรูปที่ 5.13

Output Filters

Output Data Filters

Filter #1 , 5 th Filter #2 , 7 th Filter #3 , 11 th Filter #4 , 13 th Filter #5 , # th

Table : demonstrate feature of single-tune filter order 5 th

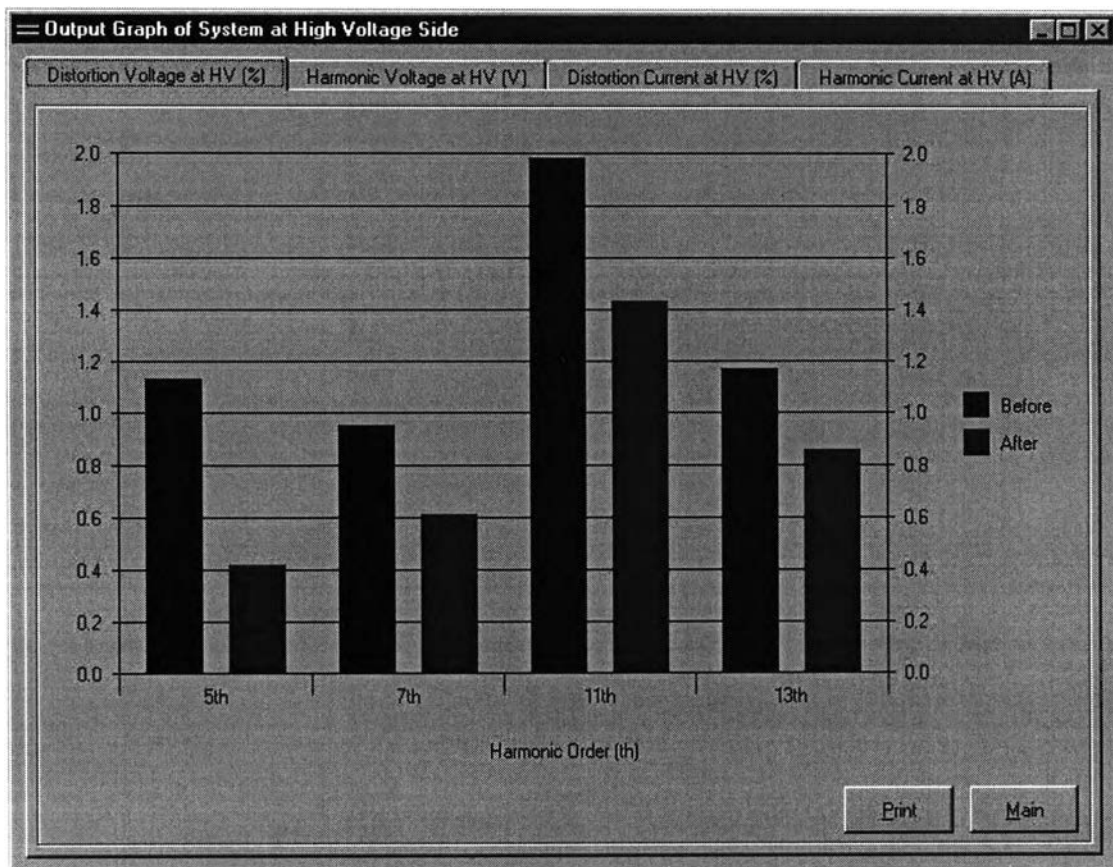
| | Quantity | Unit |
|-----------------------------|----------|------|
| Voltage Rating of Capacitor | 525 | Volt |
| Total kVar of Capacitor | 720 | kVar |
| Tuning Point | 4.50 | |
| Q-Factor | 60 | |
| Size of each Capacitor | 80 | kVar |
| Number of Capacitor | 9 | Unit |
| Size of Inductor | 715.67 | Arms |
| Inductance Value | 0.060 | mH |
| Resistance of Inductor | 1.418 | mOhm |
| Capacitor Cost | 326700 | Baht |
| Inductor Cost | 277200 | Baht |
| Total Cost | 603900 | Baht |

Print Main

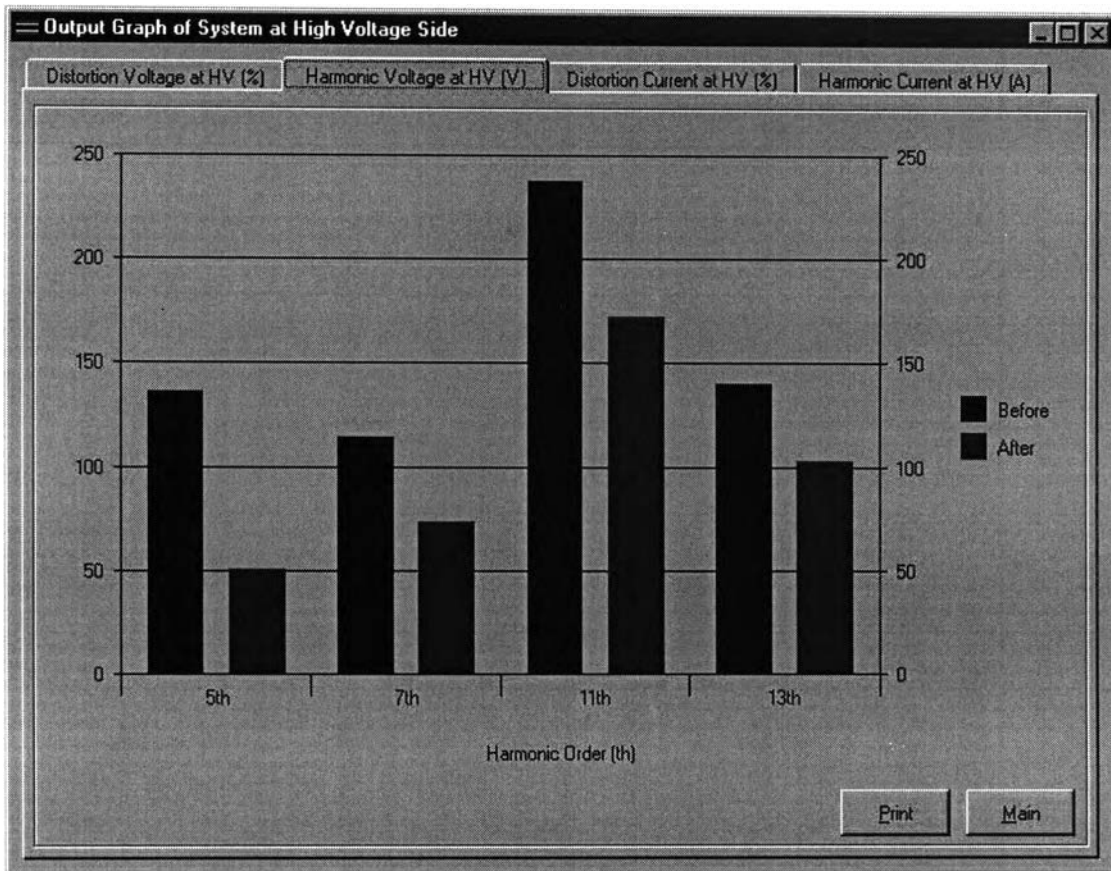
รูปที่ 5.13 ผลขนาดของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกที่ลำดับต่างๆ

5.3.3 กราฟผลการวิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิกในระบบ

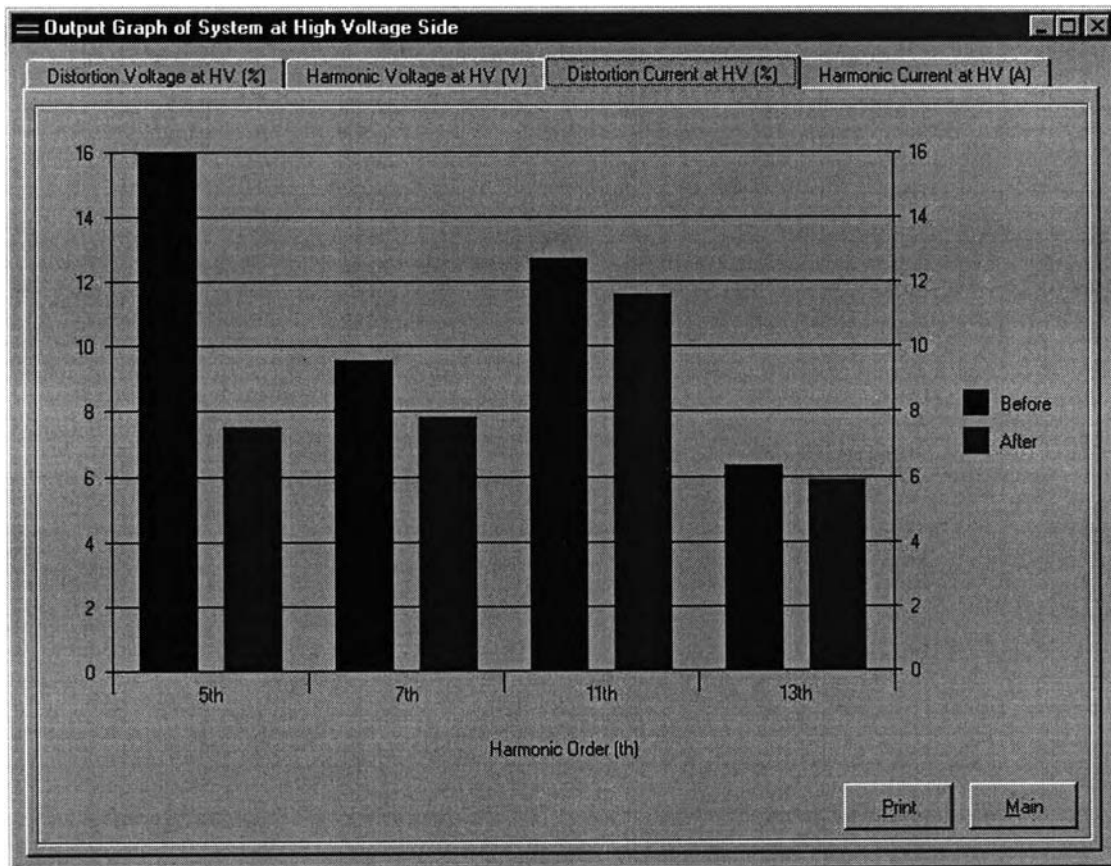
ผลการวิเคราะห์ สามารถแสดงค่าความผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกของแรงดัน ค่าความผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกของกระแสแต่ละลำดับที่จุดต่อร่วม (PCC) และค่าแรงดันฮาร์มอนิก กระแสฮาร์มอนิกแต่ละลำดับที่จุดต่อร่วม ดังแสดงในรูปที่ 5.14 ถึง รูปที่ 5.17



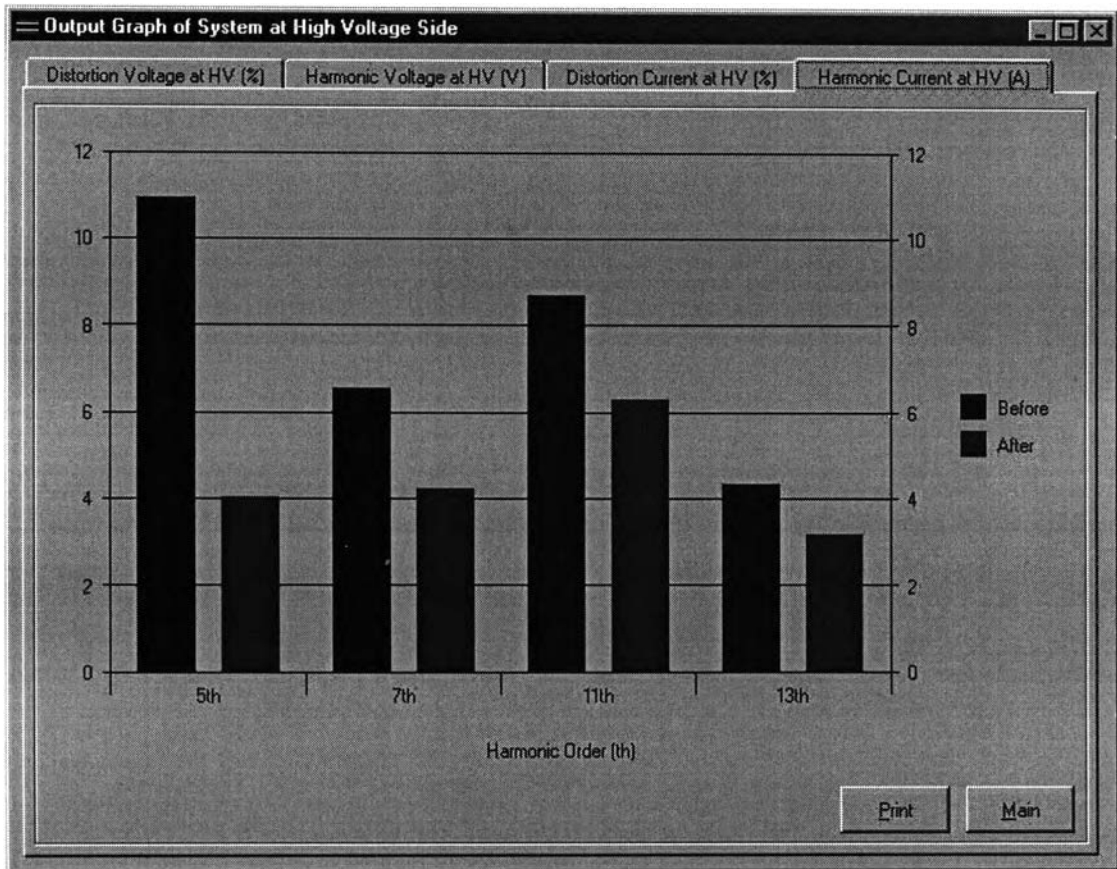
รูปที่ 5.14 กราฟความผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกของแรงดันที่ลำดับต่างๆ ด้านแรงดันสูง



รูปที่ 5.15 กราฟแรงดันฮาร์มอนิกที่ลำดับต่างๆ ด้านแรงดันสูง



รูปที่ 5.16 กราฟความผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกของกระแสที่ลำดับต่างๆ ด้านแรงดันสูง



รูปที่ 5.17 กราฟกระแสฮาร์มอนิกที่ลำดับต่างๆ ด้านแรงดันสูง

ส่วนหน้าจอแสดงมาตรฐานทางฮาร์มอนิกที่ใช้ในการออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก นั้น มีใช้อยู่ 3 มาตรฐาน คือ

1. มาตรฐานทางฮาร์มอนิกของการไฟฟ้า ทั้ง 3 แห่ง[1] แสดงดังรูปที่ 5.18
2. มาตรฐานทางฮาร์มอนิก IEC 1000 - 2 - 2 -1990[4] และ IEC 1000 - 2 - 4 - 1994[5] แสดงดังรูปที่ 5.19
3. มาตรฐานทางฮาร์มอนิก IEEE Std.519-1992[2] แสดงดังรูปที่ 5.20

มาตรฐานทางฮาร์มอนิกทั้ง 3 มาตรฐานนี้ ผู้โปรแกรมจะเป็นผู้เลือกมาตรฐานที่ใช้บังคับ ในการออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก แต่ละครั้งเอง

Standard Limited

Standard Limited

Main

Thai Utility Regulation IEC 1000-2-2,1000-2-4 IEEE 519

HARMOVOLTAGE DISTORTION LIMITS AT ANY POINT ON THE SYSTEM. (%)
(Including Background Levels)

| Voltage at PCC. kV | 0.400 | 11,12,22 and 24 | 33 | 69 | 115 and above |
|----------------------|-------|-----------------|----|------|---------------|
| Order at h 2 | 2 | 1.75 | 1 | 0.82 | 0.50 |
| Order at h 3 | 4 | 3 | 2 | 1.63 | 1.00 |
| Order at h 4 | 2 | 1.75 | 1 | 0.82 | 0.50 |
| Order at h 5 | 4 | 3 | 2 | 1.63 | 1.00 |
| Order at h 6 | 2 | 1.75 | 1 | 0.82 | 0.50 |
| Order at h 7 | 4 | 3 | 2 | 1.63 | 1.00 |
| Order at h 8 | 2 | 1.75 | 1 | 0.82 | 0.50 |

PERMITTED HARMONIC CURRENTS FOR ANY ONE CONSUMER AT PCC. (A)

| Voltage at PCC. kV | 0.400 | 11,12,22 and 24 | 33 | 69 | 115 and above |
|----------------------|-------|-----------------|----|-----|---------------|
| Order at h 2 | 48 | 13 | 11 | 8.8 | 5 |
| Order at h 3 | 34 | 8 | 7 | 5.9 | 4 |
| Order at h 4 | 22 | 6 | 5 | 4.3 | 3 |
| Order at h 5 | 56 | 10 | 9 | 7.3 | 4 |
| Order at h 6 | 11 | 4 | 4 | 3.3 | 2 |
| Order at h 7 | 40 | 8 | 6 | 4.9 | 3 |
| Order at h 8 | 2 | 2 | 2 | 2.2 | 1 |

รูปที่ 5.18 หน้าจอแสดงค่าจำกัดของกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกของการไฟฟ้า

Standard Limited

Standard Limited

Main

Thai Utility Regulation IEC 1000-2-2,1000-2-4 IEEE 519

HARMONIC VOLTAGE COMPONENTS

| Order | Class 1 | Class 2 | Class 3 |
|-------|---------|---------|---------|
| h | Un (%) | Un (%) | Un (%) |
| 2 | 2.00 | 2.00 | 3.00 |
| 3 | 3.00 | 5.00 | 6.00 |
| 4 | 1.00 | 1.00 | 1.50 |
| 5 | 3.00 | 6.00 | 8.00 |
| 6 | 0.50 | 0.50 | 1.00 |
| 7 | 3.00 | 5.00 | 7.00 |
| 8 | 0.50 | 0.50 | 1.00 |
| 9 | 1.50 | 1.50 | 2.50 |
| 10 | 0.50 | 0.50 | 1.00 |
| 11 | 3.00 | 3.50 | 5.00 |
| 12 | 0.20 | 0.20 | 1.00 |
| 13 | 3.00 | 3.00 | 4.50 |
| 14 | 0.20 | 0.20 | 1.00 |
| 15 | 0.30 | 0.30 | 2.00 |
| 16 | 0.20 | 0.20 | 1.00 |

รูปที่ 5.19 หน้าจอแสดงค่าจำกัดของแรงดันฮาร์มอนิก IEC 1000-2-2 และ 1000-2-4

Standard Limited

Standard Limited

Main

Thai Utility Regulation IEC 1000-2-2,1000-2-4 IEEE 519

Voltage Level (120 V - 69000 V)

Voltage Distortion Limits

Individual Voltage Distortion (%) Total Voltage Distortion THD (%)

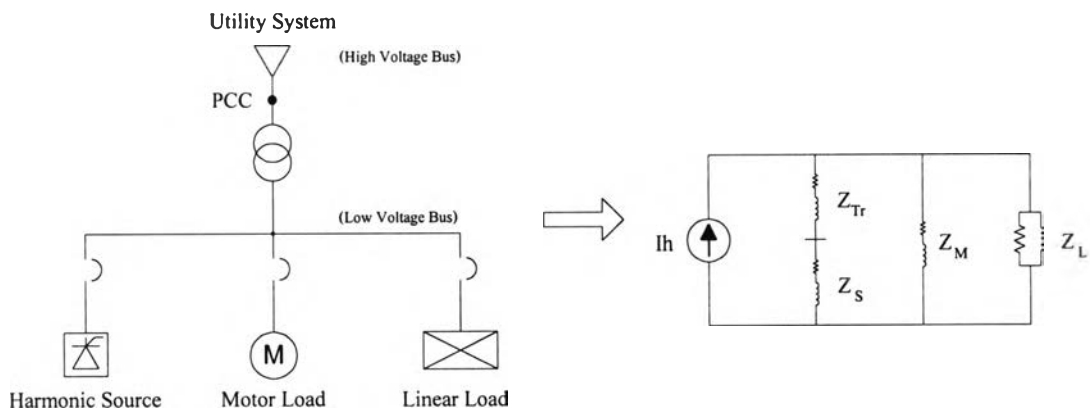
Current Distortion Limits

| Isc/L | < 20 | 20 < 50 | 50 < 100 | 100 < 1000 | >= 1000 |
|--------|------|---------|----------|------------|---------|
| h = 2 | 1.00 | 1.75 | 2.50 | 3.00 | 3.75 |
| h = 3 | 4.00 | 7.00 | 10.00 | 12.00 | 15.00 |
| h = 4 | 1.00 | 1.75 | 2.50 | 3.00 | 3.75 |
| h = 5 | 4.00 | 7.00 | 10.00 | 12.00 | 15.00 |
| h = 6 | 1.00 | 1.75 | 2.50 | 3.00 | 3.75 |
| h = 7 | 4.00 | 7.00 | 10.00 | 12.00 | 15.00 |
| h = 8 | 1.00 | 1.75 | 2.50 | 3.00 | 3.75 |
| h = 9 | 4.00 | 7.00 | 10.00 | 12.00 | 15.00 |
| h = 10 | 1.00 | 1.75 | 2.50 | 3.00 | 3.75 |
| h = 11 | 2.00 | 3.50 | 4.50 | 5.50 | 7.00 |
| h = 12 | 0.50 | 0.88 | 1.13 | 1.38 | 1.75 |
| h = 13 | 2.00 | 3.50 | 4.50 | 5.50 | 7.00 |
| h = 14 | 0.50 | 0.88 | 1.13 | 1.38 | 1.75 |

รูปที่ 5.20 หน้าจอแสดงค่าจำกัดของแรงดันและกระแสฮาร์มอนิก IEEE Std. 519- 1992

5.4 ระบบตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

ตัวอย่างที่ 1 โรงงานอุตสาหกรรมที่ทำการติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดกรองเดี่ยว ซึ่งมีข้อมูลต่างๆ ดังนี้



รูปที่ 5.21 ไดอะแกรมตัวอย่างโรงงานที่ 1

ตารางที่ 5.1 ข้อมูลเบื้องต้น

| System | Transformer | Harmonic Load | Motor Load | Linear Load |
|--|--|---|--|--|
| 12 kV , 50 Hz MVA _{sc} = 100 X/R = 10 | 2000 kVA 12 kV/ 400 V Loss = 30 kW %Z = 6 | 500 kW 380 Volt Power factor 0.5 Lagging | 350 kW , 380 Volt Efficiency = 90% Power factor 0.8 Lagging I Lock Rotor = 6 | 250 kW 380 Volt Power factor 0.75 Lagging |

ตารางที่ 5.2 ข้อมูลกระแสฮาร์มอนิกจาก Harmonic Load

| Harmonic Order | Mag (% I1) | Harmonic Order | Mag (% I1) |
|----------------|--------------|----------------|--------------|
| 5 | 20 | 19 | 2.7 |
| 7 | 14 | 23 | 2.0 |
| 11 | 7.3 | 25 | 1.6 |
| 13 | 5.7 | 29 | 1.4 |
| 17 | 3.5 | 31 | 1.2 |

วิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิก

(ก) วิเคราะห์ระบบปกติ (ยังไม่ติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก)

จากวงจรในรูปที่ 5.21 สามารถคำนวณการไหลของกระแสฮาร์มอนิก ที่แยกไหลในสวนต่างๆของระบบตามอัตราส่วนอิมพีแดนซ์ (Impedance Ratio) ผลการคำนวณหาแรงดันฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นทางด้านแรงดันสูง และ ด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลง แสดงดังตารางที่ 5.3 และ 5.4

ตารางที่ 5.3 ผลการคำนวณแรงดันฮาร์มอนิก

| Low Voltage Side | | | | | | High Voltage Side | | | | | |
|------------------|-------|------|----|------|------|-------------------|--------|------|----|-------|------|
| h | Volt | % | h | Volt | % | h | Volt | % | h | Volt | % |
| 1 | 380 | 100 | 19 | 7.28 | 1.92 | 1 | 12000 | 100 | 19 | 55.76 | 0.46 |
| 5 | 14.43 | 3.80 | 23 | 6.48 | 1.71 | 5 | 110.36 | 0.92 | 23 | 49.64 | 0.41 |
| 7 | 14.12 | 3.71 | 25 | 5.62 | 1.48 | 7 | 108.02 | 0.90 | 25 | 42.98 | 0.36 |
| 11 | 11.53 | 3.03 | 29 | 5.65 | 1.49 | 11 | 88.21 | 0.74 | 29 | 43.23 | 0.36 |
| 13 | 10.61 | 2.79 | 31 | 5.15 | 1.36 | 13 | 81.23 | 0.68 | 31 | 39.41 | 0.33 |
| 17 | 8.48 | 2.23 | | | | 17 | 64.88 | 0.54 | | | |

ตารางที่ 5.4 ผลการคำนวณแรงดันฮาร์มอนิก

| Low Voltage Side | | High Voltage Side | |
|--------------------|--------|--------------------|----------|
| V_{total} (Volt) | 381.20 | V_{total} (Volt) | 12002.22 |
| THD_V (%) | 7.94 | THD_V (%) | 1.92 |

สำหรับผลการวิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลในหม้อแปลง โหลดมอเตอร์ และโหลดเชิงเส้น แสดงดังตารางที่ 5.5

ตารางที่ 5.5 ผลการคำนวณกระแสฮาร์มอนิกในส่วนต่างๆ ของระบบ

| Order | Low Voltage Side | | | | High Voltage Side | |
|-------|------------------|-------------|--------|-------------|-------------------|----------|
| | Harm Source | Transformer | Motor | Linear Load | System | |
| | (Amps) | (Amps) | (Amps) | (Amps) | (Amps) | Limit(A) |
| 5 | 303.87 | 266.76 | 33.58 | 14.64 | 8.89 | 10 |
| 7 | 212.71 | 186.51 | 23.49 | 14.22 | 6.22 | 8 |
| 11 | 110.91 | 96.94 | 12.21 | 11.56 | 3.23 | 7 |
| 13 | 86.60 | 75.53 | 9.52 | 10.63 | 2.52 | 6 |
| 17 | 53.18 | 46.13 | 5.81 | 8.48 | 1.54 | 2 |
| 19 | 41.02 | 35.47 | 4.47 | 7.29 | 1.18 | 1 |
| 23 | 30.39 | 26.09 | 3.29 | 6.49 | 0.87 | - |
| 25 | 24.31 | 20.78 | 2.62 | 5.62 | 0.69 | - |
| 29 | 21.27 | 18.02 | 2.27 | 5.65 | 0.60 | - |
| 31 | 18.23 | 15.37 | 1.94 | 5.15 | 0.51 | - |
| รวม | 405.21 | 355.12 | 44.71 | 30.34 | 11.84 | - |

ในตัวอย่างที่ 1 มาตรฐานฮาร์มอนิกที่ใช้กำหนดในการออกแบบตัวกรอง คือ มาตรฐานของการไฟฟ้าฯ จากตารางที่ 5.5 จะเห็นว่าฮาร์มอนิกที่ลำดับที่ 19 (อยู่ในกรอบสีเขียว) มีค่ากระแสไหลเข้าระบบ 1.18 A ซึ่งเกินค่าที่มาตรฐานกำหนดไว้คือ 1 A ข้อมูลการออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก แสดงดังตารางที่ 5.6 และ ตารางที่ 5.7

ตารางที่ 5.6 ข้อมูลการออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก

| ชนิดข้อมูล | ปริมาณ |
|-----------------------|--------|
| Expected Power factor | 0.85 |
| Filter Q factor | 50 |

ตารางที่ 5.7 ข้อมูลช่วงของจุดปรับคลื่น

| Range of Tuning Point | ขีดจำกัดล่าง | ขีดจำกัดบน |
|-----------------------|--------------|------------|
| Order 5 th | 4.5 | 4.9 |
| Order 7 th | 6.5 | 6.9 |
| Order 11 th | 10.5 | 10.9 |
| Order 13 th | 12.5 | 12.9 |

ส่วนข้อมูลขนาด ราคา ของตัวเก็บประจุ และตัวเหนี่ยวนำ ต้องทำการสำรวจข้อมูลที่มีขายตามท้องตลาด แล้วนำมาใส่ในโปรแกรมเพื่อให้ได้ผลการออกแบบที่ถูกต้องที่สุด

(ข).วิเคราะห์ระบบ (ติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก)

ผลการคำนวณหาแรงดันฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นทางด้านแรงดันสูง และด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลง แสดงดังตารางที่ 5.8 และตารางที่ 5.9

ตารางที่ 5.8 ผลการคำนวณแรงดันฮาร์มอนิก

| Low Voltage Side | | | | | | High Voltage Side | | | | | |
|------------------|------|------|----|------|------|-------------------|-------|------|----|-------|------|
| h | Volt | % | h | Volt | % | h | Volt | % | h | Volt | % |
| 1 | 380 | 100 | 19 | 4.76 | 1.25 | 1 | 12000 | 100 | 19 | 36.41 | 0.30 |
| 5 | 3.90 | 1.03 | 23 | 4.28 | 1.13 | 5 | 29.81 | 0.25 | 23 | 32.75 | 0.27 |
| 7 | 7.53 | 1.98 | 25 | 3.72 | 0.98 | 7 | 57.59 | 0.48 | 25 | 28.49 | 0.24 |
| 11 | 7.14 | 1.88 | 29 | 3.77 | 0.99 | 11 | 54.67 | 0.46 | 29 | 28.88 | 0.24 |
| 13 | 6.72 | 1.77 | 31 | 3.45 | 0.91 | 13 | 51.47 | 0.43 | 31 | 26.43 | 0.22 |
| 17 | 5.50 | 1.45 | | | | 17 | 42.06 | 0.35 | | | |

ตารางที่ 5.9 ผลการคำนวณแรงดันฮาร์มอนิก

| Low Voltage Side | | High Voltage Side | |
|--------------------|--------|--------------------|----------|
| V_{total} (Volt) | 380.37 | V_{total} (Volt) | 12000.68 |
| THD_v (%) | 4.40 | THD_v (%) | 1.07 |

สำหรับผลการวิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลในหม้อแปลง โหลดมอเตอร์ และโหลดเชิงเส้น แสดงดังตารางที่ 5.10

ตารางที่ 5.10 ผลการคำนวณกระแสฮาร์มอนิกในส่วนต่างๆ ของระบบ

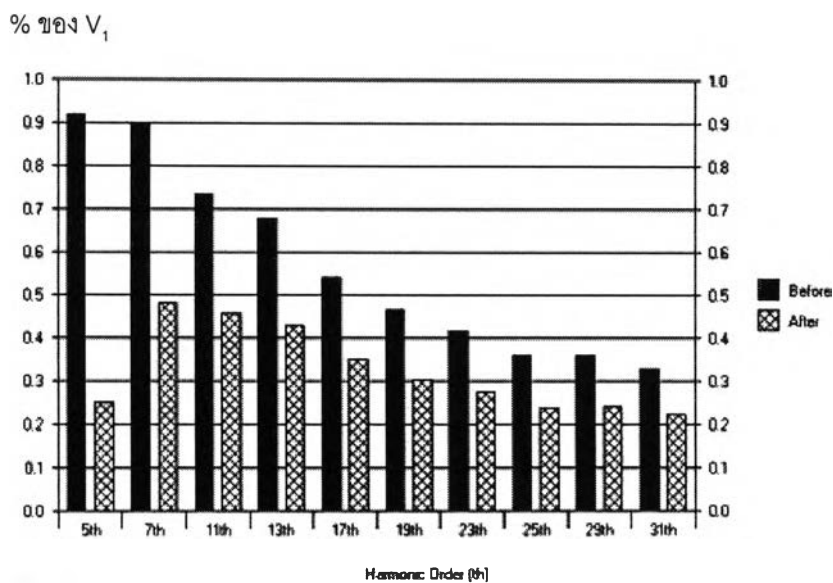
| Order | Low Voltage Side | | | | High Voltage Side | |
|-------|------------------|-------------|--------|-------------|-------------------|----------|
| | Harm Source | Transformer | Motor | Linear Load | System | |
| | (Amps) | (Amps) | (Amps) | (Amps) | (Amps) | Limit(A) |
| 5 | 303.87 | 72.07 | 9.07 | 3.96 | 2.40 | 10 |
| 7 | 212.71 | 99.43 | 12.52 | 7.58 | 3.31 | 8 |
| 11 | 110.91 | 60.08 | 7.57 | 7.16 | 2.00 | 7 |
| 13 | 86.60 | 47.86 | 6.03 | 6.74 | 1.60 | 6 |
| 17 | 53.18 | 29.91 | 3.77 | 5.50 | 1.00 | 2 |
| 19 | 41.02 | 23.16 | 2.92 | 4.76 | 0.77 | 1 |
| 23 | 30.39 | 17.21 | 2.17 | 4.28 | 0.57 | - |
| 25 | 24.31 | 13.78 | 1.74 | 3.72 | 0.46 | - |
| 29 | 21.27 | 12.04 | 1.52 | 3.77 | 0.40 | - |
| 31 | 18.23 | 10.31 | 1.30 | 3.45 | 0.34 | - |
| รวม | 405.21 | 152.15 | 19.16 | 16.77 | 5.06 | - |

จากผลการออกแบบ จะได้ว่าต้องทำการติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดกรองเดี่ยว ลำดับที่ 5th ซึ่งมีขนาด ดังตารางที่ 5.11

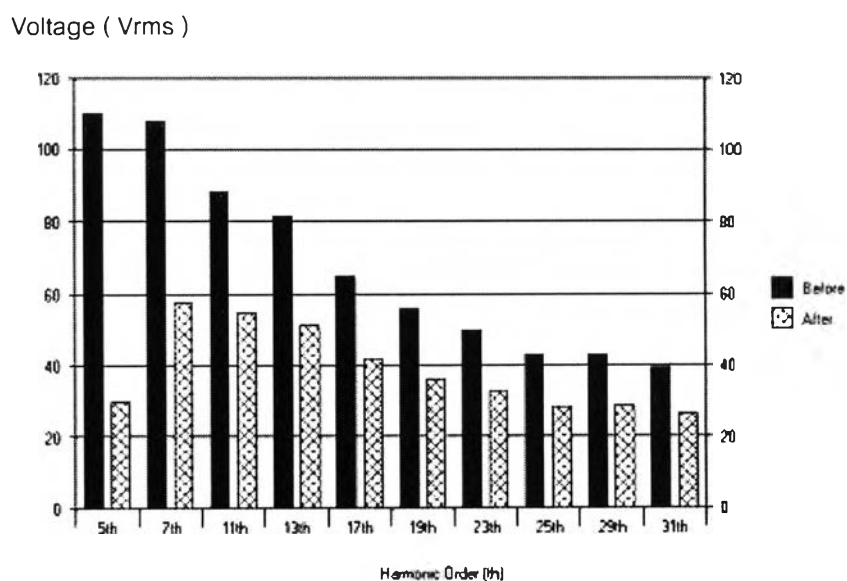
ตารางที่ 5.11 ขนาดของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5th

| | Quantity | Unit |
|-----------------------------|----------|------------------|
| Voltage Rating of Capacitor | 525 | Volt |
| Total kVAR of Capacitor | 1280 | kVAR |
| Tuning Point | 4.5 | |
| Q-Factor | 50 | |
| Size of each Capacitor | 80 | kVAR |
| Number of Capacitor | 16 | Unit |
| Size of Inductor | 1205.26 | A _{rms} |
| Inductance Value | 0.034 | mH |
| Resistance of Inductor | 0.957 | mOhm |
| Capacitor Cost | 580800 | Baht |
| Inductor Cost | 491400 | Baht |
| Total Cost | 1072200 | Baht |

ผลการวิเคราะห์ระบบหลังจากการติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดกรองเดี่ยว จะเห็นว่ากระแสฮาร์มอนิกที่ไหลในส่วนต่างๆ ของระบบ ได้เปลี่ยนทิศทางการไหลมาผ่านตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกมากกว่า โหลดต่างๆ ในระบบ เพราะตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกจะมีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำที่ตำแหน่งที่ทำการปรับคลื่นของตัวกรอง จึงทำให้กระแสฮาร์มอนิกแต่ละลำดับที่ไหลเข้าระบบที่จุดต่อร่วมและแรงดันฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วมมีค่าลดลง ดังรูปที่ 5.22 ถึง รูปที่ 2.25

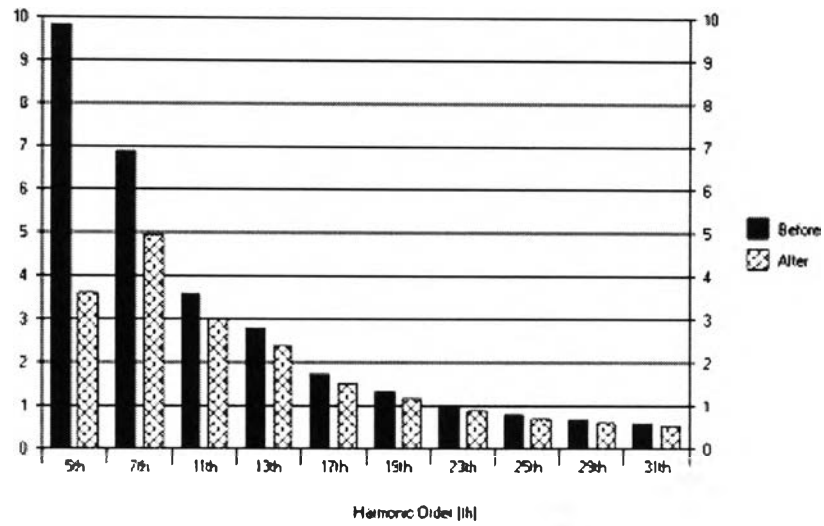


รูปที่ 5.22 สเปกตรัมของค่าความผิดพลาดเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันที่จุดต่อร่วม



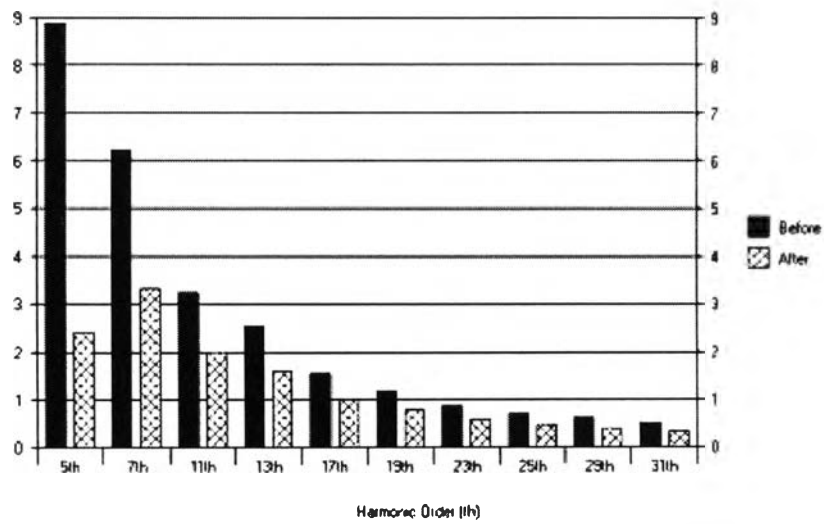
รูปที่ 5.23 สเปกตรัมของแรงดันฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วม

% ของ I_1



รูปที่ 5.24 สเปกตรัมของค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกของกระแสที่จุดต่อร่วม

Current (Arms)



รูปที่ 5.25 สเปกตรัมของกระแสฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วม

ตัวอย่างที่ 2 โรงงานอุตสาหกรรมที่ทำการติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดกรองเดี่ยว ซึ่งมีไดอะแกรมตามรูปที่ 5.21 ข้อมูลต่างๆ ดังนี้

ตารางที่ 5.12 ข้อมูลเบื้องต้น

| System | Transformer | Harmonic Load | Motor Load | Linear Load |
|------------------|--------------|---------------|-------------------|--------------|
| 12 kV , 50 Hz | 2000 kVA | 800 kW | 400 kW , 380 Volt | 200 kW |
| $MVA_{sc} = 100$ | 12 kV/ 400 V | 380 Volt | Efficiency = 90% | 380 Volt |
| X/R = 10 | Loss = 30 kW | Power factor | Power factor | Power factor |
| | %Z = 7 | 0.5 Lagging | 0.75 Lagging | 0.4 Lagging |
| | | | I Lock Rotor = 6 | |

ตารางที่ 5.13 ข้อมูลกระแสฮาร์มอนิกจาก Harmonic Load (ค่าสมมุติเพื่อทดสอบการทำงานของโปรแกรม)

| Harmonic Order | Mag (% I1) | Harmonic Order | Mag (% I1) |
|----------------|--------------|----------------|--------------|
| 5 | 25 | 19 | 2.0 |
| 7 | 15 | 23 | 4.0 |
| 11 | 30 | 25 | 3.5 |
| 13 | 8.0 | 29 | 1.0 |
| 17 | 3.0 | 31 | 0.7 |

วิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิก

(ก).วิเคราะห์ระบบปกติ (ยังไม่ติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก)

ผลการคำนวณหาแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ ที่เกิดขึ้นทางด้านแรงดันสูง และด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลง แสดงดังตารางที่ 5.14 และ 5.15

ตารางที่ 5.14 ผลการคำนวณแรงดันฮาร์มอนิก

| Low Voltage Side | | | | | | High Voltage Side | | | | | |
|------------------|-------|-------|----|-------|------|-------------------|--------|------|----|--------|------|
| h | Volt | % | h | Volt | % | h | Volt | % | h | Volt | % |
| 1 | 380 | 100 | 19 | 9.32 | 2.45 | 1 | 12000 | 100 | 19 | 63.02 | 0.53 |
| 5 | 31.02 | 8.16 | 23 | 22.44 | 5.90 | 5 | 209.69 | 1.75 | 23 | 151.74 | 1.26 |
| 7 | 26.02 | 6.85 | 25 | 21.27 | 5.60 | 7 | 175.96 | 1.47 | 25 | 143.88 | 1.20 |
| 11 | 81.57 | 21.47 | 29 | 7.0 | 1.84 | 11 | 551.63 | 4.60 | 29 | 47.36 | 0.39 |
| 13 | 25.67 | 6.75 | 31 | 5.22 | 1.37 | 13 | 173.57 | 1.45 | 31 | 35.30 | 0.29 |
| 17 | 12.54 | 3.30 | | | | 17 | 84.78 | 0.71 | | | |

ตารางที่ 5.15 ผลการคำนวณแรงดันฮาร์มอนิก

| Low Voltage Side | | High Voltage Side | |
|----------------------|--------|----------------------|----------|
| V_{total} (Volt) | 393.23 | V_{total} (Volt) | 12019.47 |
| THD _v (%) | 26.61 | THD _v (%) | 5.7 |

สำหรับผลการวิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลในหม้อแปลง โหลดมอเตอร์ และโหลดเชิงเส้น แสดงดังตารางที่ 5.16

ตารางที่ 5.16 ผลการคำนวณกระแสฮาร์มอนิกในส่วนต่างๆ ของระบบ

| Order | Low Voltage Side | | | | High Voltage Side | |
|-------|------------------|-------------|--------|-------------|-------------------|----------|
| | Harm Source | Transformer | Motor | Linear Load | System | |
| | (Amps) | (Amps) | (Amps) | (Amps) | I (%) | Limit(%) |
| 5 | 607.74 | 506.86 | 88.01 | 27.29 | 12.53 | 7 |
| 7 | 364.64 | 303.83 | 52.79 | 21.90 | 7.51 | 7 |
| 11 | 729.28 | 606.17 | 105.37 | 66.63 | 14.99 | 3.5 |
| 13 | 194.48 | 161.39 | 28.06 | 20.84 | 3.99 | 3.5 |
| 17 | 72.93 | 60.28 | 10.48 | 10.11 | 1.49 | 2.5 |
| 19 | 48.62 | 40.09 | 6.97 | 7.51 | 0.99 | 2.5 |
| 23 | 97.24 | 79.75 | 13.87 | 18.03 | 1.97 | 1 |
| 25 | 85.08 | 69.57 | 12.10 | 17.08 | 1.72 | 1 |
| 29 | 24.31 | 19.74 | 3.43 | 5.62 | 0.49 | 1 |
| 31 | 17.02 | 13.77 | 2.39 | 4.19 | 0.34 | 1 |
| รวม | 1047.5 | 871.63 | 151.45 | 83.20 | 21.55 | 8 |

ในตัวอย่างที่ 2 มาตรฐานฮาร์มอนิกที่ใช้กำหนดในการออกแบบตัวกรอง คือ มาตรฐาน IEEE Std. 519 -1992 จากตารางที่ 5.16 จะเห็นว่ากระแสฮาร์มอนิกที่ลำดับที่ 5 , 7 , 11 , 13 , 23 และ 25 (ในรอบสี่เหลี่ยม) มีค่าเกินค่าที่มาตรฐาน IEEE Std. 519-1992 กำหนด ข้อมูลการออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก แสดงดังตารางที่ 5.17 และ ตารางที่ 5.18

ตารางที่ 5.17 ข้อมูลการออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก

| ชนิดข้อมูล | ปริมาณ |
|-----------------------|--------|
| Expected Power factor | 0.95 |
| Filter Q factor | 60 |

ตารางที่ 5.18 ข้อมูลช่วงของจุดปรับคลื่น

| Range of Tuning Point | ขีดจำกัดล่าง | ขีดจำกัดบน |
|-----------------------|--------------|------------|
| Order 5 th | 4.5 | 4.9 |
| Order 7 th | 6.5 | 6.9 |
| Order 11 th | 10.5 | 10.9 |
| Order 13 th | 12.5 | 12.9 |

(ข).วิเคราะห์ระบบ (ติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก)

ผลการคำนวณหาแรงดันฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นทางด้านแรงดันสูง และด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลง แสดงดังตารางที่ 5.19 และตารางที่ 5.20

ตารางที่ 5.19 ผลการคำนวณแรงดันฮาร์มอนิก

| Low Voltage Side | | | | | | High Voltage Side | | | | | |
|------------------|------|------|----|------|------|-------------------|-------|------|----|-------|------|
| h | Volt | % | h | Volt | % | h | Volt | % | h | Volt | % |
| 1 | 380 | 100 | 19 | 1.26 | 0.33 | 1 | 12000 | 100 | 19 | 8.53 | 0.07 |
| 5 | 9.21 | 2.42 | 23 | 3.36 | 0.89 | 5 | 62.27 | 0.52 | 23 | 22.76 | 0.19 |
| 7 | 4.01 | 1.06 | 25 | 3.29 | 0.87 | 7 | 27.14 | 0.23 | 25 | 22.28 | 0.19 |
| 11 | 1.41 | 0.37 | 29 | 1.13 | 0.30 | 11 | 9.50 | 0.08 | 29 | 7.67 | 0.06 |
| 13 | 1.95 | 0.51 | 31 | 0.86 | 0.23 | 13 | 13.18 | 0.11 | 31 | 5.82 | 0.05 |
| 17 | 1.55 | 0.41 | | | | 17 | 10.47 | 0.09 | | | |

ตารางที่ 5.20 ผลการคำนวณแรงดันฮาร์มอนิก

| Low Voltage Side | | High Voltage Side | |
|--------------------|--------|--------------------|----------|
| V_{total} (Volt) | 380.18 | V_{total} (Volt) | 12000.26 |
| THD_v (%) | 3.06 | THD_v (%) | 0.65 |

สำหรับผลการวิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลในหม้อแปลง โหลดมอเตอร์ และโหลดเชิงเส้น แสดงดังตารางที่ 5.21

ตารางที่ 5.21 ผลการคำนวณกระแสฮาร์มอนิกในส่วนต่างๆ ของระบบ

| Order | Low Voltage Side | | | | High Voltage Side | |
|-------|------------------|-------------|--------|-------------|-------------------|----------|
| | Harm Source | Transformer | Motor | Linear Load | System | |
| | (Amps) | (Amps) | (Amps) | (Amps) | I (%) | Limit(%) |
| 5 | 607.74 | 150.51 | 26.13 | 8.10 | 6.73 | 7 |
| 7 | 364.64 | 46.85 | 8.14 | 3.38 | 2.09 | 7 |
| 11 | 729.28 | 10.44 | 1.82 | 1.15 | 0.47 | 3.5 |
| 13 | 194.48 | 12.26 | 2.13 | 1.58 | 0.55 | 3.5 |
| 17 | 72.93 | 7.44 | 1.29 | 1.25 | 0.33 | 2.5 |
| 19 | 48.62 | 5.42 | 0.94 | 1.02 | 0.24 | 2.5 |
| 23 | 97.24 | 11.96 | 2.08 | 2.70 | 0.53 | 1 |
| 25 | 85.08 | 10.77 | 1.87 | 2.65 | 0.48 | 1 |
| 29 | 24.31 | 3.20 | 0.56 | 0.91 | 0.14 | 1 |
| 31 | 17.02 | 2.27 | 0.39 | 0.69 | 0.10 | 1 |
| รวม | 1047.5 | 159.58 | 27.71 | 9.95 | 7.14 | 8 |

ตารางที่ 5.22 ผลการวิเคราะห์การปรับเพิ่ม-ลดค่ากำลังงานรีแอกทีฟตามตัวอย่างตารางที่ 3.3

| ชั้นการปรับ เพิ่ม-ลด | 5 th Filter (kVAr) | | 7 th Filter (kVAr) | | 11 th Filter (kVAr) | | ราคารวม (บาท) |
|-------------------------|---------------------------------|----------|---------------------------------|----------|----------------------------------|----------|--------------------|
| | ขนาดรวม | ขนาด Cap | ขนาดรวม | ขนาด Cap | ขนาดรวม | ขนาด Cap | |
| เริ่มต้น | 1200 | 80*15 | 700 | 70*10 | 1470 | 70*21 | 2834100 |
| 2.1 ₍₁₎ * | 1200 | 80*15 | 680 | 40*17 | 1520 | 80*19 | 2858300 |
| 2.2 ₍₁₎ * | 1200 | 80*15 | 720 | 80*9 | 1440 | 80*18 | 2781200 |
| 2.2 ₍₂₎ * | 1200 | 80*15 | 750 | 50*15 | 1440 | 80*18 | 2847800 |
| 2.2 ₍₃₎ * | 1200 | 80*15 | 770 | 70*11 | 1440 | 80*18 | 2840200 |
| 2.2 ₍₄₎ * | 1200 | 80*15 | 770 | 70*11 | 1400 | 70*20 | 2838800 |
| 2.2 ₍₅₎ * | 1200 | 80*15 | 800 | 80*10 | 1360 | 80*17 | 2781900 |
| 2.2 ₍₆₎ * | 1200 | 80*15 | 840 | 70*12 | 1360 | 80*17 | 2833700 |
| 2.2 ₍₇₎ * | 1200 | 80*15 | 840 | 70*12 | 1330 | 70*19 | 2835400 |

| ชั้นการปรับ เพิ่ม-ลด | 5 th Filter (kVAr) | | 7 th Filter (kVAr) | | 11 th Filter (kVAr) | | ราคารวม (บาท) |
|-------------------------|---------------------------------|----------|---------------------------------|----------|----------------------------------|----------|--------------------|
| | ขนาดรวม | ขนาด Cap | ขนาดรวม | ขนาด Cap | ขนาดรวม | ขนาด Cap | |
| 3.2 ₍₁₎ * | 1200 | 80*15 | 880 | 80*11 | 1280 | 80*16 | 2786700 |
| 3.2 ₍₂₎ * | 1260 | 70*18 | 720 | 80*9 | 1360 | 80*17 | 2791000 |
| 3.2 ₍₃₎ * | 1260 | 70*18 | 750 | 50*15 | 1360 | 80*17 | 2857600 |
| 3.2 ₍₄₎ * | 1260 | 70*18 | 800 | 80*10 | 1280 | 80*16 | 2791700 |
| 3.2 ₍₅₎ * | 1260 | 70*18 | 840 | 70*12 | 1280 | 80*16 | 2843500 |
| 3.2 ₍₆₎ * | 1280 | 80*16 | 800 | 80*10 | 1280 | 80*16 | 2783300 |
| 3.2 ₍₇₎ * | 1330 | 70*19 | 750 | 50*15 | 1280 | 80*16 | 2851700 |
| 3.2 ₍₈₎ * | 1330 | 70*19 | 770 | 70*11 | 1280 | 80*16 | 2844100 |
| 3.2 ₍₉₎ * | 1360 | 80*17 | 720 | 80*9 | 1280 | 80*16 | 2784000 |
| 3.2 ₍₁₀₎ * | 1360 | 80*17 | 750 | 50*15 | 1280 | 80*16 | 2850600 |
| 4.2 ₍₁₎ * | 1200 | 80*15 | 700 | 70*10 | 1470 | 70*21 | 2834100 |
| 4.2 ₍₂₎ * | 1200 | 80*15 | 680 | 40*17 | 1470 | 70*21 | 2845800 |
| 4.2 ₍₃₎ * | 1200 | 80*15 | 680 | 40*17 | 1520 | 80*19 | 2858300 |

หมายเหตุ : $\Delta Q = 10$ kVAr

2.1 การปรับค่ากำลังงานรีแอกทีฟ โดยให้ค่า Q_5 คงที่ Q_7 ลดลง และ Q_{11} เพิ่มขึ้น

2.2 การปรับค่ากำลังงานรีแอกทีฟ โดยให้ค่า Q_5 คงที่ Q_7 เพิ่มขึ้น และ Q_{11} ลดลง

3.2 การปรับค่ากำลังงานรีแอกทีฟ โดยให้ค่า Q_5 เพิ่มขึ้น Q_7 เพิ่มขึ้น และ Q_{11} ลดลง

4.2 การปรับค่ากำลังงานรีแอกทีฟ โดยให้ค่า Q_5 เพิ่มขึ้น Q_7 ลดลง และ Q_{11} เพิ่มขึ้น

จากตารางที่ 5.22 จะเห็นว่าไม่สามารถทำการปรับลดกำลังงานรีแอกทีฟ Q_5 ลงได้เพราะเมื่อทำการปรับกำลังงานรีแอกทีฟลดลงแล้ว จะทำให้ตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 รับกระแสรวมที่ไหลเข้ามาในตัวมันเกินค่าพิกัด ส่วนค่าของตัวห้อยในช่องการปรับเพิ่ม-ลดเป็นการบอกลำดับของคำตอบของการคำนวณตามแต่ละชั้น เช่น 4.2₍₁₎ หมายถึงคำตอบของการออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดกรองเดี่ยวแบบที่ 1 ตามชั้นการคำนวณที่ 4.2

จากผลการออกแบบ จะได้ว่าต้องทำการติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดกรองเดี่ยวลำดับที่ 5th , 7th และ 11th ซึ่งมีขนาด ดังตารางที่ 5.23 , 5.24 และ 5.25

ตารางที่ 5.23 ขนาดของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5^h

| | Quantity | Unit |
|-----------------------------|----------|-----------|
| Voltage Rating of Capacitor | 525 | Volt |
| Total kVAr of Capacitor | 1200 | kVAr |
| Tuning Point | 4.66 | |
| Q-Factor | 60 | |
| Size of each Capacitor | 80 | kVAr |
| Number of Capacitor | 15 | Unit |
| Size of Inductor | 1339.57 | A_{rms} |
| Inductance Value | 0.034 | mH |
| Resistance of Inductor | 0.821 | mOhm |
| Capacitor Cost | 544500 | Baht |
| Inductor Cost | 462000 | Baht |
| Total Cost | 1006500 | Baht |

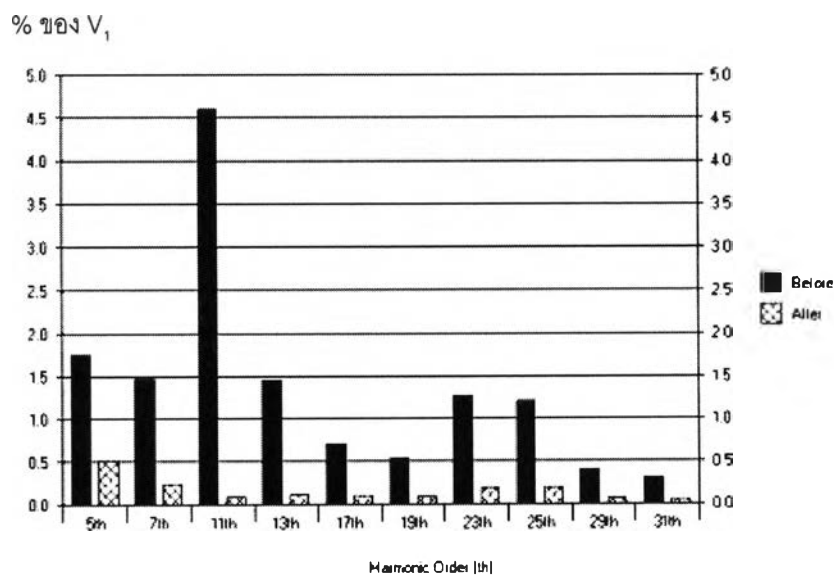
ตารางที่ 5.24 ขนาดของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 7^h

| | Quantity | Unit |
|-----------------------------|----------|-----------|
| Voltage Rating of Capacitor | 525 | Volt |
| Total kVAr of Capacitor | 720 | kVAr |
| Tuning Point | 6.66 | |
| Q-Factor | 60 | |
| Size of each Capacitor | 80 | kVAr |
| Number of Capacitor | 9 | Unit |
| Size of Inductor | 775.39 | A_{rms} |
| Inductance Value | 0.027 | mH |
| Resistance of Inductor | 0.958 | mOhm |
| Capacitor Cost | 326700 | Baht |
| Inductor Cost | 270600 | Baht |
| Total Cost | 597300 | Baht |

ตารางที่ 5.25 ขนาดของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 11th

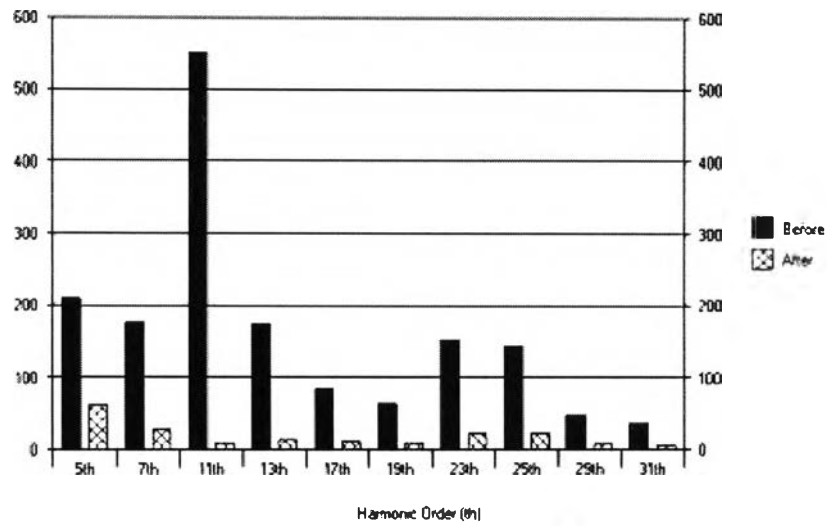
| | Quantity | Unit |
|-----------------------------|----------|-----------|
| Voltage Rating of Capacitor | 525 | Volt |
| Total kVAr of Capacitor | 1440 | kVAr |
| Tuning Point | 10.66 | |
| Q-Factor | 60 | |
| Size of each Capacitor | 80 | kVAr |
| Number of Capacitor | 18 | Unit |
| Size of Inductor | 1480.37 | A_{rms} |
| Inductance Value | 0.005 | mH |
| Resistance of Inductor | 0.299 | mOhm |
| Capacitor Cost | 653400 | Baht |
| Inductor Cost | 524000 | Baht |
| Total Cost | 1177400 | Baht |

ผลการวิเคราะห์ระบบหลังจากการติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดกรองเดี่ยว สามารถแสดงเป็นสเปคตรัมของฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าระบบที่จุดต่อรวม ดังรูปที่ 5.26 ถึง รูปที่ 2.29

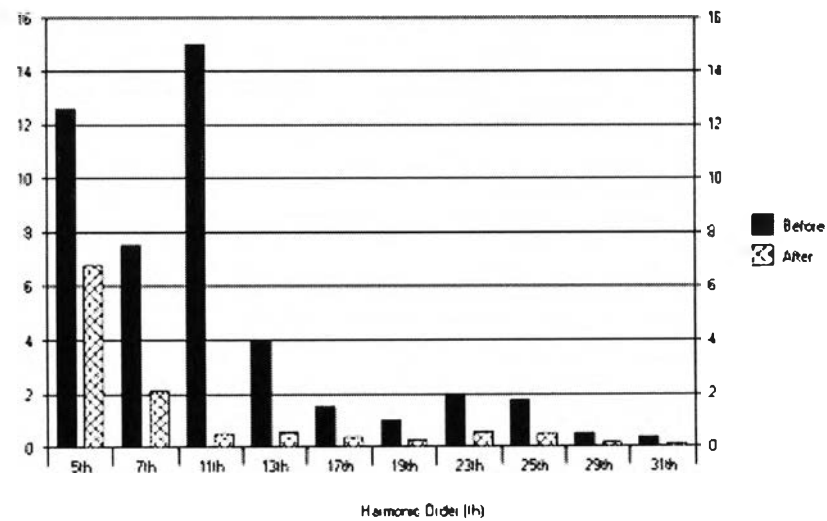


รูปที่ 5.26 สเปคตรัมของค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันที่จุดต่อรวม

Voltage (Vrms)

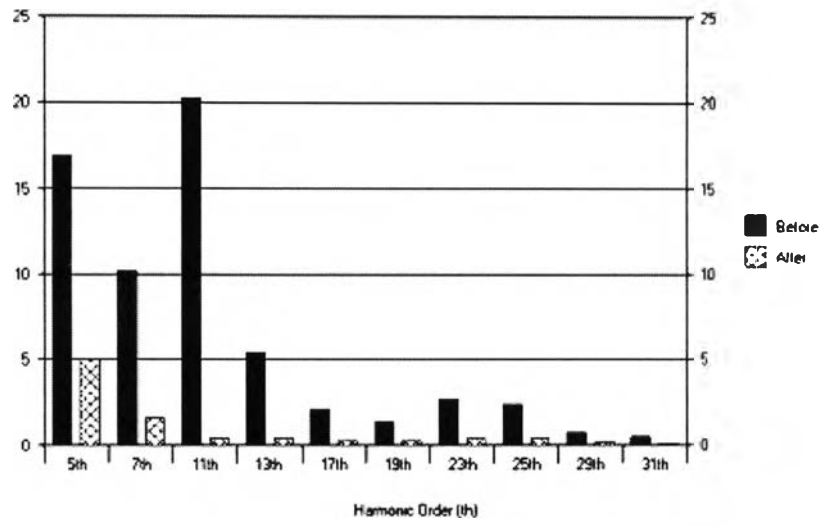


รูปที่ 5.27 สเปกตรัมของแรงดันฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วม

% ของ I_1 

รูปที่ 5.28 สเปกตรัมของค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกของกระแสที่จุดต่อร่วม

Current (Arms)



รูปที่ 5.29 สเปกตรัมของกระแสฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วม

ตัวอย่างที่ 3 โรงงานอุตสาหกรรมที่ทำการติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดกรองเดี่ยว ซึ่งมีไดอะแกรมตามรูปที่ 5.21 ข้อมูลต่างๆ ดังนี้

ตารางที่ 5.26 ข้อมูลเบื้องต้น

| System | Transformer | Harmonic Load | Motor Load | Linear Load |
|--|--|---|---|--|
| 12 kV , 50 Hz MVA _{SC} = 100 X/R = 10 | 2000 kVA 12 kV/ 400 V Loss = 30 kW %Z = 7 | 800 kW 380 Volt Power factor 0.5 Lagging | 400 kW , 380 Volt Efficiency = 90% Power factor 0.75 Lagging I Lock Rotor = 6 | 200 kW 380 Volt Power factor 0.65 Lagging |

ตารางที่ 5.27 ข้อมูลกระแสฮาร์มอนิกจาก Harmonic Load

| Harmonic Order | Mag (% I1) | Harmonic Order | Mag (% I1) |
|----------------|--------------|----------------|--------------|
| 5 | 5.0 | 19 | 2.0 |
| 7 | 4.0 | 23 | 4.0 |
| 11 | 10.0 | 25 | 3.5 |
| 13 | 8.0 | 29 | 1.0 |
| 17 | 3.0 | 31 | 0.7 |

วิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิก

(ก) วิเคราะห์ระบบปกติ (ยังไม่ติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก)

ผลการคำนวณหาแรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ ที่เกิดขึ้นทางด้านแรงดันสูง และด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลง แสดงดังตารางที่ 5.28 และ 5.29

ตารางที่ 5.28 ผลการคำนวณแรงดันฮาร์มอนิก

| Low Voltage Side | | | | | | High Voltage Side | | | | | |
|------------------|-------|------|----|-------|------|-------------------|--------|------|----|--------|------|
| h | Volt | % | h | Volt | % | h | Volt | % | h | Volt | % |
| 1 | 380 | 100 | 19 | 9.40 | 2.47 | 1 | 12000 | 100 | 19 | 63.59 | 0.53 |
| 5 | 6.26 | 1.65 | 23 | 22.64 | 5.96 | 5 | 42.33 | 0.35 | 23 | 153.10 | 1.28 |
| 7 | 7.0 | 1.84 | 25 | 21.46 | 5.65 | 7 | 47.35 | 0.39 | 25 | 145.15 | 1.21 |
| 11 | 27.44 | 7.22 | 29 | 7.06 | 1.86 | 11 | 185.56 | 1.55 | 29 | 47.77 | 0.40 |
| 13 | 25.90 | 6.82 | 31 | 5.27 | 1.39 | 13 | 175.15 | 1.46 | 31 | 35.61 | 0.30 |
| 17 | 12.65 | 3.33 | | | | 17 | 85.54 | 0.71 | | | |

ตารางที่ 5.29 ผลการคำนวณแรงดันฮาร์มอนิก

| Low Voltage Side | | High Voltage Side | |
|----------------------|--------|----------------------|----------|
| V_{total} (Volt) | 383.68 | V_{total} (Volt) | 12005.36 |
| THD _v (%) | 13.95 | THD _v (%) | 2.99 |

สำหรับผลการวิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลในหม้อแปลง โหลดมอเตอร์ และโหลดเชิงเส้น แสดงดังตารางที่ 5.30

ตารางที่ 5.30 ผลการคำนวณกระแสฮาร์มอนิกในส่วนต่างๆ ของระบบ

| Order | Low Voltage Side | | | | High Voltage Side | |
|-------|------------------|-------------|--------|-------------|-------------------|----------|
| | Harm Source | Transformer | Motor | Linear Load | System | |
| | (Amps) | (Amps) | (Amps) | (Amps) | I (%) | Limit(%) |
| 5 | 121.55 | 102.31 | 17.76 | 5.14 | 2.72 | 7 |
| 7 | 97.24 | 81.77 | 14.21 | 5.68 | 2.17 | 7 |
| 11 | 243.09 | 203.91 | 35.45 | 22.07 | 5.42 | 3.5 |
| 13 | 194.48 | 162.86 | 28.31 | 20.79 | 4.33 | 3.5 |
| 17 | 72.93 | 60.83 | 10.58 | 10.14 | 1.62 | 2.5 |
| 19 | 48.62 | 40.45 | 7.03 | 7.53 | 1.08 | 2.5 |
| 23 | 97.24 | 80.46 | 13.99 | 18.13 | 2.14 | 1 |
| 25 | 85.08 | 70.18 | 12.20 | 17.18 | 1.87 | 1 |
| 29 | 24.31 | 19.91 | 3.46 | 5.65 | 0.53 | 1 |
| 31 | 17.02 | 13.89 | 2.41 | 4.21 | 0.37 | 1 |
| รวม | 382.63 | 320.28 | 55.67 | 42.56 | 8.51 | 8 |

ในตัวอย่างที่ 3 มาตรฐานฮาร์มอนิกที่ใช้กำหนดในการออกแบบตัวกรอง คือ มาตรฐาน IEEE Std. 519 -1992 จากตารางที่ 5.30 จะเห็นว่ากระแสฮาร์มอนิกที่ลำดับที่ 11 , 13 , 23 และ 25 (ในรอบสี่เหลี่ยม) มีค่าเกินค่าที่มาตรฐาน IEEE Std. 519-1992 กำหนด ข้อมูลการออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก แสดงดังตารางที่ 5.31 และ ตารางที่ 5.32

ตารางที่ 5.31 ข้อมูลการออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก

| ชนิดข้อมูล | ปริมาณ |
|-----------------------|--------|
| Expected Power factor | 0.95 |
| Filter Q factor | 60 |

ตารางที่ 5.32 ข้อมูลช่วงของจุดปรับคลื่น

| Range of Tuning Point | ขีดจำกัดล่าง | ขีดจำกัดบน |
|-----------------------|--------------|------------|
| Order 5 th | 4.5 | 4.9 |
| Order 7 th | 6.5 | 6.9 |
| Order 11 th | 10.5 | 10.9 |
| Order 13 th | 12.5 | 12.9 |

(ข).วิเคราะห์ระบบ (ติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก)

ผลการคำนวณหาแรงดันฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นทางด้านแรงดันสูง และด้านแรงดันต่ำของหม้อแปลง แสดงดังตารางที่ 5.33 และตารางที่ 5.34

ตารางที่ 5.33 ผลการคำนวณแรงดันฮาร์มอนิก

| Low Voltage Side | | | | | | High Voltage Side | | | | | |
|------------------|------|------|----|------|------|-------------------|-------|------|----|-------|------|
| h | Volt | % | h | Volt | % | h | Volt | % | h | Volt | % |
| 1 | 380 | 100 | 19 | 3.10 | 0.82 | 1 | 12000 | 100 | 19 | 20.99 | 0.17 |
| 5 | 2.09 | 0.55 | 23 | 7.68 | 2.02 | 5 | 14.13 | 0.12 | 23 | 51.93 | 0.43 |
| 7 | 0.66 | 0.17 | 25 | 7.35 | 1.93 | 7 | 4.47 | 0.04 | 25 | 49.72 | 0.41 |
| 11 | 7.58 | 2.00 | 29 | 2.46 | 0.65 | 11 | 51.28 | 0.43 | 29 | 16.63 | 0.14 |
| 13 | 7.77 | 2.05 | 31 | 1.85 | 0.49 | 13 | 52.56 | 0.44 | 31 | 12.48 | 0.10 |
| 17 | 4.09 | 1.08 | | | | 17 | 27.67 | 0.23 | | | |

ตารางที่ 5.34 ผลการคำนวณแรงดันฮาร์มอนิก

| Low Voltage Side | | High Voltage Side | |
|--------------------|--------|--------------------|----------|
| V_{total} (Volt) | 380.36 | V_{total} (Volt) | 12000.52 |
| THD_v (%) | 4.34 | THD_v (%) | 0.93 |

สำหรับผลการวิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลในหม้อแปลง โหลดมอเตอร์ และโหลดเชิงเส้น แสดงดังตารางที่ 5.35

ตารางที่ 5.35 ผลการคำนวณกระแสฮาร์มอนิกในส่วนต่างๆ ของระบบ

| Order | Low Voltage Side | | | | High Voltage Side | |
|-------|------------------|-------------|--------|-------------|-------------------|----------|
| | Harm Source | Transformer | Motor | Linear Load | System | |
| | (Amps) | (Amps) | (Amps) | (Amps) | I (%) | Limit(%) |
| 5 | 121.55 | 34.17 | 5.93 | 1.72 | 1.53 | 7 |
| 7 | 97.24 | 7.72 | 1.34 | 0.54 | 0.35 | 7 |
| 11 | 243.09 | 56.35 | 9.79 | 6.10 | 2.52 | 3.5 |
| 13 | 194.48 | 48.87 | 8.50 | 6.42 | 2.19 | 3.5 |
| 17 | 72.93 | 19.68 | 3.42 | 3.28 | 0.88 | 2.5 |
| 19 | 48.62 | 13.36 | 2.32 | 2.49 | 0.60 | 2.5 |
| 23 | 97.24 | 27.29 | 4.75 | 6.15 | 1.22 | 1 |
| 25 | 85.08 | 24.04 | 4.18 | 5.89 | 1.08 | 1 |
| 29 | 24.31 | 6.93 | 1.21 | 1.97 | 0.31 | 1 |
| 31 | 17.02 | 4.87 | 0.85 | 1.48 | 0.22 | 1 |
| รวม | 382.63 | 93.54 | 16.26 | 13.22 | 4.19 | 8 |

ตารางที่ 5.36 ผลการวิเคราะห์การปรับเพิ่ม-ลดค่ากำลังงานรีแอกทีฟตามตัวอย่างตารางที่ 3.2

| ขั้นการปรับเพิ่ม-ลด | 5 th Filter (kVAr) | | 7 th Filter (kVAr) | | ราคารวม (บาท) |
|----------------------------------|---------------------------------|----------|---------------------------------|----------|--------------------|
| | ขนาดรวม | ขนาด Cap | ขนาดรวม | ขนาด Cap | |
| +14 ΔQ | 1760 | 80*22 | 1120 | 80*14 | 2401200 |
| +13 ΔQ | 1760 | 80*22 | 1140 | 60*19 | 2457900 |
| +8 ΔQ ถึง +12 ΔQ | 1680 | 80*21 | 1200 | 80*15 | 2400400 |
| +6 ΔQ ถึง +7 ΔQ | 1680 | 80*21 | 1260 | 70*18 | 2474000 |
| + ΔQ ถึง +5 ΔQ | 1600 | 80*20 | 1280 | 80*16 | 2399700 |
| เริ่มต้น | 1600 | 80*20 | 1280 | 80*16 | 2399700 |
| - ΔQ ถึง -2 ΔQ | 1600 | 80*20 | 1330 | 70*19 | 2466100 |
| -3 ΔQ ถึง -8 ΔQ | 1520 | 80*19 | 1360 | 80*17 | 2399000 |
| -9 ΔQ | 1520 | 80*19 | 1400 | 70*20 | 2462300 |
| -10 ΔQ | 1520 | 80*19 | 1440 | 80*18 | 2464000 |
| -11 ΔQ | 1440 | 80*18 | 1470 | 70*21 | 2450200 |

หมายเหตุ : $\Delta Q = 10$ kVAr

จากผลการออกแบบ จะได้ว่าต้องทำการติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดกรองเดี่ยว ลำดับที่ 5th และ 7th ซึ่งมีขนาด ดังตารางที่ 5.37 และ 5.38

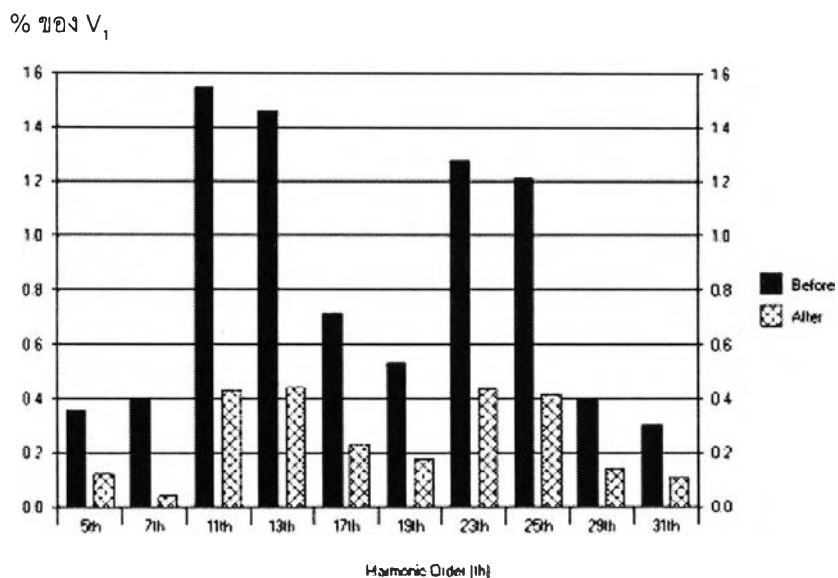
ตารางที่ 5.37 ขนาดของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5th

| | Quantity | Unit |
|-----------------------------|----------|-----------|
| Voltage Rating of Capacitor | 525 | Volt |
| Total kVAR of Capacitor | 1520 | kVAR |
| Tuning Point | 4.5 | |
| Q-Factor | 60 | |
| Size of each Capacitor | 80 | kVAR |
| Number of Capacitor | 19 | Unit |
| Size of Inductor | 1483.52 | A_{rms} |
| Inductance Value | 0.027 | mH |
| Resistance of Inductor | 0.638 | mOhm |
| Capacitor Cost | 726000 | Baht |
| Inductor Cost | 613200 | Baht |
| Total Cost | 1339000 | Baht |

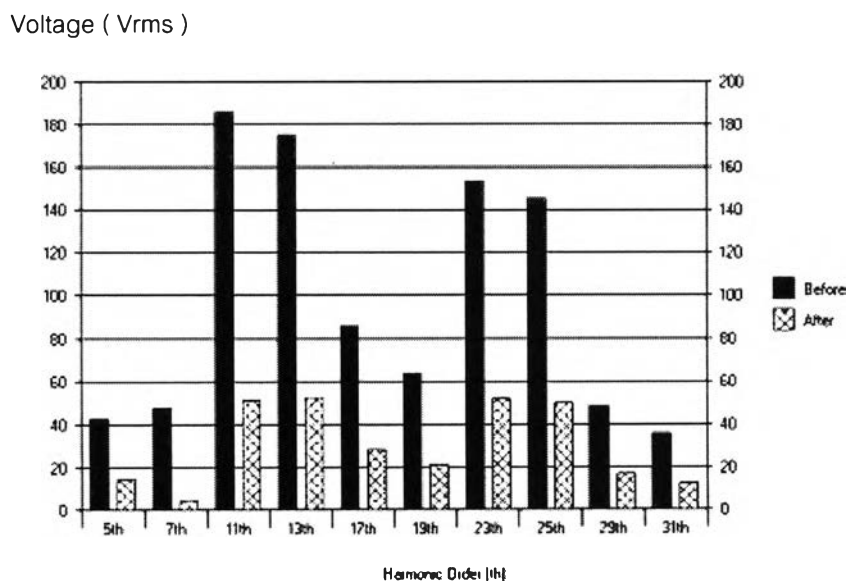
ตารางที่ 5.38 ขนาดของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 7th

| | Quantity | Unit |
|-----------------------------|----------|-----------|
| Voltage Rating of Capacitor | 525 | Volt |
| Total kVAR of Capacitor | 1360 | kVAR |
| Tuning Point | 6.5 | |
| Q-Factor | 60 | |
| Size of each Capacitor | 80 | kVAR |
| Number of Capacitor | 17 | Unit |
| Size of Inductor | 1164.25 | A_{rms} |
| Inductance Value | 0.016 | mH |
| Resistance of Inductor | 0.552 | mOhm |
| Capacitor Cost | 580800 | Baht |
| Inductor Cost | 479700 | Baht |
| Total Cost | 1060000 | Baht |

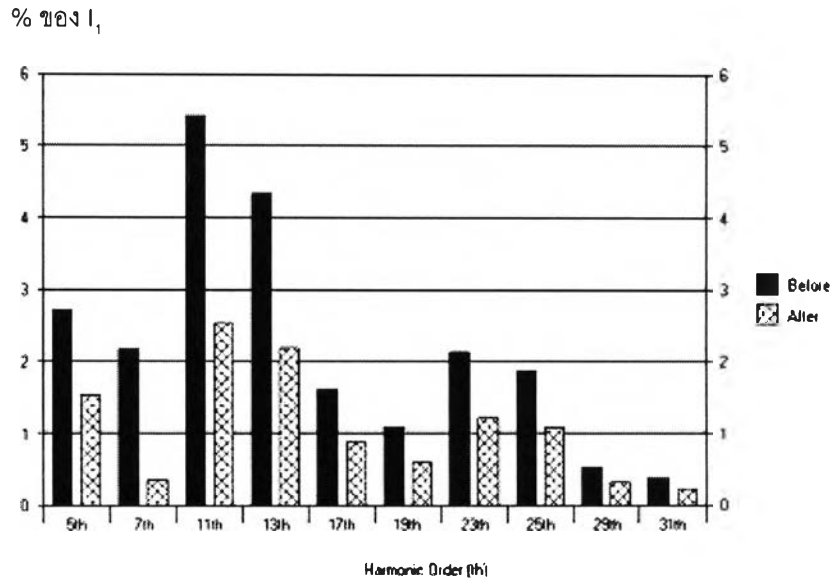
ผลการวิเคราะห์ระบบหลังจากการติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดกรองเดี่ยว สามารถแสดงเป็นสเปกตรัมของฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าระบบที่จุดต่อร่วม ดังรูปที่ 5.30 ถึง รูปที่ 5.33



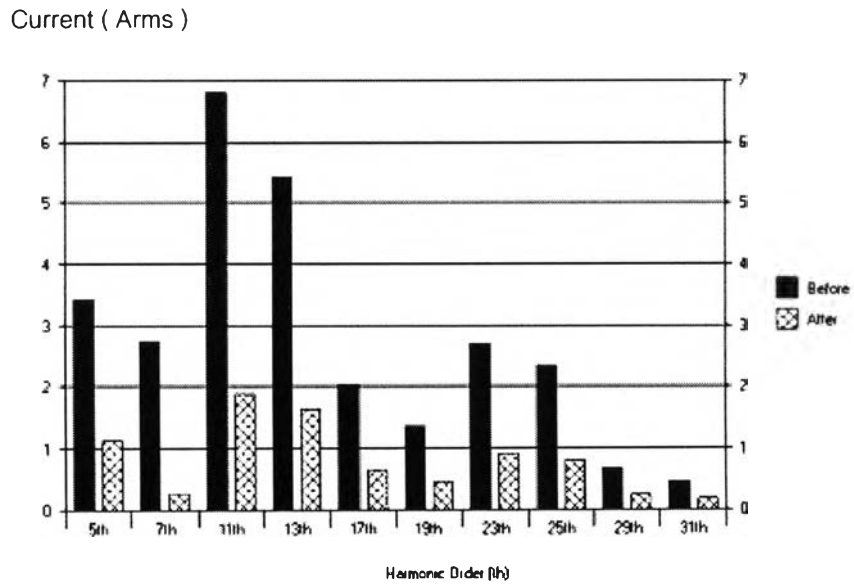
รูปที่ 5.30 สเปกตรัมของค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกของแรงดันที่จุดต่อร่วม



รูปที่ 5.31 สเปกตรัมของแรงดันฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วม



รูปที่ 5.32 สเปกตรัมของค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกของกระแสที่จุดต่อร่วม



รูปที่ 5.33 สเปกตรัมของกระแสฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วม

5.5 สรุป

ผลการคำนวณที่ได้จากโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น สามารถหาขนาดตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดกรองเดียว ที่มีราคาต่ำที่สุดได้ในระดับหนึ่งเท่านั้น ซึ่งราคารวมที่ได้จากโปรแกรมนี้เป็นราคาของตัวเก็บประจุรวมกับตัวเหนี่ยวนำเท่านั้น ทั้งนี้ยังไม่ได้รวมราคาของอุปกรณ์ป้องกันต่างๆ ราคาค่าแรงงานในการติดตั้ง ราคาตัวตัดต่อวงจร ราคาตู้ของตัวกรอง ฯลฯ ผลการคำนวณขนาดตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดกรองเดียวที่ได้จากโปรแกรมจะถูกต้องมากน้อยเพียงใดนั้น ต้องขึ้นอยู่กับความถูกต้องของข้อมูลในขณะนั้นๆ ด้วย เพราะข้อมูลราคาของตัวอุปกรณ์ต่างๆ มีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ดังนั้นผลที่ได้จากการคำนวณของโปรแกรมนี้ จะถูกใช้เป็นแนวทางในการออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกในทางปฏิบัติอีกที เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการออกแบบ และการทำงานของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก ให้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น