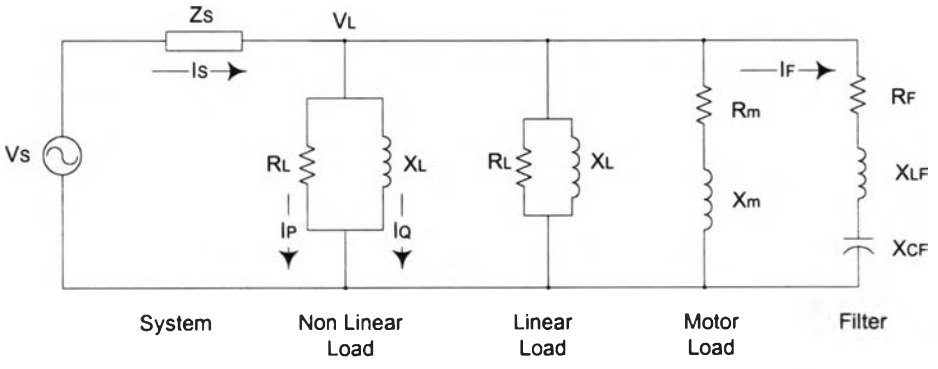
บทที่ 3

การคำนวณขนาดตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดกรองเดี่ยว

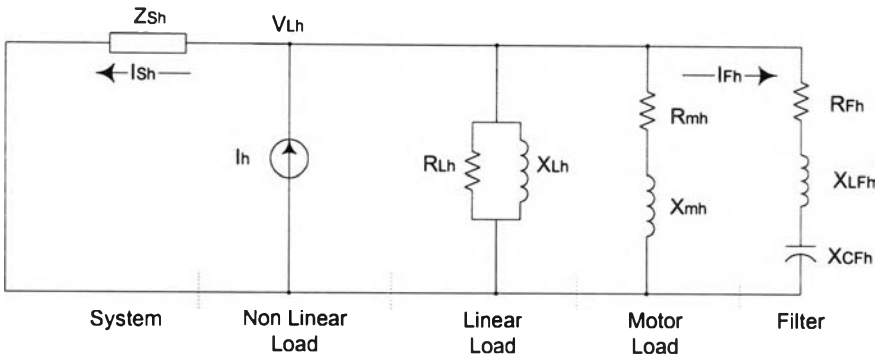
กระแสฮาร์มอนิกจากแหล่งกำเนิดในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วๆไป ที่ไหลเข้าไปในระบบไฟฟ้า เป็นตัวก่อให้เกิดปัญหาด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้า ดังนั้นจึงต้องมีการจำกัดขนาดของกระแสฮาร์มอนิกที่จะไหลเข้าไปในระบบไฟฟ้า ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้วิธีการจำกัดระดับของกระแสฮาร์มอนิกด้วยการออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดกรองเดี่ยวที่มีราคาต่ำที่สุด และยังสามารถจำกัดระดับกระแส และแรงดันฮาร์มอนิกให้อยู่ในระดับที่มาตรฐานกำหนดไว้

3.1 แบบจำลองของอุปกรณ์ต่าง ๆที่ใช้ในการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก

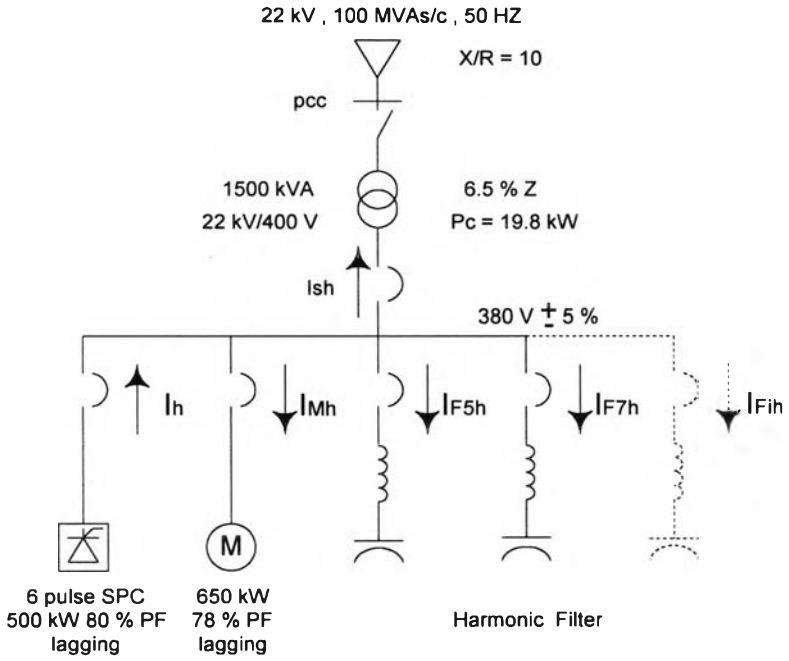
ก่อนที่จะทำการออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก เพื่อต่อเข้ากับระบบจะต้องทำการวิเคราะห์ก่อนว่ามีกระแสฮาร์มอนิกลำดับใดบ้าง และขนาดเท่าไร ไหลในระบบไฟฟ้า ซึ่งจะต้องนำค่ากระแส และค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบมาทำการคำนวณว่ามีกระแสรวมไหลเข้ามาในตัวกรองเท่าไร ซึ่งจะต้องให้กระแสรวมไหลเข้าตัวกรองไม่เกินค่าพิกัดของตัวอุปกรณ์ที่เป็นส่วนประกอบของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกตามที่มาตรฐานได้กำหนดไว้ โดยใช้วงจรสมมูลที่ความถี่หลักมูล และวงจรสมมูลที่ความถี่ฮาร์มอนิกใดๆ ทำการวิเคราะห์หาค่าต่างๆ ตามมาตรฐาน รูปที่ 3.1 และ 3.2 แสดงวงจรสมมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์



<u>รูปที่ 3.1</u> วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูล



<u>รูปที่ 3.2</u> วงจรสมมูลของระบบไฟฟ้าที่ความถี่ฮาร์มอนิกใดๆ

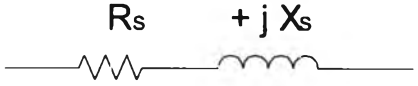


<u>รูปที่ 3.3</u> ระบบไฟฟ้าตัวอย่าง

การวิเคราะห์หาขนาดตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดกรองเดี่ยวจะมีความถูกต้องมากน้อยเพียงใด ก็ขึ้นกับแบบจำลองของอุปกรณ์ต่างๆ ในระบบไฟฟ้าที่ใช้ในการวิเคราะห์ด้วย สำหรับแบบจำลองของอุปกรณ์ที่จะพิจารณาใช้ในการวิเคราะห์นี้ จะไม่คิดผลของ Skin Effect (ค่าความต้านทานจะไม่เปลี่ยนแปลงตามความถี่) และคิดว่าระบบอยู่ในสภาวะสมดุล รายละเอียดมีดังนี้

3.1.1 **แบบจำลองของระบบไฟฟ้า**[18]

แบบจำลองนี้จะมองจากจุดต่อร่วม (PCC) เข้าไปในระบบไฟฟ้าโครงข่ายที่จ่ายไฟฟ้า ซึ่งจะแทนแบบจำลองนี้ด้วยค่าอิมพีแดนซ์ที่มีค่าความต้านทานต่ออนุกรมกับค่ารีแอกแตนซ์ โดยที่ค่าความต้านทานมีความสัมพันธ์กับค่ารีแอกแตนซ์ในรูปของอัตราส่วน X/R ที่ความถี่หลักมูลดังนั้นค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ฮาร์มอนิกจะหาได้จากสมการที่ 3.2



รูปที่ 3.4 แบบจำลองของระบบไฟฟ้า

$$Zs = \frac{Vsys^2}{MVA_{SC}} \qquad 3.1$$

$$Zsh = Rs + jhXs \qquad 3.2$$

เมื่อ Zs = ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้าที่ความถี่หลักมูล (โอห์ม)

Zsh = ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้าที่ความถี่ฮาร์มอนิก (โอห์ม)

Rs = ค่าความต้านทานของระบบไฟฟ้า (โอห์ม)

Xs = ค่ารีแอกแตนซ์ของระบบไฟฟ้า (โอห์ม)

$Vsys$ = ค่าแรงดันของระบบไฟฟ้า (kV)

MVA_{SC} = ค่ากำลังลัดวงจรของระบบไฟฟ้า (MVA)

h = เลขลำดับฮาร์มอนิก

ในระบบไฟฟ้าทั่วไป ณ จุดต่อร่วม (PCC) ค่า X/R ratio ปกติจะมีค่าประมาณ 10 เท่า คือ $R_S \approx 0.1X_S$[17] จากข้อมูลเหล่านี้นำมาหาค่าอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้าได้

3.1.2 **แบบจำลองของหม้อแปลง**[9]

หม้อแปลงไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรมเป็นหม้อแปลงขนาดปานกลาง และ ส่วนใหญ่จะทำงานที่แรงดันต่ำกว่าพิกัด ดังนั้นการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรม จึงจำลองหม้อแปลงด้วยค่าอิมพีแดนซ์ที่ประกอบด้วยค่าของ ค่าความต้านทานต่ออนุกรมกับค่ารีแอกแตนซ์รั่วไหล (Leakage Reactance) ซึ่งแปรผันตามกับเลขลำดับฮาร์มอนิก ส่วนค่าความต้านทานถ้าหากไม่คิดผลของ Skin effect ก็จะถือว่ามีค่าคงที่ ดังนั้นที่ความถี่ฮาร์มอนิกสามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงได้ดังนี้

รูปที่ 3.5 แบบจำลองของหม้อแปลงไฟฟ้า

$$Z_{Tr} = \frac{\%Z}{100} \times \frac{V^2}{KVA \times 10^3} \quad (3.3)$$

$$R_{Tr} = Pc \times \frac{V^2}{(KVA \times 10^3)^2} \quad (3.4)$$

$$Z_{Trh} = R_{Tr} + jhX_{Tr} \quad (3.5)$$

เมื่อ Z_{Tr} = ค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่หลักมูลของหม้อแปลง (โอห์ม)

Z_{Trh} = ค่าอิมพีแดนซ์ที่ความถี่ฮาร์มอนิกของหม้อแปลง (โอห์ม)

R_{Tr} = ค่าความต้านทานที่ความถี่หลักมูลของหม้อแปลง (โอห์ม)

X_{Tr} = ค่ารีแอกแตนซ์ที่ความถี่หลักมูลของหม้อแปลง (โอห์ม)

V = ค่าแรงดันพิกัดของหม้อแปลง (V)

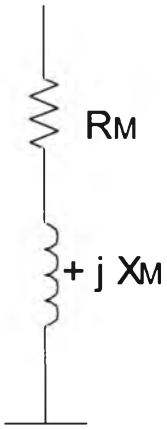
Pc = ค่ากำลังสูญเสียภายในขดลวด (Winding Loss) (kW)

$\%Z$ = ค่าอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงคิดเป็นร้อยละ

สำหรับการต่อของหม้อแปลงในวิทยานิพนธ์นี้ จะพิจารณาเป็นการต่อแบบเดลตา-วายมีกราวด์ เพื่อพิจารณาผลของกระฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าระบบตามสภาพการใช้งานจริงของระบบไฟฟ้าของประเทศไทย

3.1.3 แบบจำลองของโหลดประเภทมอเตอร์

ในโรงงานอุตสาหกรรมส่วนมากจะใช้มอเตอร์แบบเหนี่ยวนำเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์แบบเหนี่ยวนำจะประกอบด้วยอิมพีแดนซ์ในส่วนของ โรเตอร์ และสเตเตอร์ ดังนั้นวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะใช้แบบจำลองของมอเตอร์ที่ความถี่ฮาร์มอนิก ด้วยการรวมค่ารีแอกแตนซ์ของโรเตอร์ และสเตเตอร์เข้าด้วยกัน แล้วต่ออนุกรมกับค่าความต้านทานของขดลวด ตามแบบจำลองของ CIGRE[16] ซึ่งจะได้ค่าอิมพีแดนซ์ดังนี้



$$X_M = \frac{V_{sys}^2}{Sstart} \quad (3.6)$$

$$R_M = \frac{X_M}{3} \quad (3.7)$$

$$Z_{Mh} = R_M + jhX_M \quad (3.8)$$

รูปที่ 3.6 แบบจำลองของมอเตอร์ไฟฟ้า

หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

เมื่อ Z_{Mh} = ค่าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์ที่ฮาร์มอนิกลำดับที่ h (โอห์ม)

V_{sys} = ค่าแรงดันพิกัดของระบบที่สภาวะปกติ (V)

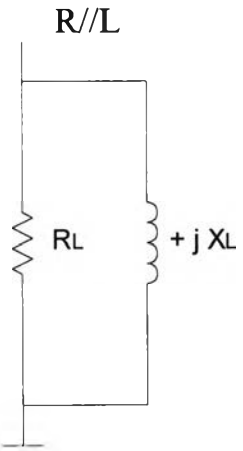
$Sstart$ = ค่ากำลังปรากฏพิกัดของมอเตอร์ตอนเริ่มทำงาน (VA)

ค่ากำลังปรากฏพิกัดของมอเตอร์ตอนเริ่มทำงาน(S_{start}) จะมีค่าเท่ากับค่ากำลังปรากฏพิกัดของมอเตอร์ตอนทำการยึดตัวโรเตอร์ (Lock Rotor)

โรงงานอุตสาหกรรมที่มีมอเตอร์เหนี่ยวนำแรงดันต่ำหลายๆตัว ต่ออยู่ภายในโรงงานเดียวกัน อาจคิดค่าอิมพีแดนซ์ของมอเตอร์ได้ โดยการนำมอเตอร์มาพิจารณารวมกันเป็นกลุ่มได้

3.1.4 แบบจำลองของโหลดเชิงเส้น[9,16]

ข้อมูลของโหลดเชิงเส้นโดยทั่วไปนั้น จะอยู่ในรูปของกำลังงานจริง (P) และ กำลังงานรีแอกทีฟ (Q) ซึ่งใช้สำหรับการคำนวณค่าอิมพีแดนซ์สมมูลของการคำนวณโหลดโฟล์วที่ความถี่หลักมูล สำหรับการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรม แบบจำลองของโหลดเชิงเส้นจะใช้ลักษณะเดียวกันกับการคำนวณโหลดโฟล์ว คือ อิมพีแดนซ์จะประกอบด้วย ค่าความต้านทาน และ ค่า รีแอกแตนซ์ ซึ่งจะต่ออนุกรม หรือ ขนานกันนั้น ขึ้นกับข้อมูลของโหลดนั้นๆ ในวิทยานิพนธ์นี้จะใช้การจำลองของโหลดแบบขนาน โดยค่าความต้านทาน และค่ารีแอกแตนซ์ หาได้จากกำลังงานจริง (P) และ กำลังงานรีแอกทีฟ (Q) ของโหลดนั้นๆ ตามสมการที่ 3.9 และ สมการที่ 3.10



$$R_L = \frac{V^2_{sys}}{P_1} \qquad 3.9$$

$$X_L = h \cdot \frac{V^2_{sys}}{Q_1} \qquad 3.10$$

รูปที่ 3.7 แบบจำลองของโหลดเชิงเส้น

เมื่อ R_L = ค่าความต้านทานของโหลดที่ฮาร์มอนิกลำดับที่ h (โอห์ม)

X_{Lh} = ค่ารีแอกแตนซ์ของโหลดที่ฮาร์มอนิกลำดับที่ h (โอห์ม)

V_{sys} = ค่าแรงดันพิกัดของระบบที่สภาวะปกติ (V)

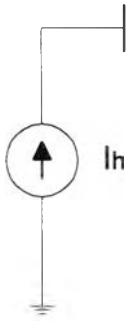
P_1 = กำลังงานจริงของโหลดในสภาวะแรงดันปกติ (W)

Q_1 = กำลังงานรีแอคทีฟของโหลดในสภาวะแรงดันปกติ (VAr)

ข้อมูลที่ต้องการของโหลดเชิงเส้นภายในโรงงาน เพื่อการหาแบบจำลองของโหลดแบบต่อขนาน คือกำลังงานจริง กำลังงานรีแอกทีฟ และ แรงดันของระบบในสภาวะที่โหลดทำงาน

3.1.5 **แบบจำลองของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก**[9]

แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก คือโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นภายในโรงงาน เช่น คอนเวอร์เตอร์แบบสถิต วงจรเรียงกระแส เป็นต้น ซึ่งแบบจำลองของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกภายในโรงงานนั้น จะถือว่าเป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก ดังรูปที่ 3.8



<u>รูปที่ 3.8</u> แบบจำลองแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิก

ข้อมูลของความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกที่ลำดับต่างๆ อันเนื่องมาจากโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่ต่ออยู่ภายในโรงงานอุตสาหกรรม สามารถหาได้จากการตรวจวัดฮาร์มอนิกภายในโรงงานก่อน นำข้อมูลมาทำการวิเคราะห์ออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดกรองเดี่ยว หรืออาจเป็นค่าที่ประเมินจากข้อมูลรายละเอียดของโหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้น เพื่อศึกษาถึงการออกแบบตัวกรอง

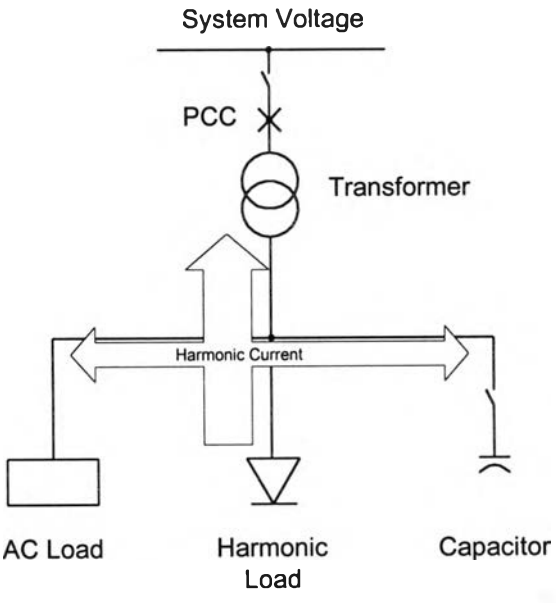
3.2 **ลักษณะของปัญหา**

ปัจจุบันพบว่าในระบบไฟฟ้าส่วนใหญ่ มีอุปกรณ์ที่เป็นแหล่งกำเนิดของกระแสฮาร์มอนิกต่ออยู่กับระบบไฟฟ้ามากขึ้น ได้แก่ เตาหลอมโลหะ(Arc Furnace) , คอนเวอร์เตอร์กำลังสถิต (Static Power Converter) , อุปกรณ์พวกอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Equipment) และภาระที่

ไม่เป็นเชิงเส้นต่างๆ(Non-Linear Load) เป็นต้น ซึ่งส่งผลกระทบให้เกิดความสูญเสียของกำลังไฟฟ้า อุปกรณ์มีอายุการทำงานสั้นลง หรือเกิดความเสียหายขึ้นที่ตัวอุปกรณ์ที่ต่ออยู่ในระบบไฟฟ้าเดียวกัน หรือตัวอุปกรณ์ทำงานผิดพลาด ซึ่งเกิดจากการรบกวนของแรงดัน และ กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลในระบบ กล่าวคือรูปคลื่นแรงดันมีการผิดเพี้ยนผลที่เกิดตามมาคือการรบกวนต่อระบบต่างๆ ทั้งระบบไฟฟ้ากำลังและระบบสื่อสาร ซึ่งทำให้ความเชื่อถือได้ของระบบลดน้อยลง

3.2.1 รูปแบบของปัญหา

ในระบบไฟฟ้าทั่วไปที่มีการใช้ภาระที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกที่ลำดับต่างๆ และมีการต่อตัวเก็บประจุเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังของระบบไฟฟ้า อาจเกิดความเสียหายจากกระแสฮาร์มอนิกไหลในระบบไฟฟ้าที่ร้ายแรงที่สุด คือ สภาวะที่เกิดการเท่ากันของความถี่ธรรมชาติของระบบไฟฟ้ากำลัง กับความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลในระบบไฟฟ้า ซึ่งส่งผลให้เกิดการขยายของกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลในระบบ ด้วยอัตราส่วนของค่า รีแอกแตนซ์ต่อค่าความต้านทาน (X/R) จนเกินค่ากระแสพิกัดของอุปกรณ์ที่ต่ออยู่ในระบบ ทำให้อุปกรณ์เกิดความเสียหายหรือเกิดระเบิดขึ้นได้ เช่น ตัวเก็บประจุ (Capacitor) เป็นต้น และยังทำให้มีกระแสฮาร์มอนิกไหลเข้าไปในระบบไฟฟ้า ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการผิดเพี้ยนของแรงดัน และกระแสที่จุดต่อร่วม (PCC) ในระบบ รูปที่ 3.9 แสดงการไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากภาระที่ไม่เป็นเชิงเส้น ในสภาวะที่ความถี่ธรรมชาติของระบบเท่ากับความถี่ของกระแสฮาร์มอนิก ที่ไหลในระบบ จึงทำให้เกิดการขยายของกระแสฮาร์มอนิก



รูปที่ 3.9 การไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่มีการติดตั้งตัวเก็บประจุ (Capacitor) เพื่อปรับปรุงตัวประกอบกำลังในระบบไฟฟ้า

ในระบบจำหน่ายไฟฟ้าโดยทั่วๆไป จะมีค่ารีแอกแตนซ์แบบอินดักทีฟ และตัวประกอบกำลังแบบล้าหลัง ซึ่งทำให้เกิดความสูญเสียกำลังงานในระบบ จึงต้องมีการชดเชยกำลังงานรีแอกทีฟ โดยการใช้ตัวเก็บประจุต่อขนานกับระบบเพื่อจ่ายกำลังงานรีแอกทีฟชดเชยให้ระบบแต่ในบางครั้งระบบอาจเกิดการเท่ากันของค่าอินดักทีฟรีแอกแตนซ์รวมของระบบ กับค่าคาปาซิทีฟรีแอกแตนซ์ของตัวเก็บประจุที่ต่อขนานกับระบบ อันเนื่องมาจากมีความถี่ฮาร์มอนิกค่าหนึ่งเรียกว่า n_h ไหลในระบบ ซึ่งส่งผลทำให้เกิดปริมาณของกระแส และแรงดันที่สูงมากที่ความถี่นั้นไหลในระบบ ทำให้เกิดความเสียหายขึ้นกับอุปกรณ์ที่ต่อร่วมอยู่ ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นนี้เรียกว่า ปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ โดยค่าความถี่เรโซแนนซ์ของระบบจำหน่ายที่มีการติดตั้งตัวเก็บประจุสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3.11[9] ดังนี้

$$n_h = \sqrt{\frac{kVA_{SC}}{Q_C}} \qquad 3.11$$

เมื่อ n_h = ลำดับฮาร์มอนิกที่ทำให้เกิดเรโซแนนซ์

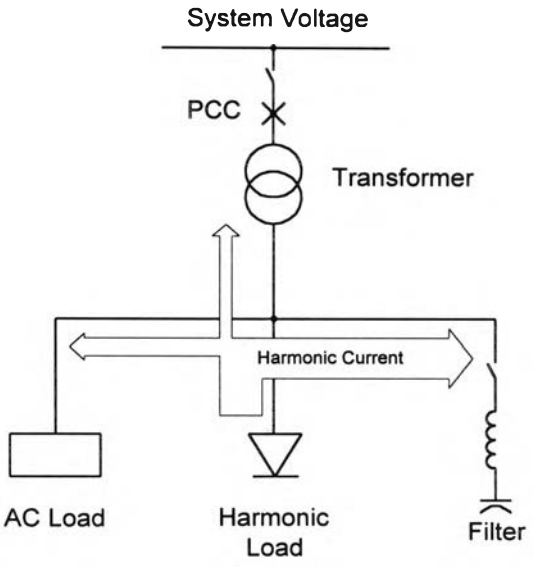
kVA_{SC} = ค่า kVA ลัดวงจรของระบบจำหน่าย ณ จุดที่มีการชดเชยกำลังงานรีแอกทีฟ

Q_C = ค่า $kVAr$ ของการชดเชยกำลังงานรีแอกทีฟ

ปัญหากระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบ สามารถแก้ไขได้หลายวิธีด้วยกัน เช่น การใช้ตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก (Harmonic Current Filter) กรองกระแสฮาร์มอนิก บางความถี่ที่ไม่ต้องการออกไปจากระบบ เพื่อสกัดกั้นการไหลของกระแสฮาร์มอนิกไม่ให้ไปรบกวนอุปกรณ์ของระบบที่ต้องการป้องกัน หรือเปลี่ยนตำแหน่งที่ต่ออุปกรณ์ที่เป็นแหล่งเกิดกระแสฮาร์มอนิกเป็นตำแหน่งที่จะไม่เกิดการรบกวนระบบ (Remove Harmonic Source) หรือเปลี่ยนการต่อหม้อแปลงในระบบ เพื่อสกัดกั้นการไหลข้ามหม้อแปลงของกระแสฮาร์มอนิก

การใช้ตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดกรองเดี่ยว(Harmonic Current Single-Tune Filter) ทำหน้าที่กรองกระแสฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ที่เกิดจากภาระที่ไม่เป็นเชิงเส้นออกจากระบบ แต่การที่จะติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าใดๆนั้นจะต้องคำนึงถึงค่ากำลังงานรีแอกทีฟที่ระบบต้องการเพื่อใช้ในการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังของระบบไฟฟ้า ลำดับความถี่ของกระแสฮาร์มอนิกที่ต้องการกรองออกจากระบบ เพื่อให้เกิดความเหมาะสมในการลงทุนที่สุด และระดับของกระแสฮาร์มอนิกที่ต้องการกรอง ดังนั้นการออกแบบตัวกรองฮาร์มอนิก ชนิดกรองเดี่ยวที่เหมาะสมกับระบบไฟฟ้านั้นๆ จำเป็นต้องคำนึงถึงปัจจัยที่กล่าวข้างบนด้วย เมื่อทำการติดตั้งตัว

กรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดกรองเดี่ยวกับระบบไฟฟ้าแล้ว กระแสฮาร์มอนิก ส่วนใหญ่จะไหลไปที่ตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก จึงทำให้กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลในระบบไม่เกินค่าพิกัดกระแสของอุปกรณ์ที่ต่ออยู่ในระบบไฟฟ้า และ ค่าที่มาตรฐานฮาร์มอนิกกำหนดไว้ ดังแสดงในรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 ลักษณะการไหลของกระแสฮาร์มอนิกหลังจากติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก (Harmonic Current Filter) ในระบบไฟฟ้า

ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีกระแสฮาร์มอนิกไหลในระบบ จะเกิดปัญหาด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้าขึ้นมากมาย ดังนั้นจึงต้องมีการกรองกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลอยู่ในระบบออก โดยการใช้ตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดกรองเดี่ยว เพื่อเป็นการเพิ่มความมั่นคงให้กับระบบ รวมถึงการมีคุณภาพกำลังไฟฟ้า และประสิทธิภาพที่ดีขึ้นด้วย

วิทยานิพนธ์นี้ จึงเสนอวิธีการออกแบบที่เหมาะสมของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดกรองเดี่ยว ที่จะใช้กรองกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลในระบบไฟฟ้า โดยคำนึงถึงความสามารถในการจ่ายกำลังงานรีแอกทีฟ (Reactive Power) ที่เหมาะสม และใช้เงินลงทุนสำหรับตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกต่ำสุด ทั้งนี้เพื่อเป็นการป้องกันการทำงานของอุปกรณ์ที่ต่อในระบบ และเป็นการปรับปรุงคุณภาพของพลังงานไฟฟ้า เพิ่มประสิทธิภาพให้กับระบบได้อย่างเหมาะสม

3.2.2 **ฟังก์ชันวัตถุประสงค์**

การออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดกรองเดี่ยว ที่มีความเหมาะสมกับระบบ และมีราคาต่ำที่สุด สามารถทำการออกแบบได้ โดยใช้ฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Objective Function) เป็นฟังก์ชันในการหาขนาดของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกที่ลำดับต่างๆ ที่มีราคาต่ำที่สุด และต้องคำนึงถึงว่าค่ากำลังงานรีแอกทีฟที่ระบบต้องการยังอยู่ในช่วงที่กำหนดหรือไม่ และค่าความผิด

เพี้ยนทางฮาร์มอนิกอยู่ในช่วงที่มาตรฐานกำหนดหรือไม่ เพื่อให้ได้ตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดกรองเดี่ยวที่มีราคา และมีคุณสมบัติต่างๆที่เหมาะสมกับระบบที่สุด ซึ่งสามารถแสดงสมการของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ได้ดังนี้[14]

ฟังก์ชันเป้าหมาย

$$Minimize\left\{F(C,L) = (K_C \times Q_C) + (K_L \times Q_L)\right\} \quad 3.12$$

โดยที่มีข้อบังคับดังนี้

$$Q_{com}^{\min} \leq Q_{fh} \leq Q_{com}^{\max} \quad 3.13$$

$$Q_{Lh} = \frac{1}{n_h^2} \times Q_{Ch} \quad 3.14$$

$$THD < THD_{Max} \quad 3.15$$

$$V_{Min} \leq V_i \leq V_{Max} \quad 3.16$$

$$m[i]-1 < n_{m[i]} \leq m[i] \times B\% \quad 3.17$$

$$V_C \leq V_{Cr} \quad 3.18$$

โดยที่

$m[i]$	คือ	ลำดับของกระแสฮาร์มอนิกที่ต้องการจะกรอง
$n_{m[i]}$	คือ	จุดปรับคลื่นของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกที่ลำดับ $m[i]$
B	คือ	ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดรวมของค่าความถี่(f) ค่าความจุ(C) และค่าความเหนี่ยวนำ (L)
THD_{Max}	คือ	ค่าความผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกรวมสูงสุด
Q_{ch}	คือ	ค่ากำลังงานรีแอกทีฟของตัวเก็บประจุ
Q_{Lh}	คือ	ค่ากำลังงานรีแอกทีฟของตัวรีแอกเตอร์
V_{Min}	คือ	ค่าแรงดันประสิทธิผล (rms) ที่ยอมให้ต่ำสุด
V_{Max}	คือ	ค่าแรงดันประสิทธิผล (rms) ที่ยอมให้สูงสุด
V_C	คือ	ค่าแรงดันคร่อมตัวเก็บประจุที่สภาวะทำงาน
V_{Cr}	คือ	ค่าแรงดันพิกัดของตัวเก็บประจุ
Q_{com}^{Max}	คือ	ค่ากำลังงานรีแอกทีฟที่ระบบต้องการชดเชยสูงสุด

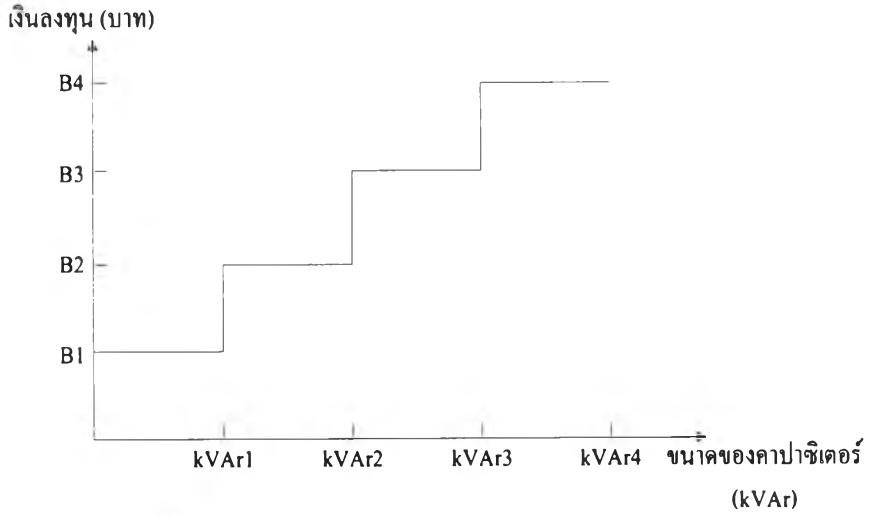
Q_{com}^{Min} คือ ค่ากำลังงานรีแอกทีฟที่ระบบต้องการชดเชยต่ำสุด

Q_{Fh} คือ ค่ากำลังงานรีแอกทีฟของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดกรองเดี่ยวในแต่ละลำดับฮาร์มอนิก

การออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดกรองเดี่ยว จะต้องทำการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของระบบไฟฟ้าหลังจุดต่อร่วม (PCC) และการพิจารณาค่าความผิดเพี้ยนทางฮาร์มอนิกรวม (*THD*) ของแรงดัน และกระแสที่เกิดจากกระแสฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วม นั้นด้วยว่าเป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐานทางฮาร์มอนิก และมาตรฐานข้อจำกัดของตัวเก็บประจุที่กำหนดไว้หรือไม่

3.3 การแก้ปัญหา

การแก้ปัญหาของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ในการหาขนาดตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดกรองเดี่ยวนั้น มีวิธีในการแก้ปัญหาหลายวิธีขึ้นอยู่กับรูปแบบของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ และสมการบังคับของฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่ใช้ในการออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก ในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้จะทำการพิจารณาราคาตัวเก็บประจุที่มีจำหน่ายตามท้องตลาดเป็นหลัก ราคาตัวเก็บประจุนี้ก็เป็นข้อบังคับหนึ่ง ในการหาขนาดตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก ซึ่งราคาตัวเก็บประจุเป็นฟังก์ชันไม่ต่อเนื่อง (Non-differentiable) แบบขั้นบันได (Step Function) ไม่สามารถเขียนเป็นสมการราคาของตัวเก็บประจุกับขนาดของตัวเก็บประจุออกมาได้ ดังในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.11 ฟังก์ชันราคาลงทุนของตัวเก็บประจุ

3.3.1 การวิเคราะห์สร้างทางเลือก

ดังนั้นการแก้ปัญหาในวิทยานิพนธ์นี้ จะใช้วิธีการลองผิดลองถูก(Trial and error) ในการปรับค่าขนาดกำลังงานรีแอกทีฟชดเชยของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกแต่ละลำดับที่ทำการติดตั้งในระบบไฟฟ้า เพื่อให้ได้ราคารวมของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกทุกลำดับให้มีค่าต่ำที่สุด ซึ่งการปรับขนาดของกำลังรีแอกทีฟของตัวกรองแต่ละลำดับ ต้องคำนึงถึงผลของแรงดัน และ กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลผ่านตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกในแต่ละลำดับ และไหลเข้าในระบบที่จุดต่อร่วมให้เป็นไปตามมาตรฐานกำหนดไว้

การปรับค่าขนาดกำลังรีแอกทีฟของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกนั้น ต้องหาค่าเริ่มต้น (Initial Value) ของขนาดกำลังงานรีแอกทีฟชดเชยของตัวกรองแต่ละลำดับก่อน การหาค่าเริ่มต้นของขนาดกำลังงานรีแอกทีฟ สามารถหาได้จากแฟคเตอร์ของกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลในระบบตามสมการที่ 3.19 [14]

$$Q_{com,h} = Q_{com} \times \frac{Ih}{\sum_{i=1}^{n} Ih} \qquad 3.19$$

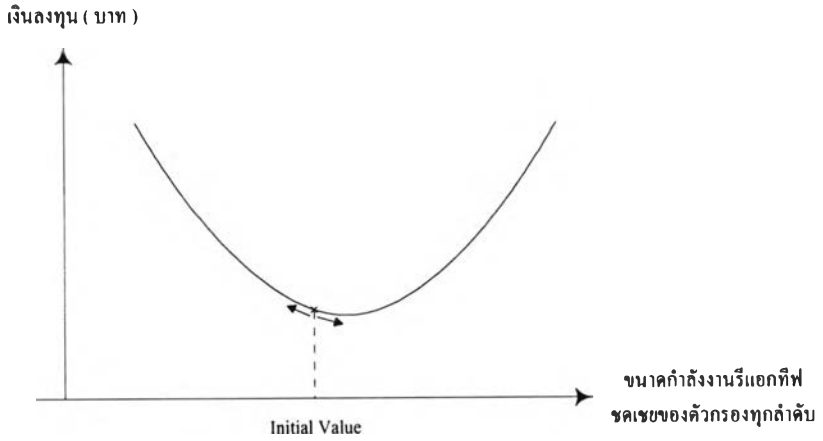
โดยที่

$Q_{com,h}$ คือ กำลังงานรีแอกทีฟชดเชยที่ตัวกรองลำดับที่ h

Q_{com} คือ กำลังงานรีแอกทีฟชดเชยทั้งหมด

Ih คือ กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ h

เมื่อทราบค่าเริ่มต้นของขนาดกำลังรีแอกทีฟชดเชยของตัวกรองแต่ละลำดับแล้ว ทำการขยับค่าขนาดกำลังรีแอกทีฟขึ้นลง เพื่อหาคำตอบที่มีราคารวมต่ำที่สุด ดังรูปที่ 3.12



รูปที่ 3.12 การขยับค่าขนาดกำลังงานรีแอกทีฟของตัวกรองทุกลำดับ

ในการแก้ปัญหาจะเริ่มต้นพิจารณาการติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกเพียง 1 ลำดับ เพื่อให้ได้ราคาที่ต่ำที่สุด แล้วทำการวิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิกในส่วนต่างๆของระบบ หลังจากนั้นทำการตรวจสอบแรงดัน และกระแสฮาร์มอนิกในแต่ละลำดับว่าอยู่ภายใต้มาตรฐานกำหนดหรือไม่ หากอยู่ในขอบเขตของมาตรฐาน ขั้นตอนต่อไปก็ทำการคำนวณหาค่าใช้จ่ายรวมทั้งหมดของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกตามสมการที่ 3.11 แต่หากค่าแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกเกินขอบเขตของมาตรฐานกำหนด จะต้องทำการติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกเพิ่มอีกลำดับหนึ่ง ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกเพียง 1 ลำดับจะไม่สามารถทำการปรับเพิ่ม ลดค่ากำลังงานรีแอกทีฟชดเชยของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกได้เลย เพราะว่าค่าตัวกระกอบกำลังที่ต้องการในระบบใหม่จะเป็นตัวกำหนดค่าความต้องการของกำลังงานรีแอกทีฟ แต่ถ้ามีการติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกตั้งแต่ 2 ลำดับขึ้นไปจะสามารถทำการปรับเพิ่ม-ลดค่ากำลังงานรีแอกทีฟชดเชยระหว่างชุดของตัวกรองได้ เพื่อให้ได้ราคาในการออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกที่ต่ำที่สุด และยังสามารถผ่านเงื่อนไขมาตรฐานด้านแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกตลอดจนมาตรฐานด้านการใช้งานตัวเก็บประจุ

การคำนวณในการออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดกรองเดี่ยว จะมีทางเลือกในการออกแบบคำนวณได้ 5 แบบ คือ

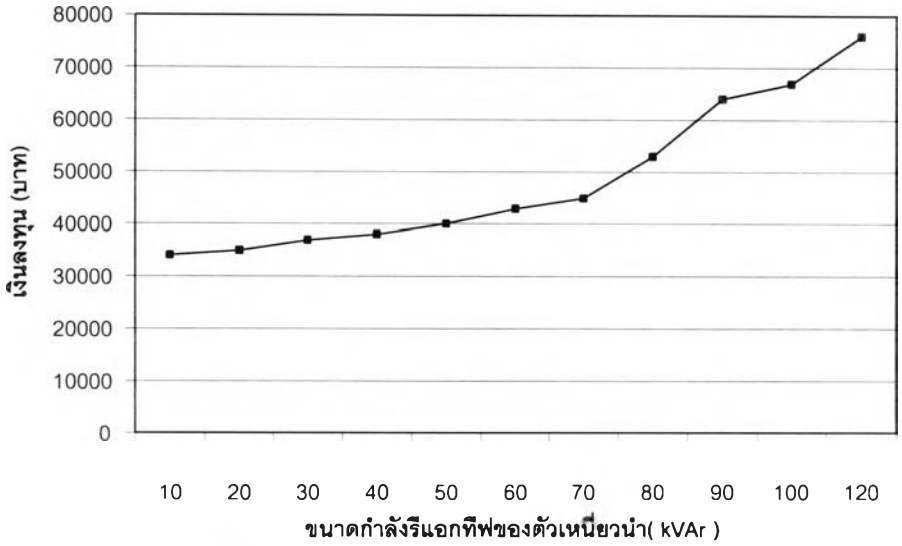
1. การออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก 1 ลำดับ
2. การออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก 2 ลำดับ
3. การออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก 3 ลำดับ
4. การออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก 4 ลำดับ
5. การออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก 5 ลำดับ

<u>การออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก 1 ลำดับ (5^{th})</u>

การออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกแบบนี้จะไม่สามารถปรับเปลี่ยนค่ากำลังงานรีแอกทีฟของระบบใหม่ได้เพราะค่าตัวประกอบกำลังของระบบใหม่จะเป็นตัวกำหนด ดังนั้นขั้นตอนในการออกแบบจะเป็นไปตามขั้นตอนทั้งหมดในบทที่ 2 ที่ได้กล่าวมาแล้ว

การออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกบางกรณี อาจจะต้องมีการใช้ขนาดกำลังงานรีแอกทีฟชดเชยที่เกินขนาดตัวเก็บประจุที่มีจำหน่ายตามท้องตลาด จึงจำเป็นต้องใช้ขนาดตัวเก็บประจุที่มีจำหน่ายตามท้องตลาดมารวมกันหลายตัว เพื่อให้ได้ขนาดค่ากำลังงานรีแอกทีฟที่ต้องชดเชยให้ระบบตามความต้องการ ซึ่งจะมีผลทำให้ไม่สามารถหาราคาของตัวเหนี่ยวนำได้ เพราะขนาดของตัวเหนี่ยวนำจะมีขนาดใหญ่กว่าขนาดมาตรฐานที่มีจำหน่ายตามท้องตลาด ดังนั้นจึงต้องทำการประมาณค่าราคาของตัวเหนี่ยวนำที่ใช้ในตัวกรอง ในการประมาณค่าราคาของตัว

เหนี่ยวนำจะใช้วิธี Least Squares เพราะลักษณะของข้อมูลราคาของตัวเหนี่ยวนำที่มีจำหน่ายตามท้องตลาดมีความเป็นเชิงเส้นอยู่พอสมควรดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 ค่าขนาดกับราคาของตัวเหนี่ยวนำ

การประมาณค่าตามวิธี Least Squares จะใช้สมการในการประมาณค่า คือ

$$Y' = a_{yx} + b_{yx}X_i \qquad 3.20$$

$$b_{yx} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i - \overline{X})(Y_i - \overline{Y})}{\sum_{i=1}^{n}(X_i - \overline{X})^2} \qquad 3.21$$

$$a_{yx} = \overline{Y} - b_{yx}\overline{X} \qquad 3.22$$

โดยที่

Y' คือ ค่าราคาประมาณของตัวเหนี่ยวนำ

a_{yx}, b_{yx} คือ สัมประสิทธิ์ของสมการ Least Squares

X_i, Y_i คือ คู่ข้อมูลราคาและขนาดของตัวเหนี่ยวนำ

$\overline{X}, \overline{Y}$ คือ ค่าเฉลี่ยของข้อมูลราคาและขนาดของตัวเหนี่ยวนำ

ค่าราคาตัวเหนี่ยวนำที่ได้จากวิธี Least Squares เป็นค่าประมาณของราคาตัวเหนี่ยวนำความถูกต้องในประมาณค่าขึ้นอยู่กับจำนวนคู่ของข้อมูลราคา และ ขนาดของตัวเหนี่ยวนำที่มีจำหน่ายตามท้องตลาด

การออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก 2 ลำดับ (5^{th} , 7^{th})

ขั้นตอนการออกแบบจะเริ่มต้นด้วย การหาค่าเริ่มต้นของค่ากำลังงานรีแอกทีฟชดเชย ที่ตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกทั้ง 2 ลำดับก่อน ซึ่งสามารถหาค่าได้ตามสมการที่ 3.19 ดังนี้คือ

$$Q_5 base = Q_{com} \times \frac{I_5}{I_5 + I_7}$$

$$Q_7 base = Q_{com} \times \frac{I_7}{I_5 + I_7}$$

จากนั้นจึงทำการปรับเพิ่มลดค่ากำลังงานรีแอกทีฟชดเชยของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกทั้ง 2 ลำดับ ตามตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ขั้นตอนการปรับเพิ่ม-ลดค่ากำลังงานรีแอกทีฟชดเชย

Case	5^{th} Filter		7^{th} Filter		Cost
1	$Q_5 base$		$Q_7 base$		C_1
2.1	Q_5 ลด	$Q_5 base - \Delta Q$	Q_7 เพิ่ม	$Q_7 base + \Delta Q$	C_2
		⋮		⋮	⋮
2.n		$Q_5 base - n\Delta Q$		$Q_7 base + n\Delta Q$	C_{n+1}
3.1	Q_5 เพิ่ม	$Q_5 base + \Delta Q$	Q_7 ลด	$Q_7 base - \Delta Q$	C_{n+2}
		⋮		⋮	⋮
3.n		$Q_5 base + n\Delta Q$		$Q_7 base - n\Delta Q$	C_{2n+1}

ค่า ΔQ ในการปรับเพิ่ม-ลดนี้จะพิจารณามาจากค่าขนาดของตัวเก็บประจุขนาดเล็กที่สุดที่สามารถหาได้ตามท้องตลาด ตัวอย่างการพิจารณาปรับเพิ่ม-ลดค่ากำลังงานรีแอกทีฟดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ผลการปรับเพิ่ม-ลดค่ากำลังงานรีแอกทีฟในการออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก

รอบที่	5^{th} Filter (kVAr)		7^{th} Filter (kVAr)		ราคารวม *
	ขนาดรวม	ขนาด Cap	ขนาดรวม	ขนาด Cap	(บาท)
**	1680	80*21	1260	70*18	2474000
เริ่มต้น	1600	80*20	1280	80*16	2399700
**	1520	80*19	1360	80*17	2399000
**	1520	80*19	1400	70*20	2462300

** ราคารวมนี้เป็นราคารวมของตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำของตัวกรองทั้งลำดับที่ 5 และ 7*

*** จำนวนรอบในการคำนวณหาขนาดกำลังรีแอกทีฟรวมของตัวเก็บประจุแต่ละครั้ง*

การปรับเปลี่ยนค่ากำลังงานรีแอกทีฟของตัวกรองทั้ง 2 ลำดับตามตารางที่ 3.1 จะต้องคำนึงถึงการไหลของกระแสฮาร์มอนิกในระบบด้วยว่าอยู่ในข้อกำหนดของมาตรฐานฮาร์มอนิกหรือไม่ ถ้าหากค่าของแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกอยู่ในข้อ กำหนดของมาตรฐานก็จะทำการคำนวณราคารวมของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก และเก็บค่าไว้ทำการเปรียบเทียบ เพื่อหาราคารวมตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกที่มีราคาต่ำที่สุดแล้วจึงทำการขยับค่ากำลังงานรีแอกทีฟในแบบต่อไป แต่ถ้าหากไม่อยู่ในข้อกำหนดก็จะทำการยกเลิกการพิจารณาการปรับเพิ่ม-ลดค่ากำลังรีแอกทีฟนั้นทิ้งไป ทั้งนี้รอบการคำนวณจะสิ้นสุดลงก็ต่อเมื่อค่ากระแสหรือแรงดันฮาร์มอนิกที่ไหลในส่วนต่างๆเกินค่ากำหนดของมาตรฐาน ซึ่งมีสมการกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกในการตรวจสอบระดับจำกัดแสดงในหัวข้อต่อไป

เมื่อทำการคำนวณการปรับเพิ่ม-ลดแบบต่างๆ ของกำลังงานรีแอกทีฟเสร็จแล้วจึงทำการเปรียบเทียบหาราคารวมของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกที่มีราคาต่ำที่สุด ซึ่งจะได้เป็นคำตอบในการออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก

<u>การออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก 3 ลำดับ (5^{th} . 7^{th} . 11^{th})</u>

การออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก 3 ลำดับ จะมีขั้นตอนในการออกแบบคล้ายกับขั้นตอนในการออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก 2 ลำดับ แต่จะมีรูปแบบในการปรับเพิ่ม-ลดค่ากำลังงานรีแอกทีฟมากกว่าตามตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 *ขั้นตอนการปรับเพิ่ม-ลดค่ากำลังงานรีแอกทีฟซดเชย*

Case	5th Filter		7th Filter		11th Filter		Cost
1	$Q_5 base$		$Q_7 base$		$Q_{11} base$		C_1
2	$Q_5 base$		Q_7 ลด	$Q_7 base - \Delta Q$ ⋮ $Q_7 base - n\Delta Q$	Q_{11} เพิ่ม	$Q_{11} base + \Delta Q$ ⋮ $Q_{11} base + n\Delta Q$	C_2 ⋮ C_{n+1}
			Q_7 เพิ่ม	$Q_7 base + \Delta Q$ ⋮ $Q_7 base + n\Delta Q$	Q_{11} ลด	$Q_{11} base - \Delta Q$ ⋮ $Q_{11} base - n\Delta Q$	C_{n+2} ⋮ C_{2n+1}
3	Q_5 ลด	$Q_5 base - \Delta Q$	$Q_7 base$		Q_{11} เพิ่ม	$Q_{11} base + \Delta Q$	C_{2n+2}
		$Q_5 base - n\Delta Q$	Q_7 ลด	$Q_7 base - \Delta Q$ ⋮ $Q_7 base - m\Delta Q$	Q_{11} เพิ่ม	$Q_{11} base + (n+1)\Delta Q$ ⋮ $Q_{11} base + (n+m)\Delta Q$	C .. ⋮ C ..
	Q_5 เพิ่ม	$Q_5 base + \Delta Q$	$Q_7 base$		Q_{11} ลด	$Q_{11} base - \Delta Q$	C ..
		$Q_5 base + n\Delta Q$	Q_7 เพิ่ม	$Q_7 base + \Delta Q$ ⋮ $Q_7 base + m\Delta Q$	Q_{11} ลด	$Q_{11} base - (n+1)\Delta Q$ ⋮ $Q_{11} base - (n+m)\Delta Q$	C .. ⋮ C ..
4	Q_5 ลด	$Q_5 base - \Delta Q$	Q_7 เพิ่ม	$Q_7 base + \Delta Q$	$Q_{11} base$		C ..
		$Q_5 base - n\Delta Q$	Q_7 เพิ่ม	$Q_7 base + (n+1)\Delta Q$ ⋮ $Q_7 base + (n+m)\Delta Q$	Q_{11} ลด	$Q_{11} base - \Delta Q$ ⋮ $Q_{11} base - m\Delta Q$	C .. ⋮ C ..
	Q_5 เพิ่ม	$Q_5 base + \Delta Q$	Q_7 ลด	$Q_7 base - \Delta Q$	$Q_{11} base$		C ..
		$Q_5 base + n\Delta Q$	Q_7 ลด	$Q_7 base - (n+1)\Delta Q$ ⋮ $Q_7 base - (n+m)\Delta Q$	Q_{11} เพิ่ม	$Q_{11} base + \Delta Q$ ⋮ $Q_{11} base + m\Delta Q$	C .. ⋮ C ..

ส่วนการออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก 4 ลำดับ และ 5 ลำดับ จะมีขั้นตอนเหมือนกับการออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก 3 ลำดับ แต่จะมีความยุ่งยากในการปรับเพิ่ม-ลดค่ากำลังงานรีแอกทีฟมากขึ้น

3.3.2 การตรวจสอบระดับจำกัดของกระแสและแรงดันฮาร์มอนิก

การคำนวณค่าแรงดันฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า[9]

ค่าแรงดันผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ , ของโหลด และจุดต่อร่วม(PCC) ในระบบไฟฟ้า ที่เกิดจากกระแสฮาร์มอนิกของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นในโรงงานอุตสาหกรรม เป็นค่าที่ใช้พิจารณากับค่ามาตรฐานฮาร์มอนิก ว่าเกินค่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐานหรือไม่ เพื่อนำไปใช้เป็นข้อกำหนดในการออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดกรองเดี่ยว ซึ่งสามารถหาค่าแรงดันผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกจากการคำนวณดังต่อไปนี้

<u>แรงดันผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกที่ตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก</u>

ค่าแรงดันผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ($D_{Fth,h}$) และค่าแรงดันผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (Total Harmonic Distortion of Voltage : THD_{VFth}) ของตัวกรองลำดับต่างๆ สามารถหาได้ดังนี้

$$V_{Fth,h} = I_{Fth,h} \times Z_{Fth,h} \qquad 3.23$$

$$D_{VFth,\,h} = \frac{V_{Fth,h}}{V_{Fth,1}} \times 100\% \qquad 3.24$$

$$THD_{VFth} = \sqrt{\sum_{h=2}^{50} D_{VFth,h}^2} \qquad 3.25$$

เมื่อ

$V_{Fth,h}$ = แรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่ h ที่ตัวกรองที่ F

$I_{Fth,h}$ = กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ h ที่ตัวกรองที่ F

$Z_{Fth,h}$ = ค่าอิมพีแดนซ์ของตัวกรองที่ F ที่ลำดับ h

$V_{Fth,1}$ = แรงดันที่ความถี่มูลฐานที่ตัวกรอง

$D_{VFth,h}$ = แรงดันผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกลำดับที่ h ที่ตัวกรองที่ F

THD_{VFth} = แรงดันผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมที่ตัวกรองที่ F

<u>แรงดันผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกที่โหลด</u>

ค่าแรงดันผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ ($D_{VL,h}$) และค่าแรงดันผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (Total Harmonic Distortion of Voltage : $THD_{V,L}$) ของโหลด สามารถแสดงได้ดังนี้

$$V_{L,h} = I_{L,h} \times Z_{L,h} \qquad 3.26$$

$$D_{VL,\,h} = \frac{V_{L,h}}{V_{L,1}} \times 100\% \qquad 3.27$$

$$THD_{V,L} = \sqrt{\sum_{h=2}^{50} D_{VL,h}^2} \qquad 3.28$$

เมื่อ

$V_{L,h}$ = แรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่ h ที่โหลด

$I_{L,h}$ = กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ h ที่โหลด

$Z_{L,h}$ = ค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดที่ลำดับ h

$V_{L,1}$ = แรงดันที่ความถี่มูลฐานที่โหลด

$D_{VL,h}$ = แรงดันผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกลำดับที่ h ที่โหลด

$THD_{V,L}$ = แรงดันผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมที่โหลด

<u>แรงดันผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วม(PCC)</u>

ค่าแรงดันผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ (D_{Vh}) และค่าแรงดันผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม (Total Harmonic Distortion of Voltage : THD_V) ของระบบที่จุดต่อร่วม(PCC) สามารถแสดงได้ดังนี้

$$V_h = I_h \times Z_h \qquad 3.29$$

$$D_{Vh} = \frac{V_h}{V_1} \times 100\% \qquad 3.30$$

$$THD_V = \sqrt{\sum_{h=2}^{50} D_{Vh}^2} \qquad 3.31$$

เมื่อ

V_h = แรงดันฮาร์มอนิกลำดับที่ h ที่จุดต่อร่วม

I_h = กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ h ที่จุดต่อร่วม

Z_h = ค่าอิมพีแดนซ์ของระบบที่ลำดับ h

V_1 = แรงดันที่ความถี่มูลฐานที่จุดต่อร่วม

D_{Vh} = แรงดันผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกลำดับที่ h ที่จุดต่อร่วม

THD_V = แรงดันผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม ที่จุดต่อร่วม(PCC)

การคำนวณค่ากระแสฮาร์มอนิกที่ไหลในระบบไฟฟ้า[9]

ค่ากระแสฮาร์มอนิกในโรงงานอุตสาหกรรมที่ไหลเข้าไปในระบบไฟฟ้าที่จุดต่อร่วม(PCC) จะสร้างปัญหาให้กับระบบ โดยจะไปรบกวนระบบไฟฟ้าอื่นที่อยู่ใกล้เคียง ดังนั้นจึงต้องกำหนดค่าความผิดเพี้ยนของกระแสฮาร์มอนิกขึ้นมา เพื่อใช้เป็นค่าที่พิจารณากับค่ามาตรฐานฮาร์มอนิกว่า

I18952641

อยู่ในข้อกำหนดของมาตรฐานหรือไม่ ซึ่งนำไปใช้เป็นข้อกำหนดในการออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดกรองเดี่ยว

ค่าความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกที่ลำดับต่างๆ (D_{Ih}) และค่าความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวม (Total Harmonic Distortion of Current : THD_I) ที่จุดต่อร่วม สามารถหาค่าได้ดังนี้

$$D_{Ih} = \frac{I_h}{I_1} \times 100\% \qquad 3.32$$

$$THD_I = \sqrt{\sum_{h=2}^{50} D_{Ih}^2} \qquad 3.33$$

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{50} Ih^2}}{I_L} \times 100\ \% \qquad 3.34$$

เมื่อ

I_h = กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ h ที่จุดต่อร่วม

I_1 = กระแสที่ความถี่มูลฐานที่จุดต่อร่วม

I_L = ขนาดของกระแสในช่วงความต้องการสูงสุด

D_{Ih} = กระแสผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกลำดับที่ h ที่จุดต่อร่วม

THD_I = กระแสผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมที่จุดต่อร่วม(PCC)

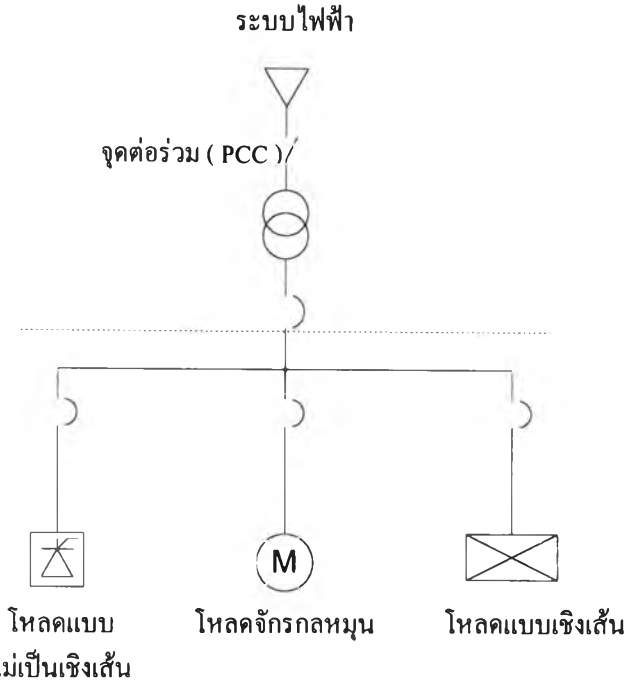
TDD = กระแสผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมที่จุดต่อร่วม(PCC) เทียบกับกระแสโหลดที่ใช้สูงสุดในช่วงที่กำหนด

3.4 ขั้นตอนการคำนวณ

กระบวนการวิเคราะห์หาขนาดของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดกรองเดี่ยว ที่เหมาะสมกับระบบนั้น จะทำการจำลองไดอะแกรมของระบบไฟฟ้าที่จะทำการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น โดยการกำหนดให้ระบบประกอบไปด้วยโหลดหลักๆ ทั่วไป ดังนี้

- กลุ่มโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น(Non-Linear Load) ซึ่งเป็นแหล่งกำหนดกระแสฮาร์มอนิก
- กลุ่มโหลดที่เป็นเชิงเส้น (Linear Load)
- กลุ่มโหลดที่เป็นกลุ่มมอเตอร์ (Motor Load)

ซึ่งเป็นกลุ่มของโหลดส่วนใหญ่ที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไป ดังนั้นก่อนที่จะทำการวิเคราะห์ จะต้องทราบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของโหลดทุกกลุ่มที่อยู่ในโรงงาน ไดอะแกรมที่สร้างขึ้นแสดงดังรูปที่ 3.14



<u>รูปที่ 3.14</u> ไดอะแกรมของระบบไฟฟ้าที่ใช้ในการวิเคราะห์ตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก

กระบวนการหาขนาดของตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดกรองเดี่ยว สามารถสรุปขั้นตอนในการคำนวณได้ดังนี้

(1). ป้อนข้อมูลต่างๆ ของระบบไฟฟ้า หม้อแปลงไฟฟ้า และกลุ่มโหลดทั้งหมดที่ต่ออยู่กับระบบ เช่น กำลังไฟฟ้าลัดวงจร แรงดันทำงาน กระแสฮาร์มอนิกในระบบ ค่าตัวประกอบกำลังที่ต้องการ เป็นต้น

(2). นำข้อมูลของระบบ และโหลดทั้งหมดมาทำการวิเคราะห์หาค่าการไหลของกระแสฮาร์มอนิกในส่วนต่างๆ ของระบบ

(3). เปรียบเทียบกับมาตรฐานฮาร์มอนิกที่ได้กำหนดไว้ ถ้าค่ากระแสฮาร์มอนิกที่ไหลในระบบผ่านค่ามาตรฐานฮาร์มอนิกให้ไปทำข้อที่ 4 ถ้าไม่ผ่านให้ไปทำข้อที่ 8

(4). ป้อนข้อมูลของระบบที่ต้องการปรับปรุงให้เป็นไปตามที่กำหนด

(5). ทำการวิเคราะห์หาค่าการไหลของกระแสอาร์มอนิกในส่วนต่างๆ ของระบบใหม่

(6). ตรวจสอบระดับแรงดันของตัวเก็บประจุว่าเกินค่าพิกัดหรือไม่ ถ้าไม่ผ่านค่าพิกัดของตัวเก็บประจุให้ไปที่ขั้นที่ 7 ถ้าผ่านให้แสดงผลและจบการทำงาน

(7). ถ้าระดับแรงดันของตัวเก็บประจุเกินค่าพิกัด ต้องเพิ่มระดับแรงดัน แล้วทำการวิเคราะห์ระบบใหม่

(8). ป้อนข้อมูลของระบบที่ต้องการปรับปรุงให้เป็นไปตามที่กำหนด

(9). กำหนดค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของการออกแบบตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก

(10). ทำการวิเคราะห์หาค่าการไหลของกระแสอาร์มอนิกในส่วนต่างๆ ของระบบใหม่

(11). ตรวจสอบระดับแรงดันของตัวเก็บประจุว่าเกินค่าพิกัดหรือไม่

(12). ถ้าระดับแรงดันของตัวเก็บประจุเกินค่าพิกัด ต้องเพิ่มระดับแรงดันแล้วทำการวิเคราะห์ระบบใหม่

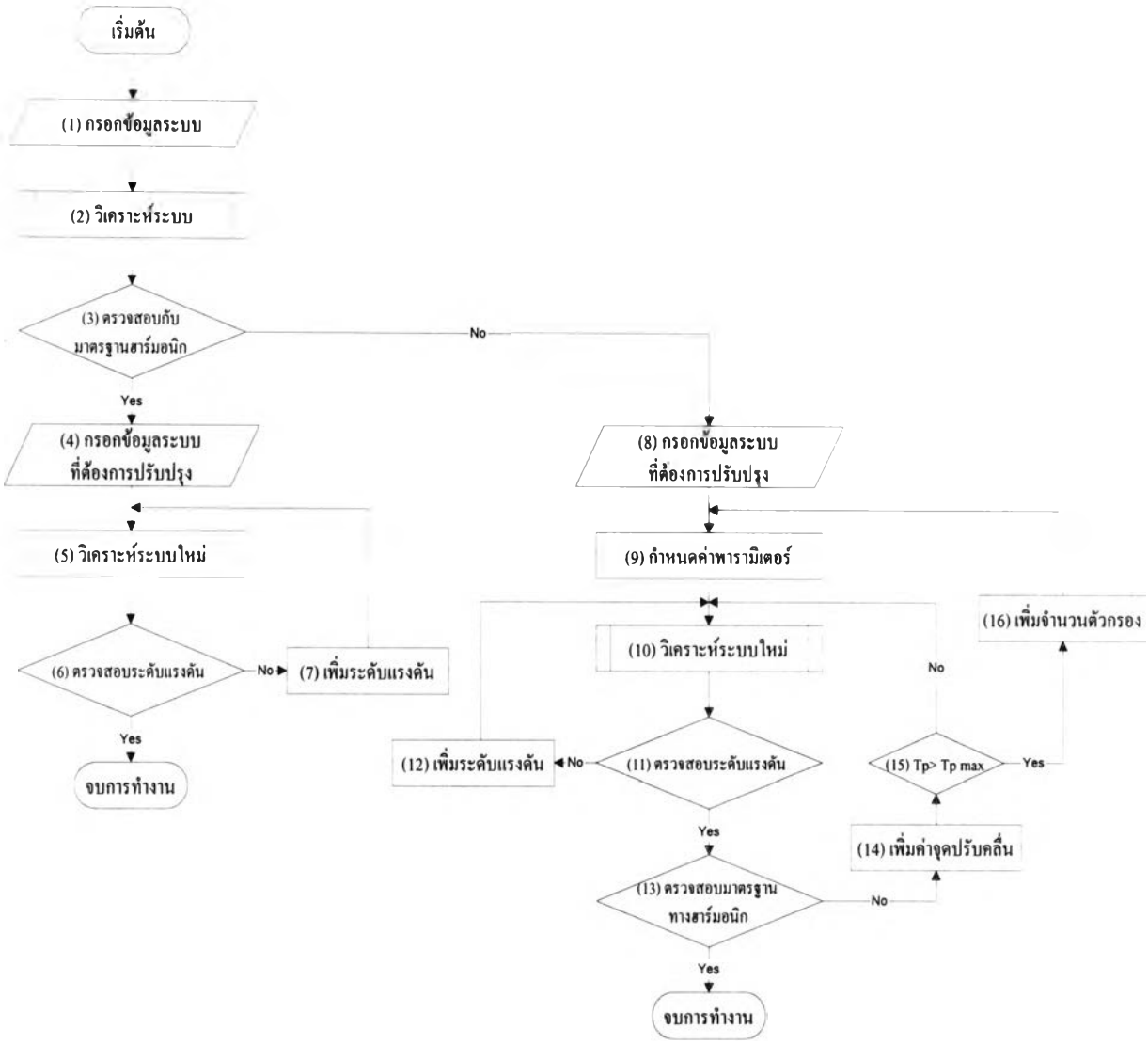
(13). ตรวจสอบค่ากระแสฮาร์มอนิกที่ไหลในระบบกับมาตรฐานฮาร์มอนิกที่กำหนดไว้ ถ้าไม่ผ่านค่ามาตรฐานฮาร์มอนิกให้ไปทำขั้นที่ 14 ถ้า ผ่านให้แสดงผล และจบการทำงาน

(14). ปรับเปลี่ยนค่าจุดปรับคลื่น

(15). ตรวจสอบค่าจุดปรับคลื่นว่าเกินค่าที่กำหนดหรือไม่

(16). เพิ่มจำนวนลำดับตัวกรองกระแสฮาร์มอนิก

ขั้นตอนการคำนวณหาขนาดตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดกรองเดี่ยว สามารถแสดงเป็นแผนภาพขั้นตอนในการคำนวณดังรูปที่ 3.15



<u>รูปที่ 3.15</u> ขั้นตอนการคำนวณหาขนาดตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกชนิดกรองเดี่ยวที่มีราคาต่ำที่สุด