

การศึกษาปัจจัยความเสียหายของคาปาซิเตอร์ในโรงงานอุตสาหกรรมจากผลของ
กระแสฮาร์โมนิกของระบบขับเคลื่อนกระบวนการผลิต
THE STUDY OF POWER CAPACITOR DAMAGE IN INDUSTRY
ELECTRICAL SYSTEM DUE TO THE HARMONIC CURRENT OF
PRODUCTION PROCESS

สำเริง อินท่าไม้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ประยุกต์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

E-mail: samroeng.hi@spu.ac.th

นิमित บุญภิรมย์

อาจารย์พิเศษ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ประยุกต์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีปทุม

E-mail: nboonpirom@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้เป็นการนำเสนอการศึกษาปัจจัยความเสียหายของคาปาซิเตอร์ในโรงงานอุตสาหกรรมจากผลของกระแสฮาร์โมนิกของระบบขับเคลื่อนกระบวนการผลิต กรณีศึกษาโรงงานปูนซีเมนต์ โดยวัตถุประสงค์เป็นการศึกษาสาเหตุของความเสียหายของคาปาซิเตอร์ที่ใช้ปรับปรุงตัวประกอบกำลังของระบบไฟฟ้าในโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ จากผลของการใช้ตัวขับเคลื่อนมอเตอร์ด้วยอิเล็กทรอนิกส์กำลังที่ใช้ในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ ขั้นตอนการศึกษาติดตั้งเครื่องมือวัดคุณภาพไฟฟ้า โดยวัดค่าอัตราความถี่รวมของแรงดันและกระแส จากนั้นสร้างวงจรสมมูลของการไหลกระแสฮาร์โมนิกในวงจรผู้สวิตช์บอร์ดของระบบไฟฟ้าเพื่อจำลองสถานะรีโซแนนซ์แบบขนาน โดยการปรับค่าระดับของการเปลี่ยนค่าคาปาซิแตนซ์ของคาปาซิเตอร์เพื่อหาตำแหน่งการเกิดรีโซแนนซ์ บันทึกค่าอัตราความถี่รวมบันทึกกระแสฮาร์โมนิกที่ไหลและที่คาปาซิเตอร์เพื่อศึกษาการไหลของฮาร์โมนิกส์ เพื่อหาอันดับวิกฤติในการปรับค่าระดับของคาปาซิเตอร์

คำสำคัญ: รีโซแนนซ์แบบขนาน, กระแสฮาร์โมนิก, อัตราความถี่รวม

ABSTRACT

This paper presents a study on the damage factor of industrial capacitors as a result of the harmonic current of the production process drive system: case study of a cement plant. The objective is to study the causes of capacitor damage used to improve the power factor of the electrical system in a Cement industrial plant due to the power electronic motor driver. The process of purpose: the power quality measurement is apply to weekly

record all the total voltage harmonic distortion and total current harmonic distortion, respectively. Beside, the equivalent circuit of parallel resonant is created in order to simulate the resonant point due to tap-changing capacitors step. In the addition, the measurement results, the harmonic spectrum and total harmonic distortion current at the load are illustrated respectively to confirm the high frequency harmonic current flow into capacitor circuit.

Keywords: Parallel Resonance, Harmonic Current, Total Harmonic Distortion.

1. บทนำ

การขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรมนิยมใช้อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพและประหยัดพลังงานส่งผลให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกจำนวนมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ เช่น อุตสาหกรรมเหล็ก (Tejinder Singh Saggu และคณะ, 2017) หรือ อุตสาหกรรมปูนซีเมนต์ เป็นต้น ปัญหาของกระแสฮาร์มอนิกจะส่งผลกระทบต่อหม้อแปลงไฟฟ้า ทำให้เกิดความร้อนของตัวนำไฟฟ้า เกิดความร้อนในหม้อแปลงไฟฟ้า (Spyridon V. และคณะ, 2014) และยังเกิดกระแสฮาร์มอนิกไหลลงสู่สายนิวทรัลสร้างไม่สมดุลของระบบไฟฟ้า เป็นต้น ปัญหาสำคัญที่ทำให้เกิดความเสียหายของคาปาซิเตอร์ที่ใช้ปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้า คือ การเกิดสภาวะรีโซแนนซ์ (N. Eghtedarpour และคณะ, 2014) ทำให้เกิดแรงดันเกินพิกัดและเกิดการเบรคดาวน์ มีงานวิจัยหลายเรื่องได้ศึกษาการป้องกันปัญหานี้ อาจจะเป็นการติดตั้งตัวกรองกระแสฮาร์มอนิกแบบต่างๆ ให้สอดคล้องกับมาตรฐานสากล (Xiaoya Tan และคณะ, 2016, Thomas S.Key และคณะ, 2010) โดยคำนึงถึงความเสี่ยงของความเสียหายที่จะเกิดขึ้น การวิเคราะห์ปัจจัยเบื้องต้นถือว่าเป็นสิ่งสำคัญในการได้ทราบถึงพฤติกรรมของการไหลของกระแสฮาร์มอนิกที่จะทำให้เกิดความเสียหาย ในบทความในบทความนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์ปัจจัยที่ทำให้เกิดความเสียหายของคาปาซิเตอร์ในระบบไฟฟ้ากำลังในอุตสาหกรรมการผลิตปูนซีเมนต์แห่งหนึ่งในประเทศไทย เพื่อศึกษาแนวโน้มในการเข้าหาจุดวิกฤติของการรีโซแนนซ์ที่จะทำให้คาปาซิเตอร์และอุปกรณ์อื่นๆ เสียหาย โดยการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และวิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิกเมื่อค่าคาปาซิเตอร์เปลี่ยนแปลงเพื่อรักษาตัวประกอบกำลัง วัตต์ค่าแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกจากระบบจริง

2. วัตถุประสงค์

- (1) ศึกษาการเกิดรีโซแนนซ์แบบขนานของระบบไฟฟ้าในตู้เมนส์สวิตช์บอร์ด โดยการสร้างวงจรมูลของการไหลของกระแสฮาร์มอนิก
- (2) ติดตั้งเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า ในตู้เมนส์สวิตช์บอร์ดของโรงงานปูนซีเมนต์แห่งหนึ่งในประเทศไทยเพื่อตรวจวัดการไหลของกระแสฮาร์มอนิก
- (3) วิเคราะห์การเกิดสภาวะรีโซแนนซ์แบบขนานของวงจรมูลจากค่าที่วัดได้จริงในช่วงคาปาซิเตอร์เปลี่ยนคาปาซิเตอร์ในลำดับต่างๆ

3. ขอบเขตของงานวิจัย

- (1) สร้างวงจรมูลของการไหลของกระแสฮาร์มอนิกในแผนภูมิเส้นเดียวของระบบไฟฟ้าของโรงงาน
- (2) ติดตั้งเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า ในตู้เมนส์สวิตช์บอร์ดของโรงงานปูนซีเมนต์แห่งหนึ่งในประเทศไทย

(3) วิเคราะห์การเกิดสภาวะรีโซแนนซ์แบบขนานของวงจรสมมูลจากค่าที่วัดได้จริงในช่วงคาปาซิเตอร์เปลี่ยนแปลงในค่าต่างๆ

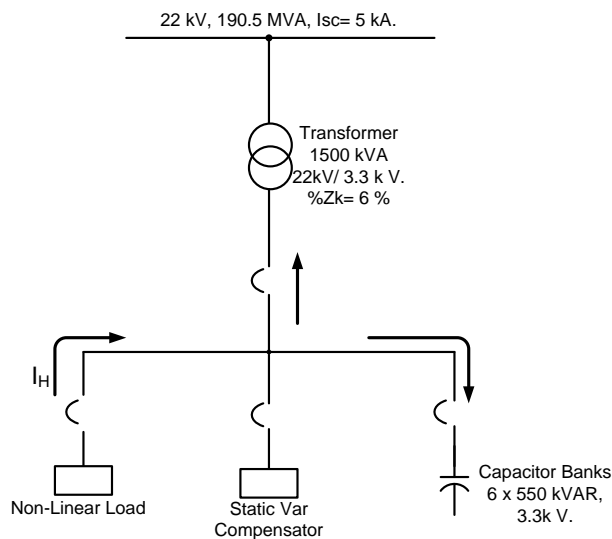
(4) วัดค่าแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกที่ตำแหน่งโหนดการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าและตำแหน่งคาปาซิเตอร์

(5) วิเคราะห์ค่าสเปกตรัมของกระแสฮาร์มอนิกที่อันดับต่างๆ ที่ตำแหน่งสายป้อนของโหนดการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าเปรียบเทียบกับตำแหน่งสายป้อนที่ไหลเข้าคาปาซิเตอร์ ที่อันดับการเปลี่ยนระดับของค่าคาปาซิเตอร์

4. หลักการเบื้องต้นของการไหลของกระแสฮาร์มอนิก และการเกิดรีโซแนนซ์แบบขนาน

4.1 หลักการเบื้องต้นของการไหลของกระแสฮาร์มอนิก

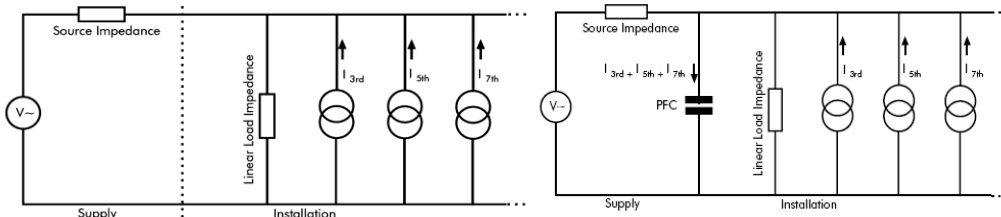
ในระบบจำหน่ายของระบบไฟฟ้าที่ใช้ในโรงงานผลิตปูนซีเมนต์ในกรณีศึกษา จะรับกำลังไฟฟ้าจากการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ในระดับแรงดัน 22 kV ส่งผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าแปลงเป็นแรงดันไฟฟ้าระดับกลางคือ 3.3 kV. ดังแสดงในรูปที่ 1 ได้แสดงให้เห็นสายป้อนกลุ่มโหนดสำคัญๆ 3 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 เป็นสายป้อนของโหนดที่ไม่เป็นเชิงเส้นจะเป็นโหนดมอเตอร์ไฟฟ้าแรงดันปานกลางที่ใช้ในกระบวนการผลิต ส่วนที่ 2 ตัวชดเชยกำลังไฟฟ้าเสมือน (Static Var Compensator : SVC) และส่วนที่ 3 เป็นกลุ่มคาปาซิเตอร์ที่ใช้ปรับปรุงตัวประกอบกำลัง (Capacitor Banks)



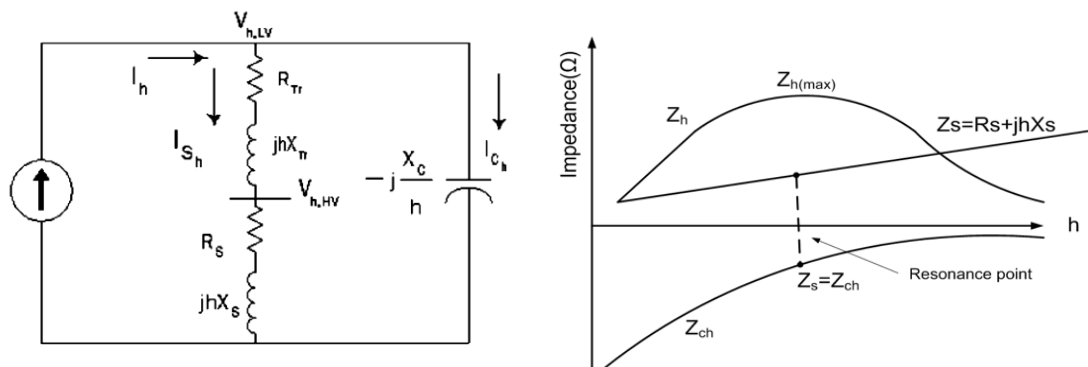
รูปที่ 1 แผนภูมิระบบไฟฟ้าเส้นเดียว (Single Line Diagram) ของระบบไฟฟ้าโรงงานปูนซีเมนต์

ในรูปที่ 1 ได้แสดงให้เห็นว่าสายป้อนโหนดที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่เกิดจากการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้าด้วย Variable Speed Drive. (VSD) ทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกความถี่ต่างๆ ไหลเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลังแยกเป็น 2 ทิศทาง คือ ไหลกลับไปที่หม้อแปลงไฟฟ้าเมนของระบบไฟฟ้าและไหลเข้าสู่กลุ่มคาปาซิเตอร์ เนื่องจากคาปาซิเตอร์เป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ตอบสนองกับกระแสที่มีความถี่สูง ถ้าความถี่เปลี่ยนแปลงจะทำให้เกิดสภาวะรีโซแนนซ์แบบขนาน แรงดันที่ตกคร่อมคาปาซิเตอร์จะสูงขึ้นจนเกิดพิกัดที่คาปาซิเตอร์จะรับได้จะเกิดระเบิดและเสียหายนอกจากนี้อาจจะเกิดเป็นรีโซแนนซ์แบบอนุกรมระหว่างตัวเหนี่ยวนำของหม้อแปลงกับค่าประจุของคาปาซิเตอร์ได้เช่นเดียวกัน แต่ในที่นี้ขอพิจารณาเพียงการเกิดรีโซแนนซ์แบบขนานเท่านั้น จากรูปที่ 2 แสดง

วงจรมานของ โหลดที่ไม่เห็นเชิงเส้นสร้างกระแสฮาร์มอนิกในระดับความถี่ต่างๆ โหลดแหล่งจ่ายและโหลดคาปาซิเตอร์



รูปที่ 2 วงจรมานพื้นฐานของการไหลของกระแสฮาร์มอนิกจากโหลดเข้าสู่คาปาซิเตอร์



รูปที่ 3 วงจรมานพื้นฐานของการไหลของกระแสฮาร์มอนิกจากโหลดเข้าสู่คาปาซิเตอร์

การจำลองให้เป็นวงจรมูลอย่างง่ายโดยใช้หลักการของเทวินินจากรูปที่ 1 จะแสดงให้เห็นดังรูปที่ 3 โดยลดรูปของอิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้าและระบบไฟฟ้ามาขนาดเท่ากับกึ่งของคาปาซิเตอร์ ทำให้เกิดวงจรมานอย่างง่ายสัญลักษณ์ของแหล่งจ่ายกระแส เป็นการจ่ายกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากโหลดดังได้กล่าวไปแล้ว ค่าอิมพีแดนซ์ทุกส่วนที่แสดงในรูปที่ 2 จะถูกคูณด้วยอันดับของความถี่ฮาร์มอนิก h เมื่ออันดับ h เข้าสู่สภาวะรีโซแนนซ์แบบขนาน ดังแสดงให้เห็น สมการที่ (1)

$$Z_s = \frac{(R_s + jhX_s) \left(-j \frac{X_c}{h}\right)}{\left[R_s + j \left(hX_s - \frac{X_c}{h}\right)\right]} \quad (1)$$

โดยที่

$$h = \sqrt{\frac{X_c}{X_s}} \quad : \text{อันดับของฮาร์มอนิกเมื่อเกิดรีโซแนนซ์}$$

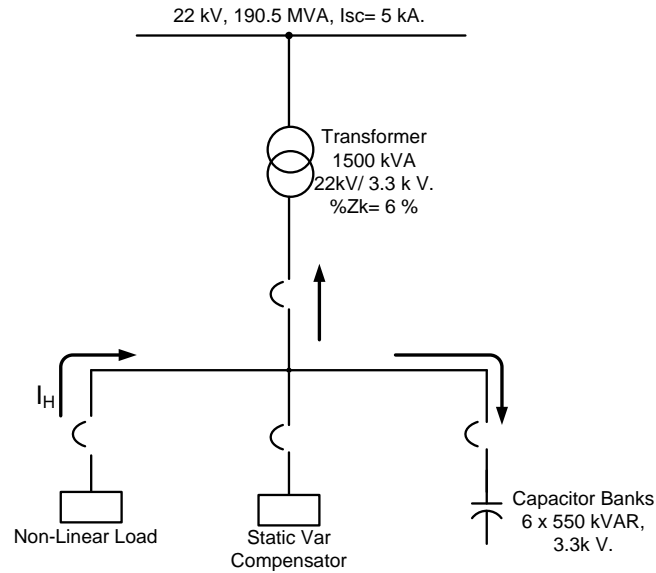
$$X_s = \frac{V_s^2}{S_{sc}} \quad : \text{ความต้านทานเชิงซ้อนของระบบไฟฟ้า } S_{sc} \text{ เป็นกำลังไฟฟ้า}$$

$$\beta_{sys} = \frac{Z_{sh}}{Z_{sh} + Z_{ch}} \quad : \text{เกณฑ์การขยายกระแสฮาร์มอนิกของระบบไฟฟ้า}$$

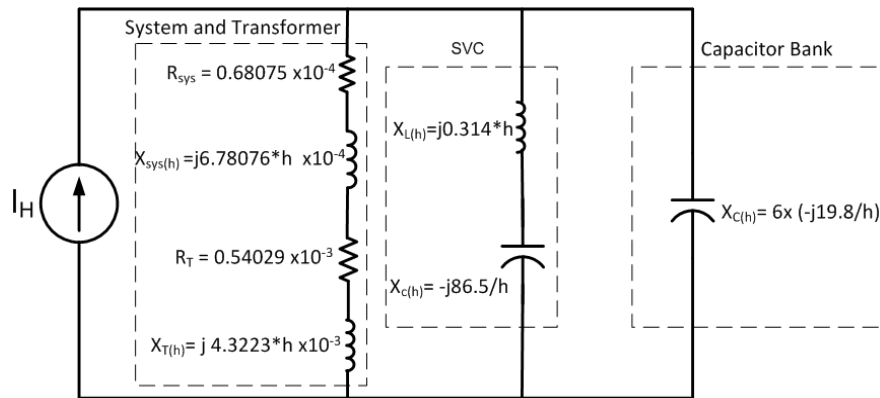
$$\beta_{cap} = \frac{Z_{ch}}{Z_{sh} + Z_{ch}} \quad : \text{เกณฑ์การขยายกระแสฮาร์มอนิกของระบบไฟฟ้า}$$

4.2 การสร้างแบบจำลองการเกิดรีโซแนนซ์แบบขนานของระบบไฟฟ้า

หลังจากที่ได้วงจรมูลเพื่อทำการทดลอง จากรูปที่ 4 ได้นำโครงสร้างของ Single Line Diagram มาหาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ จากสมการที่ (1) ได้ผลลัพธ์ของการคำนวณดังในตารางที่ 1 และสร้างเป็นวงจรมูลขนานดังรูปที่ 4 ข. เพื่อนำไปทดสอบต่อไป หลักการทดสอบจะกำหนดค่าพารามิเตอร์และทำการปรับค่าอันดับของกระแสฮาร์โมนิกจนทำให้เกิดการรีโซแนนซ์แบบขนาน



ก. แผนภูมิเส้นเดียวของระบบไฟฟ้า(Electrical System Single Line Diagram)



ข. แบบจำลองการเกิดรีโซแนนซ์แบบขนานจากกระแสฮาร์โมนิก

รูปที่ 4 แบบจำลองการเกิดรีโซแนนซ์แบบขนานจากกระแสฮาร์โมนิกของระบบไฟฟ้า
ในกรณีศึกษาโรงงานผลิตปูนซีเมนต์

ตารางที่ 1 ผลการคำนวณค่าพารามิเตอร์

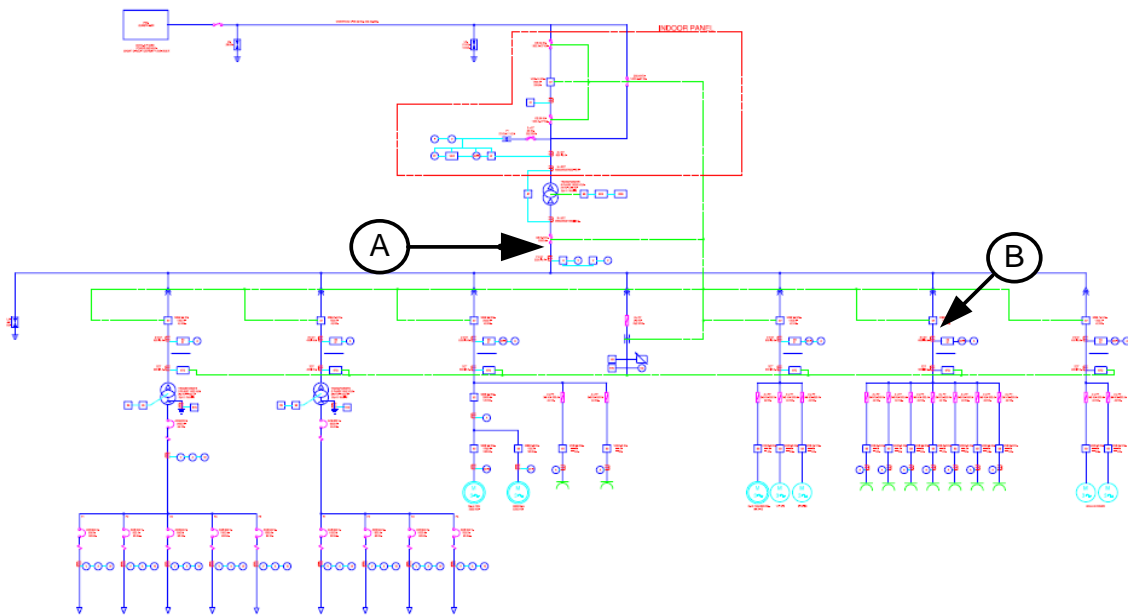
พารามิเตอร์	ผลการคำนวณ (โอห์ม)
อิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้า (System Impedance)	$(0.68075 + j6.8076) \times 10^{-4}$
อิมพีแดนซ์ของหม้อแปลงไฟฟ้า (Transformer Impedance)	$(0.68075 + j6.8076) \times 10^{-4}$
ความเหนี่ยวนำเชิงซ้อนของ SVC	$j0.0314$
ค่าประจุเชิงซ้อนของ SVC	$-j86.5$
และ ค่าประจุเชิงซ้อนของคาปาซิเตอร์	$6 \times (-j19.8)$

5. การทดลองและผลการทดลอง

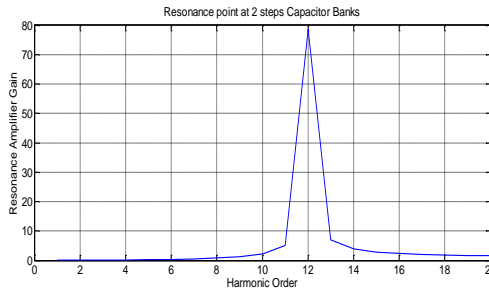
ในการทดลองนี้ดำเนินการ 2 ส่วน ส่วนที่ 1 นำวงจรสมมูลมาหาจูลรีโซแนนซ์โดยการปรับเปลี่ยนค่าคาปาซิเตอร์ในลำดับต่าง ๆ ดังแสดงในรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่าจูลรีโซแนนซ์จะขยับเข้าอันดับต่ำๆ เมื่อค่าคาปาซิเตอร์เพิ่มมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าการปรับค่าคาปาซิเตอร์อันดับมากขึ้น จะเป็นการเลี้ยงที่จะทำให้เกิดรีโซแนนซ์และกระแสฮาร์มอนิกในลำดับต่ำๆ (3,5,7) จะมีค่าสูงด้วย ส่วนที่ 2 ติดตั้งเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้าบันทึกการไหลของกระแสฮาร์มอนิกในช่วงเวลาและทำมาเขียนสเปกตรัมของกระแสฮาร์มอนิกเปรียบเทียบกับการวัดค่าสเปกตรัมจริงที่วัดในเวลาชั่วขณะ แสดงให้เห็นถึงการเกิดกระแสฮาร์มอนิกที่จุด A และจุด B ให้ฟิวส์หรืออุปกรณ์ป้องกันทำงานผิดพลาด. อีกทั้งการเกิดการรีโซแนนซ์แบบขนานยังมีผลทำให้แรงดันที่ตกคร่อม คาปาซิเตอร์สูงขึ้นเกินกว่าพิกัด ทำให้เกิดการเสียหายของคาปาซิเตอร์เช่นกัน

- อุปกรณ์ที่ใช้วัดคุณภาพไฟฟ้า

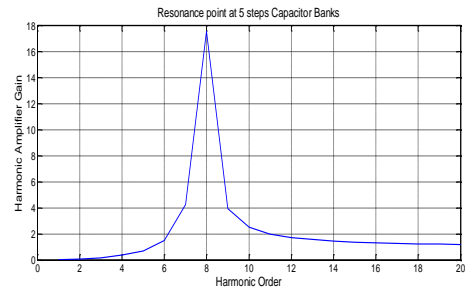
1. เครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้ายี่ห้อ. Power Quality Analyzer CA8334: EN 50160, IEC 61000-4-15, IEC 61000-4-30, IEC 61000-4-7. Sampling Time 1 นาที ตามมาตรฐาน EN50160
2. บันทึกค่า อัตราความเพี้ยนของแรงดัน (THDv) และ อัตราความเพี้ยนของกระแส (THDi) เป็นเวลา 1 สัปดาห์ 2 ตำแหน่ง บันทึกผลและนำไปคำนวณสเปกตรัมของฮาร์มอนิกในรูปที่ 7



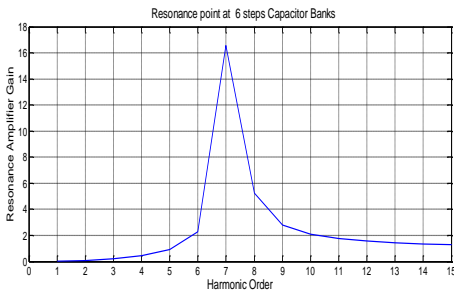
รูปที่ 5 ตำแหน่งของการติดตั้งเครื่องวัดคุณภาพไฟฟ้า



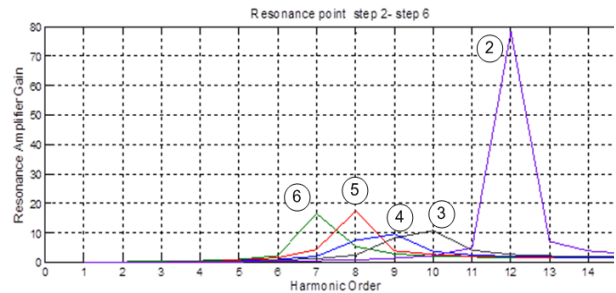
ก. ระดับ 2



ข. ระดับ 5

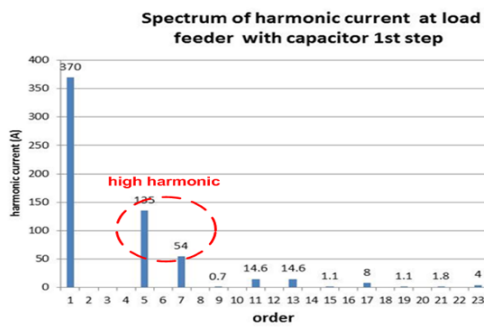


ค. ระดับ 6

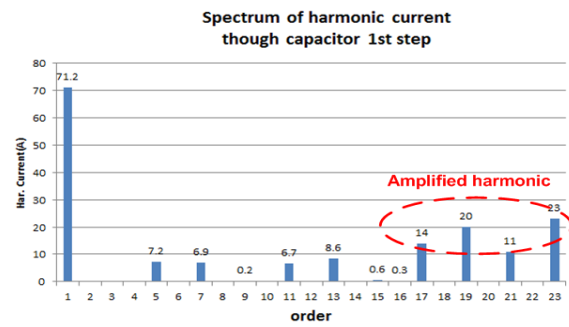


ง. การเพิ่มระดับ จาก 2 ระดับ ถึง 6. ระดับ

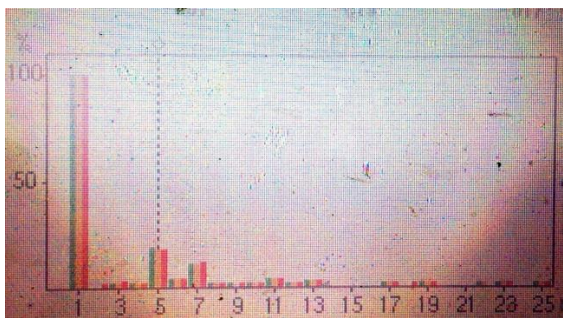
รูปที่ 6 ผลของการปรับเปลี่ยนระดับของคาปาซิเตอร์ที่ส่งผลต่อลำดับความถี่ของการเกิดรีโซแนนซ์



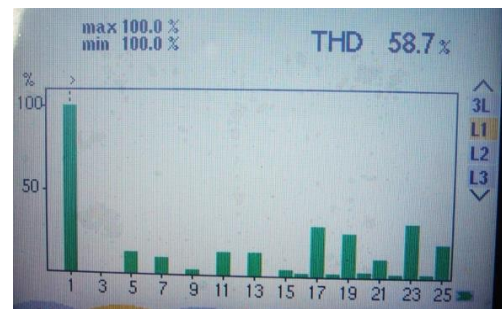
ก. สเปกตรัมกระแสที่ตำแหน่ง A



ข. สเปกตรัมกระแสที่ตำแหน่ง B

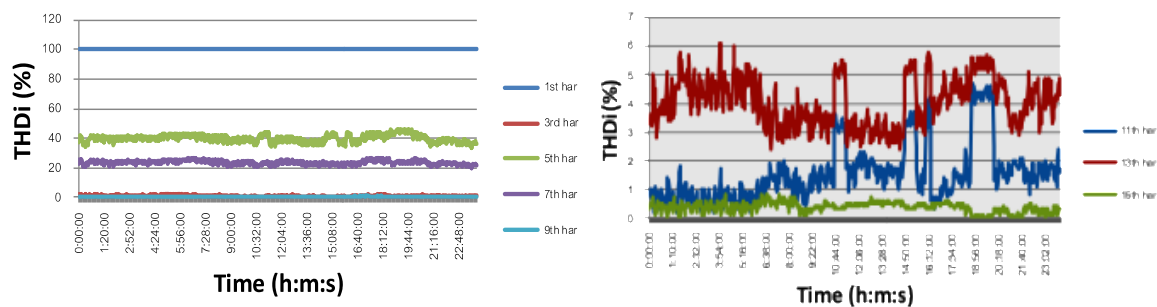


ค. สเปกตรัมกระแสที่ตำแหน่ง A จากกราวด์



ง. สเปกตรัมกระแสที่ตำแหน่ง B จากกราวด์

รูปที่ 7 ค่าสเปกตรัมที่ได้จากวัดที่ตำแหน่ง A และ B



รูปที่ 8 ค่า THDi ที่ได้จากการบันทึกใน 1 วันในลำดับ 1,3,5,7,9,11,13,15

6. สรุปการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากผลการวิจัยได้สร้างวงจรสมมูลของระบบไฟฟ้า โดยประกอบด้วยค่าอิมพีแดนซ์ของโหลดอิมพีแดนซ์ของระบบไฟฟ้าและอิมพีแดนซ์ของคาปาซิเตอร์ จากผลการจำลองพบว่า ตำแหน่งการเกิดรีโซแนนซ์จะเลื่อนเข้าสู่อันดับของฮาร์โมนิกลำดับต่ำๆ เมื่อค่าคาปาซิเตอร์เพิ่มมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าปัจจัยสำคัญของการแท็ปหรือเปลี่ยนระดับของคาปาซิเตอร์เพื่อรักษาตัวประกอบกำลังจะเป็นปัจจัยสำคัญของความเสี่ยงในการเสียหาย ซึ่งจะสัมพันธ์กับกระบวนการผลิตที่เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ดังแสดงในรูปที่ 6 ในรูปที่ 7 แสดงผลการวัดจำนวนกระแสฮาร์โมนิกสความถี่สูงจำนวนมากจะไหลเข้าคาปาซิเตอร์โดยเปรียบเทียบจากข้อมูลที่ทำการบันทึกและนำมาเขียนกราฟกับค่าสเปคตรัมที่วัดช่วงขณะ ในการแก้ไขนิยมนัดตั้งรีแอกเตอร์ที่สายป้อน เพื่อจะเบี่ยงเบนตำแหน่งของการเกิดรีโซแนนซ์ อย่างไรก็ตามแม้ว่าจะติดตั้งรีแอกเตอร์แต่ก็ยังมีกระแสฮาร์โมนิกไหลเข้าสู่คาปาซิเตอร์ ทำให้เกิดความร้อนได้เช่นกัน

7. เอกสารอ้างอิง

- Tejinder Singh Saggi, Lakhwinder Singh, Balbir Gill. 2017 “Harmonics Mitigation in a Steel Industry Using 11-Level Cascaded Multilevel. Inverter-Based DSTATCOM” *Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering*: 110-115.
- Spyridon V. Giannoutsos ,Stefanos N. Manias. 2014 “ A Systematic Power Quality Assessment and Harmonic Filter Design Methodology for Variable Frequency Drive Application in Marine Vessels” *IEEE Transactions on Industry Application*.
- N. Eghtedarpour , M.A. Karimi, M. Tavakoli. 2014. “Harmonic Resonance in Power Systems - A Documented Case” *Proceeding of IEEE*: 857-861.
- Xiaoya Tan, Andrzej Pietkiewicz, Martin Wuethrich, Norbert Haeberle. 2016 “Harmonic Filtering in Variable Speed Drives” *IEEE conference of Power Electronic*.
- Thomas S.Key. & Jih-Sheng Lai. 2010. “IEEE and International Harmonic Standards Impact on Power Electronic Equipment Design.” *Proceeding of IEEE*, 430- 436.
- IEEE 519. 1993. *IEEE Recommended Practices and Requirement for Harmonic Control in Electrical Power system. USA: American National Standard Insitue*, 11-25.