การปรับปรุงกระแสฮาร์มอนิกที่มีผลกระทบต่ออุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า

ศรัณฐ์ ฉลาดยิ่ง และ นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ*

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอผลกระทบของการรบกวนฮาร์มอนิกที่มีต่อการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ากำลัง โดยขั้นต้นได้นำเสนอนิยามของฮาร์มอนิก อุปกรณ์ที่ทำให้เกิดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง ดัชนีชี้วัดฮาร์มอนิกต่างๆ รวมไปถึงผลของการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าโดยการขนานตัวเก็บประจุไฟฟ้าเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีการรบกวนฮาร์มอนิก ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์แบบขนานขึ้นอันเนื่องมาจากการที่ค่าความต้านทานของตัวเก็บประจุไฟฟ้า และค่าความต้านทานของตัวเหนี่ยวนำใน หม้อแปลงไฟฟ้ามีค่าเท่ากันที่ความถี่ฮาร์มอนิก ทำให้เกิดการขยายตัวของแรงดัน และกระแสฮาร์มอนิกในปริมาณที่สูงมาก โดยแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกที่ขยายตัวนี้จะไหลไปยังตัวเก็บประจุไฟฟ้า ส่งผลให้เกิดความเสียหายกับตัวเก็บประจุไฟฟ้าตามมา การหลีกเลี่ยงความเสียหายของอุปกรณ์ที่เกิดขึ้นจากปรากฏการณ์เรโซแนนซ์แบบขนานที่ความถี่ฮาร์มอนิกสามารถทำได้โดยการติดตั้งรีแอกเตอร์อนุกรมเข้ากับตัวเก็บประจุไฟฟ้า ซึ่งรีแอกเตอร์จะช่วยย้ายตำแหน่งของเรโซแนนซ์แบบขนานจากฮาร์มอนิกลำดับที่มีนัยสำคัญมาอยู่ในลำดับของฮาร์มอนิกที่ไม่มีนัยสำคัญ และยังสามารถช่วยกรองกระแสฮาร์มอนิกออกจากระบบไฟฟ้ากำลังได้บางส่วนอีกด้วย แต่หากในระบบไฟฟ้ากำลังมีปริมาณฮาร์มอนิกที่สูงมากเกินประสิทธิภาพการกรองฮาร์มอนิกของรีแอกเตอร์แล้ว จะต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์กรองกระแสฮาร์มอนิกเพิ่มเติม เพื่อกรองกระแสฮาร์มอนิกออกจากระบบไฟฟ้ากำลัง

คำสำคัญ : เพาเวอร์แฟคเตอร์, ฮาร์มอนิก, ฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์แบบอนุกรม, ฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์แบบขนาน

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

* ผู้ติดต่อ, อีเมล์: nattachote.r@rmutp.ac.th รับเมื่อ 19 ตุลาคม 2558 ตอบรับเมื่อ 29 มีนาคม 2559

Implement of Harmonic Current Impact on Power Factor Correction Device

Saran Chaladying and Nattachote Rugthaicharoencheep*

Abstract

This paper presents harmonic disturbance impact on power factor improvement in power system. The Contents of this paper contains harmonic signification, harmonic current sources in power system, harmonic definitions and effect of power factor improvement by connected capacitors into power system with harmonic disturbance. Power factor improvement in power system with harmonic disturbance is caused of parallel resonance generation in power system as a result of matching impedance of inductive reactance of a power transformer and capacitive reactance of a capacitor at harmonic frequency. Parallel resonance phenomenon incurs harmonic voltage and current amplification. Harmonic voltage and current will dominate on capacitors in the power factor correction device and link to failure and damage on capacitors in the power factor correction equipment. Any problems of parallel resonance impact can be avoided and corrected by connecting series reactors to capacitors in the power factor correction device. Series reactors will move a point of parallel resonance from significant harmonic order to non-significant harmonic order and partial reducing harmonic current in power system. However, if power system contains a lot of harmonic current quantity the filter of harmonic current shall be installed in power system for reduce harmonic current in power system.

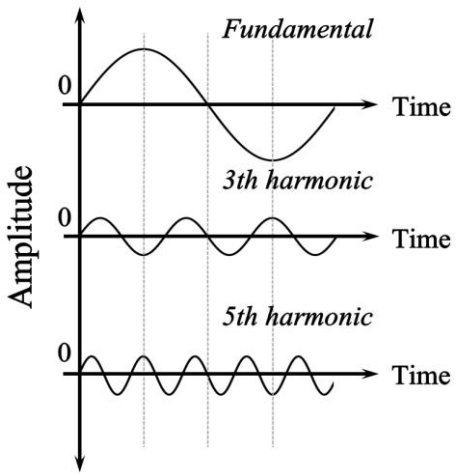
Keywords : Power Factor**,** Harmonic, Series Harmonic Resonance, Parallel harmonic resonance

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon

* Corresponding author, E-mail: nattachote.r@rmutp.ac.th Received 19 October 2015, Accepted 29 March 2016

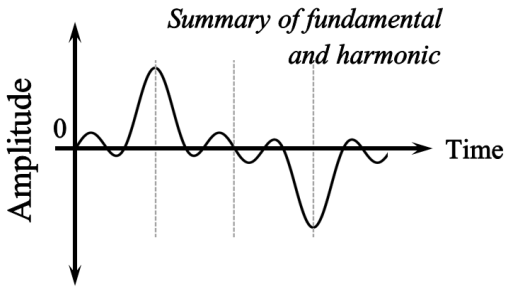
1. บทนำ

ฮาร์มอนิกเป็นปรากฏการณ์ทางด้านคุณภาพกำลังไฟฟ้ารูปแบบหนึ่ง ที่ถูกจัดให้อยู่ในปรากฏการณ์ทางด้านความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นสัญญาณ นิยามของฮาร์มอนิก คือ ส่วนประกอบของสัญญาณ หรือปริมาณรายคาบใดๆ มีความถี่มากกว่าความถี่มูลฐานของระบบเป็นจำนวนทวีคูณ [1-2] ยกตัวอย่างเช่น ในระบบไฟฟ้ากำลังที่มีความถี่มูลฐานเท่ากับ 50 รอบต่อวินาที ฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 ก็จะมีความถี่เท่ากับ 150 รอบต่อวินาทีฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ก็จะมีความถี่เท่ากับ 250 รอบต่อวินาที เป็นต้น โดยรูปคลื่นสัญญาณของปริมาณ หรือสัญญาณรายคาบที่ความถี่มูลฐาน และความถี่ของฮาร์มอนิกสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 1



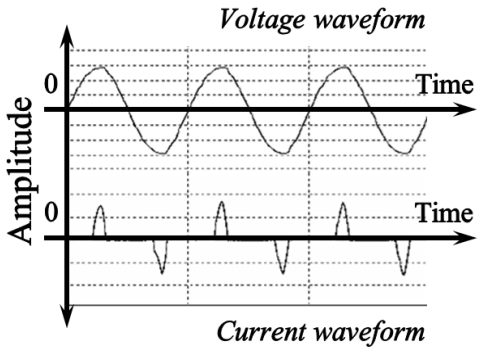
รูปที่ 1 รูปคลื่นสัญญาณที่ระดับความถี่ต่างๆ

รูปคลื่นสัญญาณที่แสดงในรูปที่ 1 ได้แสดงรูปคลื่นสัญญาณของฮาร์มอนิกลำดับที่เป็นเลขคี่เท่านั้น ซึ่งโดยปกติแล้วการวิเคราะห์ฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังจะพิจารณาไปที่ฮาร์มอนิกลำดับเลขคี่เป็นหลักเนื่องจากในระบบไฟฟ้ากำลังจะมีความสมมาตรกันระหว่างรูปคลื่นสัญญาณในช่วงคาบเวลาที่เป็นบวก และลบจะไม่มีฮาร์มอนิกลำดับที่เป็นเลขคู่เกิดขึ้น จากรูปของสัญญาณคลื่นของฮาร์มอนิกที่แสดงในรูปที่ 1 เมื่อรวมเข้ากับสัญญาณที่ความถี่มูลฐานแล้ว จะทำให้รูปคลื่นสัญญาณมีความผิดเพี้ยนไปจากเดิม และความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นสัญญาณจะขึ้นอยู่กับปริมาณของฮาร์มอนิกที่มีในระบบไฟฟ้ากำลัง [3] รูปคลื่นสัญญาณที่มีความผิดเพี้ยนอันเนื่องมาจากการรบกวนฮาร์มอนิกสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 2



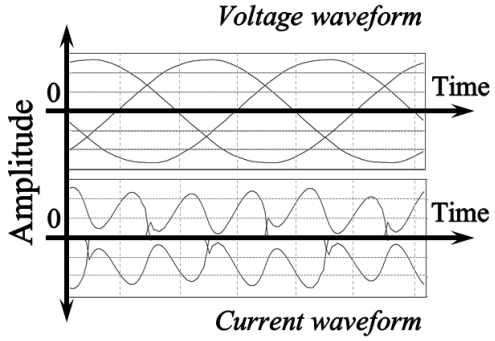
รูปที่ 2 รูปคลื่นสัญญาณผิดเพี้ยนจากผลของฮาร์มอนิก

แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง คือ อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ทำงานในลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งมีลักษณะรูปคลื่นสัญญาณของแรงดัน และกระแสไฟฟ้าที่ไม่เป็นสัดส่วนกัน และอุปกรณ์ไฟฟ้าที่เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกนั้น สามารถจำแนกได้สองประเภท คือ อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในเชิงธุรกิจ ส่วนมากจะเป็นอุปกรณ์ไฟฟ้าแบบเฟสเดียว ยกตัวอย่างเช่น บัลลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ สวิตซ์ชิ่งเพาเวอร์ซัพพลาย และเครื่องปรับอากาศชนิดอินเวอร์เตอร์ เป็นต้น [3] รูปคลื่นสัญญาณของอุปกรณ์ไฟฟ้าในเชิงธุรกิจพิจารณาได้จากรูปที่ 3



รูปที่ 3 รูปคลื่นของสวิตซ์ชิ่งเพาเวอร์ซัพพลาย [3]

อุปกรณ์ไฟฟ้าที่เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกประเภทที่สอง คือ อุปกรณ์ไฟฟ้าที่ใช้ในเชิงอุตสาหกรรม ยกตัวอย่างเช่น อุปกรณ์ปรับความเร็วรอบของมอเตอร์เครื่องจักรกลอัตโนมัติต่างๆ เป็นต้น [3-5] รูปคลื่นสัญญาณของอุปกรณ์ไฟฟ้าในเชิงอุตสาหกรรมพิจารณาได้จากรูปที่ 4



รูปที่ 4 รูปคลื่นของปรับความเร็วรอบมอเตอร์ [4-5]

ลักษณะรูปคลื่นสัญญาณของแรงดัน และกระแสไฟฟ้าที่ไม่เป็นสัดส่วนกันนี้ จะทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกขึ้น ทำให้กล่าวได้ว่าอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีการทำงานในลักษณะนี้จะเป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง และกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นนี้จะไหลเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลังไปยังอุปกรณ์ต่างๆ เช่น หม้อแปลงกำลังไฟฟ้า ตัวเก็บประจุไฟฟ้า เป็นต้น ส่งผลให้เกิดความเสียหายต่ออุปกรณ์ตามมา เช่น การเสื่อมสภาพก่อนเวลาอันควรของอุปกรณ์ การประมวลผลของอุปกรณ์เกิดความผิดพลาด และในกรณีที่เกิดการเรโซแนซ์ขึ้นในระบบอาจส่งผลต่อเสถียรภาพโดยรวมของระบบไฟฟ้ากำลังได้ [6-7]

ดัชนีชี้วัดระดับความรุนแรงของฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังประกอบด้วย ดัชนีชี้วัดระดับกระแสฮาร์มอนิกในแต่ละลำดับ ดัชนีชี้วัดระดับความเพี้ยนรวมของแรงดัน และกระแสฮาร์มอนิกในทุกลำดับที่พิจารณา และดัชนีชี้วัดระดับความเพี้ยนความต้องการรวม [1-3] ซึ่งดัชนีชี้วัดระดับความรุนแรงของฮาร์มอนิกทั้งหมดที่กล่าวไปแล้วนั้นจะแสดงอยู่ในรูปร้อยละของค่าแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐาน ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (1)-(4)

$$I_h(\%) = \frac{I_h}{I_1} \times 100 \quad (1)$$

$$THD_V(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} (V_h)^2}}{V_1} \times 100 \quad (2)$$

$$THD_i(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} (I_h)^2}}{I_1} \times 100 \quad (3)$$

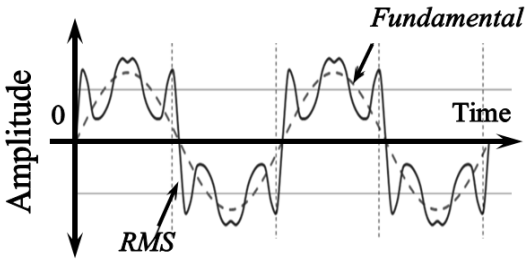
$$TDD(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} (I_h)^2}}{I_L} \times 100 \quad (4)$$

โดยกำหนดให้

I_h = กระแสฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ
I_1 = กระแสไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐาน
I_L = กระแสใช้งานทั้งหมดของระบบ
V_h = แรงดันฮาร์มอนิกแต่ละลำดับ
V_1 = แรงดันไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐาน
h = ลำดับฮาร์มอนิกที่พิจารณา
THD_V = ค่าความเพี้ยนรวมของแรงดัน
THD_i = ค่าความเพี้ยนรวมของกระแส
TDD = ค่าความเพี้ยนความต้องการรวม

สมการที่ (1) เป็นสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์หาปริมาณของกระแสฮาร์มอนิกในแต่ละลำดับที่กำลังพิจารณา สมการที่ (2)-(3) เป็นสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์หาระดับความเพี้ยนรวมของแรงดัน และกระแสฮาร์มอนิกในทุกลำดับที่พิจารณา โดยเป็นการรวมกันของแรงดันหรือกระแสฮาร์มอนิกตั้งแต่ลำดับสองขึ้นไปจนถึงฮาร์มอนิกลำดับสูงสุดที่ทำการพิจารณาด้วยกฎ Root-Sum-Square แล้วเทียบกับค่าแรงดันหรือ กระแสไฟฟ้าที่ความถี่มูลฐาน สมการที่ (4) เป็นสมการที่ใช้ในการวิเคราะห์หาระดับความเพี้ยนความต้องการรวม โดยเป็นการรวมกันระว่างกระแสฮาร์มอนิกตั้งแต่ลำดับสองขึ้นไปจนถึงฮาร์มอนิกลำดับที่ทำการพิจารณาด้วยกฎ Root-Sum-Square แล้วเทียบกับความต้องการกระแสใช้งานทั้งหมดของระบบ ซึ่งความต้องการกระแสใช้งานทั้งหมดสามารถพิจารณาได้จากการตรวจวัดที่จุดทุติยภูมิของหม้อแปลงกำลังไฟฟ้า และประมาณการจากภาระทางไฟฟ้าทั้งหมดที่มีอยู่ในระบบโดยดัชนีชี้วัดระดับความเพี้ยนความต้องการรวมใช้เพื่อป้องกันความคลาดเคลื่อนในการวิเคราะห์ระดับความรุนแรงของฮาร์มอนิก ในกรณีที่อุปกรณ์ไฟฟ้ามีความเพี้ยนของฮาร์มอนิกมากแต่มีกระแสใช้งานต่ำ [1-3]

การแสดงระดับความรุนแรงของฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ระดับความรุนแรงของปัญหาฮาร์มอนิก รวมไปถึงการแก้ปัญหาฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลัง จะสามารถแสดงอยู่รูปแบบของรูปคลื่นสัญญาณของแรงดัน และกระแสไฟฟ้า [1-3] ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 5

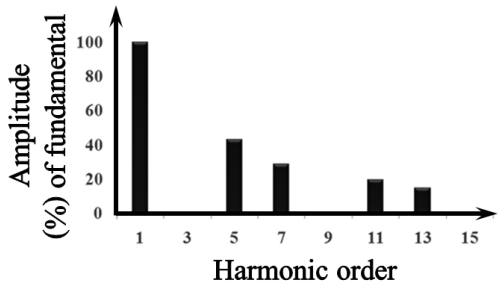


รูปที่ 5 รูปคลื่นสัญญาณของกระแสไฟฟ้า

จากรูปคลื่นสัญญาณในรูปที่ 5 เป็นการแสดงระดับความรุนแรงของฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังในรูปแบบของรูปคลื่นสัญญาณเทียบกับเวลา โดยระดับความความรุนแรงของฮาร์มอนิกจะแปรผันตรงกับความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นสัญญาณ

รูปแบบของการแสดงระดับความรุนแรงของฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังแบบที่สองคือ รูปแบบของสเปกตรัมแสดงปริมาณของฮาร์มอนิกในแต่ละลำดับที่พิจารณา ซึ่งรูปแบบของสเปกตรัมนี้จะมีส่วนที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหารวมถึงการแก้ไขปัญหาฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังมากกว่าการแสดงระดับความรุนแรง

ของฮาร์มอนิกในรูปแบบรูปคลื่นสัญญาณ เพราะจะสามารถพิจารณาปริมาณฮาร์มอนิกในแต่ละลำดับได้อย่างชัดเจน [1-3] โดยสเปกตรัมแสดงปริมาณของฮาร์มอนิกสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 6



รูปที่ 6 สเปกตรัมแสดงปริมาณของฮาร์มอนิก

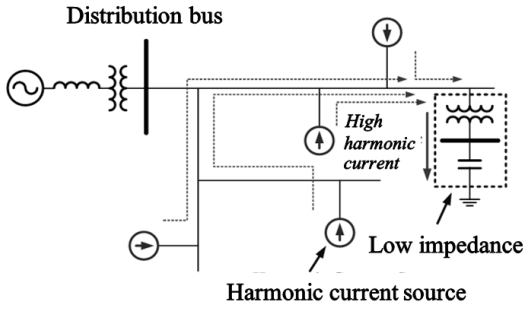
โดยทั่วไปแล้วฮาร์มอนิกลำดับที่ส่งผลต่อระบบมากที่สุด คือฮาร์มอนิกลำดับที่อยู่ใกล้กับความถี่มูลฐาน เนื่องจากฮาร์มอนิกลำดับที่อยู่ใกล้ความถี่มูลฐานจะมีปริมาณสูงเมื่อเทียบกับฮาร์มอนิกในลำดับสูง แต่อย่างไรก็ดีฮาร์มอนิกลำดับสูงก็อาจส่งผลกระทบต่อการทำงานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ได้ [6-7]

2. ปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ในระบบไฟฟ้ากำลัง

เรโซแนนซ์เป็นปรากฏการณ์ที่ค่าความต้านทานของอุปกรณ์เหนี่ยวนำทางไฟฟ้า และอุปกรณ์เก็บประจุไฟฟ้าในระบบไฟฟ้ามีค่าเท่ากัน ทำให้เกิดการหักล้างกันของค่าความต้านทานจากอุปกรณ์เหนี่ยวนำทางไฟฟ้า และอุปกรณ์เก็บประจุไฟฟ้าเหลือเพียงค่าความต้านทานจากอุปกรณ์ที่เป็นตัวต้านทาน โดยปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ในระบบไฟฟ้ากำลังมีอยู่สองรูปแบบด้วยกันคือ

2.1 เรโซแนนซ์แบบอนุกรม

เมื่อเกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์แบบอนุกรมขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง ค่าความต้านทานรวมในบริเวณที่เกิดเรโซแนนซ์จะมีค่าต่ำสุด หากตำแหน่งความถี่ของเรโซแนนซ์ตรงกับลำดับกระแสฮาร์มอนิกที่มีอยู่ในระบบแล้ว กระแสฮาร์มอนิกทั้งหมดจะไหลเข้าสู่อุปกรณ์ไฟฟ้าที่อยู่ในบริเวณนั้น ทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่อุปกรณ์ไฟฟ้าเกินพิกัด และอุปกรณ์ไฟฟ้าเสียหายตามมา ลักษณะของระบบไฟฟ้ากำลังที่เกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์แบบอนุกรม และทิศทางการไหลของกระแสฮาร์มอนิกเข้าสู่อุปกรณ์ไฟฟ้า [7-8] สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 7

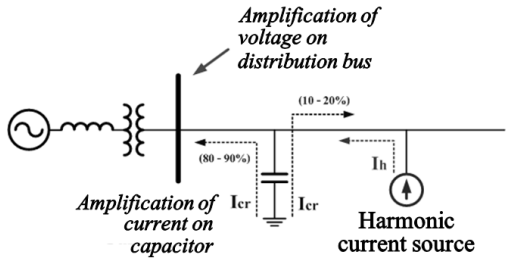


รูปที่ 7 เรโซแนนซ์แบบอนุกรม

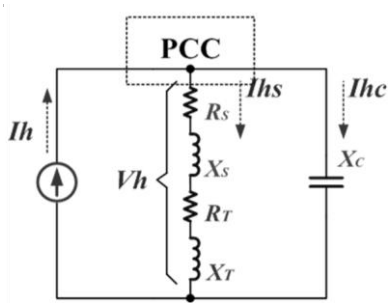
2.2 เรโซแนนซ์แบบขนาน

เมื่อเกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์แบบขนานขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง ค่าความต้านทานรวมในบริเวณที่เกิดเรโซแนนซ์จะมีค่าสูงสุด หากตำแหน่งความถี่ของเรโซแนนซ์ตรงกับลำดับกระแสฮาร์มอนิกที่มีอยู่ในระบบแล้ว จะทำให้เกิดการขยายตัวของแรงดันฮาร์มอนิกสูงมากที่จุดต่อร่วมในระบบไฟฟ้า ซึ่งจะส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ไฟฟ้าในระบบ และยังอาจจะส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพในระบบไฟฟ้ากำลังได้ ลักษณะของระบบไฟฟ้ากำลังที่เกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์แบบขนาน และ

ทิศทางการไหลของกระแสฮาร์มอนิกเข้าสู่อุปกรณ์ไฟฟ้า [8-9] สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 8



รูปที่ 8 เรโซแนนซ์แบบขนาน



รูปที่ 9 วงจรสมมูลย์เรโซแนนซ์แบบขนาน

จากรูปที่ 9 กำหนดให้

I_h = กระแสฮาร์มอนิกจากแหล่งกำเนิด

V_h = แรงดันฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วม

I_{hs} = กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลสู่หม้อแปลงกำลัง และระบบ

I_{hc} = กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลสู่ตัวเก็บประจุไฟฟ้า

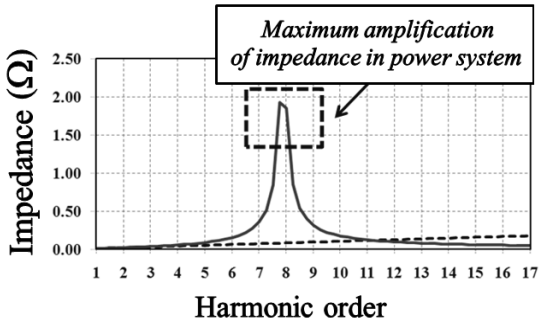
R_S, X_S = ค่าความต้านทานระบบ

R_T, X_T = ค่าความต้านทานหม้อแปลงกำลัง

X_C = ค่าความต้านทานตัวเก็บประจุไฟฟ้า

PCC = จุดต่อร่วมของระบบไฟฟ้ากำลัง

จากวงจรสมมูลในรูปที่ 9 ปรากฏเรโซแนนซ์แบบขนานที่เกิดจากการขนานอุปกรณ์ชดเชยค่ากำลังไฟฟ้าต้านกลับเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลัง จะทำให้ค่าความต้านทานในระบบจะมีค่าสูงมากที่ฮาร์มอนิกลำดับที่มีนัยสำคัญ โดยสามารถพิจารณาลักษณะของความต้านทานในระบบได้จากรูปที่ 10



รูปที่ 10 ความต้านทานรวมของเรโซแนนซ์แบบขนาน

หากในระบบไฟฟ้ากำลังมีกระแสฮาร์มอนิกซึ่งมีลำดับตรงกับลำดับฮาร์มอนิกที่มีนัยสำคัญแล้ว จะทำให้เกิดการขยายแรงดันฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วมในระบบไฟฟ้ากำลังสูงขึ้นตามค่าความต้านทานของระบบ ส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่จ่ายให้กับภาระทางไฟฟ้าในระบบทั้งหมดเกิดความผิดเพี้ยนตามไปด้วย โดยเฉพาะอุปกรณ์ชดเชยค่ากำลังไฟฟ้าต้านกลับเพื่อปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า แรงดัน และกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดการขยายตัวนี้ไหลเข้าสู่ตัวเก็บประจุไฟฟ้าในปริมาณที่สูงมาก ทำให้ตัวเก็บประจุไฟฟ้าเกิดการเสื่อมสภาพก่อนเวลาอันควร ซึ่งในกรณีที่รุนแรงมากตัวเก็บประจุไฟฟ้าก็จะเกิดการวาบไฟ หรือระเบิดขึ้น หากอุปกรณ์ตัดตอนไม่สั่งปลดอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าต้านกลับออกจากระบบ ซึ่งจะส่งผลไปถึง

อุปกรณ์ที่ติดตั้งในบริเวณข้างเคียง รวมไปถึงเสถียรภาพของระบบไฟฟ้ากำลัง [10-11]

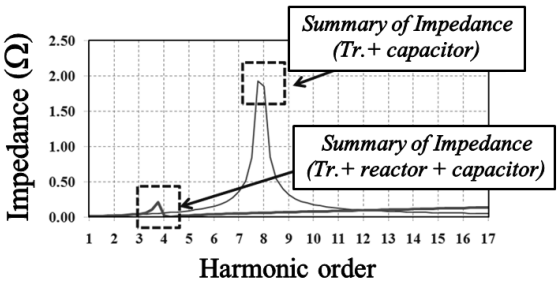
โดยทั่วไปแล้วปรากฏการณ์เรโซแนนซ์ที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้ากำลัง คือ ปรากฏการณ์เรโซแนนซ์แบบขนาน ที่เกิดจากการขนานอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าต้านกลับ หรืออุปกรณ์ปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีความเพี้ยนฮาร์มอนิก ซึ่งหากไม่มีการจัดการ หรือปรับปรุงกระแสฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังก่อน อาจจะส่งผลให้เกิดเหตุการณ์ร้ายแรงขึ้นต่อเสถียรภาพของระบบ และอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ต่อร่วมอยู่ในระบบไฟฟ้ากำลังได้ตามที่ได้กล่าวไปแล้วข้างต้น

3. การหลีกเลี่ยงความเสียหายที่เกิดขึ้นจากเรโซแนนซ์แบบขนานที่ความถี่ฮาร์มอนิก

การหลีกเลี่ยงการเกิดปรากฏการณ์เรโซแนนซ์แบบขนานในระบบไฟฟ้ากำลังสามารถทำได้โดยการต่อรีแอกเตอร์อนุกรมกับตัวเก็บประจุไฟฟ้าในอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าต้านกลับ โดยค่าความต้านของรีแอกเตอร์ที่นำมาใช้กับตัวเก็บประจุไฟฟ้าในอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าต้านกลับโดยทั่วไปแล้วจะมีค่าอยู่ในที่ร้อยละ 5.67 – 14 ของค่าความต้านของตัวเก็บประจุไฟฟ้า [11] ลักษณะของรีแอกเตอร์ที่นำมาใช้กับตัวเก็บประจุไฟฟ้าสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 11

รูปที่ 11 รีแอกเตอร์ที่ใช้กับตัวเก็บประจุไฟฟ้า

หน้าที่ของรีแอกเตอร์มีอยู่สองส่วนด้วยกัน หน้าที่หลักคือการเลื่อนตำแหน่งของเรโซแนนซ์แบบขนานไปอยู่ในย่านฮาร์มอนิกลำดับที่ไม่มีนัยสำคัญ ที่ไม่ส่งผลให้เกิดการขยายตัวของแรงดัน และกระแสฮาร์มอนิก ไหลเข้าสู่ตัวเก็บไฟฟ้าประจุในอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าต้านกลับ หน้าที่รองลงมาคือการกรองกระแสฮาร์มอนิกบางส่วนออกจากระบบไฟฟ้ากำลัง ซึ่งจะช่วยลดแรงดันฮาร์มอนิกที่บริเวณจุดต่อร่วมของระบบไฟฟ้ากำลังได้ โดยระดับการกรองกระแสฮาร์มอนิกของรีแอกเตอร์จะขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานของรีแอกเตอร์ [12-14] ลักษณะค่าความต้านทานรวมของระบบไฟฟ้ากำลังขณะขนานตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ต่อรีแอกเตอร์อนุกรมสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 12



รูปที่ 12 เปรียบเทียบก่อน และหลังติดตั้งรีแอกเตอร์

จากลักษณะความต้านทานรวมในรูปที่ 12 เมื่อต่อรีแอกเตอร์อนุกรมกับตัวเก็บประจุไฟฟ้า ตำแหน่งของเรโซแนนซ์แบบขนานที่ขยายค่าความต้านรวมสูงสุดจะถูกเลื่อนไปอยู่ในฮาร์มอนิกลำดับที่ต่ำกว่าลำดับที่ 5 ที่มีนัยสำคัญต่อการขยายแรงดัน และกระแสฮาร์มอนิก เนื่องจากตัวเก็บประจุไฟฟ้าในอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าต้านกลับมีการต่อวงจรภายในเป็นแบบสตาร์ ฮาร์มอนิกลำดับที่สามจะไม่สามารถไหลเข้าสู่ตัวเก็บ

เก็บประจุไฟฟ้าได้ และระบบไฟฟ้ากำลังปกติจะมีความสมดุลของรูปคลื่นสัญญาณระหว่างซีกบวกและลบ ซึ่งจะทำให้ไม่เกิดฮาร์มอนิกลำดับที่เป็นเลขคู่ขึ้น เพราะฉะนั้นเมื่อต่อรีแอกเตอร์อนุกรมกับตัวเก็บประจุไฟฟ้าจึงไม่มีโอกาสที่จะเกิดการขยายแรงดัน และกระแสฮาร์มอนิกได้

ในขณะเดียวกันรีแอกเตอร์ก็จะสร้างจุดเรโซแนนซ์แบบอนุกรมขึ้นมา ในตำแหน่งของฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ซึ่งจะช่วยกรองกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ออกจากระบบไฟฟ้ากำลังได้บางส่วน และจะช่วยลดแรงดันฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วมของระบบไฟฟ้ากำลังได้ แต่รีแอกเตอร์ที่ใช้ร่วมกับตัวเก็บประจุไฟฟ้าจะออกแบบให้กรองกระแสฮาร์มอนิกได้ลำดับเดียวคือลำดับที่ 5 เท่านั้น เพราะหากออกแบบให้กรองฮาร์มอนิกลำดับที่ 7 จะเกิดการขยายแรงดัน และกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ขึ้น การออกแบบรีแอกเตอร์ที่ใช้กับตัวเก็บประจุไฟฟ้าจึงต้องระมัดระวังเรื่องค่าความต้านทานของรีแอกเตอร์ด้วย [12-14]

กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าสู่ตัวเก็บประจุไฟฟ้าในอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าต้านกลับในขณะที่ไม่ต่อรีแอกเตอร์แล้วนำเข้าสู่ระบบพิจารณาได้จากสมการที่ 5

$$I_{hc} = I_h \left[\frac{R_{ST} + jhX_{ST}}{R_{ST} + j\left(hX_{ST} - \frac{X_C}{h} \right)} \right] \quad (5)$$

และกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าสู่ตัวเก็บประจุไฟฟ้าในอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าต้านกลับในขณะที่ต่อรีแอกเตอร์แล้วนำเข้าสู่ระบบพิจารณาได้จากสมการที่ 6

$$I_{hc} = I_h \left[\frac{R_{ST} + jhX_{ST}}{R_{ST} + R_L + j\left(h(X_{ST} + X_L) - \frac{X_C}{h} \right)} \right] \quad (6)$$

จากสมการที่ (5)-(6) กำหนดให้

I_{hc} = กระแสฮาร์มอนิกที่ไหลสู่ตัวเก็บประจุไฟฟ้า

I_h = กระแสฮาร์มอนิกจากแหล่งกำเนิด

R_{ST} = ค่าความต้านทานของระบบ และหม้อแปลงกำลัง

R_L = ค่าความต้านทานของรีแอกเตอร์

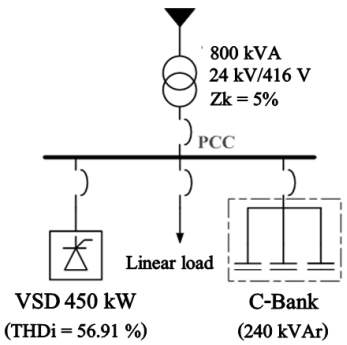
jX_{ST} = ค่าความต้านทานเหนี่ยวนำระบบของระบบ และหม้อแปลงกำลัง

jX_L = ค่าความต้านทานเหนี่ยวนำของรีแอกเตอร์

jX_C = ค่าความต้านทานการเก็บประจุของตัวเก็บประจุไฟฟ้า

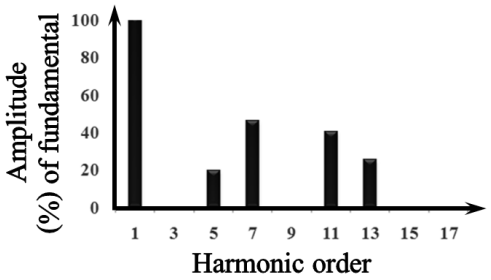
h = ลำดับฮาร์มอนิกที่พิจารณา

จากสมการที่ (5) นำมาคำนวณกับระบบไฟฟ้ากำลังในรูปที่ 13



รูปที่ 13 แบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง (ไม่ต่อรีแอกเตอร์)

จากรูปที่ 13 เป็นระบบไฟฟ้ากำลังที่มีหม้อแปลงกำลังไฟฟ้าขนาด 800 กิโลโวลต์-แอมแปร์ แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกเป็นอุปกรณ์ปรับความเร็วรอบมอเตอร์ขนาด 450 กิโลวัตต์ มีความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของกระแสร้อยละ 56.91 ของกระแสโหลดเต็มพิกัดที่ความถี่มูลฐาน และอุปกรณ์ชดเชยกำลังไฟฟ้าต้านกลับขนาด 240 กิโลวาร์ เมื่อคำนวณด้วยสมการที่ (5) แล้วนำมาผลที่ได้มาแสดงในรูปของสเปกตรัมกระแสฮาร์มอนิกในแต่ละลำดับที่ไหลเข้าสู่ตัวเก็บประจุตามที่แสดงในรูปที่ 14

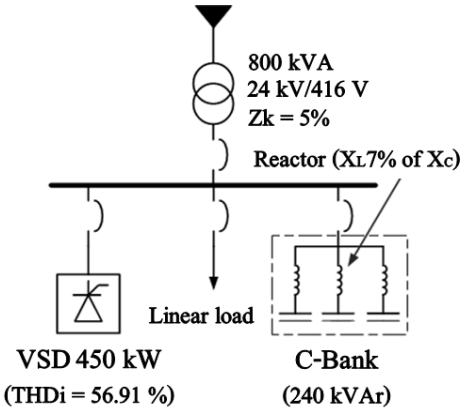


รูปที่ 14 สเปกตรัมกระแสฮาร์มอนิก (ไม่ต่อรีแอกเตอร์)

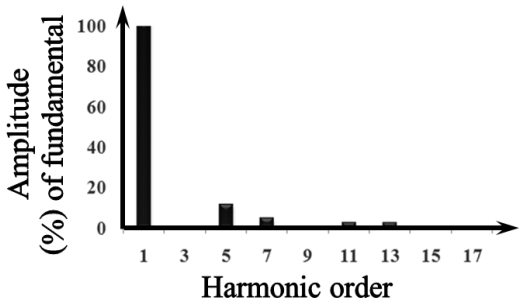
จากรูปที่ 14 พบว่าเกิดการขยายตัวของกระแสฮาร์มอนิกที่มีความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของกระแสถึงร้อยละ 68.22 ของกระแสใช้งานของตัวเก็บประจุไฟฟ้า และค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสไฟฟ้ามีค่า 1.231 เท่าของกระแสใช้งานของตัวเก็บประจุไฟฟ้า ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่ากระแสไฟฟ้าสูงสุดที่ยอมให้ไหลผ่านตัวเก็บประจุไฟฟ้าได้ตามมาตรฐาน IEC 60831 ที่ระบุไว้ 1.3 เท่าของกระแสใช้งานของตัวเก็บประจุไฟฟ้า [14-15]

แต่อย่างไรก็ดีกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าสู่ตัวเก็บประจุไฟฟ้านี้ จะทำให้เกิดความร้อนเพิ่มขึ้นกับตัวเก็บประจุไฟฟ้า ส่งผลต่ออายุการใช้งานของตัวเก็บประจุไฟฟ้า และอุปกรณ์ประกอบ เช่น สายตัวนำไฟฟ้า อุปกรณ์ตัดต่อ เป็นต้น ทำให้อายุการใช้งานสั้นลง

และจากสมการที่ (6) นำมาคำนวณกับระบบไฟฟ้ากำลังซึ่งมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ เหมือนกับรูปที่ 13 แต่ต่อรีแอกเตอร์ที่มีค่าความต้านทานร้อยละ 7 ของค่าความต้านทานของตัวเก็บประจุอนุกรมกับตัวเก็บประจุไฟฟ้า ไดอะแกรมของระบบไฟฟ้ากำลังที่เพิ่มรีแอกเตอร์ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุไฟฟ้า และผลการคำนวนในรูปของสเปกตรัมกระแสฮาร์มอนิกแสดงในรูปที่ 15 และ 16



รูปที่ 15 แบบจำลองระบบไฟฟ้ากำลัง (ต่อรีแอกเตอร์)



รูปที่ 16 สเปกตรัมกระแสฮาร์มอนิก (ต่อรีแอกเตอร์)

จากรูปที่ 16 พบว่าการขยายตัวของกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลเข้าสู่ตัวเก็บประจุไฟฟ้ามีความเพี้ยนลดงลงโดยความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของกระแสอยู่ที่ร้อยละ 12.86 ของกระแสใช้งานของตัวเก็บประจุไฟฟ้า และค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสไฟฟ้ามีค่า 1.025 จากปริมาณกระแสฮาร์มอนิกที่ลดลงนี้ ทำให้ค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้าสู่ตัวเก็บประจุไฟฟ้ามีค่าลดลง และสามารถลดอุณภูมิของตัวเก็บประจุไฟได้ ส่งผลให้อายุการใช้งานของตัวเก็บประจุไฟฟ้า และอุปกรณ์ประกอบ เช่น สายตัวนำไฟฟ้า อุปกรณ์ตัดต่อ เป็นต้น มีอายุการใช้งานเพิ่มขึ้น

5. สรุปผล

การขนานชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้าเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลังจะช่วยชดเชยกำลังไฟฟ้าต้านกลับให้กับระบบ และเป็นการปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของระบบ ซึ่งนอกจากจะเป็นการหลีกเลี่ยงค่าปรับจากการไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากการที่มีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าต่ำกว่าที่การไฟฟ้ากำหนดแล้ว ยังช่วยลดค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่เกิดขึ้นในระบบ และทำให้ระบบสามารถรองรับภาระทางไฟฟ้าได้เพิ่มขึ้น

จากรูปที่ 13 เมื่อขนานชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้าเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีความเพี้ยนฮาร์มอนิกจะทำให้เกิดการขยายกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 7 11 และ 13 เป็นต้น (ไม่มีกระแสฮาร์มอนิกลำดับคู่ และลำดับคี่ที่หารด้วยสามลงตัว เนื่องจากวงจรตัวเก็บประจุไฟฟ้าต่อแบบเดลต้า และระบบไฟฟ้าที่พิจารณาเป็นระบบที่สมดุล) ไหลเข้าสู่ชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้าตามที่แสดงในรูปที่ 14 โดยมีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของกระแสอยู่ที่ร้อยละ 68.22 ของกระแสโหลดเต็มพิกัดของชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้า ซึ่งกระแสฮาร์มอนิกในส่วนนี้อาจทำให้ชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้าเกิดความเสียหายได้

จากรูปที่ 15 เมื่อขนานชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ต่อรีแอกเตอร์อนุกรมกับตัวเก็บประจุเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลังที่มีความเพี้ยนฮาร์มอนิก ปริมาณการขยายกระแสฮาร์มอนิกในลำดับที่ 5 7 11 และ 13 ที่ไหลเข้าสู่ชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้าจะมีค่าลดลงตามที่แสดงในรูปที่ 16 โดยมีค่าความเพี้ยนฮาร์มอนิกรวมของกระแสอยู่ที่ร้อยละ 12.86 ของกระแสโหลดเต็มพิกัดของชุดตัวเก็บประจุไฟฟ้า และอัตราส่วนระหว่างค่าอาร์เอ็มเอสของกระแสกับค่ากระแสโหลดเต็มพิกัดที่ความถี่มูลฐานมีค่า 1.025 ซึ่งถือว่าเป็นค่าที่สามารถยอมรับได้ตามข้อกำหนดที่ระบุไว้ตามมาตรฐาน IEC 60831

อย่างไรก็ตามวิธีการนี้เป็นการป้องกันความเสียหายที่เกิดขึ้นกับชุดตัวเก็บประจุจากเรโซแนนซ์แบบขนานที่ความถี่ฮาร์มอนิกเท่านั้น หากกระแสฮาร์มอนิกในระบบมีปริมาณมาก และต้องการกรองกระแสฮาร์มอนิกออกจากระบบ จะต้องมีการติดตั้งอุปกรณ์กรองกระแสฮาร์มอนิกออกจากระบบเพิ่มเติม เช่น พาสซีฟ และแอคทีฟฟิลเตอร์ เป็นต้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้การสนับสนุนและความช่วยเหลือในการจัดทำบทความวิชาการนี้ รวมไปถึง บริษัท อาซีฟา จำกัด (มหาชน) ที่ให้การสนับสนุนข้อมูลทางด้านวิศวกรรมต่างๆ ซึ่งทำให้บทความวิชาการฉบับนี้สำเร็จลุล่วงอย่างสมบูรณ์

7. เอกสารอ้างอิง

[1] J. Arrillaga and N.R. Watson, "Power System Harmonics, (2nd Eds.)", John Wiley & Sons Company, 2003.

[2] T.A. Short, "Distribution Reliability and Power Quality", Taylor & Francis Group, 2006.

[3] S. Santoso, M.F. McGranaghan, R.C. Dugan and H.W. Beaty, "Electrical Power Systems Quality, (3rd Eds.)", McGraw-Hill Book Company, 2012.

[4] W. Theerasart, "Harmonic Current Filter at Variable Speed Drive in Three Phase Power System", Master Thesis, Electrical Technology Education Department, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand. 2012.

[5] H. Zubi, "Low Pass Broadband Harmonic Filter Design", Master Thesis, Electrical and Electronics Engineering Department, Middle East Technical University, USA. 2005.

[6] Ph. Ferracci, "Power Quality," Schneider Electric Company Limited, 2001.

[7] C. Collombet, J.M. Lupin and J. Schonek, "Harmonic Disturbances in Network, and Their Treatment," Schneider Electric Company Limited, 2000.

[8] J.C. Attachie and C.K. Amuzuvi, "Investing Harmonic Resonance and Capacitor Bank Switching at a Power Distribution Substation Using a Fixed Capacitor Bank", Research Journal in Engineering and Applied Sciences 2(4), 2013, pp. 343-348.

[9] J. Daniel and J. Carnovate, "Power Factor and Harmonic Resonance", EC&M Megazine, 2013.

[10] C. Boonseng, C. Chompoo-inwai, V. Kinnares, K. Nakawiwat and P. Apiratikul, "Failure Analysis of Dielectric of Low Voltage Power Capacitors Due to Related Harmonic Resonance Effects", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2012.

[11] R. Dugan and B.W. Kennedy, "Predicting Harmonic Problems Resulting from Customer Capacitor Additions for Demand-Side Management", IEEE Transmission and Power System 10, 1995, pp. 1765-1771.

[12] IEC 61642 std., "Industrial A.C. Networks Affected by Harmonic Application of Filters anf Shunt Capacitors", International Electrotechnical Commission, 1997.

[13] S. Hong, C. Zheng, F. Lei and X. Xing, "Research on the Parallel Capacitor Series Reactance Rate Parameter Design", IEEE Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2012.

[14] S. Chaladying, P. Dusitakorn and N. Rugthaichareoncheep, "Resonance Impact on Power Factor Correction System in Power System with Harmonic Distortion", Applied Mechanics and Material 781, 2015, pp. 254-257.

[15] IEC 60831-1 std., "Shunt power capacitors of the self-healing type for a.c. systems having a rated voltage up to and including 1000 V (2nd Eds.)", International Electrotechnical Commission, 2014.