บทที่ 2

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

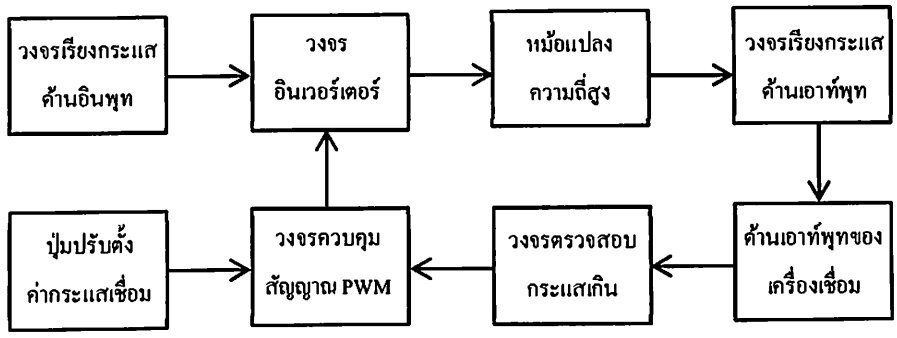
ในบทนี้เป็นการนำเสนอทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัย ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำหรับการศึกษาและวิเคราะห์ ดังนี้

2.1 ความรู้พื้นฐานในงานวิจัย

ปัจจุบันวงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังได้ถูกทำมาประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าอย่างแพร่หลาย เพื่อประโยชน์ในการประหยัดพลังงานและลดขนาดของอุปกรณ์ให้กะทัดรัด ปัญหาหลักของอิเล็กทรอนิกส์กำลัง คือ การเกิดแรงดันกระแสฮาร์มอนิกไหลเข้าสู่ระบบไฟฟ้ากำลังหลักเกิดผลเสียหายมากมายกับระบบไฟฟ้าในโรงงานอุตสาหกรรมเครื่องเชื่อมไฟฟ้าเป็นเครื่องมือหนึ่งที่มีความสำคัญและได้ถูกปรับเปลี่ยนมาใช้วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลังเช่นกัน เพื่อลดฮาร์มอนิกด้วยวิธีต่าง ๆ เช่นการออกแบบเครื่องเชื่อมไฟฟ้าให้มีกำลังไฟฟ้าคงที่ หรือการพัฒนาคอนเวอร์เตอร์เพื่อลดปัญหาฮาร์มอนิกของเครื่องเชื่อมไฟฟ้า นอกจากนี้ยังมีการวิเคราะห์การเกิดฮาร์มอนิกของกระแสและแรงดันจากหม้อแปลงที่ใช้กับเครื่องเชื่อมไฟฟ้า วิทยานิพนธ์นี้ได้นำเสนอการลดกระแสฮาร์-มอนิกจากเครื่องเชื่อมไฟฟ้า ด้วยวิธีง่าย ๆ และ ราคาถูก โดยการปรับปรุงการเกิดกระแสฮาร์มอนิกจากผลของตัวกรองแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงในวงจรเรียงกระแสแบบ 3 เฟส ซึ่งสามารถลดค่าความเพี้ยนรวมของกระแสฮาร์มอนิกได้เป็นจำนวนมาก เกิดประโยชน์ในการลดความเสี่ยงของปัญหาฮาร์มอนิกที่จะกระทบกับระบบไฟฟ้ากรณีที่มีเครื่องเชื่อมจำนวนมาก อีกทั้งยังสามารถลดขนาดของตัวกรองฮาร์มอนิกของระบบได้

2.2 เครื่องเชื่อมไฟฟ้า

เครื่องเชื่อมมีส่วนช่วยทำให้งานเชื่อมที่ออกมามีคุณภาพมากน้อยเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับการออกแบบให้สามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยการทำงานของเครื่องเชื่อมในแต่ละรุ่นก็จะมีลักษณะของการใช้งานที่แตกต่างกันไป

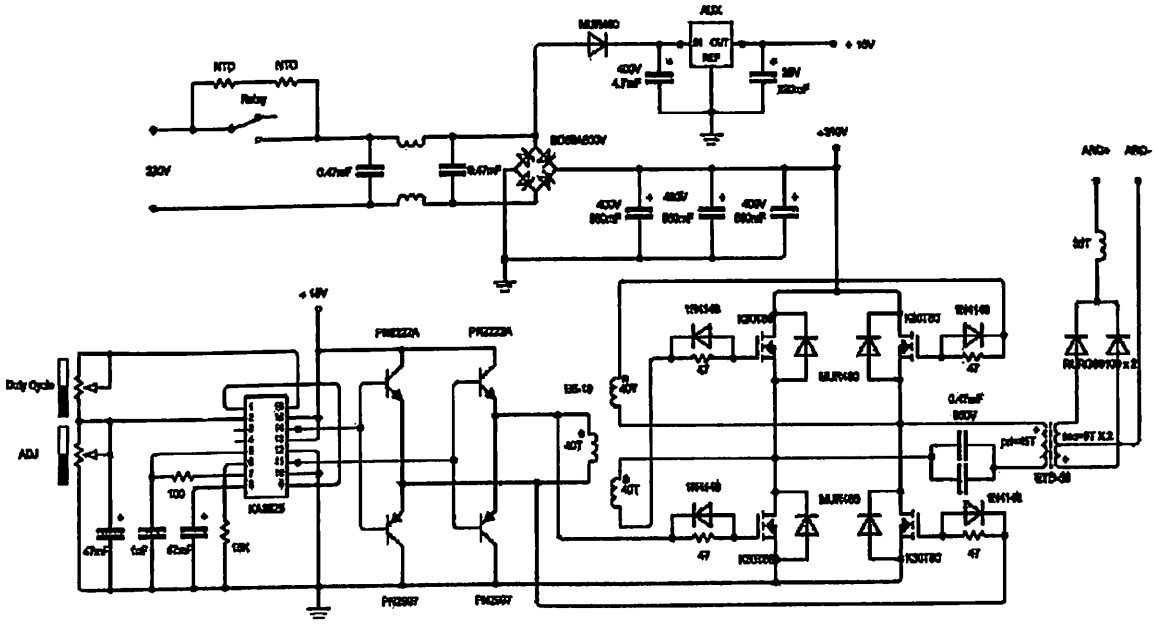


รูปที่ 2.1 โครงสร้างทั่วไปของเครื่องเชื่อมไฟฟ้า

จากรูปที่ 2.1 เป็นโครงสร้างทั่วไปของเครื่องเชื่อมไฟฟ้าประกอบไปด้วยส่วนต่างๆดังนี้

1. วงจรเรียงกระแส หรือ วงจรภาคจ่ายไฟ
2. วงจรอินเวอร์เตอร์ หรือ วงจรผกผัน
3. หม้อแปลงความถี่สูง
4. วงจรคอนเวอร์เตอร์ หรือ วงจรเรียงกระแสทางด้านเอาท์พุท
5. วงจรควบคุมสัญญาณ PWM
6. วงจรตรวจสอบกระแสเกิน
7. ปุ่มปรับตั้งค่ากระแสเชื่อม

จากรูปที่ 2.2 เป็นวงจรรวมของเครื่องเชื่อมไฟฟ้าทั่วไปแบบ 1 เฟส



รูปที่ 2.2 วงจรเครื่องเชื่อมทั่วไป (สันติ กระจ่างวงค์, 2556)

โดยหลักการทำงานจะอธิบายในบทที่ 3 ซึ่งจะนำเสนอโครงสร้างของเครื่องเชื่อมไฟฟ้ารวมไปถึงวงจรภาคต่างๆด้วย เครื่องเชื่อมไฟฟ้าเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญในขบวนการเชื่อมเป็นตัวกำเนิดพลังงาน โดยผลิตกระแสไฟเชื่อมและแรงดันออกมา ถ้าพิจารณาลักษณะพื้นฐานแล้วเครื่องเชื่อมสามารถแบ่งออกได้ 2 ชนิด คือ เครื่องเชื่อมชนิดกระแสคงที่ (CC) และเครื่องเชื่อมชนิดแรงดันไฟฟ้าคงที่ (CV) ความแตกต่างนี้พิจารณาจากคุณลักษณะของ Volt Ampere Curves ซึ่งได้จากการกำหนดจุดระหว่างกระแสเชื่อมกับแรงดันในขณะทำการเชื่อม เครื่องเชื่อมชนิดกระแสคงที่ (CC) เป็นระบบที่ใช้กับเครื่องเชื่อมธรรมดาลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ เครื่องเชื่อมทิก เครื่องคาร์บอนอาร์ค เครื่องเซาะร่อง เครื่องเชื่อมชนิดนี้จะมีแรงดันสูงสุดเมื่อไม่มีกระแสและแรงดันที่ต่ำ เมื่อกระแสเชื่อมเพิ่มขึ้นสูง ในสภาวะการเชื่อมปกติจะมีแรงดันอาร์ค (Arc Voltage) ระหว่าง 20 – 40 โวลต์ ในขณะที่แรงดันของวงจรเปิด (Open Circuit Voltage) อยู่ระหว่าง 60 – 80 โวลต์ เครื่องเชื่อมระบบกระแสคงที่มีทั้งกระแสไฟตรงและกระไฟสลับรวมกัน

เครื่องเชื่อมชนิดแรงดันไฟฟ้าคงที่ (CV) เครื่องเชื่อมชนิดนี้จะให้แรงดันคงที่ จะไม่เปลี่ยนแปลงตามขนาดของกระแสเชื่อม สามารถใช้กับการเชื่อมแบบกึ่งอัตโนมัติ ที่ใช้ระบบการป้อนลวดแบบอัตโนมัติ และเครื่องเชื่อมแบบนี้จะผลิตเฉพาะกระแสไฟตรงเท่านั้น ซึ่งอาจจะเป็นแบบขับด้วยมอเตอร์ไฟฟ้า หรือ เครื่องยนต์ หรือ แบบหม้อแปลง แบบเรียงกระแส งานเชื่อมไฟฟ้าเป็นการเชื่อมหลอมเหลว หมายถึง การประสานโลหะตั้งแต่ 2 แผ่น ขึ้นไปให้ติดกัน โดยมีความร้อนที่เกิดจากการอาร์คของไฟฟ้าความร้อนจะทำให้ชิ้นงานละลายในขณะเดียวกันลวดเชื่อมก็จะละลายเป็นสารเติมรอยเชื่อมลงไปทำให้ชิ้นงานประสานติดกัน ความร้อนที่เกิดจากการอาร์คจะสูงถึง 4,000 °C ฟลักซ์ที่หุ้มลวดเชื่อมจะละลายเป็นสแลคห่อหุ้มรอยเชื่อมไว้

2.3 กระบวนการเชื่อม

กระบวนการเชื่อมโลหะด้วยมือ (MMAW : Manual Metal Arc Welding หรือ SMAW: Shield Metal Arc Welding) คือ การเชื่อมโลหะด้วยมือ โดยใช้ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์หรือเป็นกระบวนการต่อโลหะให้ติดกันโดยใช้ความร้อนที่เกิดจากการอาร์คระหว่างลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Electrode) กับชิ้นงาน ซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นที่ปลายลวดเชื่อมมีอุณหภูมิประมาณ 5,000 – 6,000 องศาเซลเซียส เพื่อหลอมละลายโลหะให้ติดกัน โดยแกนของลวดเชื่อมทำหน้าที่เป็นตัวนำไฟฟ้าและเป็นโลหะเติมลงในแนวเชื่อมส่วนฟลักซ์ที่หุ้มลวดเชื่อมจะได้รับความร้อนและหลอมละลายปกคลุมแนวเชื่อมเอาไว้ เพื่อป้องกันอากาศภายนอกเข้าทำปฏิกิริยากับแนวเชื่อมพร้อมทั้งช่วยลด

อัตราการเย็นตัวของแนวเชื่อมเมื่อเย็นตัวลงฟลักซ์จะแข็งและเปราะเหมือนแก้วเรียกว่า สแลค (Slag) กระบวนการเชื่อมโลหะด้วยมือที่จะกล่าวถึงต่อไปนี้ คือ การเชื่อมโลหะด้วยมือโดยใช้ลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ (Shield Metal Arc Welding) หรือที่เรียกว่าการเชื่อมด้วยธูปเชื่อมเป็นกระบวนการเชื่อมที่ใช้กันอย่าง แพร่หลายเนื่องจากต้นทุนต่ำ งานที่เชื่อมด้วยกระบวนการนี้ได้แก่ ท่อส่งแก๊สท่อส่งน้ำมัน งานโครงสร้าง งานช่างกลเกษตร และงานอื่นๆอีกข้อดีของกระบวนการเชื่อมแบบนี้คือสามารถเชื่อมได้ทั้งโลหะที่เป็นเหล็กและไม่ใช่เหล็กที่มีความหนาตั้งแต่ 1.2 มม. ขึ้นไปและสามารถเชื่อมได้ทุกท่าเชื่อม

ข้อดีของการเชื่อมโลหะด้วยมือ

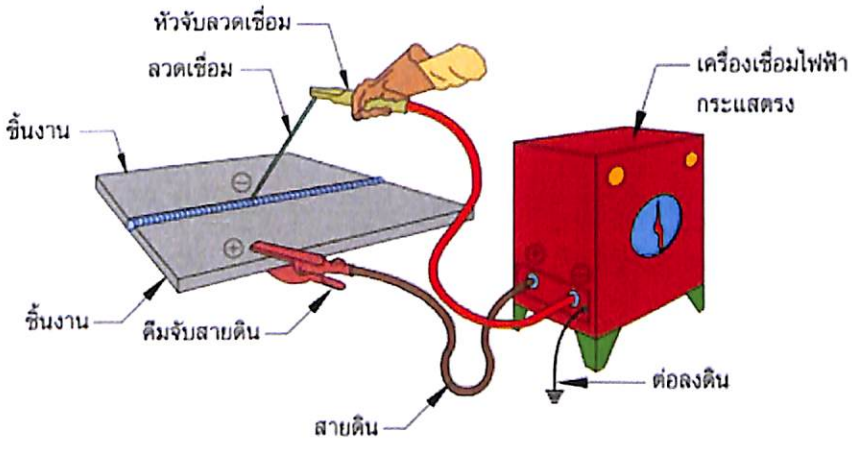
1. สามารถป้องกันการรั่วไหลของแก๊ส น้ำมัน ของเหลวและอากาศได้ดี
2. งานมีคุณภาพสูงคงทนและสวยงาม
3. โครงสร้างของงานที่ไม่ยุ่งยาก
4. ลดเสียงดังขณะทำงาน
5. ลดขั้นตอนการทำงาน
6. ค่าใช้จ่ายในการปฏิบัติงานและเตรียมการค่อนข้างต่ำ

ข้อเสียของการเชื่อมโลหะด้วยมือ

1. ชิ้นส่วนของงานเชื่อมมีความไวต่อการเกิดความเค้นเฉพาะที่
2. การควบคุมคุณภาพจะต้องตรวจสอบทุกขั้นตอน
3. ทำให้เกิดความเค้นตกค้างอยู่ในวัสดุงานเชื่อม
4. ทำให้คุณสมบัติของโลหะงานเชื่อมเปลี่ยนแปลง
5. ชิ้นงานบิดตัวและหดตัว

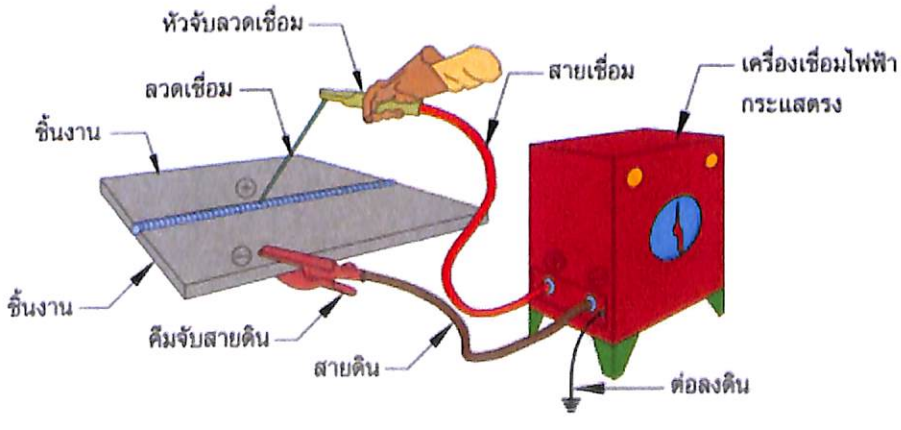
2.4 กระแสเชื่อม (Welding Current)

กระแสเชื่อมชนิดกระแสตรง เป็นกระแสที่มีอิเลคตรอนเคลื่อนที่ในทิศทางตามยาวของตัวนำไปในทิศทางเดียวกันเท่านั้น ซึ่งการเคลื่อนที่ของอิเลคตรอนนั้นเปรียบเสมือนน้ำประปาที่ไหลในท่อ แต่กระแสไฟฟ้าตรงจะไหลจากขั้วหนึ่งไปตลอด วงจรการเชื่อมโลหะด้วยลวดเชื่อมหุ้มฟลักซ์ไฟฟ้ากระแสตรง ต่อขั้วลบ หรือเรียกว่า DCEN (Direct Current Electrode Negative : DC -) ดังรูปที่ 2.3



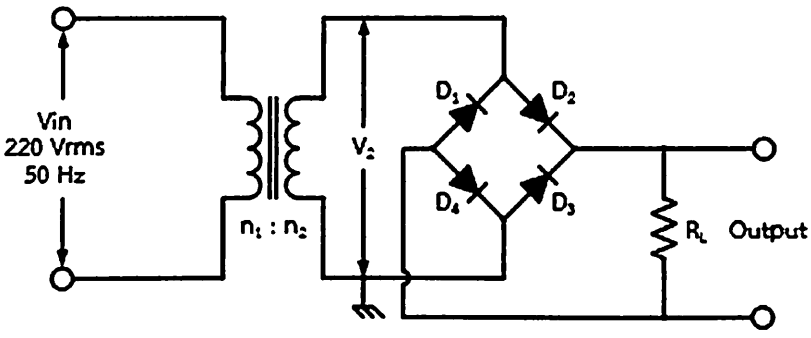
รูปที่ 2.3 ไฟฟ้ากระแสตรง ต่อขั้วลบ (Jefferson's, 1997)

วงจรเชื่อมที่มีลวดเชื่อมเป็นขั้วลบ (-) และชิ้นงานเชื่อมเป็นขั้วบวก (+) อิเลคตรอนจะวิ่งจากลวดเชื่อม เข้าหาชิ้นงาน จึงทาให้ชิ้นงานมีความร้อนเกิดขึ้นประมาณ 2 ใน 3 ของความร้อนที่เกิดจากการอาร์คทั้งหมดและยังให้การซึมลึกดีอีกด้วย จึงเหมาะสาหรับการเชื่อมด้วยลวดเชื่อมเปลือยกระแสไฟตรงขั้วบวกหรือเรียกย่อว่า DCEP (Direct Current Electrode Positive : DC +) ดังรูปที่ 2.4



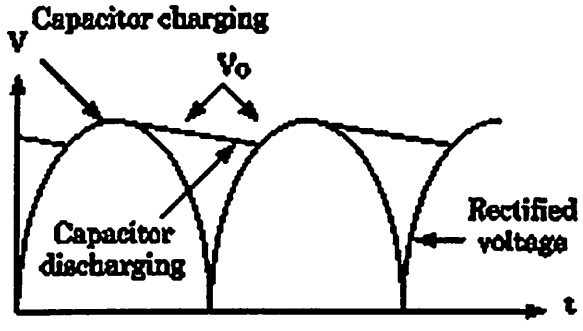
รูปที่ 2.4 ไฟฟ้ากระแสตรง ต่อขั้วบวก (Jefferson's, 1997)

2.5 วงจรเรียงกระแส



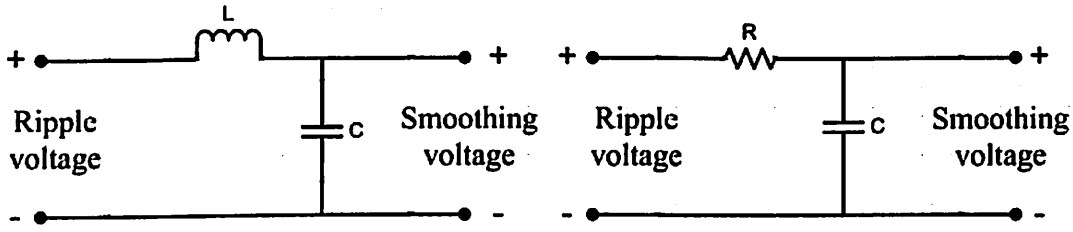
รูปที่ 2.5 วงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น (Electronics Pocket Book, 2014)

หลักการทำงานในการกรองริปเปิ้ลของตัวเก็บประจุ คือ ในช่วงขาขึ้นของแรงดันตัวเก็บประจุจะเริ่มเก็บประจุไฟฟ้า และเมื่อแรงดันอินพุทจากวงจรเรียงกระแสเริ่มลดลง ตัวเก็บประจุก็จะทำการคายประจุออกมาอย่างช้าๆ จนเมื่อแรงดันจากการเรียงกระแสในอีกฝั่งหนึ่งของไฟฟ้ากระแสสลับเข้ามา ตัวเก็บประจุก็จะกลับมาประจุแรงดันอีกครั้งหนึ่งและทำงานอย่างนี้ไปตลอดเวลา ซึ่งช่วงเวลาของการคายประจุออกจะช้ากว่าช่วงเวลาในการเปลี่ยนแปลงแรงดัน ดังนั้นจึงทำให้แรงดันที่ตกคร่อมตัวเก็บประจุหรือแรงดันเอาท์พุทมีความเป็นเส้นตรงมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 2.6

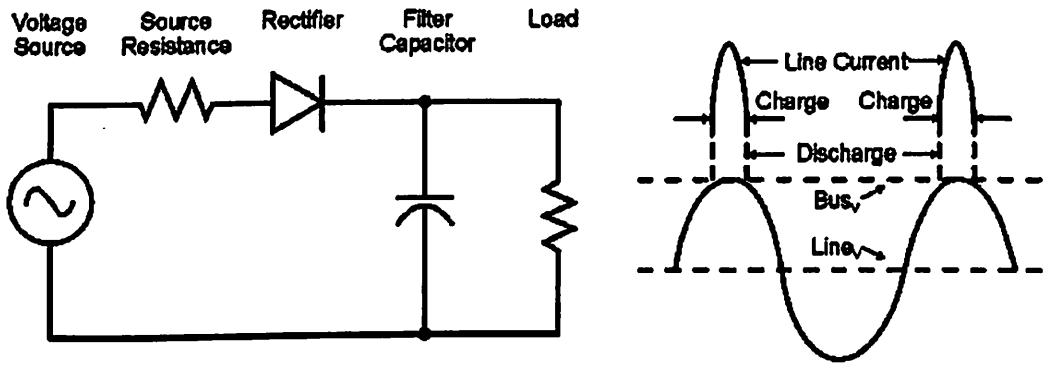


รูปที่ 2.6 แรงดันทางด้านเอาท์พุท (Electronics Pocket Book, 2014)

นอกจากตัวเก็บประจุแล้วยังสามารถเพิ่มตัวเหนี่ยวนำและตัวต้านทาน เข้ามาช่วยในการกรองแรงดันได้ด้วยดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งค่าความเหนี่ยวนำของตัวเหนี่ยวนำจะสร้างอิมพีแดนซ์ขึ้นมาต้านกระแสสลับของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไดโอด และในขณะเดียวกันก็ยอมให้กระแสตรงของกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านไดโอดได้ ดังนั้นจึงทำให้แรงดันเอาท์พุทมีความเรียบมากขึ้น อย่างไรก็ตามการใช้ตัวเหนี่ยวนำเพื่อกรองแรงดันเพียงอย่างเดียวไม่สามารถกำจัดริปเปิ้ลหมดไปได้ นอกจากนี้ยังทำให้แรงดันเอาท์พุทมีค่าลดลงแต่สามารถแก้ปัญหาได้โดยต่อตัวเก็บประจุเพิ่มเข้าไปดังแสดงในรูปที่ 2.7 การใช้ตัวเหนี่ยวนำมีความยุ่งในการใช้งาน ดังนั้นจึงมีการใช้ตัวต้านทานมาทดแทนดังแสดงในรูปที่ 2.7 อย่างไรก็ตาม ข้อเสียของใช้ตัวต้านทาน คือ ไม่สามารถจ่ายกระแสในระดับสูงได้เพราะจะทำให้เกิดความร้อนสะสมจำนวนมากที่ตัวต้านทานจนอาจทำให้ตัวต้านทานไหม้เสียหายได้



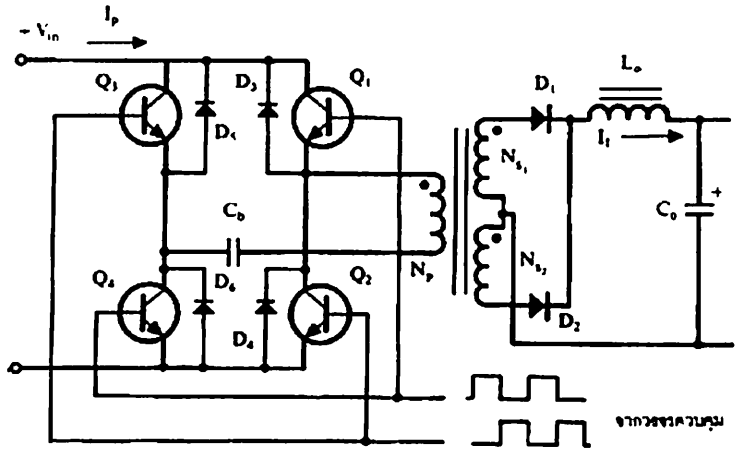
รูปที่ 2.7 การใช้ตัวเหนี่ยวนำและการใช้ตัวต้านทาน



รูปที่ 2.8 การเก็บประจุและคายประจุของคาปาซิเตอร์

ผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการเก็บประจุและคายประจุของคาปาซิเตอร์ทำให้เกิดกระแสฮาร์-มอนิกไหลเข้าสู่ระบบ

2.6 วงจรคอนเวอเตอร์



รูปที่ 2.9 วงจร Full Bridge Converter

จากรูปที่ 2.9 ประกอบด้วยทรานซิสเตอร์สองชุด ชุดที่หนึ่ง (Q1 และ Q4) จะทำงานตรงกันข้ามกับชุดที่สอง (Q3 และ Q2) และทรานซิสเตอร์ในแต่ละชุดจะยังคงทำงานในจังหวะเดียวกัน ผลการปิด-เปิดวงจรของทรานซิสเตอร์ทั้งสองชุดทำให้แรงดันหม้อแปลงด้านปฐมภูมิ มีค่าระหว่าง +Vin กับ -Vin ดังนั้นแรงดันตกคร่อมทรานซิสเตอร์ ขณะเปิดวงจรก็จะไม่มีทางเกินกว่า Vin อย่างแน่นอน และกระแสคอลเลคเตอร์ที่ไหลผ่านทรานซิสเตอร์ขณะปิดวงจรก็จะลดลงครึ่งหนึ่ง เมื่อเทียบกับ Half Bridge Converter ด้วย ดังนั้น Full Bridge Converter จึงจำเป็นต้องใช้ทรานซิสเตอร์ถึงสี่ตัวและใช้วงจรขับเบสที่มีระบบแยกกราวด์ เพื่อขับเบสของทรานซิสเตอร์แต่ละชุด สมมติประสิทธิภาพของ Converter ชนิดนี้เท่ากับ 80 เปอร์เซนต์ และมีดิวตี้ไซเคิล 0.8 ดังนั้น เนื่องจาก Full Bridge Converter นั้นพัฒนามาจาก Half Bridge Converter ดังนั้นสูตรที่ใช้ในการคำนวณหาค่าต่างๆของอุปกรณ์ที่จำเป็น จึงสามารถใช้สูตรการคำนวณเดียวกันได้ คอนเวอร์เตอร์นับว่าเป็นส่วนสำคัญที่สุดในสวิตชิ่งเพาเวอร์ซัพพลาย มีหน้าที่ลดทอนแรงดันไฟตรงค่าสูงลงมาเป็นแรงดันไฟตรงค่าต่ำ และสามารถคงค่าแรงดันได้ คอนเวอร์เตอร์มีหลายแบบขึ้นอยู่กับลักษณะการจัดวงจรภายใน โดยคอนเวอร์เตอร์แต่ละแบบจะมีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป การจะเลือกใช้คอนเวอร์-เตอร์แบบใดสำหรับสวิตชิ่งเพาเวอร์ซัพพลายนั้นมีข้อควรพิจารณาจากลักษณะพื้นฐานของคอน-เวอร์เตอร์แต่ละแบบดังนี้คือ

- ลักษณะการแยกกันทางไฟฟ้าระหว่างอินพุทกับเอาท์พุทของคอนเวอร์เตอร์
- ค่าแรงดันอินพุทที่จะนำมาใช้กับคอนเวอร์เตอร์
- ค่ากระแสสูงสุดที่ไหลผ่านเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ในคอนเวอร์เตอร์ขณะทำงาน
- ค่าแรงดันสูงสุดที่ตกคร่อมเพาเวอร์ทรานซิสเตอร์ในคอนเวอร์เตอร์ขณะทำงาน
- การรักษาระดับแรงดันในกรณีที่คอนเวอร์เตอร์มีเอาท์พุทหลายค่าแรงดัน
- การกำเนิดสัญญาณรบกวน RFI/EMI ของคอนเวอร์เตอร์

จากข้อพิจารณาดังกล่าวจะทำให้ผู้ออกแบบทราบขีดจำกัดของคอนเวอร์เตอร์และตัดสินใจเลือกใช้คอนเวอร์เตอร์แบบใดปัจจุบันได้มีการพัฒนาคอนเวอร์เตอร์ในรูปแบบต่างๆ ขึ้นมา

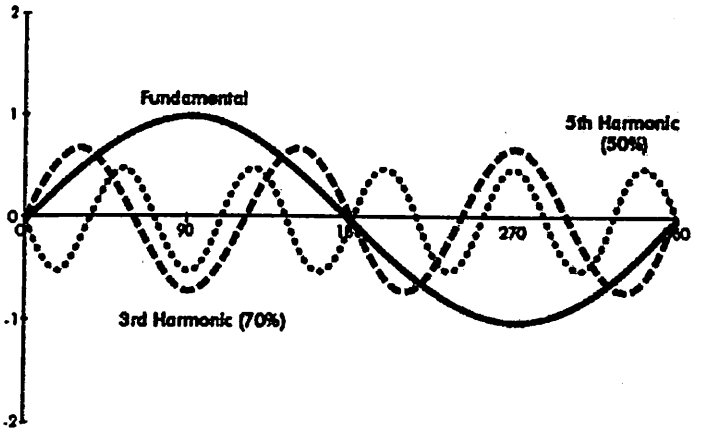
2.7 ทฤษฎีฮาร์มอนิก (Harmonic)

ในปัจจุบันการไฟฟ้าหรือผู้ใช้ไฟฟ้าได้ให้ความสำคัญกับคุณภาพไฟฟ้ามากขึ้น เนื่องจากในระบบไฟฟ้าและโดยเฉพาะในกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรม ได้มีการใช้อุปกรณ์ที่มีเทคโนโลยีสูงกว่าเดิมในอดีต ซึ่งคุณลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ดังกล่าวจะไวต่อการเปลี่ยนแปลงต่อกระแสและแรงดัน คือถ้ามีขนาดและรูปร่างผิดเพี้ยนไปจากสภาพการจ่ายไฟปกติ อาจจะทำให้อุปกรณ์มีการทำงานผิดพลาดหรือเกิดการชำรุดเสียหายขึ้นได้ ซึ่งเป็นปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่ต้องมีการป้องกันและแก้ไข โดยสาเหตุหลักที่ทำให้กระแสและแรงดันในระบบไฟฟ้ามีขนาดและรูปร่างผิดเพี้ยนไปจากสภาพการจ่ายไฟปกติ สาเหตุเกิดจากฮาร์มอนิกที่มีอยู่ในระบบไฟฟ้า ซึ่งเนื่องจากปัจจุบันโรงงานอุตสาหกรรมและอาคารพาณิชย์มีการใช้อุปกรณ์สมัยใหม่เทคโนโลยีสูงที่ทำจากอุปกรณ์ทางด้านโซลิดสเตท เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมกระบวนการผลิตให้มีคุณภาพและได้ปริมาณตามที่ต้องการ อีกทั้งในอนาคตจะมีแนวโน้มการใช้มากขึ้นเรื่อยๆ โดยส่วนใหญ่เป็นอุปกรณ์ที่มีการทำงานแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non Liner Load) ซึ่งเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก เช่น คอนเวอร์เตอร์ (Converter) ตัวเรียงกระแสกำลัง (Power – Rectifier) และชุดขับเคลื่อนปรับความเร็ว (Adjustable Speed Drive) เป็นต้นฯ ด้วยผลของการใช้อุปกรณ์ที่มีการทำงานแบบไม่เป็นเชิงเส้น อุปกรณ์ดังกล่าวจะจ่ายกระแสฮาร์มอนิกเข้าสู่ระบบไฟฟ้าภายในของผู้ใช้ไฟเอง หรือถ้า

เป็นอุปกรณ์ที่มีพิกัดขนาดใหญ่ กระแสฮาร์มอนิกนั้นอาจไหลเข้าสู่ระบบไฟฟ้าอื่นในบริเวณข้างเคียง จากผลกระทบของฮาร์มอนิกทำให้กระแสและแรงดันในระบบมีขนาดและรูปร่างผิดเพี้ยน (Distortion) ไปจากสภาพการจ่ายไฟปกติ ซึ่งเป็นผลทำให้อุปกรณ์มีการทำงานผิดพลาดหรือเกิดการชำรุดเสียหายได้ และเพื่อเป็นการเตรียมพร้อมสำหรับการป้องกันและแก้ไขปัญหาดังกล่าวที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า จะกล่าวถึงความเข้าใจเบื้องต้นและภาพโดยรวมทั่วไปของฮาร์-มอนิก แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก และผลกระทบที่เกิดจากปัญหาฮาร์มอนิก เพื่อเป็นความเข้าใจเบื้องต้น ก่อนที่จะศึกษาและทำการวิเคราะห์แก้ไขปัญหาฮาร์มอนิกขั้นต่อไปซึ่งเป็นส่วนหนึ่งที่จะช่วยทำให้ระบบไฟฟ้ามีคุณภาพยิ่งขึ้น

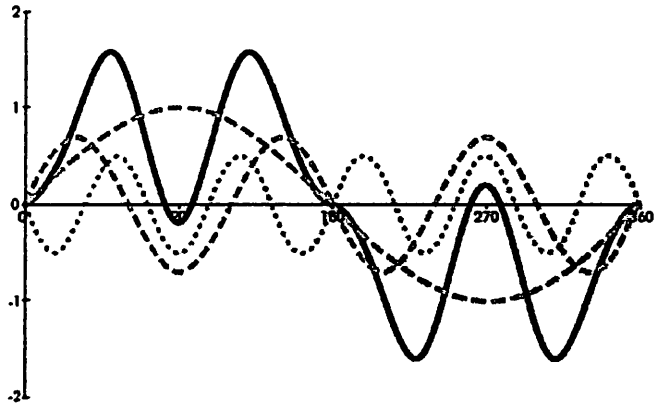
2.7.1 คำนิยามของฮาร์มอนิก

ฮาร์มอนิก (Harmonic) คือ ส่วนประกอบในรูปสัญญาณคลื่นไซน์ (Sine Wave) ของสัญญาณหรือปริมาณเป็นคาบใดๆ ซึ่งมีความถี่เป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่หลักมูล (Fundamental Frequency ในระบบไฟฟ้า เรามีค่าเท่ากับ 50 Hz) เช่น ฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 มีค่าความถี่เป็น 150 Hz และฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 มีค่าความถี่เป็น 250 Hz แสดงดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ

และผลของฮาร์มอนิกเมื่อรวมกันกับสัญญาณความถี่หลักมูลด้วยทางขนาด (Amplitude) และมุมเฟส (Phase Angle) ทำให้สัญญาณที่เกิดขึ้นมีขนาดเปลี่ยนไปและมีรูปสัญญาณเพี้ยนไปจากสัญญาณคลื่นไซน์ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 ฮาร์มอนิกลำดับที่มุมต่างๆทำให้สัญญาณไซน์มีรูปร่างผิดเพี้ยน

ในทางคณิตศาสตร์สามารถใช้อนุกรมฟูเรียร์อธิบายคุณลักษณะของฮาร์มอนิกได้โดย สัญญาณหรือฟังก์ชัน ที่เป็นคาบใดๆสามารถกระจายให้อยู่ในรูปผลรวมของฟังก์ชันตรีโกณมิติที่ความถี่ต่างๆเป็นฟังก์ชันคาบที่เขียนแทนด้วย $f(t)$ ดังสมการที่ 1

$$f(t) = a_0 + \sum_{n-1}^{\infty} a_n \cos(n\omega_0 t) + \sum_{n-1}^{\infty} b_n \sin(n\omega_0 t) \qquad (1)$$

โดยที่ a_0 คือ องค์ประกอบไฟฟ้ากระแสตรง ของสัญญาณ X(t)

$$a_0 = \frac{1}{T}\int f(t)dt \qquad (2)$$

โดยที่ a_n และ b_n คือ สัมประสิทธิ์ของอนุกรมฟูเรียร์

$$a_n = \frac{2}{T}\int f(t)\cos n\omega_0 t.dt \qquad (3)$$

$$b_n = \frac{2}{T}\int f(t)\sin n\omega_0 t.dt \qquad (4)$$

2.7.2 ค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิกรวม

มาตรฐาน IEC และ IEEE ใช้ค่าความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิก : %THD (Total Harmonic Distortion) เป็นค่าบอกระดับความผิดเพี้ยนฮาร์มอนิก โดยเทียบจากอัตราส่วนระหว่างค่ารากที่

สองของผลบวกกำลังสองของส่วนประกอบฮาร์มอนิก กับค่าของส่วนประกอบความถี่หลักมูลเทียบเป็นร้อยละ ซึ่งจะแยกออกเป็น ค่าความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวม และค่าความผิดเพี้ยนแรงดันฮาร์มอนิกรวม

ค่าความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวม (Total Harmonic Current Distortion: THD_i)

$$THD_i(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_{h(rms)}^2}}{I_{1(rms)}} x100\% \qquad (5)$$

ค่าความผิดเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกรวม (Total Harmonic Voltage Distortion:THD_v)

$$THD_v(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_{h(rms)}^2}}{V_{1(rms)}} x100\% \qquad (6)$$

ความสัมพันธ์ของ $\%THD_i$ $\%THD_v$ และ MVASC

ในบางครั้งค่าของ $\%THD_i$ ที่มีค่าสูงๆในระบบไฟฟ้า ระบบไฟฟ้านั้นอาจจะไม่เกิดผลกระทบจากปัญหาฮาร์มอนิกได้เพราะค่า $\%THD_i$ จะเป็นเพียงค่าที่บอกถึงคุณลักษณะของกระแสฮาร์มอนิกของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นแต่ละชนิด แต่ไม่สามารถที่จะบอกถึงความรุนแรงของระดับฮาร์มอนิกได้อย่างสมบูรณ์ ดังในกรณีขนาดพิกัด กำลังของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นชนิดหนึ่งตัวเดียวกัน ที่ค่าพิกัดกำลังมากหรือน้อย ค่า $\%THD_i$ ของโหลดดังกล่าวก็จะเป็นค่าเดียวกัน แต่ระดับความรุนแรงที่ทำให้เกิดปัญหาฮาร์มอนิกจะไม่เท่ากัน ดังนั้นถ้าเราจะพิจารณาค่าของ $\%THD_i$ ควรจะพิจารณาถึงพิกัดกำลังของโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นประกอบกันด้วย ซึ่งค่าความเพี้ยนกระแสฮาร์มอนิกจะมีค่าเป็นแอมป์ THD_i เราสามารถที่จะพิจารณาถึงระดับความรุนแรงของปัญหาฮาร์มอนิกในระดับหนึ่งได้ ส่วนค่า $\%THD_v$ นั้นสามารถที่บอกถึงระดับความรุนแรงของปัญหาฮาร์มอนิกในระบบได้ซึ่งจะต่างจากค่า $\%THD_i$ โดยจะอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกและค่าพิกัดลังวงจรของระบบ (MVASC)

2.7.3 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก

จากที่กล่าวมาโดยภาวะปกติ การไฟฟ้าจะจ่ายแรงดันไฟฟ้าที่เป็นรูปสัญญาณคลื่นไซน์ให้กับโหลดประเภทต่างๆของผู้ใช้ไฟ แต่ในกรณีในระบบไฟฟ้าที่ผู้ใช้ไฟบางรายมีโหลดประเภทไม่เป็นเชิงเส้น (Non Linear Load) ซึ่งโหลดดังกล่าวเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก กระแสฮาร์-มอนิกนั้นจะไหลเข้าสู่ระบบของผู้ใช้ไฟเองและระบบไฟฟ้าข้างเคียง ผลของกระแสฮาร์มอนิกจะทำให้เกิดแรงดันในระบบไฟฟ้าผิดเพี้ยนไปจากรูปคลื่นไซน์ ค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันจะมากหรือน้อยนั้น ขึ้นอยู่กับค่าอิมพีแดนซ์ของระบบและขนาดของกระแสฮาร์มอนิกที่ความถี่ต่างๆ ด้วย ผลของกระแสฮาร์มอนิกไหลเข้าสู่ระบบใกล้เคียง อาจไปรบกวนการทำงานหรือสร้างความเสียหายแก่อุปกรณ์ของผู้ใช้ไฟรายอื่นๆ และอุปกรณ์ในระบบของการไฟฟ้าได้ ดังนั้นมีความเป็นที่จะต้องทราบว่าโหลดที่อยู่ในอาคารหรือโรงงานอุตสาหกรรมเรานั้น มีโหลดที่เป็นแหล่ง จ่ายฮาร์มอนิกหรือไม่ และโหลดประเภทใดเป็นโหลดที่เป็นแหล่งจ่ายฮาร์มอนิก เพื่อที่ทำความใจก่อนที่จะทำการแก้ไขและป้องกันปัญหาที่อาจเกิดขึ้นจากฮาร์มอนิกต่อไป สามารถแบ่งแหล่งกำเนิดฮาร์มอ-นิกตามคุณลักษณะการทำงานของอุปกรณ์ได้ดังต่อไปนี้

1. อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีทั่วไปในบ้านพักสำนักงาน ส่วนใหญ่เป็นชนิด 1 เฟส

    - อุปกรณ์ที่มีการใช้แหล่งจ่ายกำลังแบบสวิทซ์ชิ่ง (Switch Mode Power Supply : SMPS) เช่น เครื่องคอมพิวเตอร์ (Computer)

    - บาลาสต์อิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Ballast)

2. อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม

    - ตัวเรียงกระแสกำลัง (Power Rectifier)

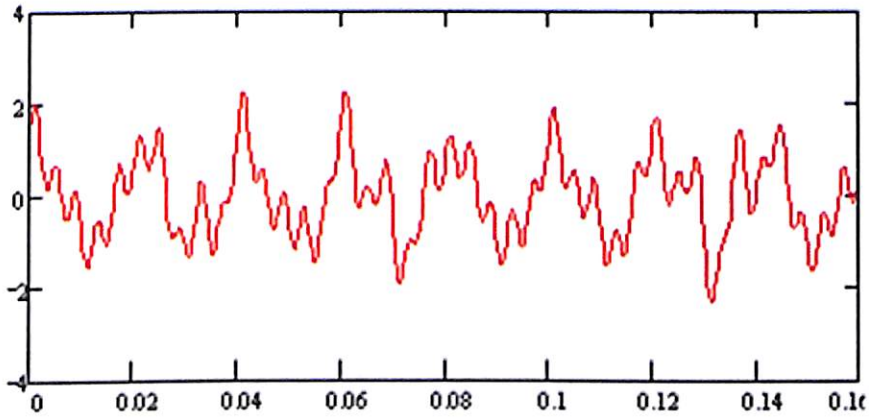
    - เครื่องแปลงผันกำลังแบบสถิต (Static Power Converter :SPC)

    - ตัวโปรแกรมเมเบิ้ลลอจิกคอนโทรลเลอร์ (Programmable Logic Controller : PLC)

    - ชุดขับเคลื่อนปรับความเร็วได้ (Adjustable Speed Drive : ASD)

3. อุปกรณ์ที่มีการทำงานประเภทอาร์ค

- เตาหลอมแบบอาร์ค (Arc Furnace)
- เตาหลอมแบบเหนี่ยวนำ (Induction Furnace)
- เครื่องเชื่อมแบบอาร์ค/แบบสปอต (Arc Welding / Spot Welding)



รูปที่ 2.12 ฮาร์มอนิกที่เกิดจากอุปกรณ์ที่มีการทำงานประเภทอาร์ค (ศักดิ์ชัย นรสิงห์, 2545)

4. อุปกรณ์ที่มีความสัมพันธ์ไม่เป็นเชิงเส้นของแรงดันและกระแส เนื่องจากการอิ่มตัวของแกนเหล็กทางแม่เหล็กไฟฟ้า เช่น หม้อแปลงไฟฟ้าและเครื่องกลไฟฟ้า

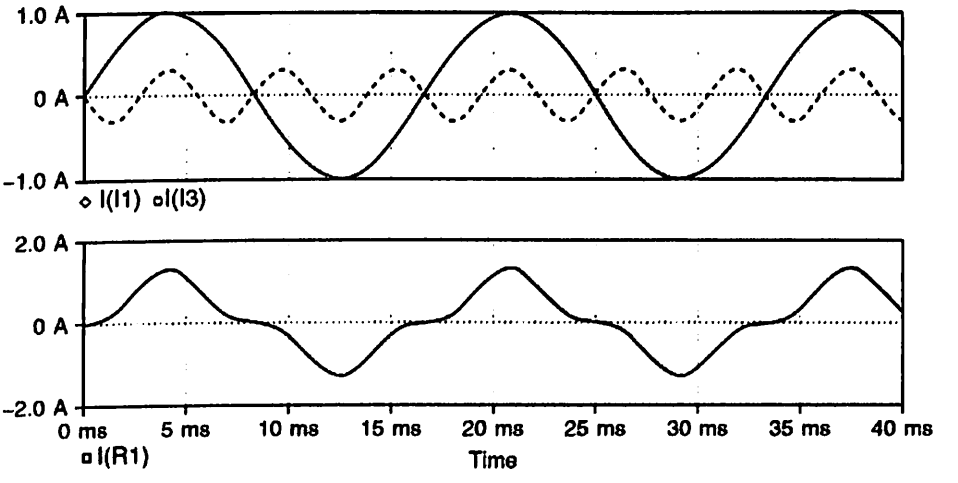
2.7.4 ปัญหาฮาร์มอนิก (Harmonic Problem)

ฮาร์มอนิก (Harmonic) สำหรับงานคุณภาพกำลังงานไฟฟ้า สามารถอธิบายได้อย่างง่ายคือ ค่าความถี่ที่ไม่ต้องการให้มีหรือเกิดขึ้นในระบบไฟฟ้า ไม่ว่าจะเป็นแรงดันหรือกระแสไฟฟ้าสำหรับประเทศไทยความถี่ของการผลิตและส่งจ่ายกระแสไฟฟ้าคือ 50 Hz (50Hz คือความถี่ฐานหรือฮาร์-มอนิก (Harmonic) ลำดับที่ 1 : Fundamental Frequency or 1st Order Harmonic) ดังนั้นความถี่ของแรงดันและกระแสไฟฟ้า นอกจากความถี่ 50 Hz นี้เป็นสิ่งที่ไม่ต้องการให้เกิดขึ้น โดยทั่วไปความถี่ที่ไม่ต้องการนี้จะเกิดขึ้นเป็นจำนวนเท่าของความถี่ 50 Hz แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ค่าฮาร์มอนิกลำดับต่างๆ

ความถี่มูลฐาน	จำนวนเท่าของความถี่มูลฐาน	ความถี่ฮาร์มอนิก	ฮาร์มอนิกลำดับที่
50 Hz	1	50 Hz	1
50 Hz	2	100 Hz	2
50 Hz	3	150 Hz	3
50 Hz	4	200 Hz	4
50 Hz	5	250 Hz	5

จากรูปที่ 2.13 แสดงตัวอย่างรูปคลื่นที่เกิดขึ้นจากการรวมตัวหรือบวกกันจากฮาร์มอนิกลำดับที่ 1 และ 3 ซึ่งผลที่ได้จะสังเกตได้ว่าจะมีความผิดเพี้ยนจากรูปคลื่นไซน์พื้นฐานอย่างชัดเจน ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้กับแรงดันและกระแสไฟฟ้าในระบบ ที่มีโหลดอิเล็กทรอนิกส์เป็นจำนวนมาก ดังที่กล่าวไปแล้ว โดยอุปกรณ์ไฟฟ้าหรือเครื่องจักรแต่ละชนิด จะมีคุณสมบัติทำให้เกิดฮาร์มอนิกต่างๆกัน และขนาดความรุนแรงของปัญหาฮาร์มอนิกโดยทั่วไปนิยามจากค่าเปอร์เซ็นต์ความเพี้ยนเชิงฮาร์มอนิก รวม (%Total Harmonics Distortion: %THD) ซึ่งเป็นค่าที่บอกถึงปริมาณผลรวมฮาร์-มอนิก ลำดับที่ 2 ขึ้นไปเทียบกับลำดับที่ 1 (THD = 0% หมายความว่าเป็นรูปคลื่นไซน์ที่ต้องการในอุดมคติ)



รูปที่ 2.13 ตัวอย่างรูปคลื่นที่เกิดฮาร์มอนิกลำดับที่ 1 และ 3 รวมกัน (Alexander Kusko, Sc.D., P.E. Marc T.Thompson, 2007)

ปัญหากระแสฮาร์มอนิก (Harmonic Current) ต่อระบบไฟฟ้ามีดังต่อไปนี้

1. ผลของกระแสฮาร์มอนิกทำให้กำลังงานสูญเสียของหม้อแปลงเพิ่มขึ้นทั้งจากลวดตัวนำและแกนแม่เหล็ก

2. ผลของกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลอยู่ในระบบทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียในสายตัวนำมากขึ้น เนื่องจากกระแสฮาร์มอนิกทำให้ค่ากระแสและความต้านทานของสายสูงขึ้น

3. ผลของกระแสฮาร์มอนิกทำให้เกิดกำลังงานสูญเสียในคาปาซิเตอร์แก้ค่าตัวประกอบกำลัง (Cap. Bank) และทำให้เกิดความร้อนสูงขึ้น

4. ผลของกระแสฮาร์มอนิก Triple n (ลำดับที่ 3,6,9..) จะรวมกันไหลอยู่ในสายนิวตรอนทำให้เกิดความร้อนสูง

5. ผลของฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์ทำให้อุปกรณ์ได้รับความเสียหายเนื่องจากได้รับกระแสและแรงดันเกินพิกัด

6. ผลของฮาร์มอนิกต่อเครื่องจักรไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งมอเตอร์และอุปกรณ์ที่มีการทำงานโดยใช้ผลของสนามแม่เหล็กทำให้กำลังงานสูญเสียเพิ่มขึ้นเป็นผลทำให้เครื่องจักรร้อนและมีอายุการใช้งานสั้นกว่าปกติ

7. ผลของฮาร์มอนิกทำให้รีเลย์และอุปกรณ์ป้องกันทางไฟฟ้าทำงานผิดพลาด

8. ผลของฮาร์มอนิกทำให้มิเตอร์วัดค่าไฟฟ้า (Watt - Hour Meter) ทำการวัดค่าผิดพลาดได้

9. ผลของฮาร์มอนิกทำให้เกิดสัญญาณรบกวน (Noise) ในระบบสื่อสารและอุปกรณ์อิเล็ก-ทรอนิกส์ทำงานผิดพลาด

ในการออกแบบและติดตั้งระบบไฟฟ้าภายในอาคารสำนักงานและโรงงานอุตสาหกรรมถ้าเป็นอาคารและโรงงานที่ถูกสร้างมาในระยะ 10 ถึง 20 ปีที่ผ่านมาส่วนใหญ่จะไม่ได้ถูกออกแบบมาสำหรับรองรับปัญหากระแสฮาร์มอนิก จากอุปกรณ์เครื่องจักรสมัยใหม่ที่ติดตั้งเพิ่มเติม (ในปัจจุบันถ้าในขั้นตอนการออกแบบไม่ได้ออกแบบเพื่อรองรับก็มีปัญหาเช่นเดียวกัน) โดยในระยะแรก

ขณะที่จำนวนหรือปริมาณอุปกรณ์และเครื่องจักรที่สร้างปัญหากระแสฮาร์มอนิกมีไม่มากในระบบ ปัญหาที่เกิดขึ้นคือความร้อนสะสมที่อุปกรณ์ที่กระแสฮาร์มอนิกไหลผ่านจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เช่น หม้อแปลง สายไฟและอุปกรณ์ภายในตู้ MDB โดยที่ผู้รับผิดชอบด้านไฟฟ้าอาจจะยังไม่สังเกตได้ แต่เมื่อปริมาณกระแสฮาร์มอนิกในระบบมีมากขึ้นจะสร้างสิ่งผิดปกติที่สังเกตได้ดังนี้ สายนิวตรอนจะมีความร้อนสูง หม้อแปลงและตู้ MDB จะมีความร้อนสูงและมีเสียงสั่นครางคาปาซิเตอร์แก้ค่าตัวประกอบกำลังจะร้อนและเสียหายบ่อย อุปกรณ์ป้องกันในระบบ เช่น เบรกเกอร์และรีเลย์จะทำงานเองโดยไม่ทราบสาเหตุ นอกจากนั้นกระแสฮาร์มอนิก ยังเป็นสาเหตุหลักของแรงดันฮาร์มอนิกที่จุดต่อร่วมและสร้างปัญหาให้กับอุปกรณ์และเครื่องจักรในระบบไฟฟ้า

ปัญหาแรงดันฮาร์มอนิก ต่อระบบไฟฟ้ามีดังต่อไปนี้

1. ทำให้กระแสไฟฟ้าที่จ่ายออกจากจุดต่อร่วมมีส่วนประกอบฮาร์มอนิก ออกไปแม้ว่าโหลดที่นำมาต่อมีคุณสมบัติเชิงเส้น

2. ถ้ามีแรงดันฮาร์มอนิก ในลำดับที่ 5 และ 11 ซึ่งเป็นเนกาทีฟซีแควนซ์ จะทำให้มอเตอร์ที่ได้รับแรงดันนี้เข้าไปจะเกิดแรงหมุนในทิศทางกลับหรือต้านกับทิศทางการหมุนปกติทำให้มอเตอร์ร้อนเนื่องจากต้องใช้กำลังงานเพื่อต้านแรงนี้

3. อุปกรณ์ที่ทำงานโดยผลของสนามแม่เหล็ก เช่น บัลลาสต์แกนเหล็ก แม่เหล็กไฟฟ้า หม้อแปลงจะร้อนผิดปกติเนื่องจากผลของแรงดันฮาร์มอนิก ในลำดับที่ 5 และ 11 จะทำให้เกิดสนามแม่เหล็กต้านภายในแกนเหล็ก ทำให้ต้องการกระแสไฟฟ้าขาเข้าและใช้กำลังงานไฟฟ้ามากกว่าปกติ

4. เป็นสาเหตุของการเรโซแนนซ์ทางกลของมอเตอร์ทำให้มอเตอร์ทำงานสั่นอย่างผิดปกติ

5. เป็นสาเหตุให้อุปกรณ์ที่ต้องทำงานเข้าจังหวะ (Synchronization) กับความถี่สายกำลังเช่น เครื่องสำรองไฟฟ้า (UPS) สวิตช์ถ่ายโอนอัตโนมัติ (ATS) วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ไทริ-สเตอร์ชนิดควบคุมเฟส ระบบการสื่อสารข้อมูล ทำงานผิดพลาดได้

6. เป็นสาเหตุให้วงจรอิเล็กทรอนิกส์ คอมพิวเตอร์ทำงานผิดพลาดหรือเสียหายได้

7. ผลกระทบของฮาร์มอนิกที่มีต่อ Power Factor

โดยพื้นฐานความเข้าใจของวิศวกรไฟฟ้าทั่วไปนั้นค่า Power Factor หรือเรียกย่อๆว่า PF ที่นิยามจากค่า $\cos\theta_1$ ของมุมของกระแสและแรงดันที่ความถี่เดียวกันที่เกิดขึ้น ซึ่งความเข้าใจนี้ถูกต้องสำหรับแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่มีเฉพาะความถี่มูลฐานเท่านั้น (สำหรับประเทศไทยคือ 50 Hz) โดยไม่มีความถี่อื่นหรือฮาร์มอนิก ของแรงดันและกระแสมาปะปน เนื่องจากในปัจจุบันโหลดที่มีการใช้งานมีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น (Non Linear Load) ซึ่งทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลในระบบมีส่วนประกอบของกระแสฮาร์มอนิกในปริมาณมาก และเป็นสาเหตุหลักของความเพี้ยนฮาร์มอนิกในขณะเดียวกัน ดังนั้นการคำนวนค่า Power Factor ของระบบที่มีปริมาณฮาร์มอนิกในระดับสูงจึงไม่สามารถใช้เฉพาะค่า $\cos\theta_1$ มาระบุค่า Power Factor ได้ ในการประเมินค่า Power Factor ของระบบที่มีแรงดันและกระแสฮาร์มอนิก การระบุค่า Power Factor จะระบุในรูปของ Total Power Factor

$$\text{Total Power Factor} = \frac{P}{S_1}.\frac{1}{\sqrt{1+THD_i^2}\,x\sqrt{1+THD_v^2}} \qquad (7)$$

กรณีไม่มีแรงดันฮาร์มอนิก (THD_V=0) โดยมีเฉพาะกระแสฮาร์มอนิกในระบบ

$$\text{Total Power Factor} = \cos\theta_1.\frac{1}{\sqrt{1+THD_i^2}} \qquad (8)$$

โดยที่ $\cos\theta_1$ = Displacement Power Factor

$\frac{1}{\sqrt{1+THD_i^2}}$ = Distortion Power Factor

ในกรณีนี้สามารถแทน $\frac{P}{S_1}$ ด้วย $\cos\theta_1$ ได้ เราเรียกค่านี้ว่า Displacement Power Factor โดย θ_1 คือมุมที่เกิดขึ้นของ Fundamental Current หรือกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 1

8. ผลกระทบของฮาร์มอนิกที่มีผลต่ออุปกรณ์ในระบบไฟฟ้า

ปัญหาฮาร์มอนิกที่ทำให้เกิดผลกระทบต่ออุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าออกเป็น 2 กรณี คือ

- ทำให้อุปกรณ์ในระบบมีการทำงานผิดพลาดด้วยผลของค่าแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกที่มีขนาดและรูปคลื่นสัญญาณไซน์ผิดเพี้ยนไป

- ทำให้อุปกรณ์ในระบบมีอายุการใช้งานน้อยลงหรือเกิดการชำรุดเสียหาย เนื่องจากมีค่า rms ของแรงดันหรือกระแสสูงขึ้นที่เกิดจากค่าฮาร์มอนิกหรือมีการขยายของแรงดันและกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์

ปัญหาฮาร์มอนิกที่ส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ในระบบไฟฟ้าดังนี้คือ

1. ผลของฮาร์มอนิกเรโซแนนซ์เกิดขึ้นในกรณีที่ความถี่เรโซแนนซ์ของระบบไปตรงกับความถี่ฮาร์มอนิกทำให้เกิดการขยายขนาดของแรงดันและกระแสฮาร์มอนิก เป็นผลทำให้อุปกรณ์ได้รับความเสียหายเนื่องจากได้รับกระแสและแรงดันเกินพิกัด

2. ผลของกระแสฮาร์มอนิกที่ไหลอยู่ในระบบจำหน่ายและสายส่ง ทำให้เกิดค่ากำลังสูญเสียในสายมากขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพ การส่งจ่ายลดลง เนื่องจากกระแสฮาร์มอนิกทำให้ค่า rms ของกระแสและความต้านทานของสายสูงขึ้น

3. ผลของกระแสฮาร์มอนิก Triple n (ลำดับที่ 3,6,9..) จัดอยู่ในกลุ่มที่มีลำดับเป็นศูนย์ (Zero Sequence) ในระบบ 3 เฟส 4 สาย ฮาร์มอนิกกลุ่มนี้จะรวมกันกันไหลอยู่ในสายนิวตรอน อาจทำให้สายนิวตรอนหรือหม้อแปลงเสียหายได้หากไม่มีการออกแบบรองรับไว้

4. ผลของกระแสฮาร์มอนิกทำให้กำลังสูญเสียขณะมีโหลดและกำลังสูญเสียสเตรย์ฟลักซ์ (Stray Flux Loss) ของหม้อแปลงมีค่าเพิ่มขึ้น และทำให้ประสิทธิภาพการในรับโหลดของหม้อแปลงลดลงไป (Derating) ผลของแรงดันฮาร์มอนิกทำให้เกิดกำลังสูญเสียกระแสไหลวน (Eddy Current Loss) และกำลังสูญเสียฮิสเทอรีซีส (Hysteresis Loss) เพิ่มขึ้น

5. ผลของกระแสฮาร์มอนิกทำให้เกิดความร้อน และความเครียดไดอิเลคตริก (Dielectric Stress) กับตัวคาปาซิเตอร์ และอาจทำให้ฟิวส์ของตัวคาปาซิเตอร์ขาดง่ายกว่าการใช้งาน

ปกติ ผลของแรงดันฮาร์มอนิก ทำให้เกิดค่ากำลังสูญเสียในคาปาซิเตอร์ และผลจากภาวะเรโซแนนซ์ที่ตัวคาปาซิเตอร์ ทำให้เกิดขยายกระแสและแรงดันฮาร์มอนิกขนาดใหญ่ ดังนั้น เพื่อความปลอดภัยในการใช้งานของคาปาซิเตอร์สามารถทนต่อค่ากระแสและแรงดันฮาร์มอนิก คาปาซิเตอร์ที่ออกแบบสร้างจากผู้ผลิตได้กำหนดตามมาตรฐาน มาตรฐาน IEEE Std. 518-1992

6. ผลของกระแสฮาร์มอนิกทำให้เกิดความร้อนในตัวฟิวส์เพิ่มขึ้น ทำให้ลักษณะเวลา - กระแส (Time - Current Characteristic) ของฟิวส์เปลี่ยนไป กรณีที่มีฟอลต์ระดับต่ำเกิดขึ้นฟิวส์จะขาดก่อนในเวลาที่กำหนดหรือในกรณีที่ฟิวส์ขาดโดยไม่ทราบสาเหตุจะเป็นเหตุมาจากฮาร์มอนิกในกรณีที่เกิดภาวะเรโซแนนซ์ได้เช่นกัน

7. ผลของฮาร์มอนิกทำให้การทำงานของรีเลย์ผิดพลาด ซึ่งขึ้นอยู่กับคุณสมบัติการทำงานของชนิดรีเลย์ การทำงานของรีเลย์ชนิด Electromagnetic ขึ้นอยู่กับค่ากระแสและแรงดัน rms ส่วนการทำงานของรีเลย์ชนิด Digital ขึ้นอยู่กับค่าแรงดันยอดคลื่น (Crest Voltage) จากการ Sampling และตรวจค่า Zero Crossing ค่ากระแสหรือแรงดันที่ศูนย์ โดยลักษณะที่ทำให้รีเลย์ทำงานผิดพลาดดังนี้

   - ทำให้รีเลย์มีการทำงานช้าลง หรือทำงานด้วยค่า (Pickup Values) ที่สูง โดยปกติรีเลย์จะทำงานอย่างรวดเร็วและทำงานด้วยค่าเริ่มต่ำๆ

   - กรณีที่มีกระแสฮาร์มอนิก Triple n มากพอ อาจทำให้กราวด์รีเลย์ทำงานผิดพลาด (False Trip)

   - ทำให้รีเลย์ระยะทาง (Distance Relay) ทำงานผิดพลาดด้วยผลของกระแสฮาร์มอนิกที่ทำให้อิมพิแดนซ์เพิ่มขึ้นต่างจากค่าอิมพิแดนซ์ที่ทำการเซทติ้งที่ความถี่หลักมูล

   - ทำให้รีเลย์สถิตแบบความถี่ต่ำ (Static Underfrequency Relay) มีความไวกว่าปกติอาจทำให้เกิดการทริปผิดพลาด

- ทำให้รีเลย์กระแสและแรงดันเกิน (Overcurrent and Overvoltage Relay) ทำงานผิดพลาดตามคุณสมบัติที่ตั้งไว้

- ทำให้ความเร็วในการทำงานของรีเลย์ชนิดผลต่าง (Differential Relay) ทำงานช้าลง

8. ผลของกระแสฮาร์มอนิก มีผลกระทบต่อความสามารถในการตัดกระแส (Current-Interruption Capacity) ของอุปกรณ์สวิตช์เกียร์ คือทำให้ขนาดของอัตราค่ากระแสเทียบกับเวลา di / dt มีค่าสูงในขณะที่กระแสมีค่าเป็นศูนย์ เป็นผลทำให้เซอร์กิตเบรค-เกอร์ไม่สามารถตัดกระแสได้เมื่อมีฮาร์มอนิกซึ่งปัญหานี้จะเกิดกับอุปกรณ์อื่นๆที่ใช้ตัดกระแสได้เช่นกัน

9. ผลของฮาร์มอนิกทำให้มิเตอร์วัดค่าไฟฟ้า (Watt Hour Meter) ซึ่งเป็นมิเตอร์ประเภทจานเหนี่ยวนำ (Induction Disk) ทำการวัดค่าผิดพลาดได้ ซึ่งโดยปกติการปรับแต่งมิเตอร์นั้นจะทำการปรับแต่งที่ความถี่หลักมูล

10. ผลของฮาร์มอนิกต่อเครื่องจักรไฟฟ้าทำให้กำลังสูญเสียเพิ่มขึ้นเป็นผลทำให้เครื่องจักรร้อนกว่าปกติ ทำให้มอเตอร์เหนี่ยวนำสามเฟส เกิดปรากฏการณ์คือกกิ้ง (Cogging) คือไม่สามารถสตาร์ทมอเตอร์ได้ จากการที่ความเร็วมอเตอร์ต่ำกว่าความเร็วซิงโครนัส และทำให้เกิดการออสซิเลตทางกลของเครื่องจักรไฟฟ้า ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพและแรงบิดของเครื่องจักร

11. ผลของฮาร์มอนิกทำให้เกิดสัญญาณรบกวน (Noise) ในระบบสื่อสาร เช่น ในระบบโทรศัพท์

ฮาร์มอนิกที่อยู่ในระบบไฟฟ้าเป็นปัญหาคุณภาพไฟฟ้าสำคัญเรื่องหนึ่งเพราะปัจจุบันการใช้โหลดประเภทที่ไม่เป็นเชิงเส้นที่เป็นแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกและโรงงานอุตสาหกรรมและในอาคารพาณิชย์นับวันมีการใช้โหลดดังกล่าวเพิ่มมากขึ้น ผลทำให้รูปคลื่นของแรงดันและกระแสเพี้ยนไปจากรูปไซน์ ซึ่งจะส่งผลกระทบให้อุปกรณ์มีการทำงานผิดพลาด หรืออาจเกิดการเสียหายได้

2.8 คุณภาพไฟฟ้า

คุณภาพไฟฟ้า (Power Quality) เป็นคำที่พูดถึงบ่อยในเรื่องของความมั่นคงการจ่ายไฟฟ้าของระบบจากการไฟฟ้าฯ และกรณีเมื่อเกิดปัญหาอุปกรณ์ไฟฟ้ามีการทำงานผิดพลาด หรือหยุดการทำงานจากผู้ใช้ไฟฟ้า ซึ่งเห็นได้ว่าคำนิยามของคำว่าคุณภาพไฟฟ้าระหว่างการไฟฟ้าและผู้ใช้ไฟจะพูดถึงในกรณีที่แตกต่างกันไป แต่ในความเป็นจริงแล้วมีความหมายเดียวกันซึ่งนิยามของคุณภาพไฟฟ้าตามมาตรฐานสากล IEC และ IEEE ให้ความหมายของคุณภาพไฟฟ้า คือ คุณลักษณะของกระแส แรงดัน และความถี่ของแหล่งจ่ายไฟฟ้าในสภาวะปกติไม่ทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้ามีการทำงานผิดพลาดจนส่งผลให้อุปกรณ์เกิดการเสียหาย

คุณภาพทางไฟฟ้า การวัดคุณภาพของระบบไฟฟ้าเพื่อศึกษาผลของการผิดเพี้ยนหรือผลจากการเกิดผิดปกติของสัญญาณ โดยทั่วไปจะมีการวัดในค่าต่าง ๆ หลายกรณี เช่น Sag, Flicker เป็นต้น ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะผลของฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้าโดยจะมีพารามิเตอร์ในการวัดต่างๆดังนี้

- Distortion Factor(DF)

$$DF = \frac{I_{1(rms)}}{I_{rms}} \tag{9}$$

- Displacement Power Factor ตัวประกอบกำลังของค่ามูลฐาน (Fundamental)

$$DPF = \cos\theta_1 \tag{10}$$

$$PF = DPF\ x\ DF \tag{11}$$

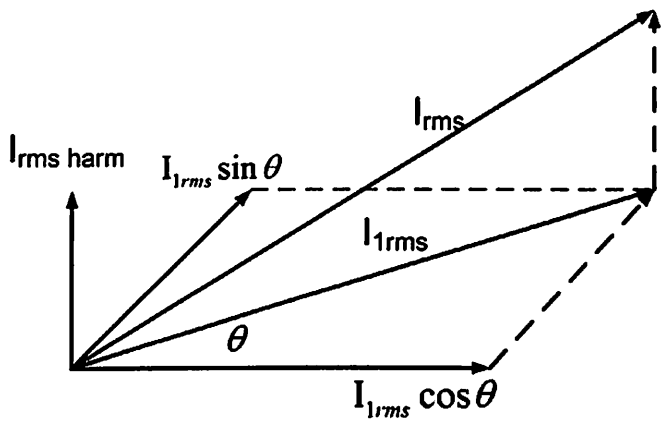
- Total Harmonic Distortion (THD) ผลรวมของค่าความผิดเพี้ยนของกระแส

$$THD = \sqrt{\frac{\sum_{n\neq 1}^{N} I_{n(rms)}^2}{I_{1(rms)}^2}} \tag{12}$$

$$THD = \frac{\sqrt{I_{rms}^2 - I_{1(rms)}^2}}{I_{1(rms)}} \tag{13}$$

- Crest Factor (*CF*)

$$CF = \frac{I_{peak}}{I_{rms}} \tag{14}$$



รูปที่ 2.14 ส่วนประกอบของกระแสไฟฟ้าเมื่อมีกระแสฮาร์มอนิกร่วม

2.9 เหตุผลหลักที่ทำให้มีการพิจารณาถึงคุณภาพไฟฟ้า

เนื่องจากกระบวนการผลิตของภาคอุตสาหกรรมมีการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีเทคโนโลยีสูงขึ้น ซึ่งจะมีความไวในการตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพของไฟฟ้ามากกว่าในอดีตโดยเฉพาะอุปกรณ์ประเภทอิเล็กทรอนิกส์กำลัง เช่น อุปกรณ์ที่ถูกควบคุมด้วยไมโครโปรเซสเซอร์ Programmable Logic Controller (PLC), Adjustable Speed Drive (ASD) และรีเลย์บางชนิดการเพิ่มขึ้นของการใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีเทคโนโลยีสูงขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในระบบไฟฟ้าดังเช่นตัวอย่างของกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมหนึ่งมีการใช้อุปกรณ์ ASD เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตซึ่ง ASD เป็นแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกก็จะทำให้เกิดปัญหาฮาร์มอนิกผลกระทบต่อระบบไฟฟ้านั้นได้ และถ้ามีคาปาซิเตอร์ติดตั้งอยู่ในระบบเพื่อปรับปรุงกำลังไฟฟ้า ก็ยิ่งทำให้เกิดปัญหาฮาร์มอนิกรุนแรงมากยิ่งขึ้นระบบไฟฟ้าที่มีการเชื่อมต่อถึงกัน ถ้าส่วนใดของระบบเกิดปัญหาคุณภาพไฟฟ้าก็จะทำส่วนอื่นๆ ของระบบได้รับผลกระทบจากปัญหาคุณภาพกำลังไฟฟ้าตามไปด้วย เช่นโรงงานอุตสาหกรรมหนึ่งมีการใช้โหลดที่เป็นแหล่งจ่ายฮาร์มอนิกและฮาร์มอนิกนั้นอาจไหลเข้าสู่ระบบไฟฟ้า อาจทำให้โรงงานบริเวณข้างเคียงได้รับผลกระทบจากปัญหาฮาร์มอนิกด้วยเช่นกัน

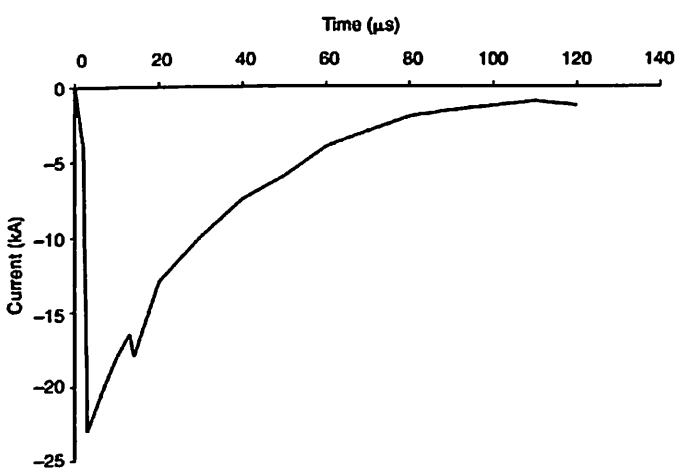
ปัญหาคุณภาพไฟฟ้าที่เกิดขึ้นโดยทั่วไปเกิดจาก 5 สาเหตุใหญ่ ได้แก่

1. จากปรากฏการณ์ธรรมชาติ เช่น ฟ้าผ่า
2. จากการเกิดสภาวะความผิดพลาด (Fault) ทางไฟฟ้าในระบบสายส่งและระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า
3. จากการกระทำการสวิตชิ่งอุปกรณ์ในระบบ
4. จากการใช้งานอุปกรณ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นในระบบอุตสาหกรรม
5. จากการต่อลงดินที่ไม่ถูกต้อง

2.10 ปัญหาคุณภาพไฟฟ้า

ภาวะชั่วครู่ (Transient) คือ ปรากฏการณ์การเปลี่ยนแปลงของสภาพไฟฟ้า (แรงดัน กระแส) ในเวลาทันทีทันใดจากสภาพปกติแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ Impulsive Transients และ Oscillatory Transients

- อิมพัลส์ชั่วครู่ (Impulsive Transients) คือ ขนาดกระแสและแรงดันที่มีค่าความชันสูงมาก เกิดขึ้นในทันทีทันใดไม่มีความถี่เปลี่ยนแปลงกำหนดให้มีขั้วทิศทางเดียวหรือเรียกว่า เสิร์จ (Surge) ดังรูปที่ 2.16 มีสาเหตุเกิดจากฟ้าผ่าซึ่งอาจเกิดได้โดยตรงหรือในบริเวณใกล้เคียงมีผลทำให้อุปกรณ์ใน ระบบได้รับความเสียหายจากแรงดันไฟฟ้าเกิน



รูปที่ 2.15 กระแสที่เกิดขึ้นจากการเกิดอิมพัลส์ชั่วครู่เกิดโดยฟ้าผ่า (Roger C. Dugan , Mark F. McGranaghan ,H. Wayne Beaty, 2004)

มาตรฐาน IEEE std 1159 - 1995 มีการกำหนดค่าอิมพัลส์ตามช่วงระยะเวลาที่เกิดกับค่าระยะเวลาที่แรงดันเริ่มสูงขึ้น (Rise Time) ดังตารางที่ 2.2

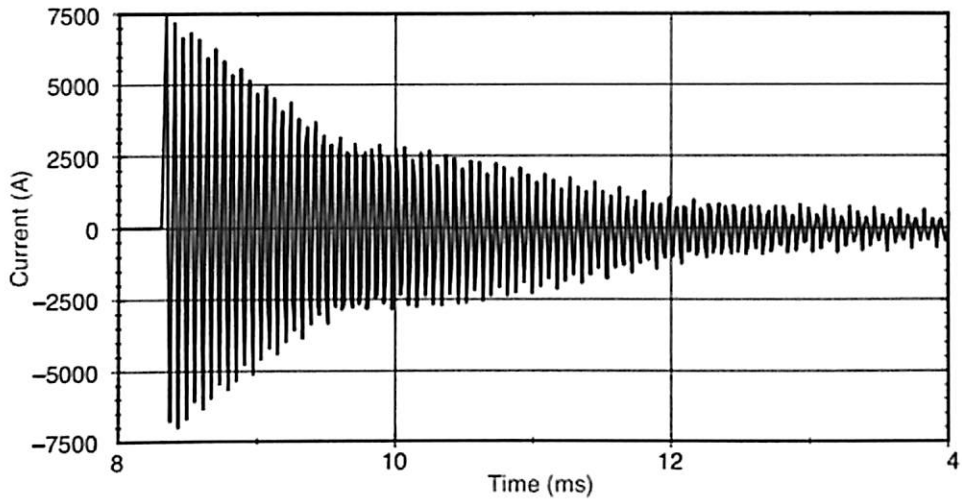
ตารางที่ 2.2 ค่าระยะเวลาที่แรงดันเริ่มสูงขึ้นกับช่วงระยะเวลาการเกิดของอิมพัลส์ (Roger C. Dugan , Mark F. McGranaghan ,H. Wayne Beaty, 2004)

อิมพัลส์ภาวะชั่วครู่	ระยะเวลาที่แรงดันเริ่มสูงขึ้น (Rise Time)	ช่วงระยะเวลาการเกิด (Duration)
Nano Second	5 ns	< 50 ns
Micro Second	1 us	50 ns – 1 ms
Milli Second	0.1 ms	> 1 ms

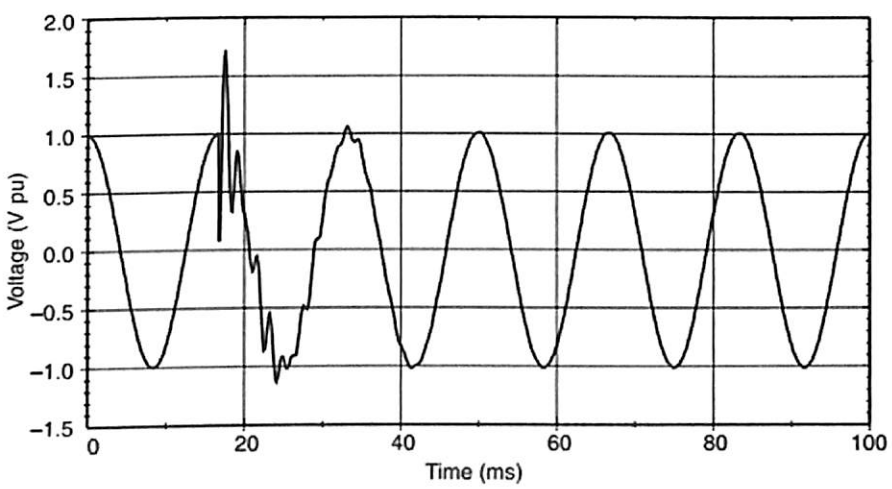
• ออสซิเลทชั่วครู่ (Oscillatory Transient) คือลักษณะของแรงดันหรือกระแสมีค่าสูงเกิดขึ้นในทันทีทันใด โดยที่ความถี่ไม่มีเปลี่ยนแปลงมีการเปลี่ยนแปลงขั้ว (บวก ลบ) ของรูปคลื่นอย่างรวดเร็ว ดังรูปที่ 2.16, 2.17 และ 2.18 มีสาเหตุเกิดจากการสวิตชิ่งของอุปกรณ์ในระบบมีผลทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าได้รับความเสียหาย และฉนวนของอุปกรณ์มีการเสื่อมสภาพหรือมีการสูญเสียความเป็นฉนวนเร็วขึ้น มาตรฐาน IEEE std 1159 - 1995 มีการแบ่งการเกิดออสซิเลทในภาวะชั่วครู่ตามขนาดแรงดันและช่วงระยะเวลาในการเกิดของความถี่ แสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ขนาดแรงดันและช่วงเวลาตามความถี่ออสซิเลทชั่วครู่ (Roger C. Dugan , Mark F. McGranaghan ,H. Wayne Beaty, 2004)

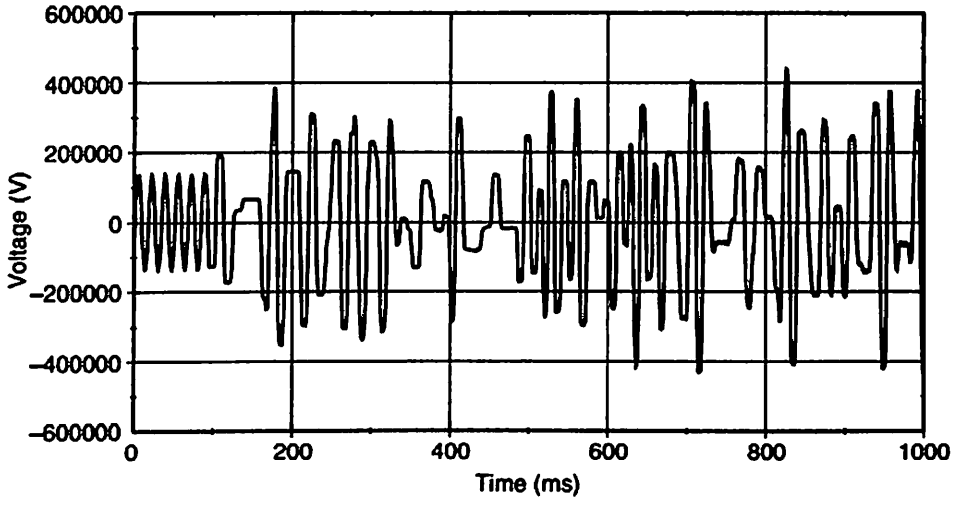
ออสซิเลทในภาวะชั่วครู่	ความถี่	ช่วงระยะเวลาในการเกิด	ขนาดแรงดัน
Lower Frequency	< 5 Khz	0.3 – 50 ms	0.4 pu
Medium Frequency	5 KHz – 500 Khz	5 – 20 ms	0.8 pu
High Frequency	500 KHz – 5 MHz	0 – 5 ms	0.4 pu



รูปที่ 2.16 กระแสออสซิเลทชั่วครู่เกิดจากการสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์แบบ Back-to-Back (Roger C. Dugan , Mark F. McGranaghan ,H. Wayne Beaty, 2004)



รูปที่ 2.17 แรงดันออสซิเลทความถี่ต่ำชั่วครู่เกิดจากการสวิตชิ่งคาปาซิเตอร์แบบเข้าระบบ (Roger C. Dugan , Mark F. McGranaghan ,H. Wayne Beaty, 2004)



รูปที่ 2.18 แรงดันออสซิเลทความถี่ต่ำชั่วครู่เกิดจากเฟอโรเรโซแนนซ์ในสภาวะหม้อแปลงไม่มีโหลด (Roger C. Dugan , Mark F. McGranaghan ,H. Wayne Beaty, 2004)

• การเปลี่ยนแปลงแรงดันช่วงระยะสั้น (Short Duration Voltage Variation) คือ การเปลี่ยนแปลงค่าแรงดัน rms ที่มีระเวลาการเปลี่ยนแปลงค่าไม่เกิน 1 นาทีมีสาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากสภาวะความผิดพลาด (Fault) ทางไฟฟ้าทำให้เกิดเหตุการณ์แรงดันตก (Voltage Sag หรือ Voltage Dip) แรงดันเกิน (Voltage Swell) และไฟดับ (Interruptions) มาตรฐาน IEEE Std 1159-1995 มีการเรียกชื่อแรงดันดังกล่าวตามระยะเวลาที่เกิด คือ เวลาทันทีทันใด (Instantaneous) ชั่วขณะ (Momentary) และชั่วครู่ (Temporary) ดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 ระยะเวลาการเกิดแรงดันตกแรงดันเกินและไฟดับของการเปลี่ยนแปลงแรงดันช่วงเวลาสั้นๆ (Roger C. Dugan , Mark F. McGranaghan ,H. Wayne Beaty, 2004)

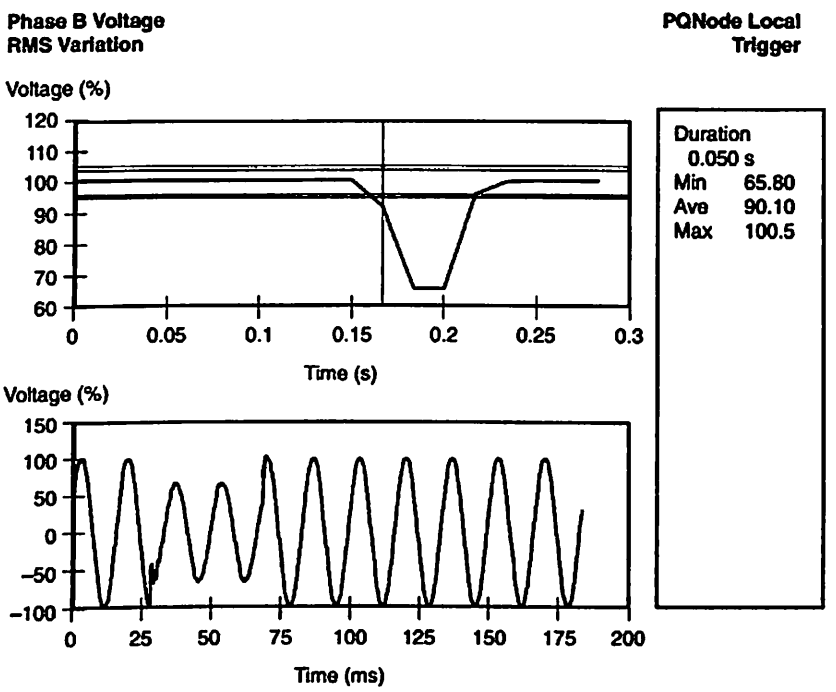
Instantaneous	Momentary	Temporary
10 ms – 1 sec	1 sec – 3 sec	3 sec – 1 min

ก. Voltage Sag & Swell

Momentary	Temporary
10 ms – 3 sec	3 sec – 1 min

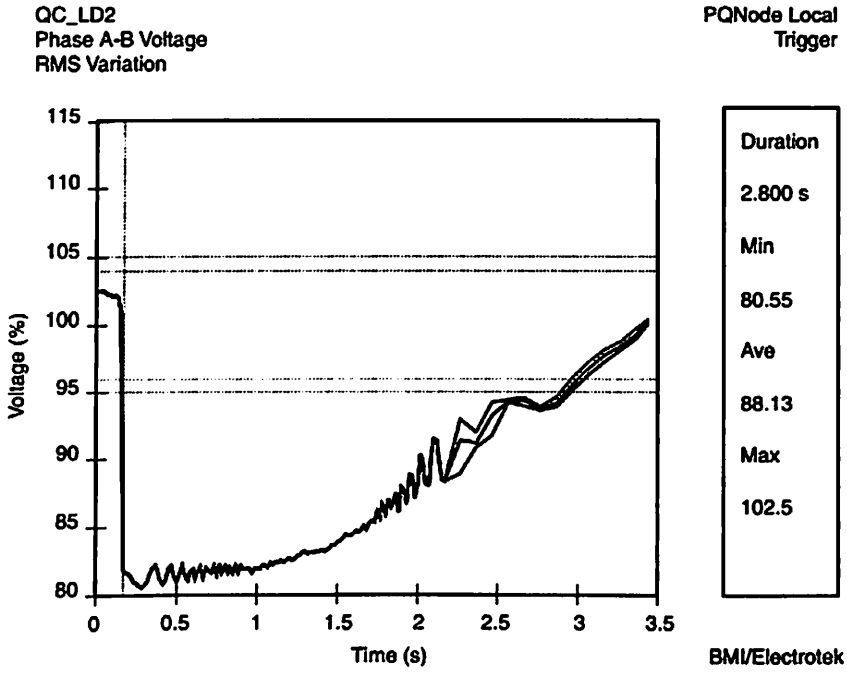
ข. Interruption

• แรงดันตกช่วงสั้น (Voltage Sag) คือ ค่าแรงดัน rms มีขนาดลดลงระหว่าง 0.1-0.9 pu. ในช่วงเวลาระหว่าง 10 ms – 1 min มีสาเหตุส่วนใหญ่ เกิดขึ้นกับเฟสที่เกิดความผิดพลาดทางไฟฟ้า ดังรูปที่ 2.19 ทำให้แรงดันมีค่าลดลงเหลือ 0.2 pu. ของแรงดันปกติ (80% Sag) ในช่วงเวลา 3 ไซเคิล และรูปที่ 2.20 แรงดันมีค่าลดลงจากผลของการสตาร์ทมอเตอร์ขนาดใหญ่ ซึ่งมอเตอร์อินดัคชั่นขณะสตาร์ทจะมีกระแสสูงสูงถึง 6-10 เท่า ของกระแสโหลดปกติ มีผลทำให้อุปกรณ์ที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของแหล่งจ่ายไฟ มีการทำงานผิดพลาดหรือหยุดการทำงาน

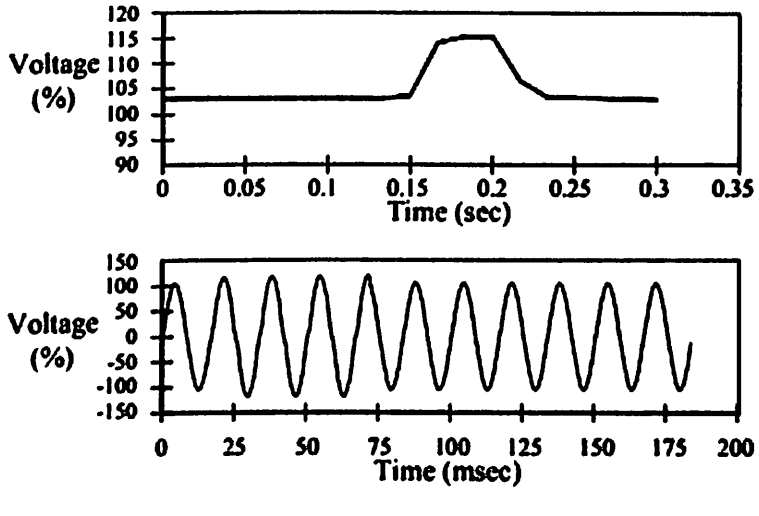


รูปที่ 2.19 Voltage Sag จากสาเหตุการเกิดความผิดพลาดทางไฟฟ้าลงดิน (Roger C. Dugan , Mark F. McGranaghan ,H. Wayne Beaty, 2004)

• แรงดันเกินช่วงสั้น (Voltage Swell) คือ ค่าแรงดัน rms มีขนาดเพิ่มขึ้นระหว่าง 1.1-1.8 pu. ในช่วงเวลาระหว่าง 10 ms – 1 min ดังรูปที่ 2.21 มีสาเหตุส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นกับเฟสที่ไม่ได้เกิดความผิดพลาดทางไฟฟ้าโดยตรง หรืออาจเกิดจากการปลดโหลดขนาดใหญ่ออกจากระบบหรือมีการต่อคาปาซิเตอร์ขนาดใหญ่เข้าระบบ มีผลทำให้อุปกรณ์ได้รับความเสียหายหรือทำให้อุปกรณ์ที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลงคุณลักษณะของแหล่งจ่ายไฟมีการทำงานผิดพลาดหรือหยุดการทำงาน



รูปที่ 2.20 Voltage Sag จากผลของการสตาร์ทมอเตอร์ขนาดใหญ่ (Roger C. Dugan , Mark F. McGranaghan ,H. Wayne Beaty, 2004)



รูปที่ 2.21 Voltage Swell จากสาเหตุการเกิดความผิดพลาดทางไฟฟ้าลงดิน (Roger C. Dugan , Mark F. McGranaghan ,H. Wayne Beaty, 2004)

- ไฟดับช่วงสั้น (Voltage Interruption) คือ ค่าแรงดัน rms มีค่าลดลงต่ำกว่า 0.1 pu. ในช่วงระหว่าง 10 ms - 1 min มีสาเหตุเกิดจากสภาวะความผิดพร่องทางไฟฟ้าในระบบ ทำให้อุปกรณ์ป้องกันมีการตัดวงจรแหล่งจ่ายไฟออก

ประมาณ 1.8 sec จากการทำงานของรีโคลสเซอร์ตัดวงจรแหล่งจ่ายออกจากระบบก่อนจะมีการต่อวงจรเข้าไปดังเดิมอีกผลทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าหยุดการทำงาน

2.11 การผิดเพี้ยนของรูปคลื่น (Waveform Distortion)

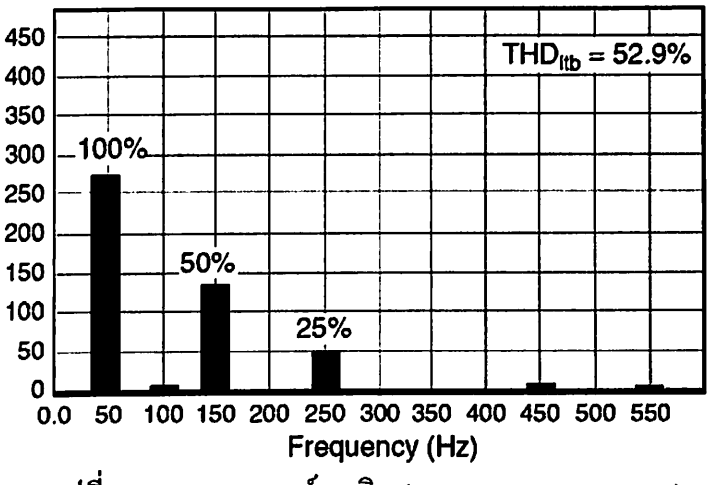
การผิดเพี้ยนของรูปคลื่น คือ การเบี่ยงเบนในสภาวะคงตัวของรูปคลื่นไซด์ที่มีความถี่ทางกำลังไฟฟ้าและสามารถอธิบายคุณลักษณะได้โดยแยกองค์ประกอบทางความถี่ออกมาการผิดเพี้ยนของรูปคลื่นแบ่งออกได้ 5 ชนิด ได้แก่

2.12.1 องค์ประกอบไฟตรง (DC offset) คือ การที่มีกระแสหรือแรงดันไฟตรงปะปนอยู่ในระบบไฟฟ้ากระแสสลับเป็นผลมาจากการใช้อุปกรณ์เรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น (Half-Wave Rectifier) เป็นผลทำให้เกิดความร้อนและค่ากำลังสูญเสียของหม้อแปลงและอาจจะทำให้เกิดการผุกร่อนของแท่งกราวด์ได้

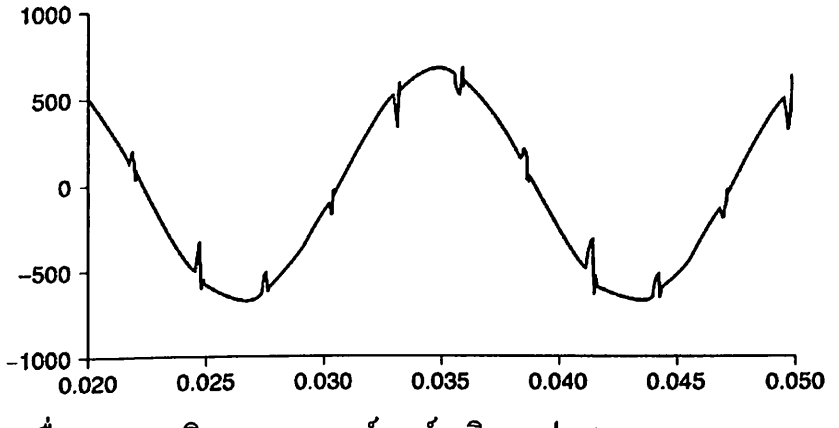
2.12.2 ฮาร์มอนิก (Harmonic) คือ ส่วนประกอบในรูปสัญญาณคลื่นไซน์ (Sine-Wave) ของสัญญาณหรือปริมาณเป็นคาบใดๆ ซึ่งมีความถี่เป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่หลักมูล (Fundamental Frequency ในระบบไฟฟ้าเรามีค่า 50 Hz) เช่น ฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 มีค่าความถี่เป็น 150 Hz ฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 มีค่าความถี่เป็น 250 Hz ผลของฮาร์มอนิกเมื่อรวมกันกับสัญญาณความถี่หลักมูลด้วยทางขนาด (Amplitude) และมุมเฟส (Phase Angle) ทำให้สัญญาณที่เกิดขึ้นมีขนาดเปลี่ยนไปและมีรูปสัญญาณเพี้ยน (Distortion) ไปจากสัญญาณคลื่นไซน์ เป็นผลเกิดจากการใช้อุปกรณ์ประเภทที่ไม่เป็นเชิงเส้นทำให้อุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ามีการทำงาน ผิดพลาดและถ้ามีการขยายของฮาร์มอนิกที่มีขนาดมากพออาจจะทำให้อุปกรณ์เกิดการชำรุดขึ้นได้

- อินเตอร์ฮาร์มอนิก (Interharmonic) คือ ส่วนประกอบในรูปสัญญาณคลื่นไซน์ (Sine - Wave) ของสัญญาณหรือปริมาณเป็นคาบใดๆ ซึ่งมีความถี่ไม่เป็นจำนวนเต็มเท่าของความถี่หลักมูล (Fundamental Frequency) เช่น มีความถี่ที่ 104 Hz, 117 Hz, 134 Hz, 147 Hz ลักษณะการเกิดและผลกระทบจะมีลักษณะเช่นเดียวกับฮาร์มอนิก

- คลื่นรอยบาก (Notching) คือ สิ่งรบกวนทางแรงดันไฟฟ้าลักษณะคล้ายกับฮาร์มอนิกและทรานเซี้ยนท์ที่มีลักษณะต่อเนื่อง เป็นผลเกิดจากใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เมื่อกระแสถูกเปลี่ยนจากเฟสหนึ่งไปยังอีกเฟสหนึ่ง ผลทำให้อุปกรณ์ประเภทอิเล็กทรอนิกส์มีการทำงานผิดพลาด

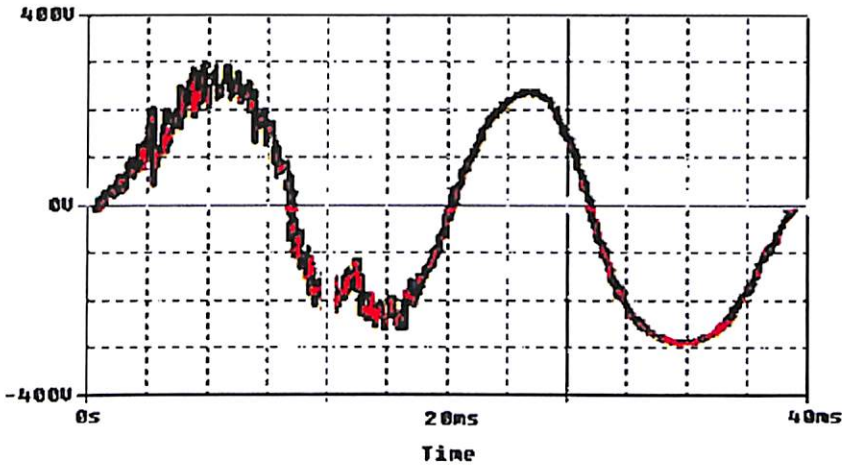


รูปที่ 2.22 กระแสฮาร์มอนิก (Angelo Baggini, 2008)



รูปที่ 2.23 คลื่นรอยบากเกิดจากคอนเวอร์เตอร์ ชนิด 3 เฟส (Alexander Kusko, Sc.D., P.E. Marc T.Thompson, 2007)

• สัญญาณรบกวน (Noise) คือ สัญญาณทางไฟฟ้าที่ไม่ต้องการจะมีความถี่ต่ำกว่า 200 KHz ปะปนบนสัญญาณแรงดันหรือกระแสในสายเฟส เป็นผลเกิดจากการต่อลงดินของระบบไฟฟ้าที่ไม่ถูกต้องที่มีการใช้อุปกรณ์ประเภทอิเล็กทรอนิกส์หรืออุปกรณ์ควบคุมอยู่ในระบบ มีผลทำให้อุปกรณ์ ดังกล่าวมีทำงานผิดพลาดหรือไม่สามารถทำงานได้



รูปที่ 2.24 สัญญาณรบกวน (Noise) (ศักดิ์ชัย นรสิงห์, 2545)

2.12 แรงดันกระเพื่อม (Voltage Fluctuation)

แรงดันกระเพื่อม คือ การเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องของค่าแรงดัน rms มีขนาดไม่เกินช่วงแรงดัน 0.95-1.05 pu. เป็นผลเกิดจากการใช้อุปกรณ์ประเภทเตาหลอมแบบอาร์ค ทำให้เกิดไฟกระพริบ (Flicker) ที่หลอดไฟและอาจส่งผลกระทบต่ออุปกรณ์ในระบบถ้ามีการเปลี่ยนแปลงของแรงดันมาก

2.13 การแปรเปลี่ยนความถี่กำลังไฟฟ้า (Power Frequency Variation)

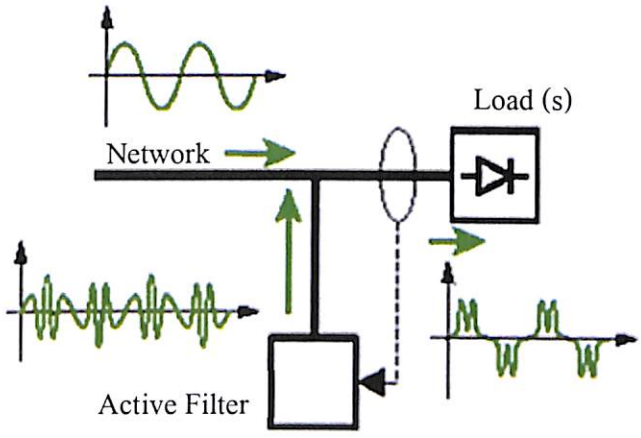
การเปลี่ยนแปลงความถี่กำลังไฟฟ้า คือ ปรากฏการณ์ที่ความถี่ของระบบไฟฟ้ามีค่าเปลี่ยนไปจากค่าความถี่ปกติ 50 Hz เป็นผลเกิดจากการทำงานผิดพลาดของ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าขนาดใหญ่หรือมีการหลุดออกจากระบบ ทำให้มีกระทบต่อการทำงานของอุปกรณ์ไฟฟ้าที่มีการทำงานสัมพันธ์กับความถี่ระบบไฟฟ้า เช่น เครื่องกลไฟฟ้า

2.14 การป้องกันความผิดเพี้ยนของรูปคลื่นที่เกิดจากฮาร์มอนิก

ฮาร์มอนิกต่างๆ ที่ปะปนเข้ามาในระบบไฟฟ้าจะส่งผลให้รูปคลื่นของแรงดันไฟฟ้า หรือกระแสไฟฟ้า มีขนาดและเฟสเปลี่ยนไปหรือที่เราเรียกว่าเกิดความผิดเพี้ยนของรูปคลื่น (Distortion Waveform) นั่นเอง มักจะเกิดในระบบไฟฟ้าที่มีการใช้งานโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้นปรากฏการณ์เช่นนี้จะมีผลทำให้อุปกรณ์ไฟฟ้าบางประเภทหยุดทำงาน หรือทำงานผิดพลาดและอาจสร้างความเสียหายกับโหลด เช่น มอเตอร์ได้ถ้าองค์ประกอบของฮาร์มอนิกมีขนาดใหญ่มาก

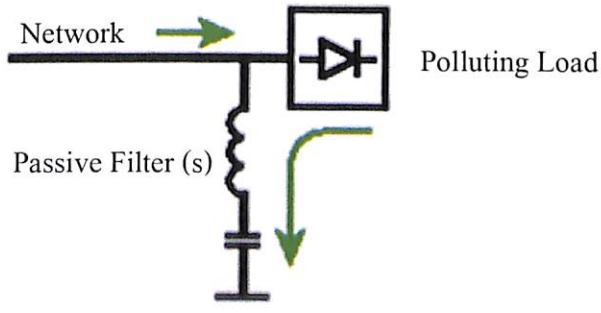
การแก้ไขปัญหาที่เกิดจาก Harmonic นั้น จะใช้วงจร Harmonic Filter ในการกำจัดปัญหา โดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

• แอคทีฟฟิลเตอร์ (Active Filter) การวิเคราะห์กระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากโหลดที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non Linear Load) แล้วสร้างกระแสฮาร์มอนิกใหม่เพื่อหักล้างฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น โดยทั่วไปแล้ว Active Filter สามารถกำจัดกระแส Harmonic จนเหลือเพียง 5%



รูปที่ 2.25 Active Filter (ศักดิ์ชัย นรสิงห์, 2545)

• พาสสีฟฟิลเตอร์ (Passive Filter) นิยมใช้กันมากที่สุด เนื่องจากมีราคาต่ำกว่าแอคทีฟฟิลเตอร์และสามารถขจัดกระแสฮาร์มอนิกหลักๆ เช่น ฮาร์มอนิกที่ 5, 7 และ11 ได้โดยตรงและยังช่วยในเรื่องของการปรับปรุงตัวประกอบกำลังไฟฟ้าได้อีกด้วย



รูปที่ 2.26 Passive Filter (ศักดิ์ชัย นรสิงห์, 2545)

การควบคุมคุณภาพและประสิทธิภาพของกำลังไฟฟ้าเป็นการที่ทำให้ภาระของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้า (Load) ได้รับกำลังไฟฟ้าใกล้เคียงกับกำลังไฟฟ้าที่จ่ายออกมาจากแหล่งกำเนิดมากที่สุด

ซึ่งในทางปฏิบัติถ้าไม่มีการควบคุมประสิทธิภาพของกำลังไฟฟ้าจะทำให้เกิดการสูญเสียในกระบวนการจ่ายกำลังไฟฟ้าในปริมาณที่มาก จะส่งผลให้โรงงานต้องสิ้นเปลืองค่าไฟฟ้าเป็นจำนวนมากและหากไม่มีการควบคุมคุณภาพของกำลังไฟฟ้าก็จะส่งผลให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์หรือเครื่องจักรที่นำมาต่อใช้งานได้ และปัจจัยที่ทำให้เกิดการสูญเสียของกำลังไฟฟ้าและคุณภาพไฟฟ้าที่แย่นั้นได้แก่ ค่า Power Factor, Noise และ Harmonic ถ้าสามารถควบคุมและกำจัดค่าดังกล่าวข้างต้นจะทำให้ได้ไฟฟ้ามีคุณภาพและประสิทธิภาพที่ดี สามารถลดค่าใช้จ่ายที่ต้องสูญเสียโดยไม่จำเป็นได้อีกด้วย

2.15 มาตรฐานของฮาร์มอนิก

มาตรฐาน IEEE519-1992

มาตรฐาน IEEE519-1992 นำเสนอแนวทางร่วมกันระหว่างสาธารณูปโภคและลูกค้าเพื่อจำกัดผลกระทบของโหลดที่ไม่ใช่เชิงเส้น การปฏิบัติที่แนะนำนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างเป้าหมายสำหรับการออกแบบระบบไฟฟ้าที่รวมทั้งโหลดเชิงเส้นและแบบไม่เชิงเส้นรูปแบบของแรงดันและกระแสที่อาจมีอยู่ในระบบจะถูกอธิบายและมีการกำหนดเป้าหมายการบิดเบือนรูปคลื่นสำหรับนักออกแบบระบบอินเตอร์เฟซระหว่างแหล่งที่มาและโหลดถูกอธิบายเป็นจุดเชื่อมต่อกันและการปฏิบัติตามเป้าหมายการออกแบบจะลดการรบกวนระหว่างอุปกรณ์ไฟฟ้าวิธีปฏิบัติที่แนะนำนี้กล่าวถึงข้อจำกัดของสภาวะคงที่อาจมีเงื่อนไขชั่วคราวมากกว่าข้อจำกัดเหล่านี้เอกสารฉบับนี้จะกำหนดคุณภาพของพลังงานที่จะต้องจัดหาให้กับจุดเชื่อมต่อทั่วไป

ปรัชญาในการพัฒนาขีดจำกัดของฮาร์มอนิกใน IEEE 519-1992 คือ จำกัดการแพร่กระจายฮาร์มอนิกจากลูกค้าแต่ละราย เพื่อไม่ให้ระดับความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าที่ยอมรับไม่ได้สำหรับลักษณะระบบปกติ)จำกัดการบิดเบือนฮาร์มอนิกโดยรวมของระบบที่จัดให้โดยไม่สิ้นสุด

ตารางที่ 2.6 แสดงรายการพื้นฐานสำหรับกระแสฮาร์มอนิก ในขณะตารางที่ 2.7 แสดงค่าฮาร์มอนิกตามขนาดของโหลดตามขนาดของระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับโหลด อัตราส่วนคือ Isc/IL ของอัตราส่วนลัดวงจรที่จุดเชื่อมต่อร่วม (PCC) กับกระแสโหลดขั้นพื้นฐานสูงสุด มาตรฐาน IEEE 519-1992 ยังแนะนำการบิดเบือนความต้องการรวม (TDD) การบิดเบือนกระแสฮาร์มอนิกในเปอร์เซนต์ของกระแสไฟฟ้าที่ต้องการสูงสุด (ต้องการความต้องการ 15 หรือ 30 นาที) ขีดจำกัด ที่ระบุไว้ในตาราง ควรใช้เป็นค่าการออกแบบระบบสำหรับกรณีที่เลวร้ายที่สุดสำหรับการทำงานตามปกติ (เงื่อนไขที่ต้องใช้นานกว่าหนึ่งชั่วโมง) สำหรับระยะเวลาที่สั้นกว่าในช่วงเริ่มต้นงานหรือเงื่อนไขที่ผิดปกติขีด จำกัด อาจเกิน 50%

ตารางที่ 2.5 รายการพื้นฐานสำหรับกระแสฮาร์มอนิก

SCR at PCC	Maximum Individual Frequency Voltage Harmonic(%)	Related Assumption
10	2.5 – 3.0	Dedicated System
20	2.0 – 2.5	1-2 large customer
50	1.0 – 1.5	A few relatively large customer
100	0.5 – 1.0	5-20 medium-size customer
1000	0.05 – 0.10	Many small customer

ตารางที่ 2.6 ค่าฮาร์มอนิกตามขนาดของโหลดตามขนาดของระบบไฟฟ้าที่เชื่อมต่อกับโหลด

Maximum Harmonic Current Distortion in Present of I_L						
Individual Harmonic Oder (Odd Harmonic)						
I_{SC} / I_L	< 11	11 ≤ h <17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	35 ≤ h	TDD
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20 < 50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50 < 100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100 < 1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
Even harmonic are limited to 25% of the odd harmonic limits above						
Current distortions that result in dc offset, e.g. half-wave converter are not allowed.						
*All power generation equipment is limited to these valves of current distortion, regardless of actual I_{SC} / I_L						
Where						
I_{SC} = Maximum short circuit current at PCC						
I_L = Maximum demand load current (Fundamental frequency component) at PCC						

ตารางที่ 2.7 แสดงค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้า ซึ่งควรใช้เป็นค่าการออกแบบระบบ เนื่องจากข้อจำกัดในปัจจุบันค่าเหล่านี้มีความหมายสำหรับกรณีที่เลวร้ายที่สุดสำหรับการทำงานของระบบตามปกติ

ตารางที่ 2.7 ค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้า

Bus Voltage at PCC	Individual Voltage Distortion (%)	Total Voltage Distortion THD (%)
69 KV and below	3.0	5.0
69.001 KV through 161 KV	1.5	2.5
161.001 KV and above	1.0	1.5

ขีดจำกัดของฮาร์มอนิกในมาตรฐาน IEC 61000-3-6

IEC ได้พัฒนาขีดจำกัดฮาร์มอนิกให้ตรงมากยิ่งขึ้นเน้นคุณภาพแรงดันไฟฟ้าระดับการวางแผนซึ่งเป็นระบบออกแบบเป้าหมายที่แรงดันไฟฟ้าขนาดกลาง (MV) แรงดันไฟฟ้าสูง (HV) และแรงดันสูงพิเศษ (EHV) สำหรับฮาร์มอนิกแรงดันไฟฟ้าขึ้นอยู่กับความเข้ากันได้ทางแม่เหล็กไฟฟ้าข้อกำหนดสำหรับอุปกรณ์ทั้งสิ้นการใช้งานระดับการวางแผนเหล่านี้แสดงในตารางที่ 2.8 นอกเหนือไปจากแรงดันไฟฟ้าแต่ละตัวฮาร์มอนิกที่ระบุไว้ในตารางที่ 2.8 แรงดันไฟฟ้า THD มีดังนี้ 6.5 และ 3 ตามลำดับสำหรับ MV และ HV / EHV ตามลำดับ ขึ้นอยู่กับระดับการวางแผนเหล่านี้การบริการลูกค้าแต่ละรายให้กับความคลาดเคลื่อนของแรงดันไฟฟ้าที่ได้รับอนุญาตโดยรวมจะได้รับการจัดสรรตามขนาดของลูกค้าสัมพันธ์กับความสามารถของระบบและปัจจัยอื่น ๆ

ตารางที่ 2.8 ระดับการวางแผนแรงดันฮาร์มอนิกในมาตรฐาน IEC 61000-3-6

Odd harmonic non-multiple of 3			Odd harmonic non-multiple of 3			Even harmonic		
Harmonic Order h	Harmonic Voltage %		Harmonic Order h	Harmonic Voltage %		Harmonic Order h	Harmonic Voltage %	
	MV	HV-EHV		MV	HV-EHV		MV	HV-EHV
5	5	2	3	4	2	2	1.8	1.4
7	4	2	9	1.2	1	4	1	0.8
11	3	1.5	15	0.3	0.3	6	0.5	0.4
13	2.5	1.5	21	0.2	0.2	8	0.5	0.4
$17 \leq h \leq 49$	1.9.(17/h) - 0.2	1.2.(17/h)	$21 < h \leq 45$	0.2	0.2	$10 \leq h \leq 50$	0.25.(10/h) + 0.22	0.19.(10/h) + 0.16

โดยทั่วไปขั้นตอน IEC คำนึงถึงแรงดันไฟฟ้าการบิดเบือนจากส่วนที่เป็นแรงดันสูง (การจัดส่ง) ของระบบและชิ้นส่วนที่มีแรงดันไฟฟ้าต่ำกว่า (โหลด) ของระบบเมื่อได้รับผลกระทบการ

บิดเบือนแรงดันไฟฟ้าไปกระจายระหว่างการติดตั้งที่การบิดเบือน ตัวอย่างเช่น ระบบ MV (จัดหาจากระบบต้นน้ำ HV) อาจใช้ระดับการวางแผนพื้นฐานของการบิดเบือนฮาร์มอนิก 5 การใช้ค่าพื้นฐานนี้ขอแนะนำให้ลบค่าที่อนุญาตออกการวางแผนระดับต้นน้ำของ HV จากระดับฐาน MV ไปกำหนดค่าความผิดเพี้ยนของแรงดันไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจริง 5 ค่าที่สามารถทำได้ผลิตโดยการติดตั้ง MV การใช้ค่าจากตารางที่ 2.8 เป็นค่าความสัมพันธ์แบบพื้นฐานของ MV 5 ระดับการวางแผนคือ 5% และระดับการวางแผนระดับ HV ที่อนุญาตคือ 2% จำนวนการบิดเบือนของฮาร์มอนิกที่ 5 ใช้ได้กับ MVการติดตั้งจะเป็น (5α-2α) 1 / α ที่ α เป็นค่าสัมประสิทธิ์ที่เลือกเพื่อให้สอดคล้องกับการยกเลิกฮาร์มอนิกที่มีตั้งแต่ 1 (สำหรับฮาร์มอนิกที่ต่ำกว่า) ถึง 2 (สำหรับฮาร์มอนิกระดับสูง) ค่าผลลัพธ์นี้เรียกว่าขีด จำกัด การปล่อยก๊าซทั่วโลก (ที่ MV ของฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ในตัวอย่างนี้) และจำนวนนี้คือจัดสรรให้กับแต่ละการติดตั้งใช้งานตามขนาด ความจุของระบบ การ a = 1 ที่ฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 ค่าเผื่อระดับโลกสำหรับการติดตั้ง MV จะเท่ากับ 3% สำหรับผู้ใช้ปลายทางที่มีภาระ 10% ของโหลด MV ทั้งหมดในระบบนี้ผู้ใช้ปลายทางจะได้รับการจัดสรร a ระดับการปลดปล่อยของ 0.1 * 3% = 0.3% ที่ฮาร์มอนิกลำดับที่ 5

สำหรับกรณีทั่วไป IEC แนะนำว่าได้รับอนุญาตแรงดันไฟฟ้าฮาร์มอนิกจะถูกแปลงเป็นกระแสฮาร์มอนิกโดยใช้ระบบความถี่ที่แท้จริง ด้วยวิธีนี้ผลกระทบที่แท้จริงของเครือข่ายเสียงสะท้อนสามารถนำมาพิจารณาในลักษณะตรงไปตรงมา ขั้นตอนจะถูกนำมาใช้ที่ MV, HV, และ EHV อย่างถูกต้องวิธีการเดียวกัน.

IEC มีข้อจำกัดเพียงชุดเดียวที่เป็นไปได้ ของกระแสฮาร์มอนิกปัจจุบันที่นี่แสดงในตารางที่ 2.9 และเหล่านี้ใช้ได้เฉพาะที่ MV เท่านั้น ในตารางที่ 2.9 I_h คือค่า rms ของคอมโพแนนต์ฮาร์มอนิก และ I_L คือค่า rms ของที่ตกลงกัน โปรดทราบว่าแนวคิด IEC มีความคล้ายคลึงกับความต้องการสูงสุดในปัจจุบันของ IEEE519-1992

ตารางที่ 2.9 ขีดจำกัดของกระแสฮาร์มอนิกสำหรับ MV

Harmonic number, h	5	7	11	13	>13
I_h / I_L	5	5	3	3	$500/h^2$

ข้อควรระวังหลายประการที่ต้องได้รับการพิจารณาในตารางที่ 2.9

1. ขนาดที่แน่นอน ควรมีขนาดเล็กกว่า 1 MVA

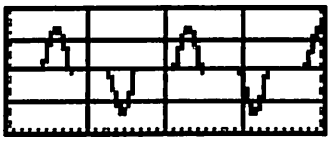
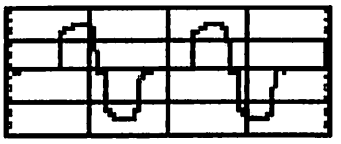
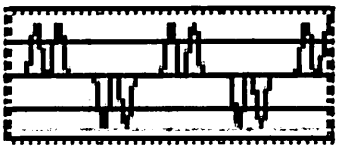
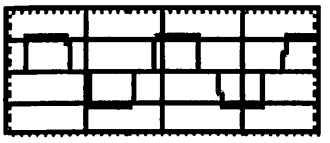
2. ขนาด (ความแข็งแรงของระบบ) ควรเล็กนิดหนึ่ง - SL / SSC <1% โดยที่ SL เป็นกำลังรับน้ำหนัก (ใน MVA) และ SSC เป็น MVA ที่มีอยู่

3. ไม่ควรปรับปรุงค่าตัวประกอบกำลังที่มีตัวเก็บประจุหรือฟิลเตอร์

ข้อควรระวังเหล่านี้ทำให้แน่ใจได้ว่าข้อจำกัดฮาร์มอนิกในปัจจุบันเท่านั้นแนะนำโดย IEC เป็นแบบอนุรักษ์นิยม ที่มีขนาดเล็กดังนั้นจึงไม่น่าจะส่งผลกระทบต่อระบบและไม่มีตัวเก็บประจุ (หรือตัวกรอง) เพื่อประเมินสมรรถภาพของตัวต้านทานระบบ.

จากตารางที่ 2.10 แสดงถึงปัจจัยการถ่วงน้ำหนักสำหรับอุปกรณ์การผลิตฮาร์มอนิกประเภทต่างๆ ที่มีประเภทโหลด รูปคลื่นสัญญาณที่เกิดขึ้น รวมถึงค่าความผิดเพี้ยนของกระแส

ตารางที่ 2.10 ปัจจัยการถ่วงน้ำหนักสำหรับอุปกรณ์การผลิตฮาร์มอนิกประเภทต่างๆ

Type of Load	Typical Waveform	Current Distortion	Weighting Factor
Single phase power supply		80% (High 3rd)	2.5
Semiconverter		High 2nd, 3rd, 4th at Partial Load	2.5
6 Pulse Converter Capacitive Smoothing No Series Inductance		80%	2.0
6 Pulse Converter Capacitive Smoothing With Series Inductance > 3% or DC Drive		40%	1.0
6 Pulse Converter With Large Inductor for Current Smoothing		28%	0.8
12 Pulse Converter		15%	0.5
AC Voltage Regulator		Varies With Firing angle	0.7

การเปรียบเทียบระหว่าง IEEE519-1992 กับ IEC61000-3-6

ขีดจำกัดภาพรวมที่เรียบง่ายของ IEEE และ IEC ฮาร์มอนิกได้ถูกนำเสนอในส่วนก่อนหน้า เป็นสิ่งสำคัญที่จะสรุปความคล้ายคลึงกันและความแตกต่างของพวกเขาในพื้นที่สำคัญ

1. หลักการขับเคลื่อน

ข้อสมมติฐานพื้นฐานของข้อจำกัดของฮาร์มอนิก IEEE คือส่วนที่ใช้ร่วมกันความรับผิดชอบระหว่างสาธารณูปโภคและลูกค้า ลูกค้าทุกคนคิดว่าเป็นส่วนแบ่งที่เหมาะสมของระบบความสามารถในการดูดซับคลื่นหากเกิดปัญหาการบิดเบือนแรงดันไฟฟ้าอยู่กับลูกค้าทั้งหมดภายในปัจจุบันของพวกเขารับผิดชอบในการดำเนินการเพื่อฟื้นฟูคุณภาพแรงดันไฟฟ้าวิธี IEC จะขึ้นอยู่กับการกำหนดขีดจำกัด ในปัจจุบันได้รับแรงกว่าจากเป้าหมายด้านคุณภาพแรงดันไฟฟ้า และเป็นออกแบบมาเพื่อประกันในขอบเขตที่เหมาะสมที่สุดว่า ถ้าลูกค้าทั้งหมดอยู่ในขอบเขตของแต่ละคนแล้วปัญหาเกี่ยวกับคุณภาพระดับแรงดันไฟฟ้าในระบบจะไม่เกิดขึ้น

2. ข้อจำกัดฮาร์มอนิกแรงดันไฟฟ้า

มาตรฐานทั้งสองให้ข้อจำกัดของแรงดันไฟฟ้าฮาร์มอนิก IEEE แรงดันไฟฟ้าฮาร์มอนิกจะมีค่าคงที่ตลอดทุกความถี่ในขณะที่แรงดันไฟฟ้าฮาร์มอนิกที่ได้รับอนุญาตลดลงด้วยความถี่ใน IEC

3. ข้อจำกัดของกระแสฮาร์มอนิก

ข้อจำกัดของกระแสฮาร์มอนิกเป็นจุดศูนย์กลางของ IEEE519-1992 แต่ค่าขีดจำกัดมีความสัมพันธ์ใกล้เคียงกันเท่านั้นเป้าหมายแรงดันไฟฟ้าของระบบ IEC หลีกเลี่ยงการให้กระแสไฟฟ้าฮาร์มอนิกในแง่ทั่วไปเลือกที่ข้อจำกัดเหล่านี้จะได้รับมาอย่างเข้มงวดขึ้นอยู่กับขีดจำกัด ของแรงดันและระบบลักษณะของอิมพีแดนซ์

4. การประสานกันแบบสม่ำเสมอ

IEEE519-1992 ไม่ได้ระบุถึงลำดับที่เท่าเทียมกันฮาร์มอนิกสำหรับแรงดันไฟฟ้าเท่าเทียมกันแต่ไม่แนะนำให้สั่งซื้อกระแสฮาร์มอนิกจะถูกจำกัด ไว้ที่ 25% ของค่าที่สอดคล้องกันของฮาร์มอนิกแปลก ๆ IEC ระบุถึงช่วงเวลาพิเศษฮาร์มอนิกแรงดันไฟฟ้าและดูเหมือนจะช่วยให้มีความเรียบมากขึ้นการปล่อยกระแสฮาร์มอนิก (ขึ้นอยู่กับระบบอิมพีแดนซ์) มากกว่า IEEE

5. ลักษณะของฮาร์มอนิก

ทั้ง IEEE และ IEC พิจารณาฮาร์มอนิกในแง่ทั่วไป โดยไม่คำนึงถึงลักษณะเสียงที่สร้างขึ้นโดยอุปกรณ์บางประเภท (เช่น ตัวปรับแก้แบบหกพัลส์การสร้างลักษณะของฮาร์มอนิกที่ 5, 7, 11,

13, ฯลฯ ,ความถี่) อย่างไรก็ตาม IEEE มี Higherpulse สำหรับสั่งซื้ออุปกรณ์ที่ไม่เป็นลักษณะฮาร์-มอนิก(สำหรับอุปกรณ์ที่มีปัญหา) ยังคงอยู่ในระดับต่ำ

6. ฮาร์มอนิกที่เวลาที่แตกต่างกัน

IEEE แสดงให้เห็นว่าข้อจำกัดของกระแสฮาร์มอนิกในปัจจุบันอาจเป็นได้เกิน 50% ในช่วงเวลาสั้น ๆ IEC เน้นแง่มุมต่าง ๆ ของฮาร์มอนิกด้วยการใช้ประโยชน์ Percentiles (เช่น 95 และ 99th) เป็นเวลาสั้น ๆ (3 วินาที) และวัดระยะเวลาสั้น ๆ (10 นาที) ในนอกจากนี้ IEC ยังเป็นตัวคูณด้วยข้อจำกัดของฮาร์มอนิกอาจเพิ่มขึ้นเมื่อพิจารณาสั้นมากเวลาปล่อย

7. อินเตอร์ฮาร์มอนิก

IEEE519-1992 ไม่ได้กล่าวถึงเรื่องการสังเคราะห์อินเตอร์ฮาร์มอนิก IEC 61000-3-6 ระบุขีดจำกัดแรงดันไฟฟ้าแบบอินเตอร์ฮาร์มอนิกโดยการแนะนำจำกัดความถี่อิสระที่ 0.2% เพื่อหลีกเลี่ยงปัญหาเกี่ยวกับการกระพริบของหลอดไฟและการควบคุมการกระเพื่อมการส่งสัญญาณและอุปกรณ์สื่อสาร

2.16 ทฤษฎีตัวเหนี่ยวนำ

DC Choke ระหว่างอินพุตของวงจรเรียงกระแสและตัวเก็บประจุบัสจะมีผลต่อรูปแบบแรงดันไฟฟ้าของบัส DC และรูปแบบกระแสไฟฟ้ากระแสสลับของ AC จะช่วยลดปริมาณกระเพื่อม AC บนแรงดันไฟฟ้าของสายไฟ DC และสายสัญญาณ AC นอกจากนี้ยังมีการป้องกันการสะดุดเนื่องจากแรงดันสไปร์ เช่นที่เกิดจากการเปลี่ยนเฟสก้าวหน้าตัวเก็บประจุ

DC Chokes จะให้ประโยชน์สูงสุดของวงจรเหนี่ยวนำสำหรับคุณภาพไฟฟ้าแต่ไม่ก่อให้เกิดแรงดันไฟฟ้าเข้าสาย AC ลดลง DC Chokes link สามารถใช้แยกโดยปกติจะเป็นบัส DC บวกหรือเป็นคู่กับหนึ่งในด้านบวกและหนึ่งในบัส DC ลบ เมื่อใช้ DC Chokes 2 ตัว บนบัส ค่าความเหนี่ยวนำจะเพิ่มขึ้นโดยทั่วไปแล้วต้องใช้ค่าการเหนี่ยวนำเป็นสองเท่าใน DC บัส เท่ากับที่ใช้ในอินพุต AC (ต่อเฟส) เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพเช่นเดียวกับอินพุทรีแอคเตอร์ AC ดังนั้นเมื่อแรงดันไฟฟ้าลดลงของอินพุทรีแอคเตอร์ AC จะอยู่ที่ 3% แรงดันไฟฟ้าจะลดลง 6% เมื่อ DC Choke เพื่อให้ได้ผลเช่นเดียวกัน

ในการคำนวณความเหนี่ยวนำแบบ DC Choke สามารถใช้สูตรดังต่อไปนี้ได้

$$L = \Delta v_{\%} \cdot \frac{U}{\sqrt{3}.2\pi f I_{INV}} \qquad (15)$$

โดยที่

$\Delta_{V_{\%}}$ = เปอร์เซนต์ของแรงดันไฟฟ้าของอินพุทรีแอคเตอร์

U = ค่าแรงดันไฟฟ้า

f = ค่าความถี่ ที่ 50 เฮิร์ต

I_{INV} = ค่ากระแสอินเวอร์เตอร์

ดังนั้นเมื่อใช้ตัวอย่างเช่นอินเวอร์เตอร์ 55 kW ที่แรงดันไฟฟ้าของ 400 VDC ค่าตัวเหนี่ยวนำคือ:

$$L = 0.06.\frac{575V}{\sqrt{3}.2\pi.50Hz.77A.} = 0.686mH$$

ค่าตัวเหนี่ยวนำของ DC Choke จะเท่ากับ $0.686mH$

การคำนวณกระแสไฟฟ้าที่กำหนดไว้กระแสไฟฟ้าที่กำหนดของ DC Choke ต้องเป็นค่าเดียวกับกระแสขาออกของไดโอด เรียงกระแส $I_{rec_{rms}}$

$$I_{rec_{rms}} = \frac{I_{DC_{av}}}{\phi} \qquad (16)$$

$$I_{DC_{av}} = \frac{P_M}{V_{PN}.\eta_M.\eta_{inv}} \qquad (17)$$

โดยที่

$I_{DC_{av}}$ = ค่าเฉลี่ยของกระแสไฟไฟฟ้ากระแสตรง

ϕ = ค่าตัวประกอบกำลังของแหล่งจ่ายไฟ : 0.9

P_M = ค่ากำลังมอเตอร์สูงสุด 15 กิโลวัตต์

η_M = ค่าประสิทธิภาพของมอเตอร์ : 0.9

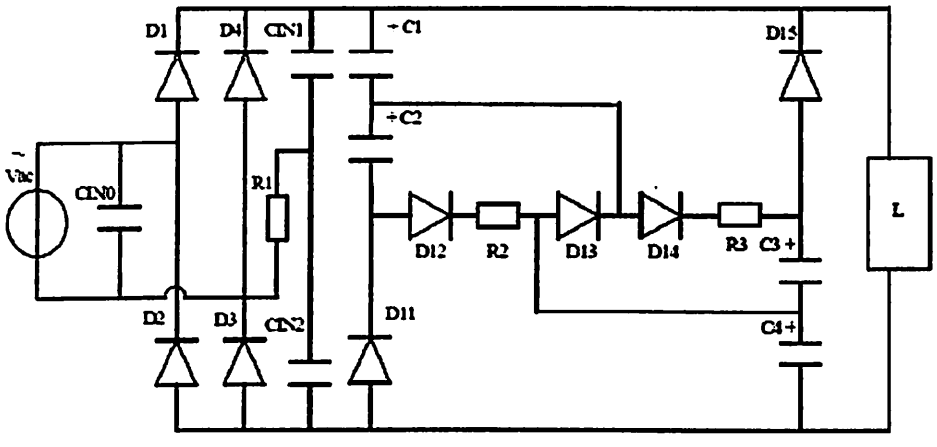
η_{inv} = ค่าประสิทธิภาพของอินเวอร์เตอร์ : 0.9

$$I_{DC_{av}} = \frac{15kW}{1.35.400V.0.9.0.96} = 32.15A.$$

$$I_{rec_{rms}} = \frac{32.15A.}{0.9} = 35.72A.$$

กระแสไฟฟ้าที่ได้ของ DC choke คือ 35.72 Amps

2.17 ทฤษฎีของ Valley Fill



รูปที่ 2.27 วงจร VFPFC (Dylan Dah-Chuan Lu, 2007)

จากรูปที่ 2.28 วงจร VFPFC จะถูกแทรกระหว่างวงจรเรียงกระแสแบบไดโอดบริดจ์และโหลด หลักการดำเนินการสามารถอธิบายได้ด้วยรูปคลื่นที่แสดงในรูปที่ 2.29

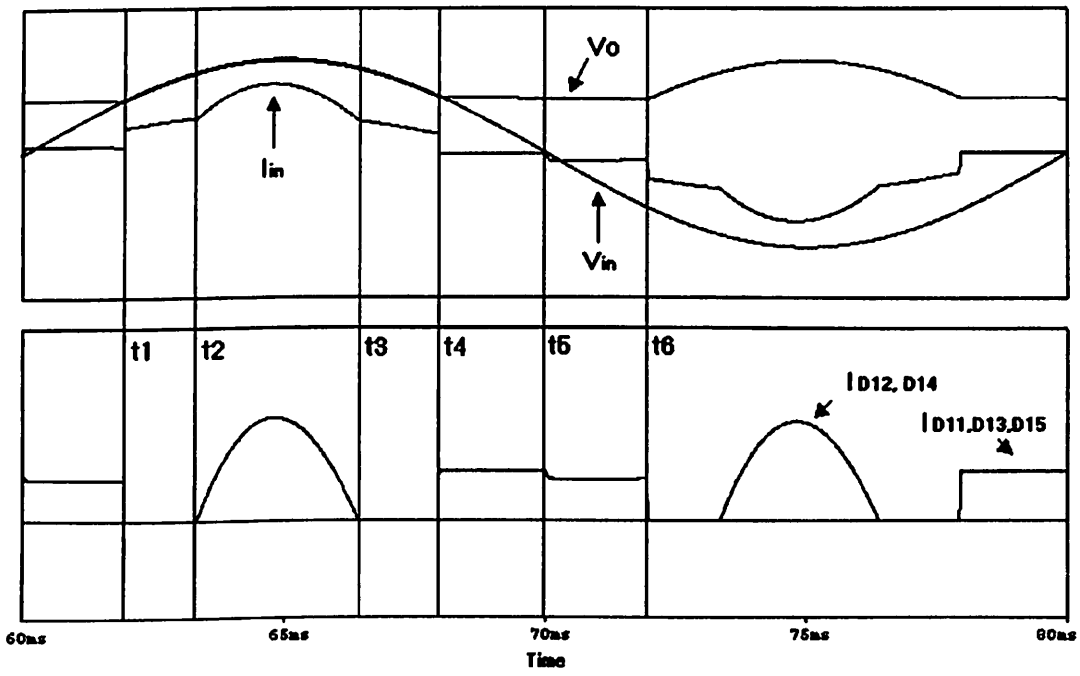
เวลา t1-t2: แรงดันไฟฟ้าของสายไฟสูงกว่าเล็กน้อย (เช่น VC1 + VC2 ; VC3 + VC4) หรือ VC1 + VC4) และนำกระแสอินพุตไหลผ่านไดโอดเข้าสู่โหลดเอาท์พุทโดยตรง (หมายเหตุ: Vcx หมายถึงแรงดันไฟฟ้าทั่วตัวเก็บประจุ CX สำหรับ X เท่ากับ 1, 2, 3 หรือ 4)

ในเวลา t2-t3: แรงดันไฟฟ้าของสายไฟยังคงเพิ่มขึ้นและสูงกว่าผลรวมแรงดันไฟฟ้าเล็กน้อย VC1 + VC3 + VC4 หรือ VC1 + VC2 + VC4 จะมีการชาร์จประจุตัวคูณด้วยแรงดันไฟฟ้าต่ำหรือมีประจุน้อยลง ถ้า C2 > C3 กระแสไฟฟ้าที่ชาร์จจะไหลผ่าน C1, D14, R3, C3, C4 จนกระทั่งแรงดันไฟฟ้า C3 เท่ากับแรงดันไฟฟ้า C2 แล้ว C2 และ C3 จะเก็บประจุแบบขนาน ถ้า C2 < C3, C2 จะเก็บประจุก่อนและหาก C2 = C3 พวกเขาจะเริ่มชาร์จพร้อมกันกระแสอินพุทจะประจุกระแสไฟฟ้ารวมทั้งที่โหลด

เวลา t3-t4: กระแสอินพุทจะไหลไปสู่โหลดเฉพาะเมื่อตัวเก็บประจุทั้งหมดถูกชาร์จเต็ม ซึ่งแตกต่างจากตัวเก็บประจุขนาดใหญ่ทั่วไป ซึ่งเมื่อได้รับการประจุไฟเต็มแล้วจะยังคงอยู่ที่แรงดันไฟฟ้าขาเข้าและกระแสอินพุทจะหยุดทำงาน เนื่องจากแรงดันอินพุทจะลดลงกระแสอินพุทยังสามารถไหลเข้าสู่โหลดในวงจรนี้เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าของ Valley Fill เติมจะอยู่ที่ประมาณสองในสามของแรงดันไฟฟ้าขาเข้าสูงสุด โดยสมมติว่าตัวเก็บประจุมีขนาดใหญ่พอที่จะควบคุมแรงดันไฟขาออก ดังนั้นระยะเวลาการนำของไดโอดบริดจ์จะยาวขึ้นเมื่อเทียบกับวงจรเรียงกระแสแบบเดิม

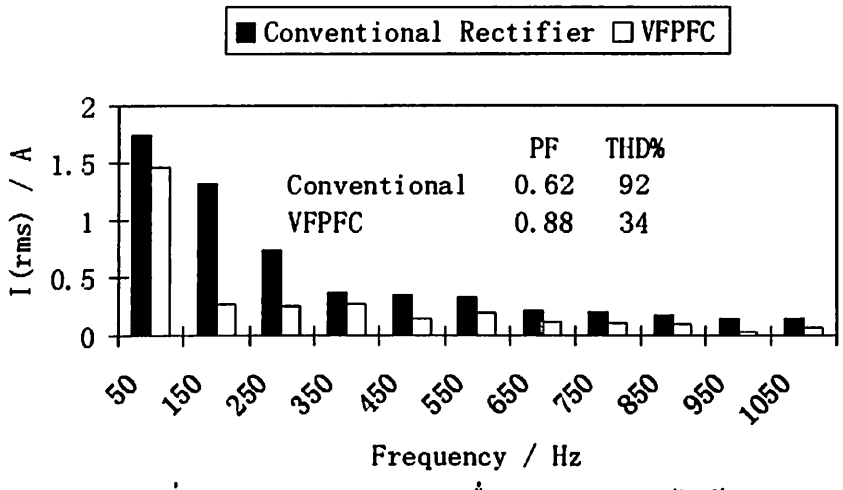
เวลา t4-t5: เมื่อแรงดันไฟฟ้าเข้าลดลงและลดลงต่ำกว่าสองในสามของแรงดันไฟฟ้าขาเข้า หรือแรงดันไฟฟ้าที่ VFPFC อยู่กระแสไฟเข้าหยุดไหลเนื่องจากไดโอดไดโอดถูกไบอัสกลับ แทนที่ตัวเก็บประจุปล่อยคู่ในชุด เพื่อให้กระแสเอาท์พุทอีกครั้งขึ้นอยู่กับความจุของคาปาซิเตอร์คู่หนึ่งที่มีความจุขนาดเล็กจะปล่อยก่อน

เวลา t5-t6: แรงดันไฟฟ้าเปลี่ยนทิศทาง แต่ต่ำกว่าแรงดันValley Fill อย่างไรก็ตามกระแสไฟอินพุทยังคงไหลผ่านทาง R1-CI N2-D2 รอบการชาร์จ / การคายประจุจะเกิดขึ้นที่ช่วงครึ่งสายถัดไป เมื่อแรงดันไฟฟ้าเข้าสูงกว่าแรงดันไฟฟ้ารวมของ VC1 + VC2 ; VC3 + VC4 หรือ VC1 + VC4



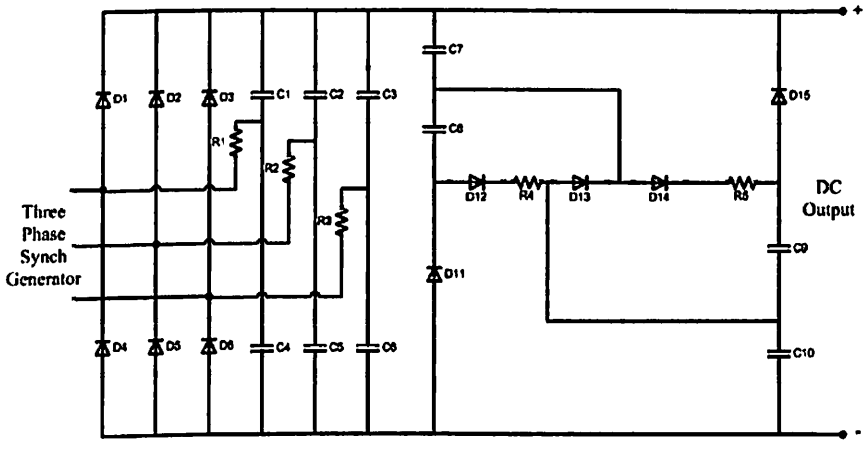
รูปที่ 2.28 รูปคลื่นที่สำคัญของ VFPFC (Dylan Dah-Chuan Lu, 2007)

จากรูปที่ 2.30 แสดงให้เห็นว่าคอมโพเนนต์ฮาร์มอนิกที่สามของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าแบบเดิมมีส่วนมากในกระแสฮาร์มอนิกอินพุทและสาเหตุหลักที่ทำให้มีค่ากำลังไฟต่ำและค่า THD สูง อย่างไรก็ตามเมื่อใช้ VFPFC ที่เสนอไม่เพียง แต่ส่วนประกอบฮาร์มอนิกที่สามจะลดลง 79% แต่ส่วนที่เหลือขององค์ประกอบฮาร์มอนิกจะถูกยับยั้งด้วยเช่นกัน นอกจากนี้ค่า THD ลดลงจาก 92% เป็น 34% และค่ากำลังไฟฟ้าเพิ่มขึ้นจาก 0.62 เป็น 0.88 สาเหตุของการลดค่าความร้อนและการเพิ่มกำลังไฟฟ้า (THD)



รูปที่ 2.29 สเปกตรัมความถี่ของกระแสอินพุทของเครื่องแปลงกระแสไฟฟ้าแบบเดิมและ VFPFC (Dylan Dah-Chuan Lu,2007)

2.18 การประยุกต์ใช้วงจร Valley Fill ในวงจรเรียงกระแส 3 เฟส

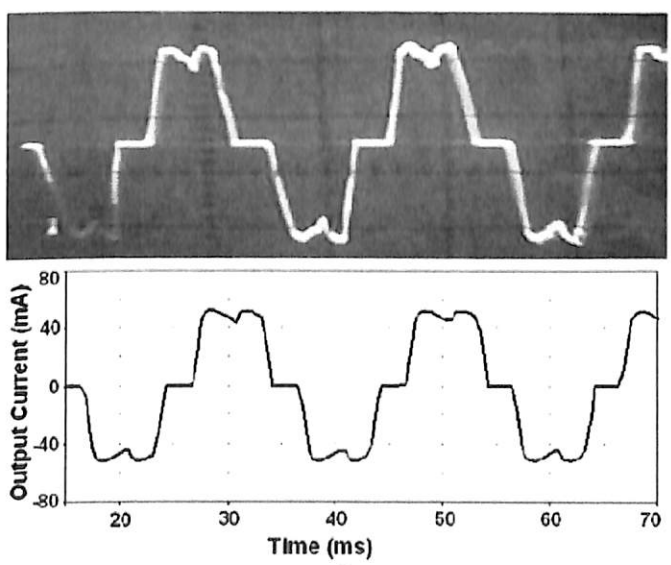


รูปที่ 2.30 การประยุกต์ใช้วงจร Valley Fill ในวงจรเรียงกระแส 3 เฟส (A.Hiendro, M.Anwari, M.I.Hamid, 2011)

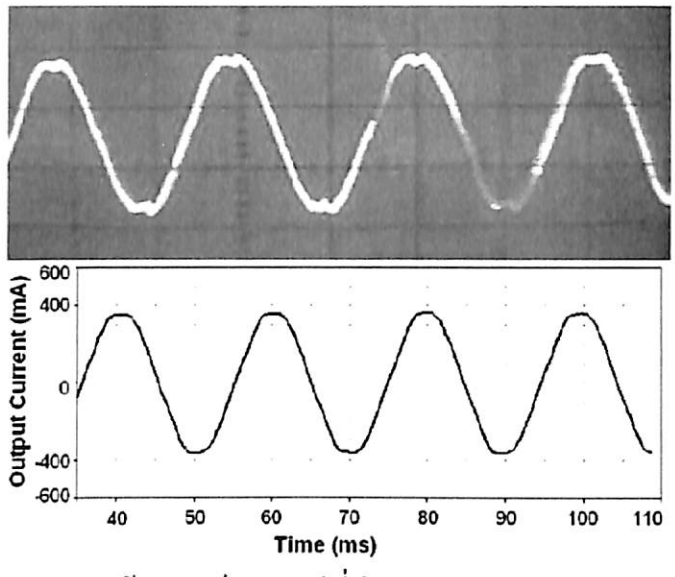
รูปแบบของวงจร MVF ประกอบด้วยตัวเก็บประจุ (C) ไดโอด (D) และตัวต้านทาน (R) ส่วนประกอบแต่ละชิ้นมีส่วนช่วยในการปรับปรุงรูปคลื่นและกระแสที่เครื่องกำเนิดไฟฟ้า ค่าที่มีประสิทธิภาพของสมรรถภาพเทียบเท่าในสมการความจุรวมของ C7, C8, C9 และ C10 มีการเปลี่ยนแปลงตลอดช่วงเวลาแรงดันไฟฟ้าอินพุท

$$C_{eff} = (C7 // C9) + (C8 // C10) \qquad (18)$$

ความจุที่มีประสิทธิภาพมีค่ามากที่สุดในระหว่างระยะเวลาการคายประจุและป้องกันไม่ให้แรงดันไฟฟ้าขาออกลดลงอย่างรวดเร็วและยืดเวลาในการนำของไดโอด D1-D6 ในทางกลับกัน ความจุที่มีประสิทธิภาพมีค่าน้อยที่สุดในระหว่างระยะเวลาการชาร์จและทำให้กระแสอินพุทมีขนาดเล็กลงไดโอด D12 ทำหน้าที่จัดหาเส้นทางสำหรับ C8 และ C9 ที่ชาร์จไฟขนานและไดโอด D14 เป็นเส้นทางสำหรับการชาร์จแบบขนาน C7 และ C10 ตัวเก็บประจุ C7 และ C10 จะประจุเป็นชุดด้วย C8 และ C9 และปล่อยผ่าน D11 และ D15 แบบขนาน มีการใส่ไดโอด D13 เพื่อป้องกันไม่ให้ C7 และ C10 ไหลผ่าน C8 และ C9 ตัวเก็บประจุ C1 ถึง C6 ช่วยในการรักษาเวลาการนำกระแสอินพุทโดยการกำหนดเส้นทางสำหรับกระแสอินพุทที่จะไหลเข้าสู่วงจร MVF ก่อนที่แรงดันไฟฟ้าของเต้าเสียบของเครื่องกำเนิดไฟฟ้าจะเพิ่มขึ้นเหนือแรงดันไฟฟ้าของวงจร MVF และลดการบิดเบือนในปัจจุบันของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ตัวต้านทาน R4 และ R5 ใช้ในการยับยั้งการบิดเบือนกระแสโดยการยับยั้งและขจัดกระแสไฟฟ้าของไดโอดสูงสุด นอกจากนี้ตัวต้านทาน R1, R2 และ R3 จะถูกแทรกระหว่างจุดเชื่อมต่อของ (D1-D6) และ (C1-C6) จะลบจุดชาร์จที่จุดข้ามและเพิ่มคุณภาพของกระแสไฟเข้าสู่วงจรเรียงกระแส



รูปที่ 2.31 รูปคลื่นกระแสทางด้านเอาท์พุท กรณีที่ไม่ต่อวงจร MVF (A.Hiendro, M.Anwari, M.I.Hamid, 2011)



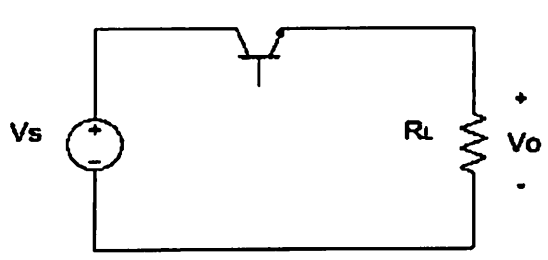
รูปที่ 2.32 รูปคลื่นกระแสทางด้านเอาท์พุท กรณีที่ต่อวงจร MVF (A.Hiendro, M.Anwari, M.I.Hamid, 2011)

จากผลของรูปคลื่นกระแสในรูปที่ 2.32 จะถูกบิดเบือนด้วยฮาร์มอนิกอันดับ (n = 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23 และ 25) ก่อนที่จะใช้ MVF ฮาร์มอนิกอันดับ n และอื่น ๆ จะถูกยกเลิกเนื่องจากลักษณะของระบบสามเฟสรูปแบบของคลื่นถูกฮาร์มอนิกอันดับ ที่ 5 และ 7 ปะปน

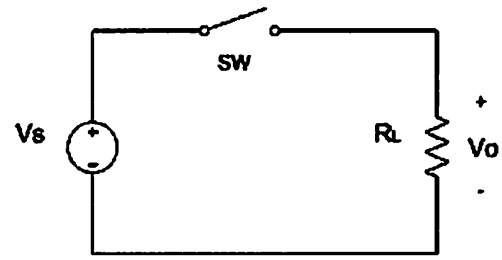
2.19 ทฤษฎีของวงจรชอปเปอร์กระแสตรง

การแปลงผันไฟฟ้ากระแสตรง หรือ DC To DC Converter หมายถึงการแปลงผันกำลังไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้าอีกระดับหนึ่งซึ่งระดับแรงดันเอาท์พุทอาจต่ำกว่าหรือสูงกว่าแรงดันอินพุทก็ได้หลักการเบื้องต้นของวงจรชอปเปอร์ คือใช้สวิทช์กำลังเป็นตัวตัดและต่อแรงดันไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายให้แก่โหลดเป็นสัดส่วนกับคาบเวลาสวิทช์เพื่อควบคุมสวิทช์เป็นสัดส่วนกับเวลาจะทำให้แรงดันค่าเฉลี่ยเอาท์พุทมีระดับแรงดันตามต้องการวิธีการแปลงผันแบบนี้เรียกว่า วงจรชอปเปอร์กระแสตรง หรือเรียกสั้นๆว่า วงจรชอปเปอร์

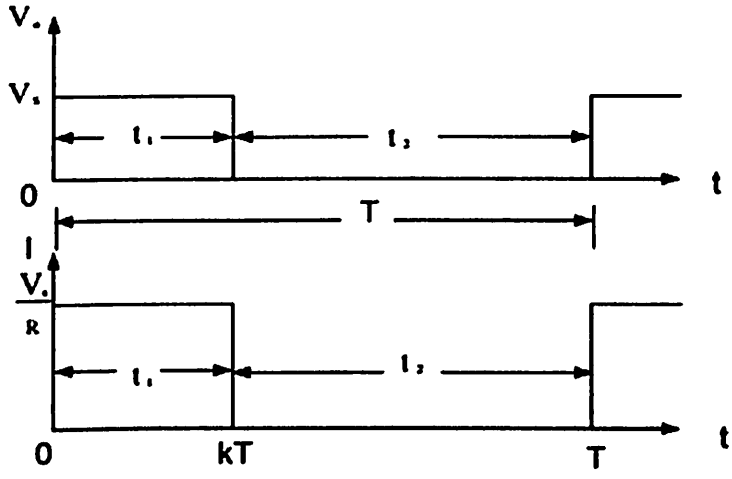
การแปลงผันกำลังไฟฟ้าโดยวงจรชอปเปอร์สามารถออกแบบให้แรงดันเฉลี่ยทางเอาท์พุทมีค่าสูงกว่าแรงดันเฉลี่ยทางอินพุทหรือให้แรงดันเฉลี่ยทางอินพุทมีค่าสูงกว่าแรงดันเฉลี่ยทางเอาท์พุทขึ้นอยู่กับอัตราการแปลงผัน a (a = Output Voltage / Input Voltage) ถ้า a น้อยกว่าหรือเท่ากับ 1 จะเป็นวงจรชอปเปอร์แบบทอนแรงดัน (Voltage Step Down Chopper) แต่ถ้า a มากกว่า 1 จะเป็นวงจรชอปเปอร์แบบทบแรงดัน (Voltage Step Up Chopper) วงจรชอปเปอร์โดยทั่วไปสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในงานควบคุมโหลดดังรูปที่ 2.33 อินพุทจะเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรงส่วนเอาท์พุทสามารถเพิ่มหรือลดแรงดันโดยสวิทช์สารกึ่งตัวนำ เช่น มอสเฟส ไอจีบีที ซึ่งง่ายต่อการควบคุม



ก. วงจรชอปเปอร์พื้นฐาน



ข. วงจรสมมูลของสวิทช์

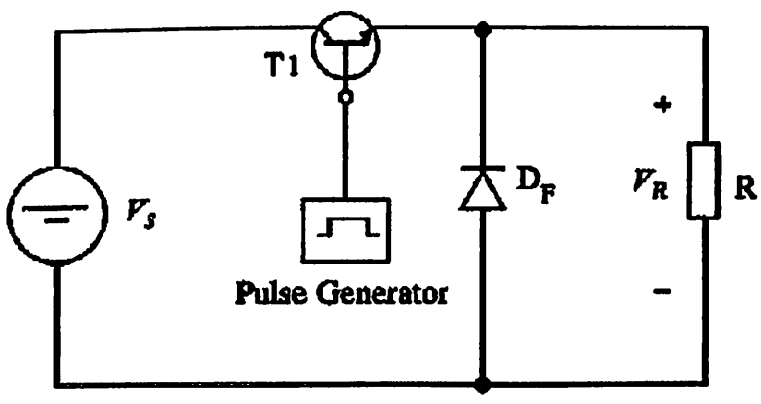


ค. แรงดันเอาท์พุท

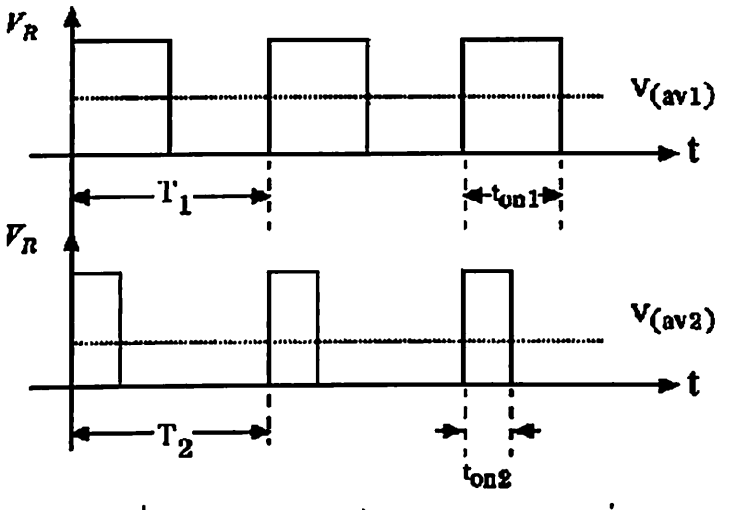
รูปที่ 2.33 องค์ประกอบต่างๆ ของวงจรชอปเปอร์พื้นฐาน

2.20 หลักการควบคุมสัญญาณพีดับเปิลยูเอ็ม

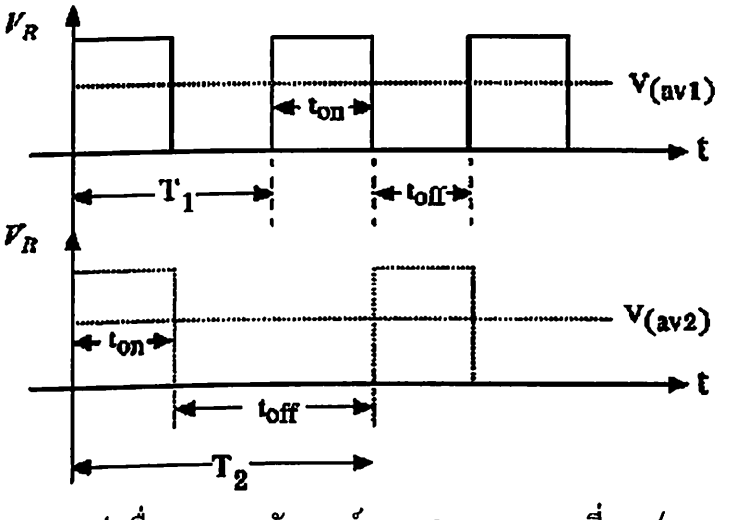
การควบคุมการไหลของกำลังไฟฟ้าในวงจรชอปเปอร์สามารถควบคุมค่ารอบทำงานหรือดิวตี้ไซเคิล (Duty cycle: D) โดยการเปลี่ยนแปลงค่า t_{on} ,T หรือความถี่ เพื่อทำให้แรงดันเอาท์พุท Vo เปลี่ยนแปลงค่าได้การควบคุมสวิทช์แบ่งได้เป็น 2 ลักษณะ คือ



ก. วงจรชอปเปอร์ที่ใช้ทรานซิสเตอร์กำลังเป็นสวิทช์



ข. รูปคลื่นของแรงดันเอาท์พุท V2 แบบ PWM ที่ $t_{on}1 \neq t_{on}2$, T= Constant



ค. รูปคลื่นของแรงดันเอาท์พุท V2 แบบ PFM ที่ T1≠T2

รูปที่ 2.34 การควบคุมสัญญาณพีดับเบิลยูเอ็ม

1. การควบคุมแบบสวิทช์ความถี่คงที่ (Constant Switch Frequency)

การควบคุมแรงดันเอาท์พุทแบบสวิทช์ความถี่คงที่ เป็นการปรับช่วงเวลา t_{on} และ t_{off} โดยคาบเวลาจะสวิทช์คงที่ การควบคุมแบบนี้เรียกว่าการควบคุมโดยปรับความกว้างพัลส์ (Pulse Width Modulation: PWM) ดังแสดงในรูปที่ 2.34 ข.

2. การควบคุมแบบสวิทช์ความถี่เปลี่ยนแปลง (Variable Switch Frequency)

การควบคุมแรงดันเอาท์พุทแบบสวิทช์ความถี่เปลี่ยนแปลง โดยให้ t_{on} คงที่และปรับเฉพาะ t_{off} การควบคุมนี้เรียกว่าการควบคุมโดยปรับความถี่พัลส์ (Pulse Frequency Modulation: PFM) ดังแสดงในรูปที่ 2.34 ค.

ค่าแรงดันเอาท์พุท

$$V_0 = \int_0^{t_{on}} V_0 dt = \frac{t_{on}}{T} V_S = f\, t_{on} V_S = D V_S \qquad (19)$$

ค่ารอบทำงาน

$$D = \frac{t_{on}}{T} = f.t_{on}(dutycycle) \qquad (20)$$

โดยที่

D = ค่ารอบทำงาน (duty cycle)

V_S = แรงดันอินพุท

V_0 = แรงดันเอาท์พุท

T = คาบเวลาการสวิทช์

f = ความถี่การสวิทช์

t_{on} = เวลาสวิทช์นำกระแส

t_{off} = เวลาสวิทช์ไม่นำกระแส