

ศิวัช หงษ์นภา
(EE_{KMITN}, BE_{RU} and MBE_{NIDA})
Siwa.Hongnapa@yahoo.com



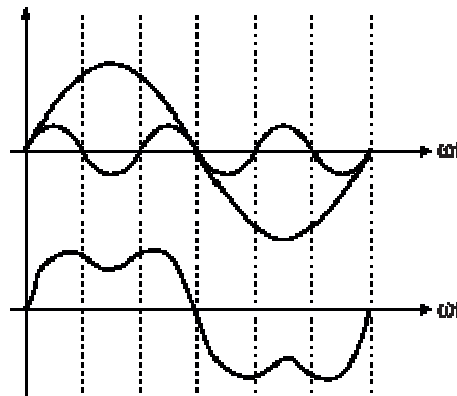
ฮาร์มอนิก (Harmonics) จากระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์

ในการทำงานเกี่ยวข้องกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุปกรณ์ประเภทระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ ผู้ทำงานมักจะพบปัญหาที่เกี่ยวข้องกับฮาร์มอนิกอยู่เสมอ และผู้ทำงานส่วนใหญ่โดยเฉพาะอย่างยิ่งผู้ที่ไม่ได้จบทางด้านไฟฟ้ากำลัง มักมีปัญหาในเรื่องการทำความเข้าใจเกี่ยวกับฮาร์มอนิก จริงอยู่ที่มีความเกี่ยวข้องกับฮาร์มอนิกเป็นจำนวนมากตีพิมพ์ลงในวารสารทางวิชาการและวารสารสำหรับช่าง แต่บทความส่วนใหญ่มักจะอธิบายฮาร์มอนิกด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ซึ่งพบว่ายิ่งทำให้ผู้ที่ไม่ได้จบโดยตรงงุนงงมากขึ้น บทความต่อไปนี้จะพยายามที่จะอธิบายเรื่องของฮาร์มอนิกให้เข้าใจได้อย่างง่าย ๆ โดยเน้นไปที่ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นเนื่องจากการทำงานของระบบควบคุมความเร็วรอบมอเตอร์ หวังว่าน่าจะเป็นประโยชน์ต่อผู้อ่านที่มีพื้นฐานความรู้คณิตศาสตร์ไม่มากนัก ได้บ้างพอสมควร

หากจะกล่าวให้เข้าใจอย่างง่าย ๆ ฮาร์มอนิกก็คือสัญญาณรูปไซน์ที่มีความถี่นอกเหนือไปจากความถี่ปกติของระบบแต่เมื่อสัญญาณเหล่านั้นเข้ามาพร้อมกับสัญญาณรูปไซน์ที่มีความถี่ตามปกติจะทำให้เกิดสัญญาณที่ไม่เป็นรูปไซน์ แต่มีคาบและความถี่เท่ากับคาบและความถี่ของสัญญาณปกติ ตัวอย่างเช่น ถ้าความถี่ปกติของระบบคือ 50 Hz ซึ่งมีคาบของสัญญาณเท่ากับ 20 ms รวมกับสัญญาณที่มีความถี่ 150 Hz ซึ่งมีคาบเท่ากับ 20/3 ms ก็จะได้รูปคลื่นใหม่ที่ไม่ใช่คลื่นรูปไซน์ แต่ยังคงมีความถี่ 50 Hz และคาบ 20 ms เหมือนเดิม ดังแสดงในรูปที่ 1 กรณีเช่นนี้เราจะถือว่าระบบมีฮาร์มอนิกที่สาม ในโลกแห่งความเป็นจริงระบบเพียงระบบเดียวอาจมีฮาร์มอนิกปะปนอยู่เป็นจำนวนมาก ยิ่งฮาร์มอนิกมากเท่าใด รูปคลื่นรวมก็จะมีรูปร่างแปลกไปจากคลื่นรูปไซน์มากขึ้นเท่านั้น นอกจากนี้ขนาดของฮาร์มอนิกต่าง ๆ ที่ไม่เท่ากันก็จะทำให้รูปคลื่นรวมมีหน้าตาแตกต่างกันไป แล้วแต่ว่ามีฮาร์มอนิกใดมากน้อยเท่าใด

มีฮาร์มอนิกแล้วไม่ได้อย่างไร?

จะว่าไปแล้วฮาร์มอนิกมีความไม่ได้อยู่หลายอย่าง แต่ผู้เขียนจะขอยกตัวอย่างที่พอจะมองออกง่าย ๆ สัก 2-3 ตัวอย่าง



รูปที่ 1 แสดงสัญญาณรูป Sine ที่ผิดเพี้ยนไปซึ่งเกิดจากฮาร์มอนิก

ตัวอย่างแรก ขอให้ผู้อ่านนึกถึงแกนเหล็กของหม้อแปลงไฟฟ้า ผู้อ่านคงทราบแล้วว่า เมื่อไฟฟ้ากระแสสลับไหลผ่านหม้อแปลงไฟฟ้าจะทำให้เกิดสนามแม่เหล็ก ซึ่งสนามแม่เหล็กนี้ก็จะเป็นสนามแม่เหล็กที่กลับตัวไปมาตลอดเวลาตามลักษณะของกระแสสลับ การกลับตัวไปมาของสนามแม่เหล็กนี้ก็จะเป็นไปส่งผลให้โมเลกุลของเหล็กกลับตัวไปมาตามด้วย ผลที่เกิดขึ้นจึงเกิดการเสียดสีของโมเลกุลในแกนเหล็กจนทำให้เกิดความร้อนที่เรียกว่า Hysteresis Loss โดยปกติหม้อแปลงที่ออกแบบมาสำหรับไฟ 50 Hz ก็จะได้รับสภาพความร้อนที่เกิดจากการกลับตัวไปมาของโมเลกุล 50 รอบต่อวินาทีนี้ได้ แต่ถ้าเกิดมีฮาร์มอนิกเข้ามา เช่น สมมติว่าเป็นฮาร์มอนิกที่สาม โมเลกุลของเหล็กแทนที่จะถูกสนามแม่เหล็กดึงดูดให้หมุนกลับไปกลับมาเรื่อย ๆ เพียง 50 รอบต่อวินาที กลับต้องเกิดการกระตุกตัวไปมาในระหว่างหมุนนั้นถึง 150 ครั้งต่อวินาที ซึ่งหมายถึงการเสียดสีระหว่างโมเลกุลมีมากขึ้น สิ่งก็ตามมากก็คือความร้อนที่สูงขึ้น



ตัวอย่างที่สอง ที่จะยกให้เห็น คือ กรณีของมอเตอร์กระแสสลับ ตามที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่ามอเตอร์กระแสสลับหมุนได้จากการที่ไฟฟ้ากระแสสลับทำให้เกิดสนามแม่เหล็กหมุน โดยความเร็วของสนามแม่เหล็กหมุนจะขึ้นอยู่กับความถี่ของแหล่งจ่ายตามสมการ $N = 120f / P$ ซึ่งสมการนี้ตั้งอยู่บนสมมติฐานที่ว่า แหล่งจ่ายมีความถี่ 50 Hz คลื่นรูปไซน์ของกระแสไฟที่จ่ายเข้ามาก็จะมีเฉพาะ 50 Hz

เท่านั้น สนามแม่เหล็กหมุนที่กล่าวถึงจึงหมุนจะได้อย่างราบเรียบ แต่ถ้าเกิดเหตุการณ์ที่ทำให้มีฮาร์มอนิกปนมากับแหล่งจ่าย เช่น แรงดันที่จ่ายให้มอเตอร์ไม่เป็นคลื่นรูปไซน์บริสุทธิ์ แต่มีฮาร์มอนิกปนเข้ามาด้วย ก็ส่งผลให้กระแสที่ไหลเข้าไปในมอเตอร์ไม่เป็นคลื่นรูปไซน์ที่บริสุทธิ์ เมื่อเป็นเช่นนี้ สนามแม่เหล็กหมุนที่เกิดจากกระแสก็จะมีภาระหมุนที่ไม่เรียบแต่จะเป็นลักษณะกระตุกตามรูปร่างของกระแสที่ไม่เป็นรูปไซน์แทน แรงบิดที่เกิดจากสนามแม่เหล็กนี้จึงไม่เรียบไปด้วย ถ้าหากมอเตอร์นี้ถูกนำไปใช้ในงานที่ต้องการความละเอียด ผลผลิตก็จะไม่ได้คุณภาพตามที่ควรจะเป็น

นอกจากผลเสียของฮาร์มอนิกที่มากับสายตัวนำไฟฟ้าในรูปของกระแสและแรงดันไฟฟ้าดังสองกรณีตัวอย่างข้างต้นแล้ว ฮาร์มอนิกยังมาในรูปของคลื่นรบกวนทางแม่เหล็กไฟฟ้าที่มากับอากาศได้อีกด้วย เพราะกระแสไฟฟ้าที่มีฮาร์มอนิกย่อมเหนี่ยวนำให้เกิดคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าแผ่กระจายออกจากตัวเองและคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้านี้ก็จะเป็นคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่มีฮาร์มอนิกเช่นเดียวกับกระแสที่เป็นแหล่งกำเนิด เมื่อแพร่ออกไปในอากาศก็อาจไปรบกวนการทำงานของระบบอิเล็กทรอนิกส์ที่อยู่ใกล้เคียงให้ทำงานผิดพลาดได้ ข้อเสียของฮาร์มอนิกที่มากับอากาศจึงเป็นสิ่งที่ทำให้เกิดความเสียหายได้เช่นเดียวกัน

จากที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้น เป็นตัวอย่างเพียงเล็กน้อยที่แสดงให้เห็นถึงผลเสียที่เกิดขึ้นจากความไม่บริสุทธิ์ของแหล่งจ่ายเนื่องจากฮาร์มอนิก ซึ่งในความเป็นจริงแล้วมีผลเสียอีกหลายอย่างที่เกิดจากมีฮาร์มอนิกอยู่ในแหล่งจ่ายไฟ ในหัวข้อนี้จึงจะกล่าวถึงฮาร์มอนิกที่เกิดจากคอนเวอร์เตอร์เมื่อให้หม้อแปลงแบบต่าง ๆ เป็นแหล่งจ่ายไฟ

ตามที่ได้ทราบแล้วว่าลักษณะการทำงานแบบสลับช่วงเวลาการจ่ายกระแสให้กับโหลดของไทรสเตอร์แต่ละตัวในคอนเวอร์เตอร์ทำให้กระแสขาเข้าของคอนเวอร์เตอร์มีรูปร่างบิดเบือนไปจากรูปคลื่นไซน์มาก ซึ่งก็หมายความว่ากระแสดังกล่าวมีฮาร์มอนิกปนอยู่มากนั่นเอง จากการศึกษาทางคณิตศาสตร์พบว่าฮาร์มอนิกของกระแสด้านขาเข้าของคอนเวอร์เตอร์จะมีความสัมพันธ์กับจำนวนพัลส์ของแรงดันไฟตรงด้านขาออกตามสมการ

$$n = cp \pm 1$$

เมื่อ n คือ ลำดับของฮาร์มอนิกที่จะปรากฏในกระแสด้านขาเข้า

p คือ จำนวนพัลส์ของแรงดันด้านขาออก

c คือ เลขจำนวนเต็ม 0,1, 2,.....

ตัวอย่างเช่นถ้าแรงดันไฟตรงขาออกของคอนเวอร์เตอร์มี 6 พัลส์ จะพบว่ากระแสขาเข้าของคอนเวอร์เตอร์จะประกอบด้วยฮาร์มอนิกที่ 1, 5, 7,11,13...(เมื่อ $c = 0, n = 0 + 1$; $c=1, n = 6 (1 ; c = 2, n = 12 (1)$

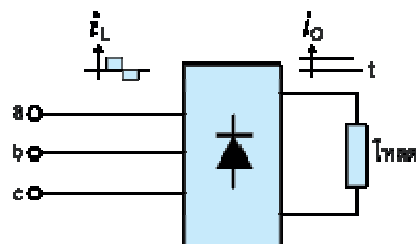
ตารางที่ 1 แสดงถึงลำดับของฮาร์มอนิกที่จะเกิดขึ้นเมื่อ $P = 2, 3$ และ 6 และขนาดของฮาร์มอนิกนั้น ๆ เมื่อเทียบกับฮาร์มอนิกลำดับที่ 1 หรือความถี่มูลฐาน ซึ่งเป็นความถี่ปกติ

ตารางที่ 1 แสดงลำดับของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น

ลำดับ	ความถี่	I_n / I_1		
		P = 2	P = 3	P = 6
1	50	1.00	1.00	1.00
2	100	-	0.50	-
3	150	0.333	-	-
4	200	-	0.25	-
5	250	0.20	0.20	0.20
6	300	-	-	-
7	350	0.143	0.143	0.143
8	400	-	0.125	-
9	450	0.111	-	-
10	500	-	0.100	-
11	550	0.091	0.091	0.091
12	600	-	-	-
13	650	0.077	0.077	0.077
14	700	-	0.071	-
15	750	0.0667	-	-
16	800	-	0.062	-
17	850	0.059	0.059	0.059
18	900	-	-	-
19	950	0.526	0.0526	0.0526
20	1000	-	0.05	-
21	1050	0.0476	-	-
22	1100	-	0.0455	-
23	1150	0.0435	0.0435	0.0435
24	1200	-	-	-

ขนาดของฮาร์มอนิกในตารางเป็นขนาดของฮาร์มอนิกที่ยังไม่ผ่านกระบวนการที่จะปรับปรุงคุณภาพของระบบไฟใด ๆ ทั้งสิ้น รวมถึงไม่มี Commutating Reactor ต่ออยู่ด้านหน้าของคอนเวอร์เตอร์ และคิดที่กระแสโหลดเรียบและต่อเนื่องดังแสดงในรูปที่ 2 อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าการมี Commutating Reactor หรือการที่กระแสไม่เรียบอาจทำให้ขนาดผิดเพี้ยนไปจากตารางบ้างแต่ลำดับของฮาร์มอนิกจะยังคงเดิม

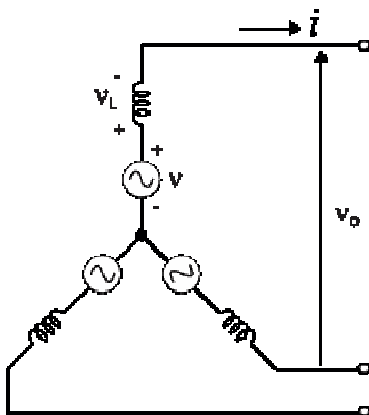
มีอีกสิ่งหนึ่งที่ผู้เขียนอยากจะเน้นย้ำ ณ จุดนี้คือ ฮาร์มอนิกของคอนเวอร์เตอร์ที่เรากำลังกล่าวถึงกันอยู่นี้เป็นฮาร์มอนิกของกระแส ไม่ใช่ฮาร์มอนิกของแรงดัน ที่ผู้เขียนต้องเน้นย้ำตรงนี้เพราะจากประสบการณ์ในการทำหลักสูตรฝึกอบรมพบว่าผู้เข้าอบรมหลายคนเข้าใจว่าฮาร์มอนิกของกระแสและฮาร์มอนิกของแรงดันเป็นสิ่งเดียวกัน ซึ่งต้องขอตอบชี้แจงไว้ ณ ตรงนี้ว่าไม่ใช่สิ่งเดียวกัน ค่าตามมาก็คือ แล้วสองสิ่งนี้ต่างกันอย่างไร



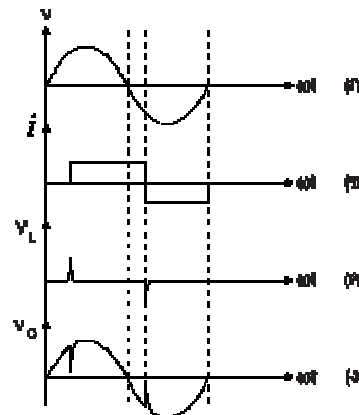
รูปที่ 2 วงจรการทดลองที่โหลดแบบต่อเนื่อง

ก่อนตอบคำถามนี้คงต้องขออ่านไปพิจารณาแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้าใด ๆ ที่เป็นแหล่งจ่ายแรงดัน ไม่ว่าจะเป็นเครื่องกำเนิดไฟฟ้า หรือหม้อแปลงไฟฟ้า หรือ อินฟิไนต์บัสที่รับจากการไฟฟ้า แต่ไม่ว่าจะเป็นแหล่งจ่ายแรงดันที่เป็นแบบใดก็จะประกอบไปด้วย 2 สิ่งคือ ตัวแหล่งจ่ายแรงดันเอง และอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายแรงดันนั้น ดังแสดงในรูปที่ 3 จากรูปค่ากระแส i ที่จ่ายให้กับโหลดมีรูปร่างเป็นไซน์ ก็คงไม่มีปัญหาอะไรเกิดขึ้น เพราะเมื่อกระแสเป็นไซน์ แรงดันที่ตกคร่อมอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายก็จะมีรูปร่างเป็นไซน์ด้วย ถึงแม้เฟสของแรงดัน V_L ที่ตกคร่อมอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายจะไม่ตรงกับเฟสของแรงดัน V ของแหล่งจ่ายเอง แต่คลื่นรูปไซน์บวก - ลบกันเอง อย่างไรก็ตามเสียก็ได้รูปคลื่นไซน์ แรงดันขาออกที่ถูกลำเลียงไปใช้งาน V_0 จึงเป็นคลื่นรูปไซน์ด้วย แต่ถ้ากระแส i ที่จ่ายให้กับโหลดไม่เป็นไซน์ แรงดันที่ตกคร่อมอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายก็จะเป็นไซน์ตามกระแส อีกทั้งรูปร่างยังอาจเปลี่ยนไปอีกด้วย เนื่องจากอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายโดยส่วนใหญ่จะมีความเป็น L มากกว่าความเป็น R ทำให้แรงดันที่ตกคร่อมที่อิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายมีค่าเท่ากับ $V_L = L di / dt$ เช่น ถ้ากระแสมีลักษณะเป็นคลื่นสี่เหลี่ยม V_L ก็จะมีลักษณะเป็นยอดแหลมดังแสดงในรูป 4 ค แรงดัน V_0 ซึ่งเกิดจากแรงดันแหล่งจ่าย (ลบด้วยแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย V_L) ก็จะมีรูปร่างผิดเพี้ยนไปดังแสดงในรูป 4 ง เมื่อแรงดัน V_0 ไม่ใช่คลื่นรูปไซน์บริสุทธิ์ก็จะก่อให้เกิดปัญหาตามมากับโหลดที่ต่ออยู่กับแหล่งจ่ายนี้ตามที่ได้อธิบายไว้แล้วก่อนหน้านี้ อย่างไรก็ตามการที่ V_0 จะมีรูปร่างผิดเพี้ยนไปจากไซน์เนื่องจากผลของกระแสฮาร์มอนิกมีขนาดน้อยแค่ไหนนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 ประการคือ

1. กระแสฮาร์มอนิกมีขนาดน้อยเพียงใด เมื่อเทียบกับความสามารถที่แหล่งจ่ายจะจ่ายได้ เช่น ถ้าแหล่งจ่ายดังกล่าวสามารถจ่ายได้สูง 100 A แต่กระแสที่มีฮาร์มอนิกมีเพียง 1 A อย่างนี้ก็คงไม่ทำให้ V_0 เปลี่ยนแปลง แต่หากกระแสฮาร์มอนิกมีมาก V_0 ก็จะเพี้ยนมาก
2. อิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายมีมากน้อยเพียงใด ถ้าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายมีน้อย ก็จะทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมที่อิมพีแดนซ์น้อย รูปร่างของ V_0 ก็จะไม่ค่อยเพี้ยน ฮาร์มอนิกของกระแสก็จะไม่ค่อยมีผลกระทบมาก แต่ถ้าอิมพีแดนซ์มีค่ามากก็จะทำให้เกิดฮาร์มอนิกของแรงดันมากตาม



รูปที่ 3 แสดงแหล่งจ่ายแรงดันและอิมพีแดนซ์



รูปที่ 4 แสดงผลการทดลอง

ในทางปฏิบัติ หากผู้อ่านพิจารณาที่ป้ายบอกคุณสมบัติทางเทคนิคของหม้อแปลง หรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ป้ายบอกคุณสมบัติเหล่านั้นมักจะไม่นิบอกค่าอิมพีแดนซ์มาโดยตรง แต่จะบอกมาเป็นเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์ เช่นระบุเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์เท่ากับ 6% หมายความว่า ถ้าหม้อแปลงไฟฟ้าหรือเครื่องกำเนิดไฟฟ้าตัวนั้นจ่ายกระแสเต็มพิกัด จะมีแรงดันตกคร่อมอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายเอง 6% ของแรงดันพิกัด หรือกล่าวง่าย ๆ ก็คือ ถ้าจ่ายกระแสเต็มพิกัด แรงดันที่ขั้วหม้อแปลงหรือเครื่องกำเนิดเครื่องนั้นจะตกไป 6% เช่นถ้าพิกัด 400 V, 100 A ถ้าจ่ายกระแสเต็ม 100 A แรงดันที่ขั้วจะหายไป 6% หรือ 24 V หรือเหลือเพียง 376 V ถ้าเราต้องการหาอิมพีแดนซ์ก็สามารถหาได้จาก $X_L = V/i$ โดย V คือแรงดันที่ตกคร่อมอิมพีแดนซ์ ซึ่งหมายความว่าถ้าเปอร์เซ็นต์อิมพีแดนซ์สูง อิมพีแดนซ์ก็จะสูงตาม โอกาสที่จะเกิดฮาร์มอนิกของแรงดัน เมื่อมีฮาร์มอนิกของกระแสเข้ามา ก็จะมากตาม