บทที่ 3

การประเมินหาระดับกระแสฮาร์มอนิก

การวิเคราะห์ฮาร์มอนิกที่กล่าวมาในบทที่ 2 จะเห็นว่าข้อมูลที่จำเป็นอย่างหนึ่งคือ ปริมาณของกระแสฮาร์มอนิกจากแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก ซึ่งในการวิเคราะห์นั้นจะถือว่าเป็นข้อมูลเบื้องต้นที่ต้องทราบมาก่อน ดังนั้นในบทนี้จะกล่าวถึงวิธีการประเมินหากระแสฮาร์มอนิก เพื่อที่จะใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นสำหรับการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก กระแสฮาร์มอนิกจะเกิดจากอุปกรณ์ที่มีคุณสมบัติไม่เป็นเชิงเส้น ซึ่งเรียกว่าแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก สำหรับอุปกรณ์ที่เป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกที่พบเห็นมากในโรงงานอุตสาหกรรมได้แก่

- เครื่องแปลงผันกำลังแบบสถิต(Static Power Converter : SPC)
- เครื่องจักรกลไฟฟ้า
- หม้อแปลง
- หลอดปล่อยประจุในก๊าซ
- แหล่งจ่ายกำลังโมดสวิตช์ (Switching Mode Power Supply : SMPS)
- ชุดปรับความเร็วรอบมอเตอร์ (Adjustable Speed Drive :ASD)
- เตาหลอมแบบอาร์ก
- เครื่องเชื่อมไฟฟ้า
- ชุดควบคุมการทำงานแบบ Integral Cycle หรือ Burst firing

โดยทั่วไปค่าของกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากอุปกรณ์เหล่านี้จะมีวิธีการประเมินค่าได้จาก 2 วิธี คือ

(ก) **การประเมินจากการตรวจวัด** วิธีการนี้จะต้องอาศัยเครื่องวัดค่าทางไฟฟ้า ซึ่งเครื่องวัดส่วนใหญ่ในปัจจุบันนอกจากการวัดค่ากระแส และแรงดัน แล้ว ยังสามารถวิเคราะห์รูปคลื่นนั้นๆได้ว่ามีฮาร์มอนิกลำดับใดปนอยู่ หลักการที่เครื่องวัดส่วนใหญ่นำมาใช้คือ Fast Fourier Transform :FFT จะวิเคราะห์ได้ถึงฮาร์มอนิกลำดับใดนั้น ขึ้นกับอัตราการสุ่มสัญญาณของเครื่องวัดรุ่นนั้นๆ ปริมาณฮาร์มอนิกที่ได้จากการวัดจะถือว่าเป็นค่าที่เกิดขึ้นจริงในสภาวะนั้นๆ และความถูกต้องหรือความเชื่อถือได้ของข้อมูล จะขึ้นกับลักษณะการวัด เช่น ตำแหน่งการติดตั้งเครื่องวัด การต่อวงจรเพื่อการตรวจวัด และความแม่นยำของเครื่องวัดเอง เป็นต้น

(ข) **การประเมินจากการคำนวณ** วิธีการนี้เป็นการวิเคราะห์จากรูปคลื่นของกระแสของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก เช่น จากเครื่องแปลงผันกำลังแบบสถิต โดยอาศัยหลักการทางคณิตศาสตร์ โดยทั่วไปแล้วทุกวิธีการจะอยู่บนพื้นฐานของการแทนสัญญาณนั้นๆด้วยอนุกรมฟูเรียร์ ผลการวิเคราะห์นี้จะมีความถูกต้องใกล้เคียงกับค่าที่เกิดขึ้นจริงหรือไม่ ขึ้นกับพารามิเตอร์ที่นำมาพิจารณา เช่น การควบคุมมุมหน่วงจุดชนวน อิมพีแดนซ์ของระบบที่แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกต่ออยู่ หรือ การกระเพื่อมของกระแสไฟตรงที่ปนอยู่ทางด้านขาออกของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก (เช่น คอนเวอร์เตอร์) เป็นต้น

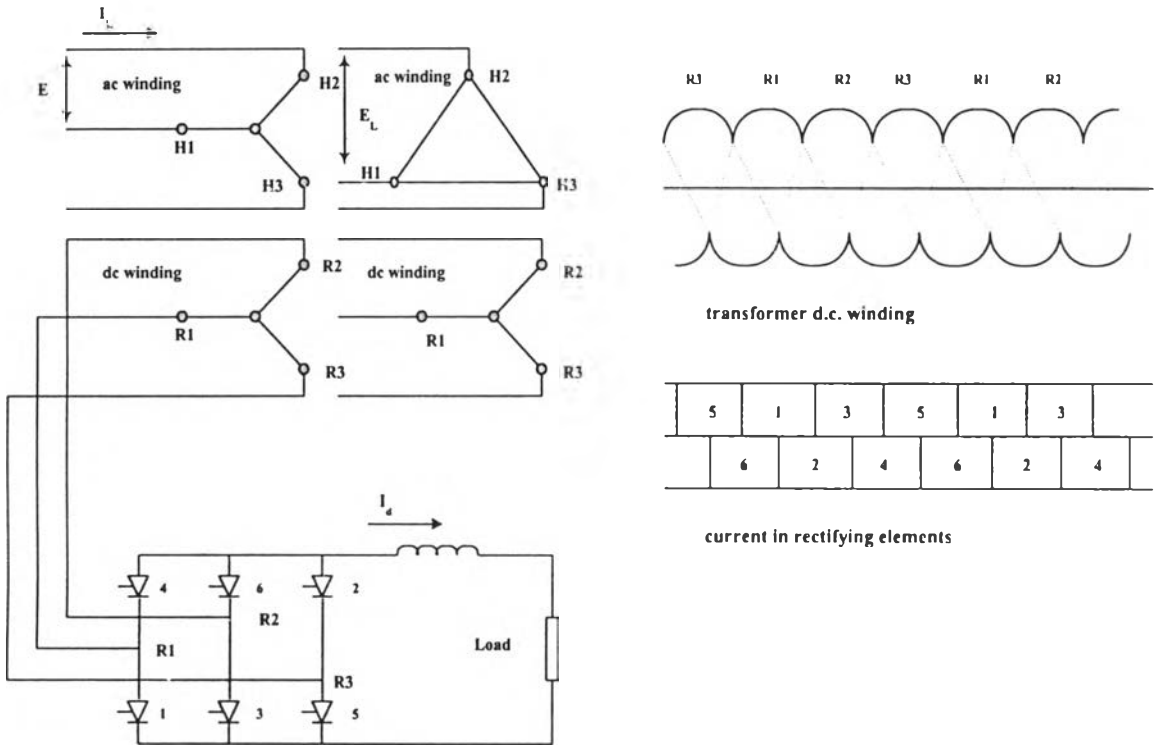
เมื่อเปรียบเทียบวิธีการประเมินค่ากระแสฮาร์มอนิกแล้ว จะพบว่า วิธีการตรวจวัดเป็นวิธีการที่แม่นยำเพราะค่าที่วัดได้เป็นค่าที่เกิดขึ้นจริง แต่ในการตรวจวัดนั้นจะต้องใช้เวลานานและค่าใช้จ่ายมากพอสมควร ส่วนวิธีการคำนวณนั้นอาจให้ผลไม่ตรงกับค่าจริง เพราะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ที่นำมาพิจารณา แต่มีข้อดีคือ จะใช้เวลาวิเคราะห์และค่าใช้จ่ายน้อยกว่าการตรวจวัด และ สามารถกำหนดเงื่อนไขต่างๆได้ อย่างไรก็ตาม วิธีการทั้งสองนี้ยังมีความจำเป็นที่จะต้องทำควบคู่กันไปสำหรับการวิเคราะห์ฮาร์มอนิก โดย การตรวจวัดจริงจำเป็นในแง่ของ การประเมินค่าภายหลังการนำอุปกรณ์ที่เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกเข้ามาใช้ในระบบ เพื่อตรวจสอบกับค่ามาตรฐาน เกณฑ์การบังคับใช้ หรือค่าที่ได้ออกแบบไว้ ส่วนการคำนวณจำเป็นในแง่ของ การคาดการล่วงหน้า ก่อนการติดตั้งอุปกรณ์ หรือ การแปรเปลี่ยนของพารามิเตอร์ต่างๆในระบบ ซึ่งจะทำให้เห็นถึงปัญหาที่อาจเกิดขึ้นเมื่อใช้งานจริง ในวิทยานิพนธ์นี้จะกล่าวถึงการประเมินค่ากระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธีการคำนวณ ของเครื่องแปลงผันกำลังแบบสถิต เพราะเป็นอุปกรณ์ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในโรงงานอุตสาหกรรม

3.1 การประเมินค่ากระแสฮาร์มอนิกจากเครื่องแปลงผันกำลังแบบสถิต (คอนเวอร์เตอร์)

เครื่องแปลงผันกำลังแบบสถิต หรือ เรียกว่า คอนเวอร์เตอร์ เป็นวงจรเรียงกระแส โดยมีชุดเรียงกระแสเป็นอุปกรณ์สารกึ่งตัวนำ เช่น ไทริสเตอร์ หรือ อาจจะเป็นไดโอดธรรมดาไม่มีการควบคุม สำหรับทางด้านขาออกของคอนเวอร์เตอร์จะนำไปจ่ายให้กับโหลดกระแสตรง เช่น มอเตอร์กระแสตรง หรือจะนำไปจ่ายให้กับโหลดกระแสสลับโดยผ่าน อินเวอร์เตอร์เพื่อแปลงกลับไปเป็นไฟฟ้ากระแสสลับก่อนจ่ายให้กับโหลด จุดที่จะประเมินคือกระแสฮาร์มอนิกทางด้านแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ โดยจะประเมินว่าผลการทำงานของวงจรภายในของคอนเวอร์เตอร์ก่อให้เกิดฮาร์มอนิกลำดับใดบ้างปนอยู่และมีขนาดเท่าใด

การประเมินค่ากระแสฮาร์มอนิกจากคอนเวอร์เตอร์ จะพิจารณาจากรูปคลื่นกระแสที่เกิดขึ้นซึ่งจะมีทั้งแบบที่เป็นไปตามทฤษฎี หรือ แบบอุดมคติ ซึ่งมีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยม และแบบที่ไม่เป็นอุดมคติเนื่องจากมีพารามิเตอร์อื่นๆที่จะต้องพิจารณาร่วม ดังนั้นค่ากระแสฮาร์มอนิกอาจมีค่าแตก

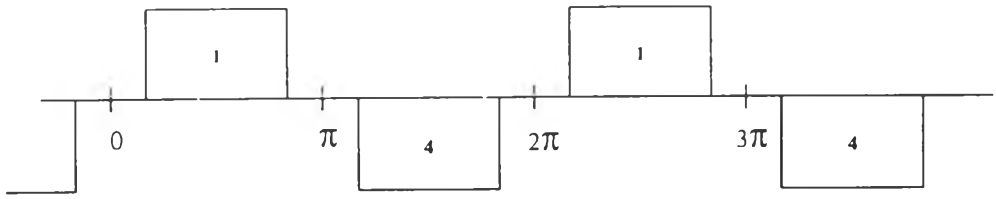
ต่างไปจากทฤษฎีและลำดับฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น อาจมีฮาร์มอนิกที่ไม่ใช่ฮาร์มอนิกเฉพาะตัว (Non-Characteristic harmonic) เกิดขึ้นด้วย แต่ในที่นี้จะกล่าวถึงเฉพาะฮาร์มอนิกเฉพาะตัวเท่านั้น



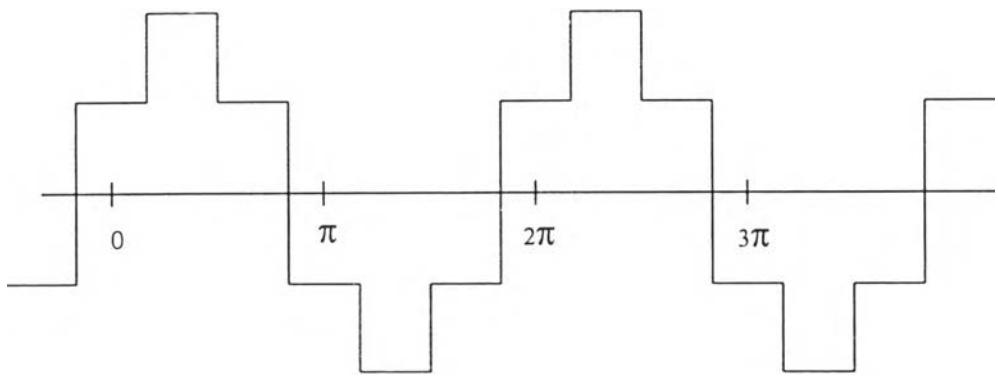
รูปที่ 3.1 วงจรของคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์ 3 เฟส

3.1.1 คอนเวอร์เตอร์แบบอุดมคติ

จากรูปที่ 3.1 ซึ่งเป็นวงจรมาตรฐานของคอนเวอร์เตอร์ เมื่อพิจารณาแบบอุดมคติแล้วจะได้ว่ากระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นที่คอนเวอร์เตอร์แบบอุดมคตินั้นมีความราบเรียบดังแสดงในรูปที่ 3.2 ซึ่งส่วนใหญ่แล้วคอนเวอร์เตอร์ที่กระแสไฟฟ้ามีความราบเรียบจะเป็นคอนเวอร์เตอร์ขนาดใหญ่ ซึ่งค่าอินดักทีฟรีแอคแตนซ์ทางด้านโหลดมีขนาดใหญ่ เมื่อมองจากด้านแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่จ่ายไฟให้กับคอนเวอร์เตอร์จะจำลองแบบเป็นแหล่งกำเนิดกระแสฮาร์มอนิกดังรูปที่ 3.3

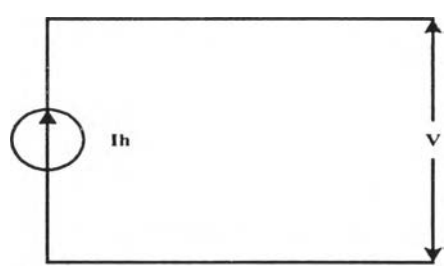


(ก) รูปคลื่นกระแสของคอนเวอร์เตอร์แบบอุดมคติ เมื่อ
ต่อหม้อแปลง แบบ วาย-วาย (Wye-Wye)



(ข) รูปคลื่นกระแสของคอนเวอร์เตอร์แบบอุดมคติ เมื่อ
ต่อหม้อแปลง แบบ เดลตา-วาย (Delta-Wye)

รูปที่ 3.2 รูปคลื่นกระแสของคอนเวอร์เตอร์แบบอุดมคติ



รูปที่ 3.3 วงจรสมมูลของคอนเวอร์เตอร์ที่ความถี่ฮาร์มอนิก

ส่วนประกอบฮาร์มอนิกของรูปคลื่นกระแสของคอนเวอร์เตอร์ [1]

จากการวิเคราะห์ด้วยอนุกรมฟูเรียร์กระแสทางด้านแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ รูปคลื่นกระแสในรูปที่ 3.2 (ก) เมื่อหม้อแปลงต่อแบบ วาย-วาย เขียนได้ดังสมการที่ (3.1)

$$I_L = \frac{\sqrt{2}I_1}{\pi}\left\{\begin{array}{l}\sin(\omega t)-\frac{1}{5}\sin(5\omega t)-\frac{1}{7}\sin(7\omega t)+\frac{1}{11}\sin(11\omega t)\\ +\frac{1}{13}\sin(13\omega t)+\ldots+\frac{2}{\sqrt{3}}\cos(\frac{h\pi}{6})\frac{1}{h}\sin(h\omega t)+\ldots\end{array}\right\} \quad (3.1)$$

และหากถ้าหม้อแปลงต่อแบบ เดลตา-วาย จะเขียนสมการของกระแสทางด้านแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับได้ ดังสมการที่(3.2)

$$I_L = \frac{\sqrt{2}I_1}{\pi}\left\{\begin{array}{l}\sin(\omega t)+\frac{1}{5}\sin(5\omega t)+\frac{1}{7}\sin(7\omega t)+\frac{1}{11}\sin(11\omega t)\\ +\frac{1}{13}\sin(13\omega t)+\ldots+\frac{2}{\sqrt{3}}\cos(\frac{h\pi}{6})\frac{1}{h}\sin(h\omega t)+\ldots\end{array}\right\} \quad (3.2)$$

ดังนั้นการประเมินกระแสฮาร์มอนิกจากคอนเวอร์เตอร์แบบอุดมคติกล่าวได้ดังนี้

องค์ประกอบของลำดับฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น เป็นฮาร์มอนิกเฉพาะตัว (Characteristic harmonic) และขนาดของกระแสฮาร์มอนิกแต่ละลำดับมีค่าดังนี้

$$h = kP \pm 1 \quad (3.3)$$

$$I_h = \frac{I_1}{h} \quad (3.4)$$

และ $$I_1 \approx \frac{\sqrt{6}I_d}{\pi} \quad (3.5)$$

เมื่อ h = เลขลำดับฮาร์มอนิก

k = เลขจำนวนเต็มบวกใดๆ k = 1,2,3,4,...

p = จำนวนพัลส์ของคอนเวอร์เตอร์

I_h = ขนาดกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ h

I_1 = ขนาดกระแสของคอนเวอร์เตอร์ที่ความถี่หลักมูล

I_d = ขนาดกระแสไฟตรงทางด้านขาออกของคอนเวอร์เตอร์(ค่าเฉลี่ย)

ตารางที่ 3.1 ขนาดของกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากคอนเวอร์เตอร์ 6 พัลส์ แบบอุดมคติ

ลำดับฮาร์มอนิก (h)	***I_h (% of I_1)***	***ลำดับฮาร์มอนิก (h)***	***I_h (% of I_1)***
5	20.00	25	4.00
7	14.29	.	.
11	9.09	.	.
13	7.69	.	.
17	5.88	.	.
19	5.26	6k ± 1	100/h

จากสมการที่ (3.1) และ (3.2) จะพบว่า รูปแบบของสมการคล้ายกันยกเว้นกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5,7,17,19,...จะมีเครื่องหมายตรงกันข้าม ดังนั้นถ้าหากนำเอาคอนเวอร์เตอร์ 6 พัลส์แบบอุดมคติ 2 ชุดนี้ มาต่อขนานหรืออนุกรมกัน กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5,7,17,19,... จะหักล้างกันไป ซึ่งเรียกว่า คอนเวอร์เตอร์แบบ 12 พัลส์ นั่นเอง การนำเอาคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์ หลายชุดมาต่อขนานหรืออนุกรมกัน เรียกว่าการทำเฟสมัลติพลิเคชัน (Phase multiplication) ซึ่งสามารถทำได้หลายแบบ ดังนี้

- คอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์ 2 ชุด ขนานหรืออนุกรมกันเป็น คอนเวอร์เตอร์แบบ 12 พัลส์
- คอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์ 3 ชุด ขนานหรืออนุกรม กันเป็น คอนเวอร์เตอร์แบบ 18 พัลส์
- คอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์ 4 ชุด ขนานหรืออนุกรม กันเป็น คอนเวอร์เตอร์แบบ 24 พัลส์

องค์ประกอบลำดับฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจะเป็นไปตามสมการที่ (3.3) ดังนั้น การทำเฟสมัลติพลิเคชันจึงเป็นวิธีการลดปัญหาเรื่องฮาร์มอนิกอีกวิธีหนึ่ง กระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจะเป็นไปตามทฤษฎีได้ต้องมีเงื่อนไขดังนี้ สมมุติถ้ามี คอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์ m ชุด เมื่อนำมาทำเฟลมัลติพลิเคชัน [9]

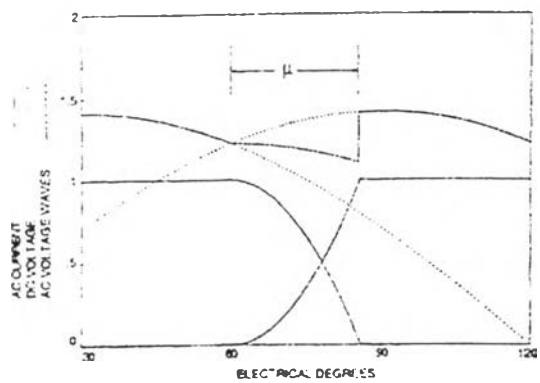
1) หม้อแปลงที่ใช้ต้องมีอัตราส่วนการแปลงเท่ากัน
2) หม้อแปลงที่ใช้ต้องมีค่าอิมพีแดนซ์เท่ากัน
3) คอนเวอร์เตอร์แต่ละชุดต้องถูกควบคุมด้วยมุมหน่วงจุดชนวนเท่ากัน (มุม α)
4) การเลื่อนเฟสของหม้อแปลงแต่ละตัวห่างกันด้วยมุม 60/m องศา
5) คอนเวอร์เตอร์แต่ละชุดต้องรับโหลดเท่าๆกัน

ในทางปฏิบัติเงื่อนไขดังกล่าวอาจทำได้ยาก เพราะไม่มีคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์ใดๆ ที่มีคุณสมบัติเท่ากันทุกประการ กระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นอาจไม่เป็นไปตามทฤษฎี นอกจากนี้เมื่อพิจารณาคอนเวอร์เตอร์ แบบ 6 พัลส์ ในความเป็นจริงแล้ว กระแสไฟตรงที่ได้จากคอนเวอร์เตอร์จะมีการกระเพื่อม (d.c. ripple) บนอยู่ รวมทั้งพารามิเตอร์อื่นๆ เช่น อิมพีแดนซ์ของระบบ ปรากฏการณ์นำกระแสจากเฟสหนึ่งไปยังอีกเฟสหนึ่ง ซึ่งเรียกว่า ปรากฏการณ์คอมมิวเตชัน (Commutation phenomena) พารามิเตอร์เหล่านี้ ล้วนทำให้ค่ากระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากคอนเวอร์แตกต่างไปจากทฤษฎี จึงมีวิธีการประเมินหลายแบบ ดังจะได้กล่าวต่อไป

3.1.2 คอนเวอร์เตอร์แบบไม่เป็นอุดมคติ [4,7,9]

ขนาดของกระแสฮาร์มอนิกที่ได้ในทางปฏิบัติอาจมีค่ามากหรือน้อยกว่าค่าที่ได้ตามทฤษฎี ผลกระทบที่ทำให้ขนาดกระแสฮาร์มอนิกไม่เป็นตามทฤษฎีมีดังนี้

(ก) ผลกระทบเนื่องจากอิมพีแดนซ์ของระบบและหม้อแปลง การประเมินค่ากระแสฮาร์มอนิกเมื่อคำนึงถึงอิมพีแดนซ์ของระบบเป็นการเปรียบเทียบขนาดของคอนเวอร์เตอร์กับระบบที่ต่ออยู่ เนื่องจากปรากฏการณ์คอมมิวเตชันนั้นไม่สามารถเกิดขึ้นทันทีทันใด จึงทำให้กระแสไม่เป็นรูปสี่เหลี่ยมตามอุดมคติ หน่วยที่ใช้บอกจะเป็นมุม เรียกว่ามุมคอมมิวเตชัน (Commutation angle) หรือมุมเหลื่อม (Overlap angle) สัญลักษณ์ที่ใช้คือ μ ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 ลักษณะกระแสของคอนเวอร์เตอร์เมื่อคำนึงถึงการเกิดคอมมิวเตชัน

โดยทั่วไปแล้วจะเรียกค่าอิมพีแดนซ์ของระบบกับของหม้อแปลงว่า คอมมิวเตชันรีแอคแตนซ์ และใช้สัญลักษณ์เป็น X_C ซึ่ง หากเป็นระบบขนาดใหญ่ ค่ารีแอคแตนซ์รั่วไหล (leakage reactance) ของหม้อแปลงจะมีอิทธิพลมากที่สุด ถ้าอิมพีแดนซ์ของระบบหรือหม้อแปลงมีค่ามากการคอมมิวเตชันจะใช้เวลานาน (มุม μ กว้างขึ้น) และถ้าไม่คิดค่าความต้านทาน กระแสคอมมิวเตชัน (i_c) ในช่วงต่างๆ นิยามได้ดังนี้

$$i_c = \frac{E}{\sqrt{2}X_C}(\cos\alpha-\cos\omega t) \qquad (3.6)$$

เมื่อสิ้นสุดการคอมมิวเตชัน $i_c = I_d$ และ $\omega t = \mu+\alpha$ สมการที่ (3.6) จะเขียนได้เป็น

$$I_d = \frac{E}{\sqrt{2}X_C}[\cos\alpha-\cos(\alpha+\mu)] \qquad (3.7)$$

จากสมการที่ (3.6) และ (3.7) จะได้

$$i_C = I_d\left(\frac{\cos\alpha-\cos\omega t}{\cos\alpha-\cos(\alpha+\mu)}\right) \qquad (3.8)$$

เป็นกระแสคอมมิวเตชันในช่วง $\alpha < \omega t < \alpha+\mu$

และ ถ้าขนาดขดลวด D.C Link มีค่ารีแอคแตนซ์เป็นอนันต์ กระแสด้านแหล่งจ่ายไฟที่อยู่ในช่วง ($\alpha+\mu < \omega t < \alpha+2\pi/3$) จะยังคงมีค่าเท่ากับกระแสไฟตรง (I_d) กล่าวคือ

$$i_{Line} = I_d \quad (\text{สำหรับ } \alpha+\mu < \omega t < \alpha+2\pi/3) \tag{3.9}$$

และที่มุม $\omega t = \alpha+2\pi/3$ การคอมมิวเตชันจะเกิดขึ้นอีก และการคำนวณจะเหมือนกับกรณีข้างต้น โดยจะได้สมการของกระแสคอมมิวเตชันดังนี้

$$I_C = I_d - I_d\left[\frac{\cos(\alpha+2\pi/3)-\cos\omega t}{\cos(\alpha+2\pi/3)-\cos(\alpha+2\pi/3+\mu)}\right] \tag{3.10}$$

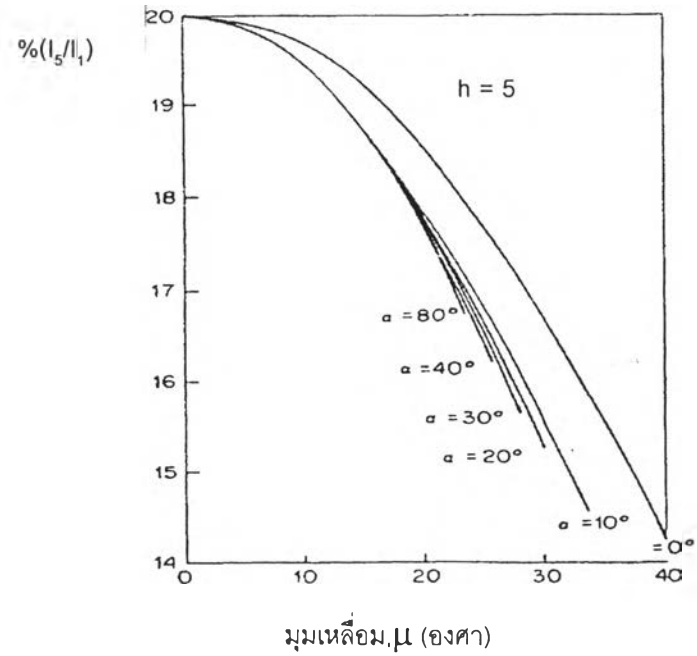
เป็นค่าสำหรับช่วง $\alpha+\frac{2\pi}{3} < \omega t < \alpha+\frac{2\pi}{3}+\mu$

ถ้าหากภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน แต่ ค่า α และ μ ของคอนเวอร์เตอร์แปรเปลี่ยนไป จะได้ตัวอย่างการประเมินค่ากระแสฮาร์มอนิกจากคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์ ดังตารางที่ 3.2

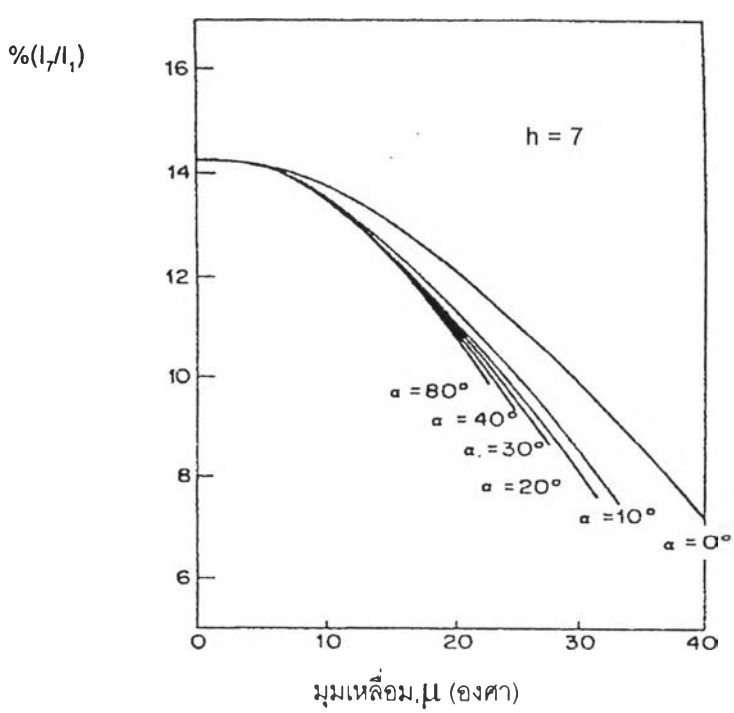
ตารางที่ 3.2 ตัวอย่างของกระแสฮาร์มอนิกจากคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์ เมื่อค่ามุม α และ μ แปรเปลี่ยนไป และ X_C = 8 %[7]

ลำดับฮาร์มอนิก h	***$\alpha = 10^o, \mu = 15.2^o$*** I_h *(% ของ* I_1*)*	***$\alpha = 60^o, \mu = 5.2^o$*** I_h *(% ของ* I_1*)*	***ค่าตามทฤษฎี (1/h)*** I_h *(% ของ* I_1*)*
5	18.65	19.83	20.00
7	12.44	14.05	14.29
11	6.37	8.72	9.09
13	4.62	7.26	7.69
17	2.29	5.32	5.88
19	1.53	4.64	5.26
23	0.63	3.61	4.35
25	0.51	3.21	4.00

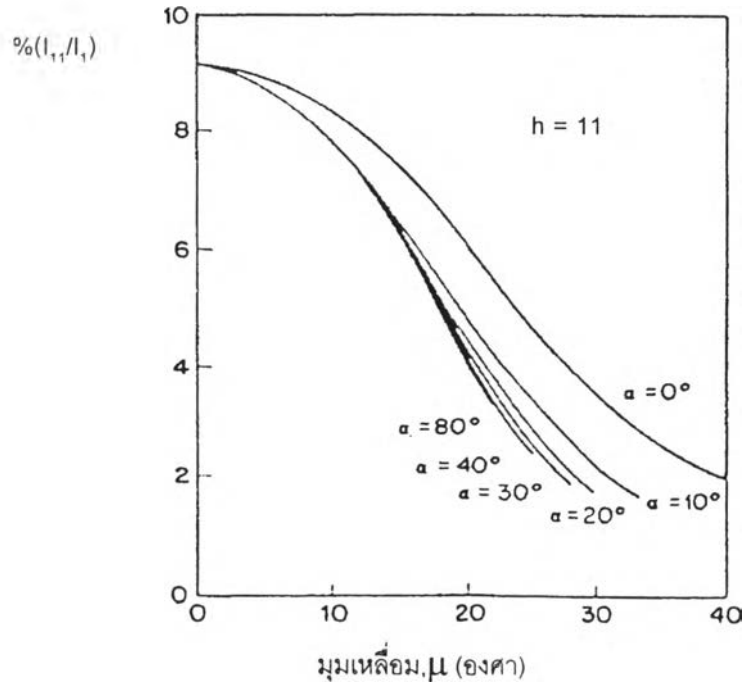
จากตารางที่ 3.2 พบว่า ถ้ามุมเหลื่อม (μ) มาก ขนาดกระแสฮาร์มอนิกจะลดลง เมื่อประเมินหาค่ากระแสฮาร์มอนิกสามารถเขียนอยู่ในเทอมของ มุมหน่วงจุดชนวน (α) มุม เหลื่อม (μ) และขนาดของกระแสฮาร์มอนิก โดยเป็นร้อยละของค่ากระแสที่ความถี่หลักมูล จะได้กราฟความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์เหล่านี้ ดังแสดงในรูปที่ 3.5 ถึง 3.8 [4] ซึ่งจะเห็นว่าถ้าอิมพีแดนซ์ของระบบมีมาก ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกจะลดลง และวิธีการประเมินแบบนี้ตาม [7] จะเรียกว่า Classical Method



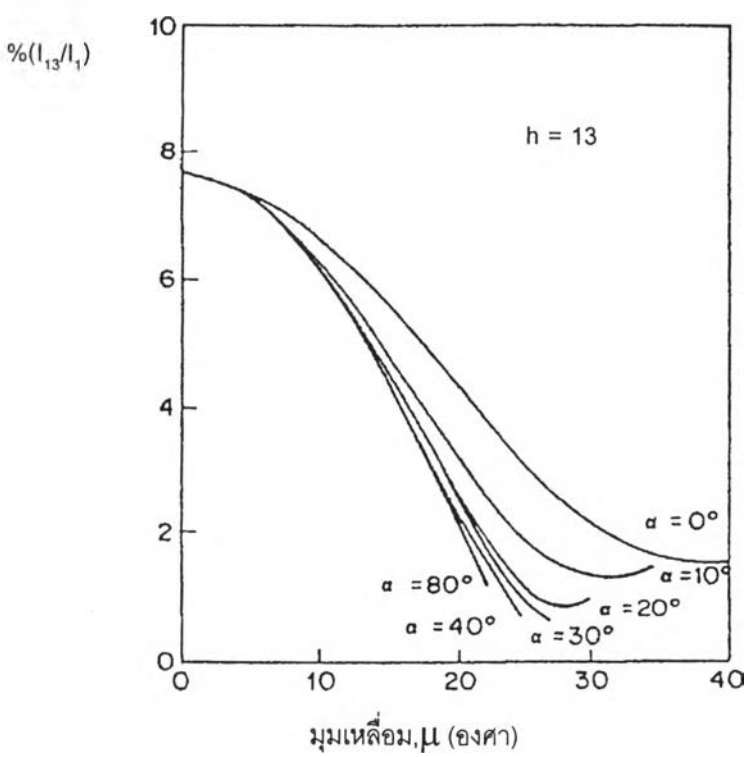
รูปที่ 3.5 ขนาดของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 โดยสัมพันธ์กับ มุม α และ μ



รูปที่ 3.6ขนาดของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 7 โดยสัมพันธ์กับ มุม α และ μ

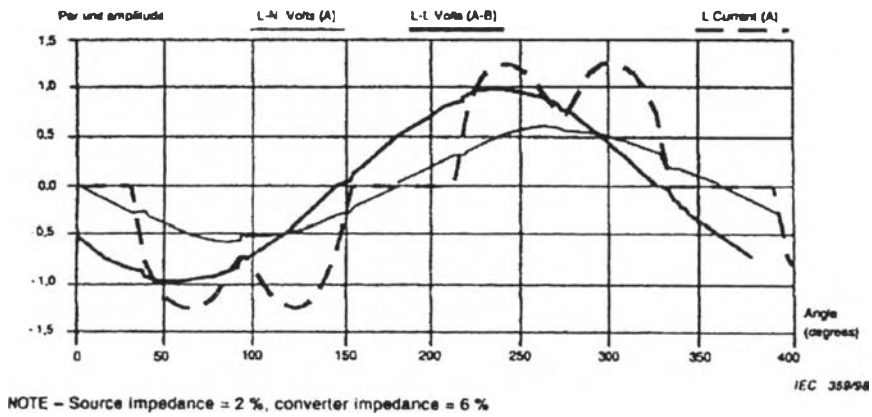


รูปที่ 3.7ขนาดของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 11 โดยสัมพันธ์กับ มุม α และ μ



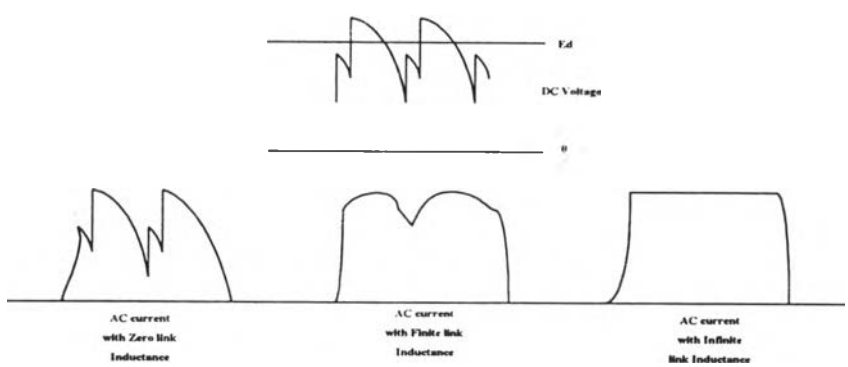
รูปที่ 3.8ขนาดของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 13 โดยสัมพันธ์กับ มุม α และ μ

(ข) ผลกระทบเนื่องจากกระแสไฟตรงด้านขาออกมีการกระเพื่อม เมื่อนำผลการกระเพื่อมที่ปนอยู่กับไฟฟ้ากระแสตรงมาพิจารณาด้วย ค่ากระแสฮาร์มอนิกที่ประเมินได้จะใกล้เคียงความเป็นจริงมากขึ้น การกระเพื่อมของกระแสจะพบมากในคอนเวอร์เตอร์ขนาดกลาง เพราะค่า รีแอคแตนซ์ทางด้านขาออกไม่ใช่ค่าอนันต์เหมือนคอนเวอร์เตอร์ขนาดใหญ่ เช่น คอนเวอร์เตอร์ที่จ่ายให้กับมอเตอร์กระแสตรง สำหรับรูปคลื่นกระแสทางด้านแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ เนื่องจากการกระเพื่อมของกระแสไฟตรง แสดงดังรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ตัวอย่างของกระแสทางด้านขาเข้าของคอนเวอร์เตอร์ที่คิดผลเนื่องจากการกระเพื่อมของกระแสไฟตรง

จากการวิเคราะห์ด้วยอนุกรมฟูเรียร์ จะพบว่า กระแสฮาร์มอนิกสูงสุดลำดับที่ 5 อาจเพิ่มขึ้นถึง 3 เท่าของค่าที่ได้จากการประเมินตามทฤษฎี (รูปคลื่นสี่เหลี่ยม) [4] โดยขึ้นอยู่กับลักษณะการกระเพื่อม ทั้งนี้วิธีลดการกระเพื่อมของกระแสทางด้านแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ ทำได้โดยการเพิ่มค่ารีแอคแตนซ์ทางด้านขาออกหรือเข้าของคอนเวอร์เตอร์ ดังอย่างผลของการเปลี่ยนขนาดของค่ารีแอคแตนซ์ แสดงดังรูปที่ 3.10 [7]

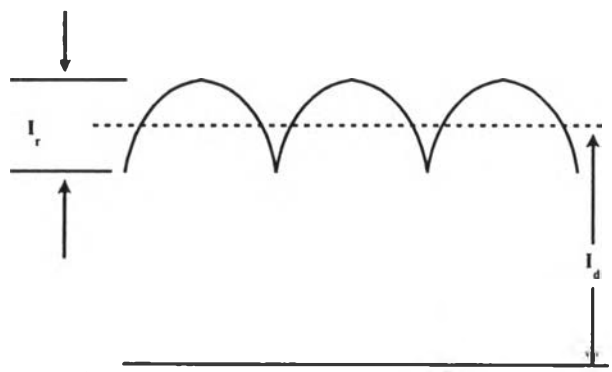


รูปที่ 3.10 ตัวอย่างรูปคลื่นกระแสทางด้านขาเข้าที่ค่ารีแอคแตนซ์ต่างๆกัน

ได้มีผู้เสนอวิธีการประเมินค่ากระแสฮาร์มอนิกเนื่องจากการกระเพื่อมของกระแสไฟตรงด้านขาออกของคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์ ไว้หลายวิธีดังตัวอย่างต่อไปนี้

(1) **วิธีการประเมินตามวิธีของ** Dobinson

วิธีการของ Dobinson จะประเมินค่ากระแสฮาร์มอนิกโดยพิจารณาการกระเพื่อมของกระแสอยู่ในรูปแบบของอัตราส่วนการกระเพื่อม ดังรูปที่ 3.11 แต่ไม่คิดผลของการคอมมิวเตชัน (μ angie) เพราะถือว่ามุมหน่วงจุดชนวน(α) มีอิทธิพลมากกว่า การคอมมิวเตชัน (μ)



รูปที่ 3.11 ลักษณะของรูปคลื่นกระแสที่มีการกระเพื่อม

อัตราส่วนการกระเพื่อม (Ripple ratio :r) **เขียนได้ดังสมการที่** (3.11)

$$r = \frac{I_r}{I_d} \tag{3.11}$$

กระแสที่ความถี่หลักมูลด้านขาเข้าของคอนเวอร์เตอร์มีค่าดังสมการที่ (3.12)

$$I_1 = I_d(1.102+0.014r) \tag{3.12}$$

และขนาดของกระแสฮาร์มอนิกมีค่าดังสมการที่ (3.13) **และ** (3.14)

$$I_h = I_1\left[\frac{1}{h}+\frac{6.46r}{h-1}-\frac{7.13r}{h}\right](-1)^k \tag{3.13}$$

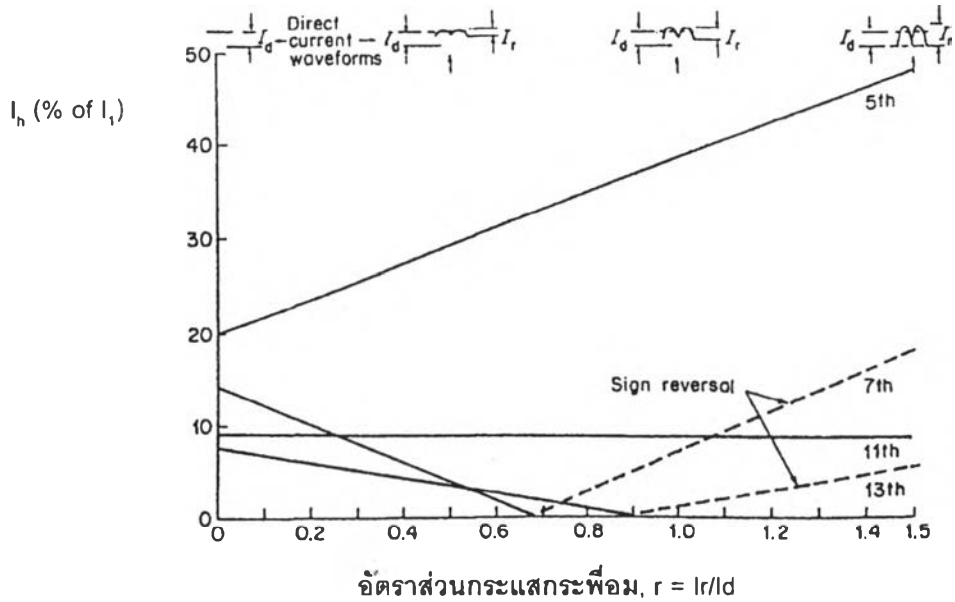
สำหรับ $h = kp - 1$ (5,11,19,23,...)

และ

$$I_h = I_1\left[\frac{1}{h}+\frac{6.46r}{h+1}-\frac{7.13r}{h}\right](-1)^k \tag{3.14}$$

สำหรับ $h = kp + 1$ (7,13,21,25,...)

จากสมการเหล่านี้จะได้กราฟเพื่อการประเมินหาขนาดของกระแสฮาร์มอนิก ดังรูปที่ 3.12 โดยขนาดของกระแสเหล่านี้จะเป็นฟังก์ชันของ อัตราส่วนการกระเพื่อม



รูปที่ 3.12 กระแสฮาร์มอนิกทางด้านขาเข้าของคอนเวอร์แบบ 6 พัลส์ กับอัตราส่วนการกระเพื่อม

จากกราฟจะเห็นว่า ถึงแม้ฮาร์มอนิกที่ ลำดับที่ 5 จะเพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้น ในสภาวะที่มีการกระเพื่อมมาก แต่กระแสฮาร์มอนิกลำดับอื่นๆจะลดลง

(2) **การประเมินตามวิธีของ** Graham-Schonholzer(G-S)

Graham-Schonholzer จะนำผลของการคอมมิวเตชันมาพิจารณาด้วย สำหรับขนาดของกระแสฮาร์มอนิกทางด้านแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับเขียนได้ดังนี้

$$I_h = I_C \frac{2\sqrt{2}}{\pi}\left[\frac{\sin(h\pi/3)\sin(h\mu/2)}{h^2\mu/2} + \frac{r_c g_h \cos(h\pi/6)}{1-\sin(\pi/3+\mu/2)}\right] \qquad (3.15)$$

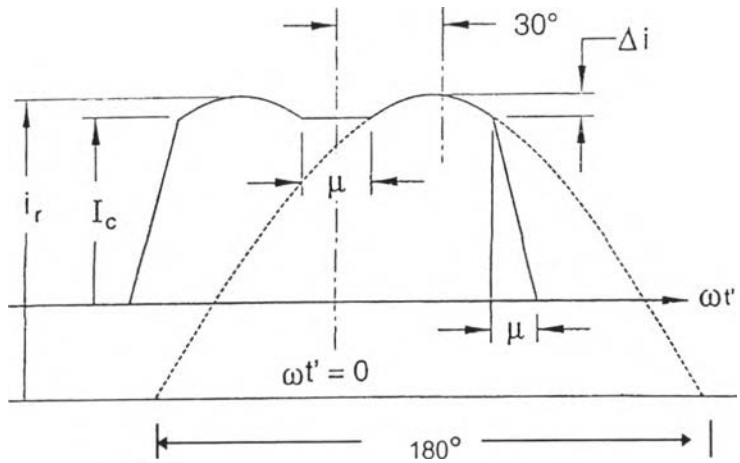
เมื่อ

$$g_h = \frac{\sin\left[(h+1)(\pi/6-\mu/2)\right]}{h+1} + \frac{\sin\left[(h-1)(\pi/6-\mu/2)\right]}{h-1} - \frac{2\sin\left[h(\pi/6-\mu/2)\sin(\pi/3+\mu/2)\right]}{h} \qquad (3.16)$$

และ I_C = กระแสไฟตรงที่จุดสิ้นสุดการคอมมิวเตชัน

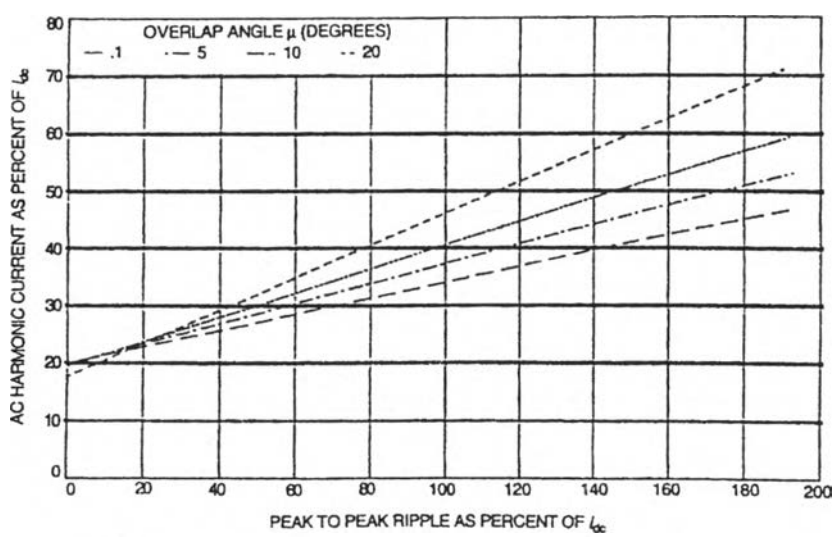
r_c = $\Delta i/I_C$

นิยามที่ใช้ในสมการที่ (3.16) แสดงดังรูปที่ 3.13



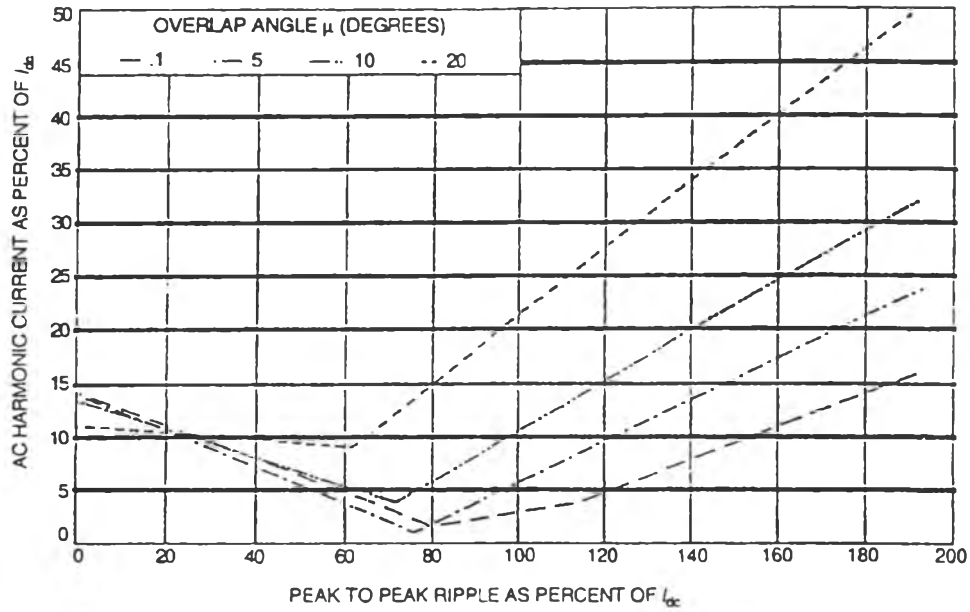
รูปที่ 3.13 นิยามของตัวแปรที่ใช้ในสมการที่ (3.15,3.16)

จากสมการที่ (3.15) จะได้กราฟความสัมพันธ์ระหว่างขนาดของกระแสฮาร์มอนิกกับการกระเพื่อมของกระแสและ มุมคอมมิวเตชัน ดังรูปที่ 3.14 ถึง รูปที่ 3.17

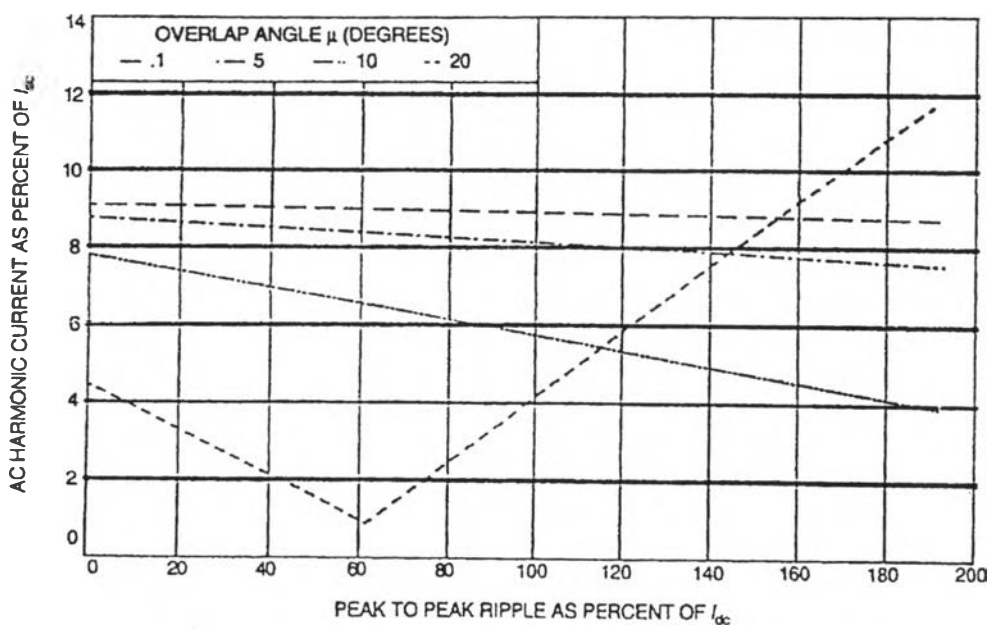


รูปที่ 3.14 กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 จากคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์ ที่มีการกระเพื่อมของไฟฟ้ากระแสตรง

I 18932010



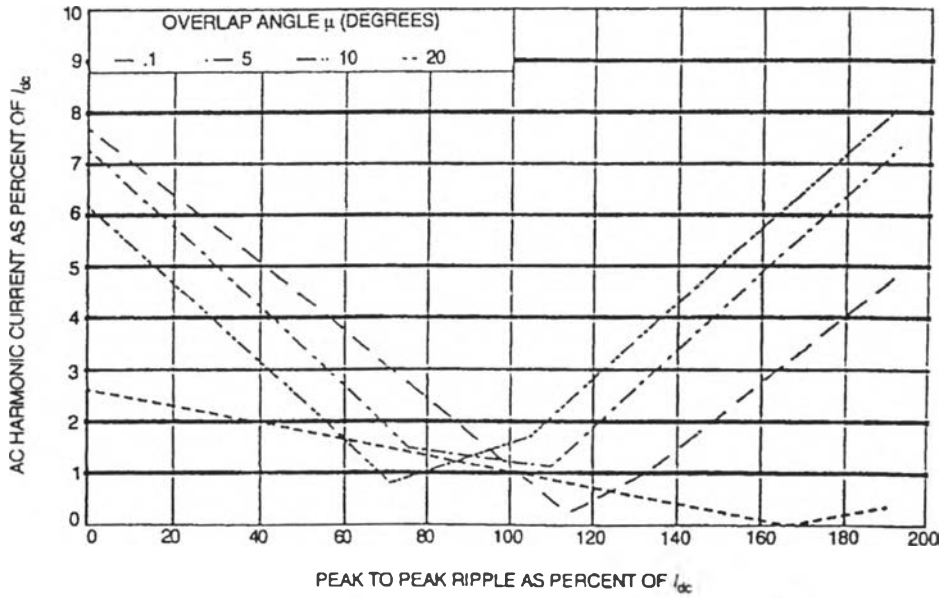
รูปที่ 3.15 กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 7 จากคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์
ที่มีการกระเพื่อมของไฟฟ้ากระแสตรง



รูปที่ 3.16 กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 11 จากคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์
ที่มีการกระเพื่อมของไฟฟ้ากระแสตรง

Order	L=6.5mH	X_c=0.08 pu	α=10°	μ=15.2°	L=6.5mH	X_c=0.08 pu	α=60°	μ=5.17°	L=0.5mH	X_c=0.08 pu	α=25°	μ=9.28°
h	1/h	Classical	Dobinson	GS	1/h	Classical	Dobinson	GS	1/h	Classical	Dobinson	GS
5	20.000	18.653	20.849	15.718	20.000	19.831	22.331	18.995	20.000	19.426	36.508	61.568
7	14.286	12.440	13.338	8.810	14.286	14.050	11.683	9.319	14.286	13.539	4.151	14.508
11	9.091	6.373	9.081	4.767	9.091	8.723	9.064	7.279	9.091	7.945	8.900	9.607
13	7.692	4.618	7.302	3.321	7.692	7.260	6.619	5.149	7.692	6.359	0.090	1.373
17	5.882	2.292	5.812	1.464	5.882	5.324	5.689	4.265	5.882	4.206	4.514	2.419
19	5.263	1.526	5.029	0.977	5.263	4.643	4.619	3.389	5.263	3.434	0.698	0.612
23	4.348	0.627	4.274	0.035	4.348	3.610	4.145	2.830	4.348	2.254	2.919	0.247
25	4.000	0.513	3.835	0.111	4.000	3.206	3.547	2.381	4.000	1.795	0.791	1.091
29	3.448	0.617	3.380	0.471	3.448	2.547	3.261	1.996	3.448	1.069	2.125	0.520
31	3.226	0.654	3.100	0.470	3.226	2.274	2.879	1.712	3.226	0.784	0.769	1.014
35	2.857	0.612	2.796	0.467	2.857	1.811	2.688	1.380	2.857	0.343	1.659	0.723
37	2.703	0.545	2.601	0.411	2.703	1.613	2.423	1.229	2.703	0.188	0.720	0.753
41	2.439	0.366	2.383	0.241	2.439	1.270	2.286	0.955	2.439	0.161	1.356	0.665
43	2.326	0.274	2.240	0.182	2.326	1.120	2.091	0.864	2.326	0.236	0.666	0.453
47	2.128	0.145	2.077	0.002	2.128	0.858	1.989	0.635	2.128	0.347	1.143	0.492
49	2.041	0.141	1.968	0.039	2.041	0.743	1.840	0.581	2.041	0.379	0.616	0.184

ตารางที่ 3.3 เปรียบเทียบกระแสฮาร์มอนิกจากคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์ เมื่อประมินด้วยวิธีการต่างๆ ด้วยเงื่อนไขเดียวกัน (% of I_1) [7]



รูปที่ 3.17 กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 13 จากคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์ ที่มีการกระเพื่อมของไฟฟ้ากระแสตรง

จากวิธีการที่กล่าวมานี้ถ้านำมาประเมินค่ากระแสฮาร์มอนิกจากคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์ ภายใต้เงื่อนไขเดียวกัน ผลการประเมินค่ากระแสฮาร์มอนิกจากแต่ละวิธีการแสดงดังตารางที่ 3.3 โดยจะปรับเปลี่ยนพารามิเตอร์ คือ มุม α และขนาดของขดลวด (D.C. link) ที่ต่ออยู่ระหว่างทางด้านขาออกของคอนเวอร์เตอร์กับโหลด และกำหนดให้ X_C = 0.08 p.u.

จากตารางที่3.3 จะเห็นถึงข้อแตกต่างของกระแสที่ได้จากแต่ละวิธีที่ใช้ในประเมิน วิธีการในแต่ละวิธีที่กล่าวมาจะมีเหมาะสมในสภาวะต่างๆกันแสดงดังตารางที่ 3.4 โดยทั้งนี้จะขึ้นกับลักษณะการกระเพื่อมว่ามีมากน้อยเพียงใด

ตารางที่ 3.4 วิธีการที่เหมาะสมที่ใช้ประเมินกระแสฮาร์มอนิกในสภาวะที่มีการกระเพื่อมต่างกัน

การกระเพื่อม	***วิธีที่ใช้ประเมิน***
ต่ำ	Classical
ปานกลาง	Dobinson (ฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 และ 7) Graham-Schonholzer (สำหรับฮาร์มอนิกลำดับสูงๆ)
มาก	Dobinson

จากวิธีการประเมินที่กล่าวมา ในแต่ละวิธีมีการนำเอาพารามิเตอร์ใดบ้างมาประกอบการพิจารณาหาค่ากระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากคอนเวอร์เตอร์ สรุปได้ดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 พารามิเตอร์ที่นำมาพิจารณาสำหรับการประเมินในแต่ละวิธี

วิธีการ	*มุมคอมมิวเตชัน*	*การกระเพื่อม*
1/h (ตามทฤษฎี)	ไม่ใช้	ไม่ใช้
Classical	ใช้	ใช้
Dobinson	ใช้	ใช้(โดยประมาณ)
Graham-Schonholzer	ใช้(โดยประมาณ)	ใช้(โดยประมาณ)

3.2 การประเมินค่ากระแสฮาร์มอนิกจากคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์ ตามมาตรฐาน IEC 1000-2-6 [14]

การหาปริมาณกระแสฮาร์มอนิกจากคอนเวอร์เตอร์ตามมาตรฐาน IEC แล้ว มีพารามิเตอร์ที่จะต้องพิจารณาร่วม ดังนี้ คือ

- มุมหน่วงจุดชนวน (Trigger delay angle or Firing angle :α)
- ค่าอัตราส่วนกระแสลัดวงจร (Short circuit ratio:R_{SC})
- ความราบเรียบของกระแสไฟฟ้าตรงจากคอนเวอร์เตอร์ (d.c.smoothing current)

สัญลักษณ์และความหมายของตัวแปรที่ใช้ในการประเมินตาม IEC มีดังนี้

X_d = ค่ารีแอคแตนซ์ทางด้านกระแสไฟตรงที่ความถี่หลักมูล รวมทั้งของโหลดด้วย

X_L = ค่ารีแอคแตนซ์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ (a.c.side) เป็นค่าต่อเฟสที่ความถี่หลักมูล รวมถึงค่ารีแอคแตนซ์ของสายและของหม้อแปลง หรือเรียกรวมว่าคอมมิวเตชันรีแอคแตนซ์

I_d = กระแสไฟตรงที่ได้จากคอนเวอร์เตอร์ (ค่าเฉลี่ย)

U_{di} = แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขณะไม่มีโหลด ที่มุม $\alpha = 0$

U_L = แรงดันไฟฟ้าระหว่างเฟส (Line -to - Line)ด้านแหล่งจ่าย (เป็นค่า r.m.s)

U_d = แรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่เกิดขึ้นจริงทางด้านขาออกของคอนเวอร์เตอร์ (ค่าเฉลี่ย)

α = มุมหน่วงจุดชนวน (Trigger delay angle)

R_{SC} = อัตราส่วนของกำลังไฟฟ้าลัดวงจร ณ จุดที่คอนเวอร์เตอร์ต่ออยู่ต่อกำลังไฟฟ้ากระแสตรงของคอนเวอร์เตอร์เมื่อทำงานแบบอุดมคติ ($\alpha = 0$)

Ih = กระแสฮาร์มอนิก (ค่า r.m.s) ที่เกิดขึ้นทางด้านแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ

I_1 = กระแสที่ความถี่หลักมูล (ค่า r.m.s) ของคอนเวอร์เตอร์ทางด้านแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ

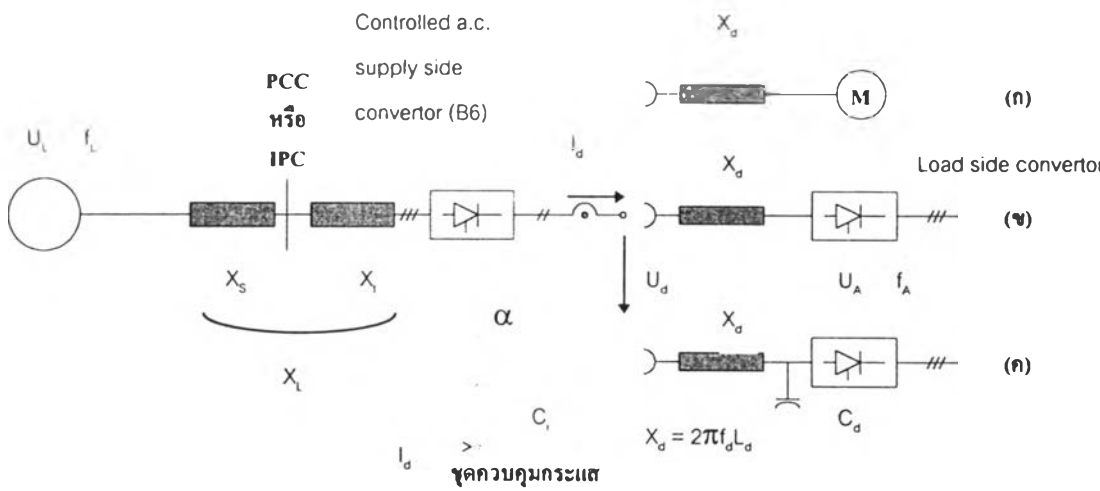
h = ลำดับของฮาร์มอนิก $h = 6n \pm 1 = 1,5,7,11,13,...$

n = เลขจำนวนเต็ม $n = 0,1,2,3 ...$

ในการประเมินจะแบ่งตามลักษณะการต่อใช้งานของคอนเวอร์เตอร์ดังนี้

3.2.1 คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟสที่จ่ายให้กับโหลดแบบกระแสไฟตรงโดยกระแสมีความราบเรียบ

กรณีนี้ค่ารีแอคแตนซ์ทางด้านโหลดจะมีค่ามาก หรืออาจกล่าวได้ว่ากระแสไฟตรงที่ได้จากคอนเวอร์เตอร์มีความราบเรียบไม่คิดถึงผลของการกระเพื่อมที่ปนอยู่ รูปแสดงวงจรของคอนเวอร์เตอร์ที่จ่ายโหลดกรณีนี้แสดงดังรูปที่ 3.18 (ก) และ (ข)



รูปที่ 3.18 ไดอะแกรมวงจรของคอนเวอร์เตอร์ตาม IEC 1000-2-6

หมายเหตุ การต่อแบบ B6 ถือเป็นวงจรมาตรฐานของคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์

สำหรับอัตราส่วนความราบเรียบมีความสัมพันธ์ตามสมการที่(3.17)

$$\text{Smoothing ratio} = (X_d + 2X_L)\frac{I_d}{U_{di}} \qquad (3.17)$$

อัตราส่วนลัดวงจรมีความสัมพันธ์ตามสมการที่ (3.18)

$$R_{SC} = \frac{U_L^2}{X_L}\frac{1}{U_{di}I_d} \qquad (3.18)$$

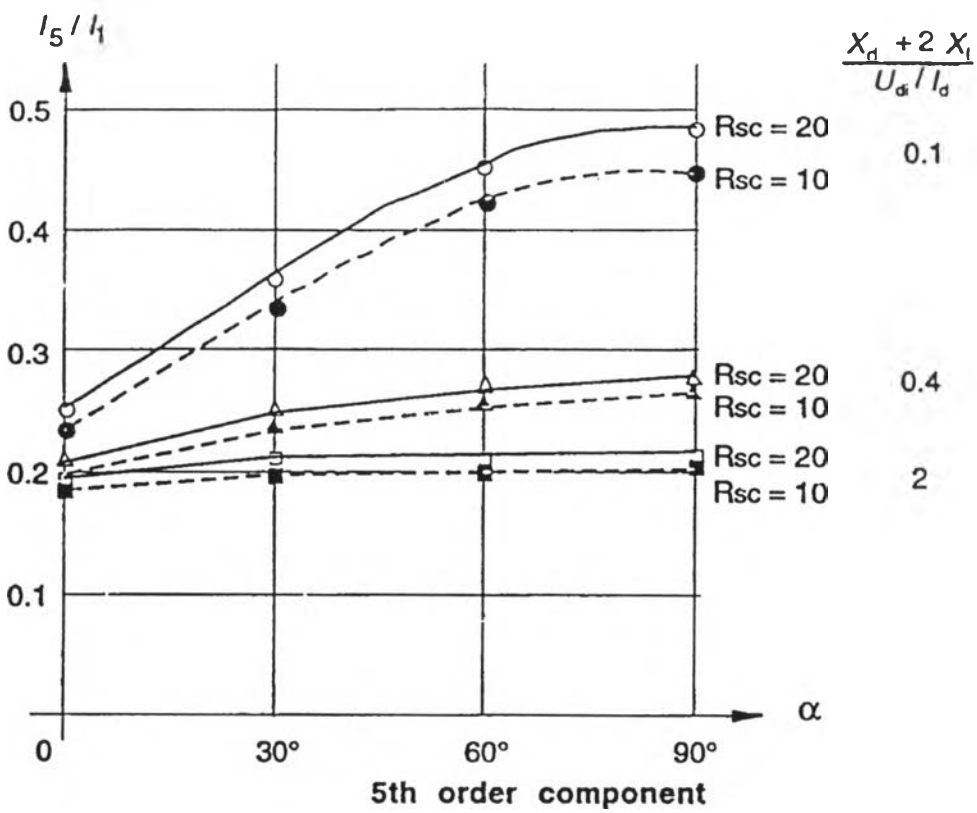
กระแสของคอนเวอร์เตอร์ที่ความถี่หลักมูลมีค่าโดยประมาณตามสมการที่ (3.19)

$$I_1 \approx \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d \qquad (3.19)$$

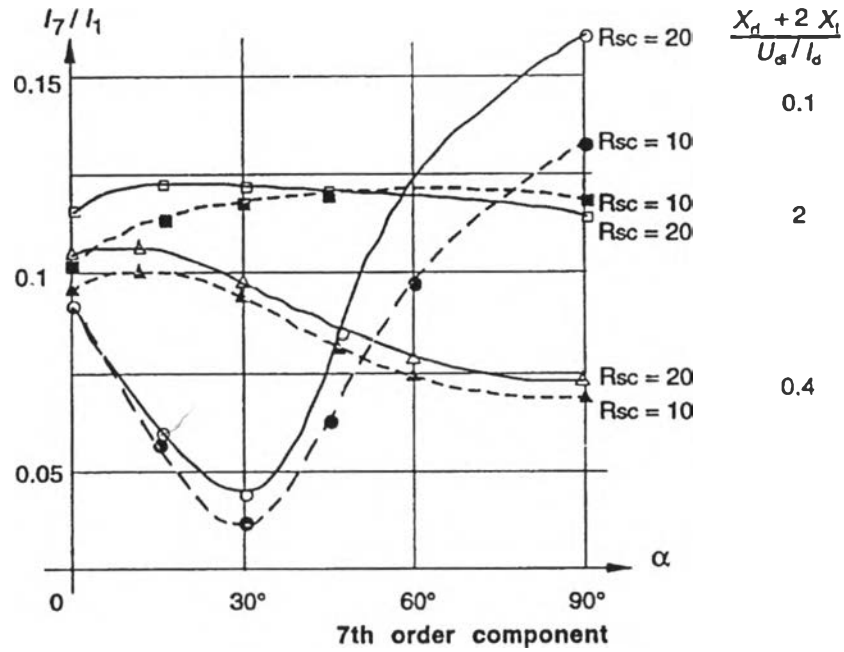
สำหรับกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นเมื่อไม่คำนึงผลของการกระเพื่อมของกระแสไฟตรง และการคอมมิวเตชัน จะได้ดังสมการที่ 3.20 (ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎี)

$$Ih = \frac{I_1}{h} \qquad (3.20)$$

แต่ถ้าพิจารณาถึงพารามิเตอร์อื่นๆได้แก่ มุมหน่วงจุดชนวน อัตราส่วนความราบเรียบ อัตราส่วนลัดวงจร กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 และ 7 ที่เกิดด้านแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับจะมีความสัมพันธ์กับพารามิเตอร์ต่างๆดังแสดงในรูปที่ 3.19 และ 3.20 ตามลำดับ โดยอัตราส่วนความราบเรียบมีค่าเป็น 2, 0.4 และ 0.1 และค่า R_{SC} = 20 และ 10 ตามลำดับ ส่วนฮาร์มอนิกลำดับอื่นๆที่นอกเหนือจากนี้ มีค่าดังตารางที่ 3.6 ถึง 3.8



รูปที่ 3.19 กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 โดยสัมพันธ์กับ ค่า R_{sc} ,α และ Smoothing ratio



รูปที่ 3.20 กระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 7 โดยสัมพันธ์กับ ค่า R_{sc} ,α และ Smoothing ratio

ตารางที่ 3.6 ขนาดของกระแสฮาร์มอนิก เมื่อ ค่าการกระเพื่อมต่ำ

(Low d.c. ripple) $R_{sc} = 20$, $(X_d + 2X_L)\frac{I_d}{U_{di}} = 2$

U_d/U_{di}	α	h	5	7	11	13	17	19	23	25
0	90°	Ih/I1	0.21	0.13	0.09	0.07	0.06	0.05	0.04	0.04
0.84	30°		0.21	0.13	0.09	0.07	0.05	0.04	0.04	0.03
0.975	0°		0.19	0.12	0.08	0.05	0.02	0.02	0.01	0.01

ตารางที่ 3.7 ขนาดของกระแสฮาร์มอนิก เมื่อ ค่าการกระเพื่อมปานกลาง

(Medium d.c. ripple) $R_{sc} = 20$, $(X_d + 2X_L)\frac{I_d}{U_{di}} = 0.4$

U_d/U_{di}	α	h	5	7	11	13	17	19	23	25
0	90°	Ih/I1	0.27	0.06	0.09	0.04	0.05	0.03	0.04	0.03
0.84	30°		0.24	0.10	0.09	0.06	0.05	0.04	0.03	0.03
0.975	0°		0.20	0.11	0.06	0.05	0.02	0.02	0.01	0.01

ตารางที่ 3.8 ขนาดของกระแสฮาร์มอนิก เมื่อ ค่าการกระเพื่อมสูง

(High d.c. ripple) $R_{SC} = 20 \cdot \left(X_d + 2X_L\right) \frac{I_d}{U_{di}} = 0.1$

U_d/U_{dl}	α	h	5	7	11	13	17	19	23	25
0	90°	Ih/I1	0.48	0.17	0.09	0.05	0.04	0.02	0.02	0.01
0.84	30°		0.35	0.04	0.09	0.01	0.04	0.01	0.03	0.01
0.975	0°		0.25	0.09	0.06	0.04	0.02	0.02	0.01	0.01

การพิจารณาหามุมเฟสของกระแสฮาร์มอนิกทางด้านแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ

ในกรณีกระแสไฟตรงทางด้านขาออกของคอนเวอร์เตอร์มีความราบเรียบ สมการของแรงดันและกระแส เขียนได้ดังสมการที่ (3.21) และ (3.22) ตามลำดับ

$$U_{L\text{-}N} = U_{L\text{-}N}\sqrt{2}\sin(\omega_L t) \quad (3.21)$$

$$I_{ih} = I_H\sqrt{2}\sin(h\omega_L t - \phi h) \quad (3.22)$$

และ

$$\alpha + \frac{\mu}{2} \approx \arccos\left(\frac{U_d}{U_{di}}\right) \quad (3.23)$$

เมื่อ

μ = มุม เหลื่อม (Overlap) ที่เกิดจาก การคอมมิวเตชัน

$U_{L\text{-}N}$ = แรงดันเฟสของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับที่จ่ายไฟให้คอนเวอร์เตอร์

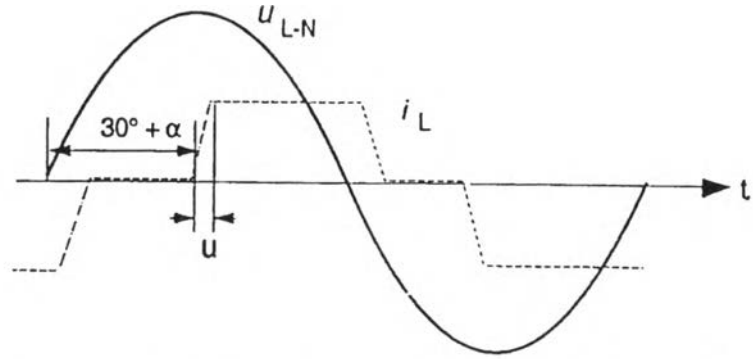
I_{ih} = กระแสฮาร์มอนิกทางด้านแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ

ω_L = ความถี่ของ แหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ

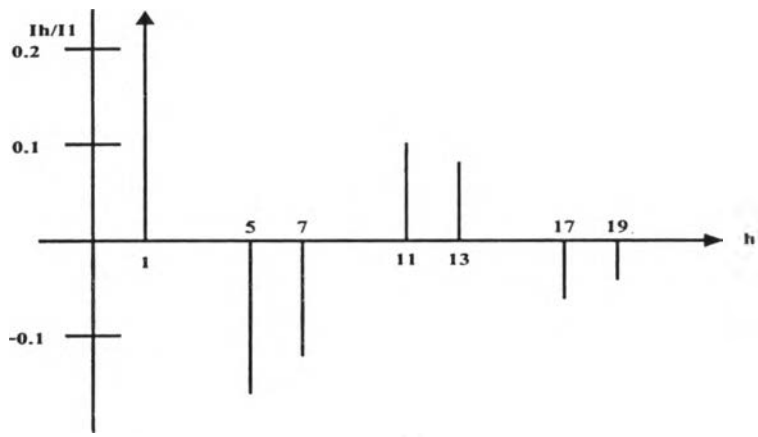
สำหรับมุมเฟส ϕh ที่ได้นี้เป็นค่าโดยประมาณ ทั้งนี้จะขึ้นกับลักษณะการต่อหม้อแปลงที่จ่ายให้คอนเวอร์เตอร์ด้วย ดังนี้

(ก) **กรณีหม้อแปลงต่อแบบ** Y/Y **หรือ** D/D

ตัวอย่างรูปคลื่นและ สเปกตรัมของกระแสจากคอนเวอร์เตอร์ที่มีการต่อหม้อแปลงแบบ Y/Y หรือ D/D แสดงดังรูปที่ 3.21 และ 3.22 ตามลำดับ



รูปที่ 3.21 รูปคลื่นของแรงดันและกระแสในกรณีหม้อแปลงต่อแบบ Y/Y หรือ D/D

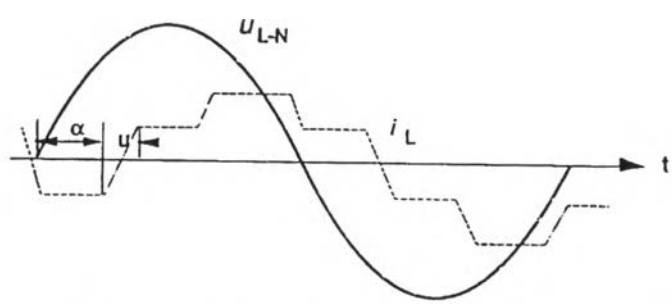


รูปที่ 3.22 สเปคตรัมของกระแสในกรณีหม้อแปลงต่อแบบ Y/Y หรือ D/D

$$\phi h \approx (180^{\circ} + \alpha + \mu/2)h \quad \text{สำหรับ } h = 5,7,(17,19)$$
$$\phi h \approx (\alpha + \mu/2)h \quad \text{สำหรับ } h = 11,13,(23,25) \qquad (3.24)$$

(ข) กรณีหม้อแปลงต่อแบบ Y/D หรือ D/Y

ตัวอย่างรูปคลื่นและ สเปกตรัมของกระแสจากคอนเวอร์เตอร์ที่มีการต่อหม้อแปลงแบบ D/Y หรือ Y/D แสดงดังรูปที่ 3.23 และ 3.24 ตามลำดับ



รูปที่ 3.23 รูปคลื่นของแรงดันและกระแสในกรณีหม้อแปลงต่อแบบ Y/D หรือ D/Y

รูปที่ 3.24 สเปคตรัมของกระแสในกรณีหม้อแปลงต่อแบบ Y/D หรือ D/Y

$$\phi h \approx (\alpha + \mu/2)h \qquad \text{สำหรับ } h = 5,7,11,13,\ldots \qquad (3.25)$$

จะเห็นว่าหากน้ำคอนเวอร์เตอร์แบบ 6 พัลส์ 2 ชุดที่มีการต่อหม้อแปลงต่างกันมาต่อขนานหรืออนุกรมกัน ฮาร์มอนิกบางลำดับ เช่น ลำดับที่ 5 และ 7 จะหักล้างกันไป ซึ่งเป็นหลักการของคอนเวอร์เตอร์แบบ 12 พัลส์ ดังได้กล่าวมาแล้ว

3.2.2 คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟสที่จ่ายให้กับโหลดแบบกระแสไฟตรงโดยผ่านตัวกรอง L-C

ลักษณะวงจรขาออกของคอนเวอร์แสดงดังรูปที่ 3.18 (ค) ซึ่งปริมาณกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นทางแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับจะใช้ข้อมูลในตารางที่ 3.6 ได้ ทั้งนี้ขนาดของรีแอคเตอร์จะต้องทำให้เกิดความราบเรียบ และต้องเป็นไปตามเงื่อนไขดังสมการที่ (3.26)

$$2\omega_L > \omega_R$$

เมื่อ $$\omega_R = \sqrt{\frac{\omega_L}{C_d(X_d + 2X_L)}} \qquad (3.26)$$

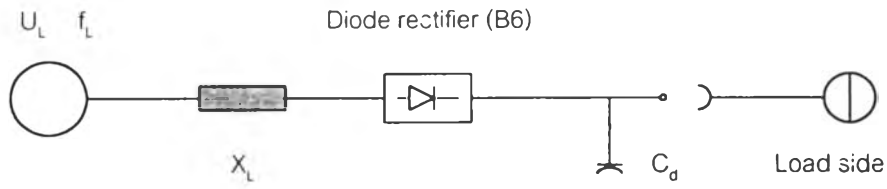
ω_L = ความถี่เชิงมุมของแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ

ω_R = ความถี่เชิงมุมที่จุดเกิดเรโซแนนซ์ของตัวกรอง

3.2.3 คอนเวอร์เตอร์ 3 เฟสที่จ่ายให้กับโหลดแบบกระแสไฟตรงโดยมีคาปาซิเตอร์ ต่ออยู่ทางด้านขาออก

เมื่อต่อคาปาซิเตอร์ที่มีขนาดใหญ่ทางด้านขาออกของคอนเวอร์เตอร์ที่ใช้ชุดเรียงกระแสเป็นไดโอด ทั้งนี้เพื่อให้ได้แรงดันไฟตรงที่ราบเรียบ แต่ค่ากระแสฮาร์มอนิกจะมีค่าสูงขึ้น ถ้าหากค่า

รีแอคแตนซ์ของแหล่งจ่ายไฟ (X_L) ลดลง ความหมายคือ ค่ากำลังไฟฟ้าลัดลงจรเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับพิกัดของคอนเวอร์เตอร์ ลักษณะวงจรสมมูลแสดงดังรูปที่ 3.25



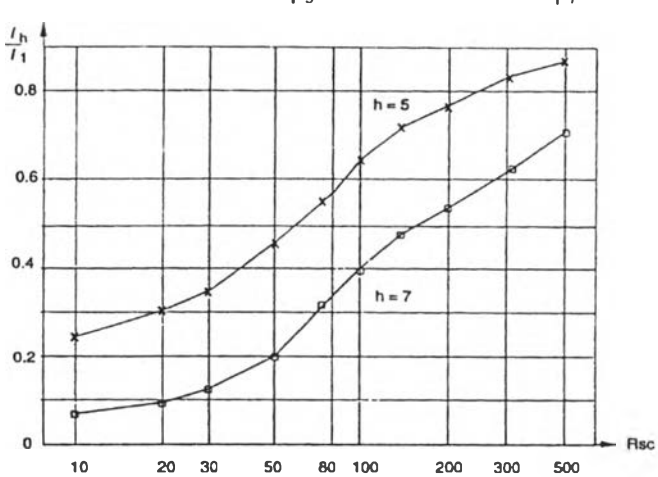
รูปที่ 3.25 คอนเวอร์เตอร์ที่ต่อคาปาซิเตอร์ด้านขาออก

ความสัมพันธ์ของกระแสฮาร์มอนิกกับค่าอัตราส่วนลัดวงจร (R_{SC}) แสดงดังตารางที่ 3.9 และกราฟในรูปที่ 3.25 เป็นความสัมพันธ์ของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 และ 7 กับค่า R_{SC}

ตารางที่ 3.9 กระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากวงจรเรียงกระแสของไดโอด และ ด้านขาออกมีคาปาซิเตอร์ต่อขนานอยู่

U_d/U_{di}	R_{SC}	h	5	7	11	13	17	19	23	25
1.02	500	Ih/I1	0.86	0.70	0.35	0.22	0.09	0.09	0.07	0.05
1.00	100		0.64	0.40	0.09	0.09	0.05	0.04	0.02	0.02
0.97	20		0.30	0.09	0.06	0.04	0.02	0.02	0.01	0.01
0.94	10		0.24	0.07	0.04	0.03	0.014	0.01	0.01	0.01

เมื่อไม่คำนึงถึงการกระเพื่อมของแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแล้ว มุมเฟสของกระแสฮาร์มอนิกอันดับต่ำๆ จะมีค่าโดยประมาณ โดย $\phi_5 = 70^\circ...135^\circ$ และ $\phi_7 = 90^\circ...290^\circ$ เมื่อ $R_{SC} = 10...500$



รูปที่ 3.26 ความสัมพันธ์ของกระแสฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 และ 7 กับค่า R_{SC}

จะเห็นได้ว่า การประเมินค่ากระแสฮาร์มอนิกของคอนเวอร์เตอร์ด้วยวิธีการคำนวณนั้น จะมี 2 วิธีหลักๆ คือ การประเมินแบบอุดมคติ และ แบบไม่เป็นอุดมคติ สำหรับแบบไม่เป็นอุดมคติมีวิธีการประเมินอยู่หลายวิธี และมีพารามิเตอร์หลายอย่างที่พิจารณาร่วม ค่าที่ได้จะใกล้เคียงกับค่าที่เกิดขึ้นจริงมากขึ้น ซึ่งกระแสฮาร์มอนิกบางลำดับอาจมีค่ามาก หรือ น้อยกว่า ค่าตามทฤษฎี และส่วนใหญ่แล้วค่าเหล่านี้จะสรุปออกมาในรูปของ กราฟ หรือ ตาราง โดยขึ้นกับพารามิเตอร์ต่างๆ เช่น การกระเพื่อมของกระแสไฟตรง มุมหน่วงจุดชนวน เป็นต้น ค่าที่ได้จากการประเมินนี้ จะเป็นส่วนป้อนเข้า (Input) เพื่อวิเคราะห์การไหลของกระแสฮาร์มอนิกเมื่อใช้แบบจำลองของแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกมีคุณสมบัติเป็นแหล่งกำเนิดกระแส