บทที่ 2

แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกในระบบจำหน่าย

ระบบจำหน่ายในปัจจุบันมีการใช้งานอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์กำลังเพิ่มมากขึ้นทั้งในโรงงานอุตสาหกรรมและบ้านเรือนที่อยู่อาศัย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของอุปกรณ์และใช้ในการควบคุมการทำงานให้ได้ตามความต้องการ แต่ปัญหาเนื่องจากการใช้งานอุปกรณ์ดังกล่าวทำให้ระบบจำหน่ายมีมลภาวะเพิ่มขึ้นมลภาวะดังกล่าวได้แก่ ฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นในระบบไฟฟ้าอุตสาหกรรมและเข้ามาในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า ทำให้มีผลกระทบต่ออุปกรณ์ในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้า เช่น หม้อแปลง , ตัวเก็บประจุ เป็นต้น

ฮาร์มอนิกในระบบจำหน่ายของการไฟฟ้าส่วนใหญ่เกิดมาจากอุปกรณ์ประเภท เครื่องแปลงผันกำลังสถิต , วงจรเรียงกระแส ที่ใช้ในอุปกรณ์ควบคุมความเร็วของมอเตอร์ นอกจากนี้ยังรวมถึง เตาหลอมแบบอาร์ก และ เครื่องเชื่อมไฟฟ้า ซึ่งโหลดประเภทที่ได้กล่าวมาแล้วนี้รวมเรียกว่า โหลดไม่เป็นเชิงเส้น (Nonlinear load) แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นเนื่องจากโหลดไม่เป็นเชิงเส้นเริ่มมีการศึกษากันอย่างจริงจังในปัจจุบัน

การตรวจวัดฮาร์มอนิกเป็นวิธีหนึ่งเพื่อให้ได้มาซึ่งข้อมูลต่างๆที่เกี่ยวกับแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกและการเปลี่ยนแปลงของปริมาณฮาร์มอนิกในช่วงเวลาต่างๆ ซึ่งจะใช้เป็นแนวทางในการศึกษาเกี่ยวกับฮาร์มอนิกในอนาคต จากการศึกษาแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกในระบบจำหน่ายสามารถที่จะสรุปได้เป็น 2 หัวข้อดังนี้คือ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.1 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกที่สร้างกระแสฮาร์มอนิกที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูล โดยที่แหล่งกำเนิดที่สำคัญๆ สามารถที่จะจำแนกได้ดังนี้คือ

2.1.1 เครื่องแปลงผันกำลังสถิต (static power convertor) [3,4]

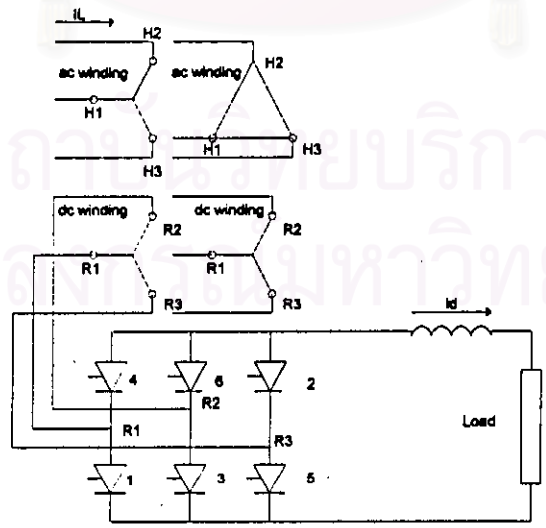
เครื่องแปลงผันกำลังสถิตเป็นอุปกรณ์ที่ได้รับความนิยมมากในโรงงานอุตสาหกรรม ตลอดจนบ้านเรือนที่อยู่อาศัยและมีแนวโน้วที่จะเพิ่มขึ้นอย่างมากในอนาคตเนื่องจากเป็นอุปกรณ์ที่มีประสิทธิภาพในการทำงานสูง เครื่องแปลงผันกำลังสถิต จะทำหน้าที่เปลี่ยนไฟฟ้ากระแสสลับให้เป็นกระแสตรง เพื่อจ่ายให้กับโหลดกระแสตรงเช่นมอเตอร์กระแสตรง สามารถแบ่งชนิดของเครื่องแปลงผันกำลังสถิต ตามพิกัดได้ดังนี้

เครื่องแปลงผันกำลังสถิตขนาดใหญ่ จะมีพิกัดอยู่ในหน่วยเมกะวัตต์นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ เช่น อุตสาหกรรมโลหะ อุตสาหกรรมเคมี และในระบบส่งจ่ายแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงที่มีขนาดแรงดันสูงๆ

เครื่องแปลงผันกำลังสถิตขนาดกลาง จะมีพิกัดตั้งแต่ 10-1000 กิโลวัตต์ นิยมใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไป เช่น ใช้ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์กระแสตรง เป็นต้น

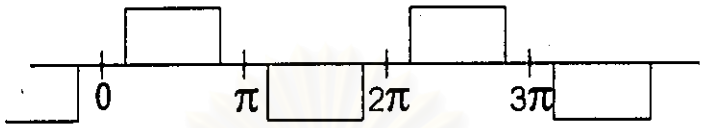
เครื่องแปลงผันกำลังสถิตขนาดเล็ก จะมีพิกัดน้อยกว่า 10 กิโลวัตต์ นิยมใช้ในชุดปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ แหล่งจ่ายไฟของชุดชาร์จแบตตารี่ เป็นต้น

เครื่องแปลงผันกำลังสถิตมีทั้งชนิดเฟสเดียวที่ใช้กับอุปกรณ์เช่น โทรทัศน์ , คอมพิวเตอร์ และ ชนิดสามเฟส สามารถที่จะแบ่งแยกได้ตามจำนวน พัลส์ เช่น เครื่องแปลงผันกำลังสถิต แบบ 6 พัลส์ (six pulse static power convertor) ดังรูปที่ 2.1

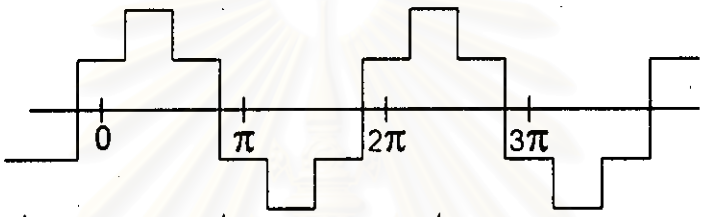


รูปที่ 2.1 วงจรมาตรฐานของเครื่องแปลงผันกำลังสถิต แบบ 6 พัลส์

จากรูป 2.1 พบว่าเมื่อพิจารณาไฟฟ้ากระแสตรงที่ได้จากเครื่องแปลงผันกำลังสถิตนี้จะมีความราบเรียบทำให้กระแสที่เครื่องแปลงผันกำลังสถิตดึงจากแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับมีความราบเรียบไปด้วย และเมื่อมองจากทางด้านแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับเครื่องแปลงผันกำลังสถิตจะเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิก โดยจะได้ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกดังรูปที่ 2.2



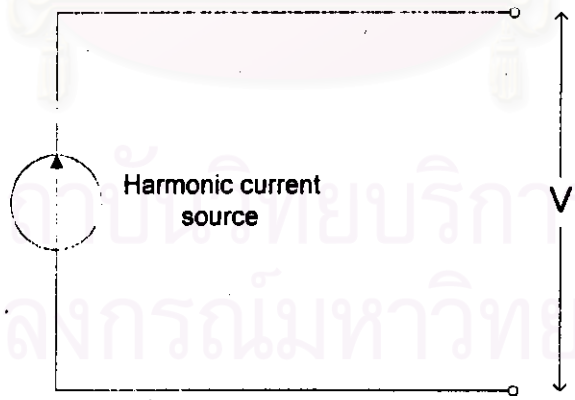
ก. รูปคลื่นของกระแสของเครื่องแปลงผันอุดมคติเมื่อหม้อแปลง ต่อแบบ วาย-วาย



ข. รูปคลื่นของกระแสของเครื่องแปลงผันอุดมคติเมื่อหม้อแปลง ต่อแบบ เดลตา-วาย

รูปที่ 2.2 รูปคลื่นกระแสของเครื่องแปลงผันกำลังสถิตแบบอุดมคติ

และเขียนวงจรสมมูลของเครื่องแปลงผันกำลังสถิตได้ดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลของเครื่องแปลงผันกำลังสถิต

จากการวิเคราะห์โดยใช้อนุกรมฟูเรียร์ของกระแสทางด้านแหล่งจ่ายไฟกระแสสลับ ในกรณีที่หม้อแปลงต่อแบบ วาย-วาย รูปที่ 2.2 (ก) จะได้ดังสมการ (2.1)

$$i = \frac{\sqrt{2}I}{\pi}\left[\sin(\omega t) - \frac{1}{5}\sin(5\omega t) - \frac{1}{7}\sin(7\omega t) + \frac{1}{11}\sin(11\omega t) + \frac{1}{13}\sin(13\omega t) - \frac{1}{17}\sin(17\omega t) - \frac{1}{19}\sin(19\omega t) + \ldots\right] \qquad (2.1)$$

และในกรณีที่หม้อแปลงต่อแบบ เดลตา-วายรูปที่ 2.2 (ข) จะได้ดังสมการ (2.2)

$$I_s = \frac{\sqrt{2}I_l}{\pi}\left[\sin(\omega t)+\frac{1}{5}\sin(5\omega t)+\frac{1}{7}\sin(7\omega t)+\frac{1}{11}\sin(11\omega t)+\frac{1}{13}\sin(13\omega t)+\frac{1}{17}\sin(17\omega t)+\frac{1}{19}\sin(19\omega t)+...\right] \quad (2.2)$$

ดังนั้นกระแสฮาร์มอนิกที่ได้จากเครื่องแปลงผันกำลังสถิตแบบอุดมคติจะมีองค์ประกอบของกระแสฮาร์มอนิกเฉพาะตัว (characteristic harmonic) โดยที่ขนาดและลำดับของกระแสฮาร์มอนิกจะมีคุณลักษณะ ดังนั้น

$$h = kP \pm 1 \quad (2.3)$$

$$I_h = \frac{I_1}{h} \quad (2.4)$$

$$I_1 \approx \frac{\sqrt{6}I_d}{\pi} \quad (2.5)$$

โดยที่

h คือ อันดับของฮาร์มอนิก

k คือ จำนวนเต็มบวก เช่น 1 , 2 , 3 ...

P คือ จำนวนพัลส์ของเครื่องแปลงผันกำลังสถิต

I_h คือ ขนาดกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ h

I_d คือ ค่าเฉลี่ยขนาดกระแสทางด้านขาออกของเครื่องแปลงผันสถิต

I_1 คือ ขนาดกระแสของเครื่องแปลงผันสถิตที่ความถี่หลักมูล

ในกรณีของเครื่องแปลงผันกำลังสถิตแบบ 6 พัลส์ จะได้องค์ประกอบของกระแสฮาร์มอนิกตามสมการ(2.1)-(2.2) จะมีลักษณะที่คล้ายคลึงกัน ยกเว้นฮาร์มอนิกอันดับที่ 5,7,17,19 ... ที่จะมีเครื่องหมายที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับ รูปแบบการต่อหม้อแปลงว่าเป็นแบบวาย-วาย หรือ เดลตา-วาย ดังนั้นหากนำเครื่องแปลงผันกำลังสถิตแบบอุดมคติ 2 ชุด มาต่อใช้งานร่วมกันโดยต่อแบบขนานกัน ซึ่งเรียกว่าเครื่องแปลงผันกำลังสถิตแบบ 12 พัลส์ กระแส

ที่ 5,7,17,19,... จะหักล้างกันไป การนำเครื่องแปลงผันกำลังสถิตแบบ 6 พัลส์ 2 ชุดมาต่อขนานกันนี้เรียกว่า การทำเฟสมัลติพลิเคชั่น (Phase multiplication)

การทำเฟสมัลติพลิเคชั่นจึงเป็นการลดปัญหาเรื่องฮาร์มอนิกวิธีหนึ่ง โดยปริมาณกระแสฮาร์มอนิกจะเป็นไปตามทฤษฎีได้จะต้องมีเงื่อนไข ดังนี้

1.หม้อแปลงที่ใช้ต้องมีอัตราส่วนการแปลงแรงดันเท่ากัน

2.หม้อแปลงที่ใช้ต้องมีค่าอิมพิแดนซ์เท่ากัน

3.เครื่องแปลงผันกำลังสถิตแต่ละชุดต้องถูกควบคุมด้วยมุมหน่วงจุดชนวนเท่ากัน

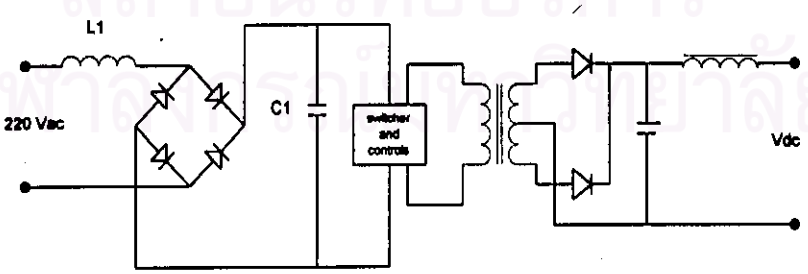
4.การเลื่อนของมุมเฟสของหม้อแปลงแต่ละตัวต้องห่างกันด้วยมุมเฟส 60/N ในกรณีที่นำเครื่องแปลงผันกำลังสถิตแบบ 6 พัลส์ N ตัวมาต่อขนานกัน

5.เครื่องแปลงผันกำลังสถิตแต่ละชุดจะต้องรับโหลดเท่ากัน

ในทางปฏิบัติตามเงื่อนไขดังกล่าวอาจจะเป็นไปได้ยาก ทำให้กระแสฮาร์มอนิกอาจจะไม่เป็นไปตามทฤษฎี นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่นๆที่มีผลต่อปริมาณกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้น เช่น การกระเพื่อมของกระแสตรง และการนำกระแสจากเฟสหนึ่งไปยังอีกเฟสหนึ่งซึ่งเรียกว่าปรากฏการณ์คอมมิวเตชั่น (Commutation phenomena) ซึ่งปัจจัยเหล่านี้จะมีผลทำให้กระแสฮาร์มอนิกที่ได้จากเครื่องแปลงผันกำลังสถิตมีค่าแตกต่างไปจากทฤษฎี

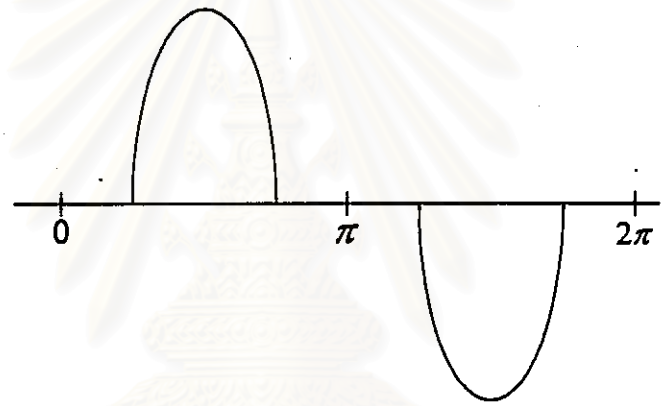
2.1.2 แหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตชิง (Switch Mode Power Supply , SMPS) [4]

แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกที่สำคัญอย่างหนึ่งในระบบจำหน่าย คือ แหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตชิงซึ่งเป็นแหล่งจ่ายไฟให้กับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เฟสเดียว แหล่งจ่ายไฟกระแสตรงนี้จะมีส่วนประกอบจาก วงจรตัวเรียงกระแส ที่ประกอบด้วยไดโอด 4 ตัว ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 วงจรของแหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตชิง

แหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตชิง จะเป็นอุปกรณ์ที่จะทำให้ได้ไฟฟ้ากระแสตรงที่มีความเรียบโดยทางด้านรับไฟจะต่อโดยตรงเข้ากับไฟฟ้ากระแสสลับผ่านวงจรตัวเรียงกระแส ที่ประกอบด้วยไดโอด 4 ตัวโดยที่ไม่ต้องผ่านหม้อแปลงไฟฟ้า จะได้แรงดันกระแสตรงที่ยังไม่เรียบที่ตกคร่อม C1 ในรูปที่ 2.4 จากนั้นจะถูกแปลงกลับให้เป็นแรงดันกระแสสลับที่มีความถี่สูงด้วยตัวสวิตช์ (switcher) ต่อมาก็จะผ่านชุดวงจรตัวเรียงกระแส อีกครั้งเพื่อให้ได้แรงดันกระแสตรงที่มีความเรียบมากขึ้น คุณลักษณะที่สำคัญของแหล่งจ่ายกำลังแบบสวิทชิงคือสามารถใช้กับแรงดันกระแสสลับทางด้านรับไฟที่มีค่าเปลี่ยนแปลงได้ในช่วงกว้าง คุณลักษณะเฉพาะอย่างหนึ่งของแหล่งจ่ายกำลังแบบ สวิตชิง คือ จะก่อให้เกิดปริมาณกระแสฮาร์มอนิกที่ 3 ไหลในสายนิวทรอล ในรูปที่ 2.5 จะแสดงกระแสที่แหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตชิงดึงจากแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับ



รูปที่ 2.5 รูปคลื่นของกระแสที่แหล่งจ่ายกำลังแบบสวิตชิงดึงจากแหล่งจ่ายไฟ

2.1.3 หม้อแปลงไฟฟ้า [3]

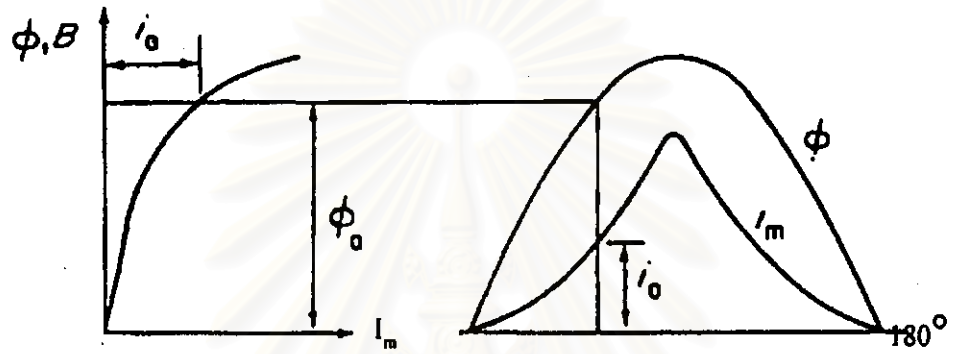
หม้อแปลงไฟฟ้าจัดว่าเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกเนื่องจากคุณลักษณะความไม่เป็นเชิงเส้นของแกนเหล็ก ในสภาวะไม่มีโหลดแรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงจะสมดุลกับแรงเคลื่อนไฟฟ้าย้อนกลับสมการแรงดัน V1 สำหรับแหล่งจ่ายไฟสามารถเขียนได้ดังสมการที่(2.6)

$$v_1 = -e = -E_m \sin(\omega t) = N_1 \frac{d\phi}{dt} \qquad (2.6)$$

จะได้

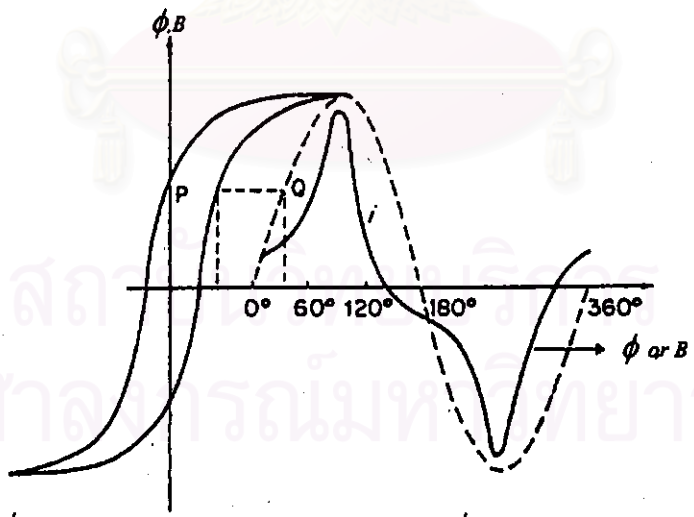
$$\phi = -\int \frac{e_1}{N_1} dt = \frac{E_m}{N_1 \omega} \cos(\omega t) = \phi_m \cos(\omega t) \qquad (2.7)$$

จากสมการดังกล่าว แรงดันด้านปฐมภูมิของหม้อแปลงเป็นรูปไซน์ แต่กระแสจะไม่เป็นรูปไซน์เพราะว่าฟลักซ์แม่เหล็กไม่ได้เป็นสัดส่วนโดยตรงกับกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก ถ้าแกนเหล็กไม่มี hysteresis loss จะได้ความสัมพันธ์ของฟลักซ์แม่เหล็ก และ กระแสสร้างสนามแม่เหล็กดังรูปที่ 2.6 แต่ถ้าคิดผลของ hysteresis loss ความสัมพันธ์ดังกล่าวจะผิดเพี้ยนไป และจะก่อให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกที่ 3 ขึ้น ดังรูปที่ 2.7 การแก้ปัญหาดังกล่าวในหม้อแปลงทำได้โดยการต่อขดลวดเดลตา เพื่อให้กระแสฮาร์มอนิกที่ 3 ไหลวนในขดลวดชุดนี้



(ก)เส้นโค้งการเกิดสนามแม่เหล็ก (ข) ฟลักซ์และกระแสสร้างสนามแม่เหล็ก

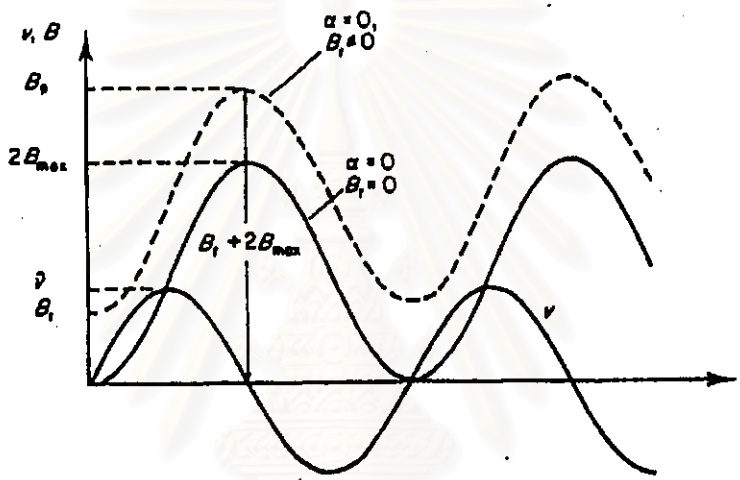
รูปที่2.6 การสร้างสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงเมื่อไม่คิดผลของ hysteresis loss



รูปที่ 2.7 การสร้างสนามแม่เหล็กของหม้อแปลงเมื่อคิดผลของ hysteresis loss

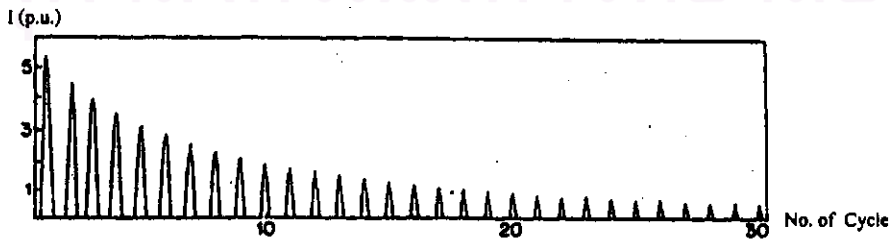
เมื่อหม้อแปลงอยู่ในสภาวะกระตุ้นเกิน (over excitation) กล่าวคือ หม้อแปลงรับแรงดันเกินพิกัดจนทำให้แกนเหล็กหม้อแปลงอิ่มตัว ในกรณีนี้กระแสสร้างสนามแม่เหล็กจะผิดเพี้ยนมาก ทำให้มีปริมาณกระแสฮาร์มอนิกเพิ่มมากขึ้น ปกติในการออกแบบหม้อแปลงไฟฟ้าจะออกแบบให้หม้อแปลงทำงานที่จุดต่ำกว่า จุดที่แกนเหล็กหม้อแปลงอิ่มตัว (knee point)

ในกรณีหม้อแปลงถูกปลดออกจากระบบ จะมีความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กส่วนหนึ่งที่ตกค้างอยู่ภายในแกนเหล็กขนาด B+ หรือ B- เมื่อหม้อแปลงถูกจ่ายไฟกลับ ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กอาจจะสูงถึง 2 หรือ 3 เท่าของความหนาแน่นสนามแม่เหล็กขณะทำงาน ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็ก เมื่อจ่ายไฟให้กับหม้อแปลงกรณีมีฟลักซ์แม่เหล็กตกค้างและไม่มีฟลักซ์แม่เหล็กตกค้าง

ในการออกแบบหม้อแปลง จะให้ความหนาแน่นของฟลักซ์แม่เหล็กสูงถึง 3.4 หรือ 4.7 เทสลา (Tesla : T) เมื่อเปรียบเทียบกับระดับที่ทำให้เกิดการอิ่มตัวซึ่งมีค่าประมาณ 2.05 เทสลา ดังนั้นกระแสอินรัช จะทำให้แกนเหล็กอิ่มตัว และจะมีค่าสูงถึง 5-10 pu. ของกระแสสร้างสนามแม่เหล็กในสภาวะปกติดังรูปที่2.9 โดยที่กระแสอินรัชจะมีขนาดลดลงเมื่อเวลาผ่านไปเนื่องจากผลของความต้านทานของขดลวดด้านปฐมภูมิของหม้อแปลง

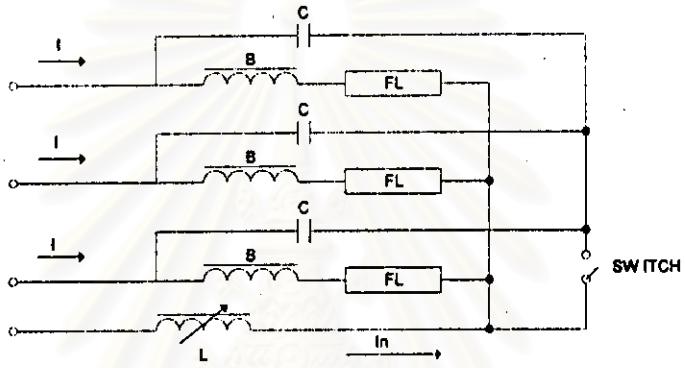


รูปที่ 2.9 ตัวอย่างกระแสอินรัชของหม้อแปลงขนาด 5 MVA Br = 1.3 T

2.1.4 **หลอดฟลูออเรสเซนต์** [3]

หลอดฟลูออเรสเซนต์ เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกที่สำคัญในระบบจำหน่ายโดยที่ในปัจจุบันมีการใช้งานหลอดฟลูออเรสเซนต์มากขึ้นเนื่องจากเป็นการประหยัดพลังงาน ซึ่งการใช้งานหลอดดังกล่าว จะมีค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ต่ำ และก่อให้เกิดฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้า โดยปริมาณการรบกวนขึ้นอยู่กับกำลังไฟฟ้าที่จ่ายให้กับหลอด

หลอดฟลูออเรสเซนต์ จะให้ปริมาณกระแสฮาร์มอนิกที่เป็นเลขคี่ ในระบบ3เฟส4สาย กระแสฮาร์มอนิกที่เป็นพหุคูณของสาม (Triplen harmonic) จะไหลมารวมกันในสายนิวทรอล โดยเฉพาะฮาร์มอนิกที่ 3 จะมีปริมาณที่สูงที่สุด ในวงจรการต่อหลอดฟลูออเรสเซนต์ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 รูปแบบวงจรการต่อหลอดฟลูออเรสเซนต์

จากรูปที่ 2.10 จะพบว่ามีการใช้งานตัวเก็บประจุในการแก้เพาเวอร์แฟคเตอร์อาจจะทำให้เกิดเรโซแนนซ์ขึ้นที่ฮาร์มอนิกที่3ได้ ดังนั้นในการออกแบบใช้งานหลอดฟลูออเรสเซนต์ที่ต้องใช้งานร่วมกับชุดตัวเก็บประจุ ดังกล่าวอาจแก้ปัญหาการเกิดเรโซแนนซ์ได้โดยการต่อหลอดแบบเดลตา หรือ ต่อแบบ วาย และไม่ต่อสายนิวทรอลลงกราวด์

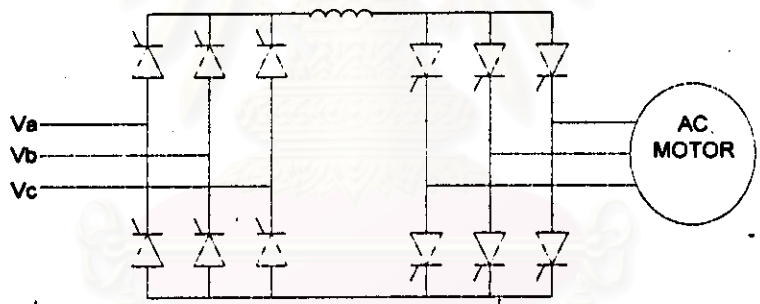
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2 แหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกที่สร้างกระแสฮาร์มอนิกที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าและไม่เป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูล โดยแหล่งกำเนิดที่สำคัญๆ สามารถที่จะจำแนกได้ดังนี้คือ

2.2.1 ชุดปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแหล่งจ่ายกระแส (current source inverter adjustable speed drive) [4]

ชุดปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแหล่งจ่ายกระแส (current source inverter adjustable speed drive) เป็นแหล่งจ่ายกระแสสลับที่สามารถปรับความถี่ เพื่อที่จะใช้ควบคุมเครื่องจักรกลไฟฟ้า ชุดปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแหล่งจ่ายกระแสนี้ เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกที่จะสร้างกระแสฮาร์มอนิกที่มีความถี่เป็นจำนวนเท่าและไม่เป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูล

โดยสามารถที่จะแสดงรูปแบบ ของชุดปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแหล่งจ่ายกระแส ได้ดังรูปที่ 2.11



รูปที่ 2.11 รูปแบบชุดปรับความเร็วรอบมอเตอร์เหนี่ยวนำแบบแหล่งจ่ายกระแส

จากรูปที่ 2.11 จะประกอบด้วยเครื่องแปลงผันกำลังสถิตซนิด 6 พัลส์จำนวน 2 ชุดเชื่อมต่อด้วย แรงดันกระแสตรง โดยที่ความเร็วของมอเตอร์จะขึ้นกับระดับแรงดันกระแสตรงที่สามารถปรับค่าได้โดยขึ้นอยู่กับมุมจุดชนวนของไทริสเตอร์และสามารถที่จะเขียนคุณลักษณะของความถี่ของฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นได้ดังสมการที่ (2.8)

$$f_i = n_1 f_{ac} \pm 6n_2 f_s \qquad (2.8)$$

โดยที่

n1 = 1 , 5 , 7 , 11 ,...

n2 = 1 , 2 , 3 ,...

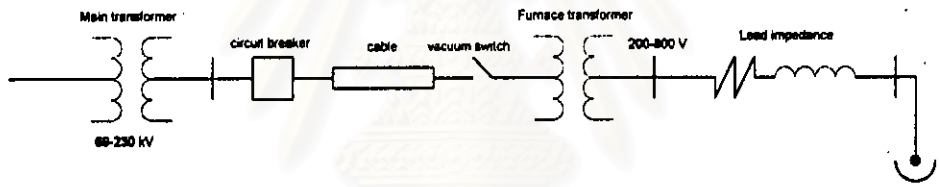
fac คือ ความถี่หลักมูลของระบบ

fs คือ ความถี่ของแรงดันด้านออก

2.2.2 เตาหลอมแบบอาร์ก (arc furnace) [3]

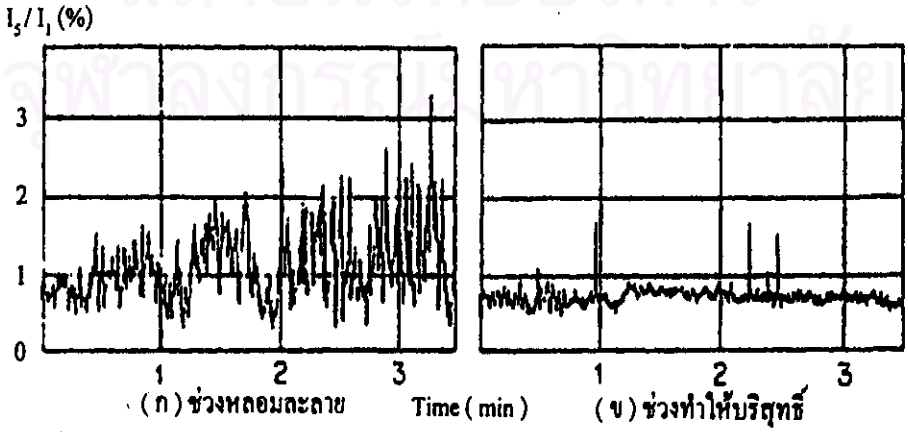
เตาหลอมแบบอาร์กที่ใช้ในการหลอมโลหะต่างๆ โดยอาศัยความร้อนที่เกิดจากกระแสจำนวนมากไหลผ่านขั้วอิเล็กโทรด โดยในปัจจุบันนี้นิยมใช้กันมาก เช่น เตาหลอมแบบอาร์กขนาดใหญ่ที่มีขนาด 50 MVA ขึ้นไป

เตาหลอมแบบอาร์ก เป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกที่สำคัญมากชนิดหนึ่งที่มีแรงดันที่ไม่เป็นรูปไซน์ เนื่องจากอาร์กมีความไม่เสถียรภาพเตาหลอมแบบอาร์กจึงมีลักษณะเหมือนความเหนี่ยวนำที่แปรค่าได้ เพราะหลักการทำงานใช้การเปลี่ยนแทป แรงดันไฟฟ้าอาร์กจะแปรเปลี่ยนไปตามระบบการทำงานเป็นขั้นตอน ตั้งแต่สภาพลัดวงจรจนถึงเปิดวงจร โดยรูปที่ 2.12 จะแสดงระบบของเตาหลอมแบบอาร์ก



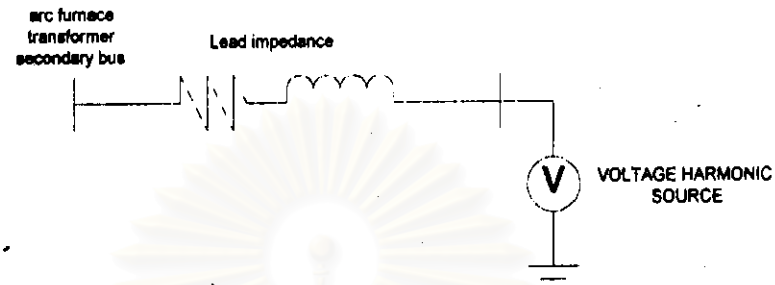
รูปที่ 2.12 ตัวอย่างของระบบเตาหลอม

ปริมาณฮาร์มอนิกที่เกิดจากเตาหลอมแบบอาร์กไม่สามารถบอกได้อย่างเจาะจงเพราะค่าจะเปลี่ยนไปตามจังหวะการทำงานของเตาหลอม กรณีที่แรงดันที่ใช้ในการอาร์กไม่สมดุลจะทำให้เกิดฮาร์มอนิกอันดับที่ 3 มากที่สุด ส่วนในสภาวะสมดุลจะเกิดฮาร์มอนิกอันดับที่ 5 และ 7 มากขึ้นกว่าตอนสภาวะไม่สมดุล ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 การเปรียบเทียบปริมาณกระแสฮาร์มอนิกที่ 5 ของช่วงหลอมกับช่วงที่ทำให้บริสุทธิ์

จากรูปที่2.13 จะพบว่าปริมาณฮาร์มอนิกที่ 5 จะมี การเปลี่ยนแปลง 8% , 6% และ 2.5% ของความถี่หลักมูล ในช่วงเวลาที่เริ่มหลอมละลาย และช่วงการทำให้บริสุทธิ์ตามลำดับ ด้วยเหตุที่กระแสฮาร์มอนิกจะไม่สามารถทำนายได้อย่างเจาะจง เพราะอาร์กเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา ทำให้สามารถแทนแบบจำลองเตาหลอมแบบอาร์กด้วยแหล่งกำเนิดแรงดันฮาร์มอนิก ดังรูปที่ 2.14

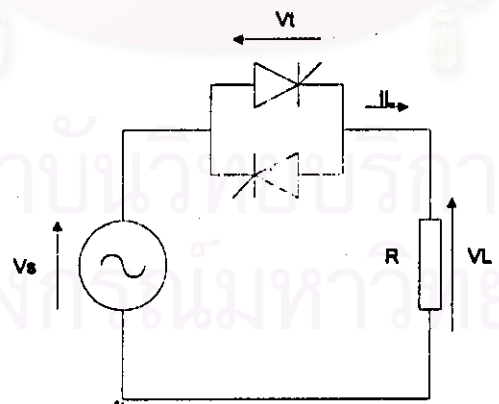


รูปที่ 2.14 แบบจำลองของเตาหลอมแบบอาร์ก

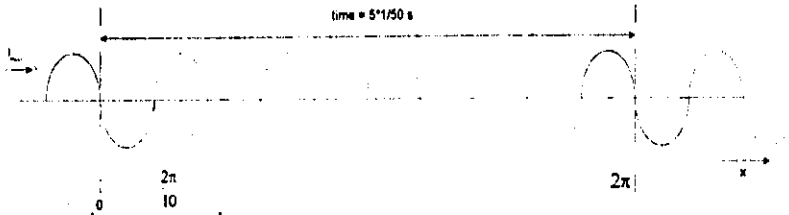
โดยลักษณะการทำงานที่ไม่เป็นเชิงเส้นของเตาหลอมแบบอาร์ก ทำให้เตาหลอมแบบอาร์กเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกที่สำคัญมากที่สุดอย่างหนึ่งในระบบจำหน่าย

2.2.3 ชุดควบคุมการทำงานแบบ Integral Cycle [3]

ชุดควบคุมการทำงานแบบ Integral cycle หรือ Burst firing จะพบได้ในเครื่องใช้ไฟฟ้า เช่น ชุดควบคุมอุณหภูมิของเตาไฟฟ้า โดยแสดงวงจรพื้นฐานของชุดควบคุมการทำงานแบบ Integral cycle ดังรูปที่ 2.15 และสามารถที่จะแสดงรูปคลื่นแรงดันได้ดังรูปที่ 2.16



รูปที่2.15 วงจรพื้นฐานของชุดควบคุมการทำงานแบบ Integral cycle



รูปที่2.16 รูปคลื่นของแรงดันของชุดควบคุมการทำงานแบบ Integral cycle

กำหนดให้ N คือจำนวนรูปคลื่นที่ใช้งาน M คือจำนวนรูปคลื่นที่ซ้ำ เช่น จากรูปที่ 2.16 N = 1 และ M = 5 เป็นต้น จะได้คาบของการซ้ำเท่ากับ M/f โดยที่ f เท่ากับ ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟ โดยที่ความถี่ต่ำที่สุดก็คือความถี่หลักมูลซึ่งมีค่าเท่ากับ f/M เฮิร์ต ดังนั้นจะได้กระแสที่มีค่าเป็นไปตามสมการที่ (2.9)

$$i = I_{max} \sin(M\omega t) \tag{2.9}$$

และจากรูปที่ 2.16 ทำการวิเคราะห์โดยใช้ ฟูเรียร์ จะได้ค่าสัมประสิทธิ์ฟูเรียร์ Ao และ An มีค่าเท่ากับศูนย์ โดยจะมีแต่ Bn ซึ่งหาค่าได้จากสมการที่ (2.10)

$$Bn = \frac{2}{\pi}\int_{0}^{2\pi f/M} [-I_{max}\sin(M\omega t)\sin(n\omega t)]d\omega t = -I_{max} * \frac{2M}{\pi} * \frac{\sin((N/M)n\pi)}{M^2 - N^2} \tag{2.10}$$

โดยพิจารณาจาก M = 5 และ N = 1 ความถี่ของแหล่งจ่ายไฟเท่า 50 เฮิร์ต ดังนั้นความถี่ต่ำสุดของการซ้ำเท่ากับ 10 โดยที่ n = 1 หรือที่ความถี่หลักมูลจะมีความถี่เท่า 10 เฮิร์ต จะได้ค่าต่อหน่วย (pu.) ที่ความถี่ต่างๆตามสมการที่(2.10) ดังนี้

f1 (10Hz) เท่ากับ 0.087	f8 (80Hz) เท่ากับ 0.078
f2 (20Hz) เท่ากับ 0.14	f9 (90Hz) เท่ากับ 0.033
f3 (30Hz) เท่ากับ 0.189	f10 (100Hz) เท่ากับ 0
f4 (40Hz) เท่ากับ 0.208	f11 (110Hz) เท่ากับ 0.019
f5 (50Hz) เท่ากับ 0.2	f12 (120Hz) เท่ากับ 0.025
f6 (60Hz) เท่ากับ 0.17	f13 (130Hz) เท่ากับ 0.021
f7 (70Hz) เท่ากับ 0.126	f14 (140Hz) เท่ากับ 0.011

โดยที่ ความถี่ 100 Hz, 150 Hz, 200Hz... จะมีค่าเท่าศูนย์ ดังนั้นชุดควบคุมการทำงานแบบ Integral Cycle จะเป็นแหล่งกำเนิดฮาร์มอนิกที่มีความถี่ไม่เป็นจำนวนเท่าของความถี่หลักมูลขึ้นในระบบนั้นเอง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย