หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

ทฤษฎีการกำจัดฮาร์มอนิกด้วยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ

วงจรกรองกำลังแอกทีฟมีหลักการทำงานที่สำคัญคือ การจ่ายกระแสที่มีเครื่องหมายตรงข้ามกับกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดจากโหลดเข้าไปหักล้างกัน เพื่อทำให้กระแสที่ไหลไปยังแหล่งจ่ายมีเหลือเฉพาะองค์ประกอบความถี่มูลฐาน ดังนั้นสิ่งสำคัญสำหรับคุณลักษณะในการทำงานของวงจรกรองกำลังแอกทีฟได้แก่

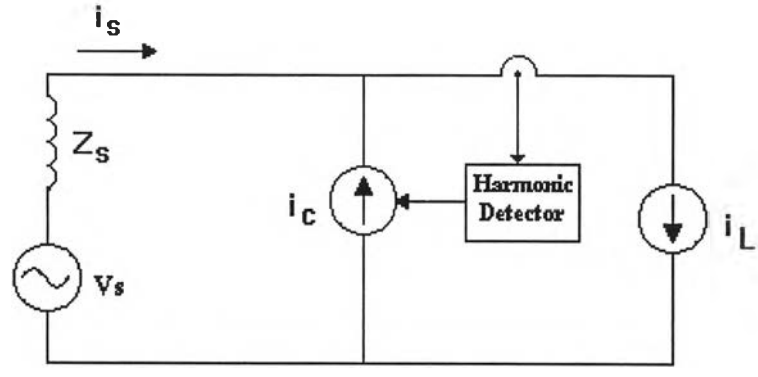
1. วิธีการตรวจจับกระแส
2. การคำนวณหาค่าฮาร์มอนิกและคำสั่งกระแสชดเชย
3. การสร้างกระแสชดเชยเพื่อจ่ายเข้าไปในระบบ

1. วิธีการตรวจจับกระแส

วงจรกรองกำลังแอกทีฟโดยทั่วไป จะทำการตรวจจับกระแสเพื่อนำมาใช้ในการคำนวณหาค่าฮาร์มอนิกได้ในสองลักษณะคือ

1.1 การตรวจจับกระแสด้านโหลด

การตรวจจับกระแสในลักษณะนี้มีวงจรสมมูลดังแสดงในรูปที่ 2.1 ในกรณที่โหลดมีลักษณะเป็นแหล่งจ่ายกระแสหรือมีอิมพีแดนซ์สูง การทำงานของวงจรกรองจะมีลักษณะเป็นแบบวงรอบเปิดดังแสดงตามรูปที่2.2 ซึ่งในกรณีเช่นนี้เราสามารถคำนวณหาองค์ประกอบฮาร์มอนิกที่ต้องการกำจัดจากกระแสโหลด และสามารถใช้เป็นคำสั่งกระแสชดเชยได้โดยตรง การตรวจจับในลักษณะนี้ทำให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟประพฤติตัวเป็นแหล่งจ่ายกระแส (F. Z. Peng, 1992)



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูล 1 เฟสของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ตรวจจับกระแสด้านโหลด

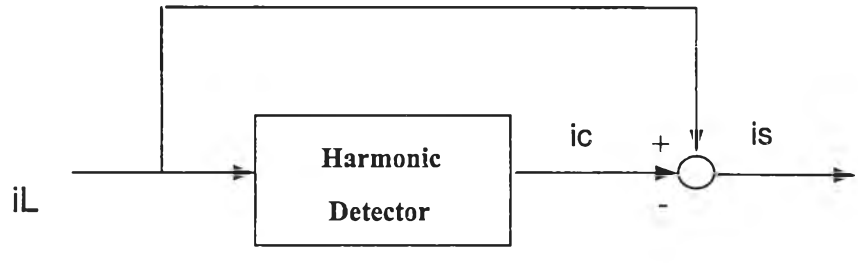
โดยที่ V_s คือ แรงดันแหล่งจ่าย

Z_s คือ อิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย

i_s คือ กระแสแหล่งจ่าย

i_L คือ กระแสโหลด

i_c คือ กระแสชดเชยที่จ่ายโดยวงจรกรองกำลังแอกทีฟ



รูปที่ 2.2 บล็อกไดอะแกรมของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ตรวจจับกระแสด้านโหลด

1.2 การตรวจจับกระแสด้านแหล่งจ่าย

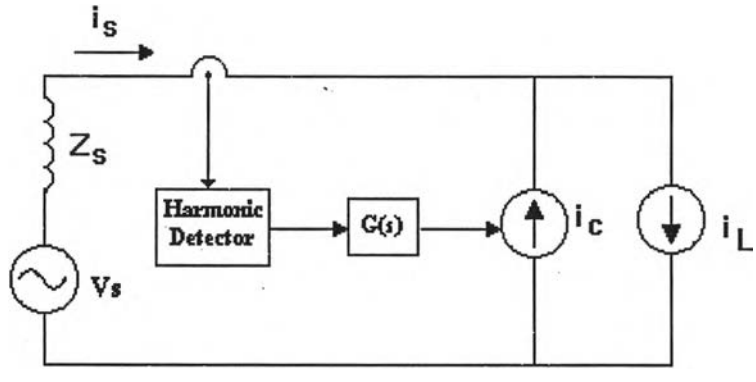
การตรวจจับกระแสลักษณะนี้จะทำให้วงจรกรองกำลังจะอาศัยการป้อนกลับเพื่อควบคุมกระแสฮาร์มอนิก ด้านแหล่งจ่ายให้มีค่าน้อยที่สุด โดยมีวงจรสมมูลดังรูปที่ 2.3 และมีลักษณะการทำงานเป็นแบบวงรอบปิดดังรูปที่2.4 ในกรณีนี้คำสั่งกระแสชดเชยจะไม่ได้มาจากกระแสฮาร์มอนิกที่แหล่งจ่ายโดยตรง แต่จะมีการคูณฟังก์ชันควบคุมเข้ากับกระแสฮาร์มอนิกที่ตรวจจับได้แล้วจึงใช้เป็นคำสั่งกระแสชดเชยเพื่อจ่ายออกไปโดยมีเป้าหมายการควบคุมเพื่อทำให้กระแสฮาร์มอนิก ด้านแหล่งจ่ายในอันดับที่ต้องการกำจัดมีค่าต่ำ

ฟังก์ชันควบคุม G(s) สามารถเลือกได้หลายหลายแบบซึ่งจะให้ผลแตกต่างกันไปโดยทำให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟประพฤติตัวเป็นอิมพีแดนซ์เสมือนที่มีค่าแปรตามความถี่ในลักษณะต่างๆ กัน (สรรค์ธิพงษ์ โฆษิตเกษม, 2540) อาทิเช่น

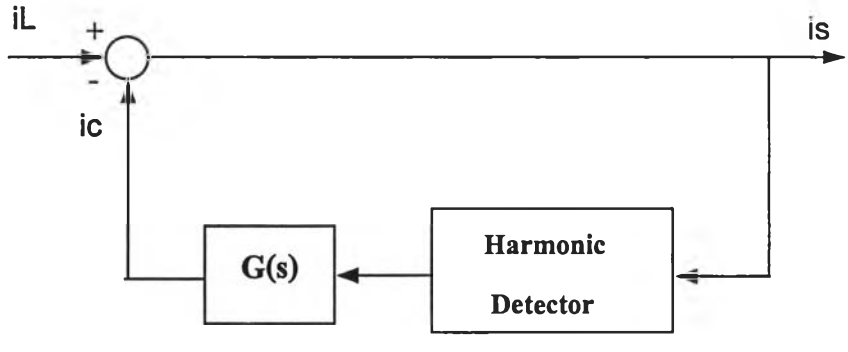
1. G(s) = k เมื่อ k เป็นค่าคงตัว วงจรกรองกำลังจะประพฤติตัวเสมือนเป็นตัวเหนี่ยวนำที่ความถี่ของฮาร์มอนิกที่ต้องการกำจัด

2. G(s) = $\frac{kTs}{1+Ts}$ เมื่อ k และ T เป็นค่าคงตัว วงจรกรองกำลังจะประพฤติตัวเสมือนเป็นตัวเหนี่ยวนำอนุกรมกับความต้านทานและมีลักษณะเฟสนำหน้าที่ความถี่ที่ต้องการกำจัด

การออกแบบฟังก์ชันควบคุมที่เหมาะสมจะทำให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟสามารถกำจัดฮาร์มอนิกได้ผลตามต้องการ



รูปที่ 2.3 วงจรสมมูล 1 เฟสของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ตรวจจับกระแสด้านแหล่งจ่าย



รูปที่ 2.4 บล็อกไดอะแกรมของวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ตรวจจับกระแสด้านแหล่งจ่าย

2. ทฤษฎีการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกแบบต่างๆ

สัญญาณกระแสรายคาบสามารถแตกออกเป็นผลรวมของกระแสองค์ประกอบความถี่มูลฐานกับกระแสองค์ประกอบฮาร์มอนิกอันดับต่างๆซึ่งมีค่าความถี่เป็นจำนวนเท่า(อันดับ)ที่ลงตัวของความถี่มูลฐานซึ่งมีค่าได้ไปจนถึงอนันต์ วงจรกรองกำลังแอกทีฟจะต้องสามารถทำการตรวจจับแยกเอาสัญญาณฮาร์มอนิกที่ต้องการออกมา เพื่อทำการสร้างกระแสชดเชยไปหักล้างกับกระแสฮาร์มอนิกในองค์ประกอบนั้นๆ

ในกรณีที่ระบบเป็นแบบ 3 เฟส 3 สาย ซึ่งกระแส 3 เฟส มีความไม่อิสระกัน เราอาจพิจารณาตรวจจับฮาร์มอนิกแยกกันทีและเฟสอย่างอิสระกัน หรืออาจพิจารณาตรวจจับฮาร์มอนิกจากสเปซเวกเตอร์ 2 เฟส ซึ่งเป็นปริมาณซึ่งแสดงภาพรวมของกระแส 3 เฟสก็ได้ ซึ่งกระแสในรูปสเปซเวกเตอร์นี้ก็สามารถแยกออกได้เป็นผลรวมขององค์ประกอบมูลฐานกับองค์ประกอบฮาร์มอนิกต่างๆได้เช่นกัน ดังแสดงตามสมการที่ (2.1)

$$\vec{i}(t) = \sum_{h=-\infty}^{\infty} Ih \cdot e^{jh\omega t} \tag{2.1}$$

เมื่อ $\vec{i}(t)$ คือสเปซเวกเตอร์กระแส h คืออันดับของฮาร์มอนิก ω คือความถี่มูลฐาน Symmetrical Component ของกระแส 3 เฟสกับกระแสสเปซเวกเตอร์จะมีความสัมพันธ์กันคือ

- กระแสซีเควนซ์ศูนย์ กรณีระบบ 3 เฟส 3 สายจะไม่มีกระแสซีเควนซ์นี้
- กระแสซีเควนซ์บวก เมื่อแปลงเป็นสเปซเวกเตอร์จะกลายเป็นเวกเตอร์ขนาดคงที่ หมุนไปในทิศทางทวนเข็มนาฬิกาด้วยความเร็วเท่ากับความถี่ของฮาร์มอนิกนั้นๆ ซึ่งสอดคล้องกับพจน์ $Ih \cdot e^{jh\omega t}$ เมื่อ h มีค่าเป็นบวกนั่นเอง
- กระแสซีเควนซ์ลบ เมื่อแปลงเป็นสเปซเวกเตอร์จะกลายเป็นเวกเตอร์ขนาดคงที่ หมุนไปในทิศทางตามเข็มนาฬิกาด้วยความเร็วเท่ากับความถี่ของฮาร์มอนิกนั้นๆ ซึ่งสอดคล้องกับพจน์ $Ih \cdot e^{jh\omega t}$ เมื่อ h มีค่าเป็นลบนั่นเอง

การมองกระแส 3 เฟสเป็นสเปซเวกเตอร์นี้ทำให้เราสามารถพัฒนาวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิกแบบใหม่โดยมองจากสเปซเวกเตอร์ได้ เราสามารถตรวจจับโดยแยกแยะทั้งความถี่และซีเควนซ์ ซึ่งมีประโยชน์ในการเลือกตรวจจับและกำจัดเฉพาะบางฮาร์มอนิกและบางซีเควนซ์ เมื่อระบบมีฮาร์มอนิกเฉพาะบางอันดับและบางซีเควนซ์ ตัวอย่างเช่น ระบบ 3 เฟส 3 สายสมดุลโดยทั่วไป ซึ่งมีฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับ 5 ซีเควนซ์ลบ อันดับ 7 ซีเควนซ์บวก อันดับ 11 ซีเควนซ์ลบ อันดับ 13

ซีเควนซ์บวก เช่นนี้เรื่อยไป เราสามารถพัฒนาวิธีการตรวจจับฮาร์มอนิกแบบใหม่ได้จากมุมมองนี้ อาทิเช่นการตรวจจับเฉพาะฮาร์มอนิก อันดับ 5 ซีเควนซ์ลบและฮาร์มอนิกอันดับ 7 ซีเควนซ์บวก โดยใช้วงจรกรองผ่านแถบ (สรรค์ธิพงษ์ โฆษิตเกษม 2540) และการปรับปรุงการทำ Recursive DFT ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดต่อไป

วิธีการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกที่นิยมกันทั่วไปได้แก่ วิธีการซึ่งอาศัยทฤษฎีกำลังงานรีแอกทีฟขณะใดๆ (Instantaneous Reactive Power) (H. Akagi, 1983) และวิธีการหมุนแกนอ้างอิง

2.1 การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกโดยใช้ทฤษฎีกำลังงานรีแอกทีฟขณะใด

โดยทั่วไปวิธีการนี้จะใช้ตรวจจับฮาร์มอนิกในระบบ 3 เฟส 3 สาย ซึ่งจะให้ค่ากระแสฮาร์มอนิกถูกต้องเมื่อแหล่งจ่ายมีรูปคลื่นแรงดันเป็นไซน์และมีความสมดุล มิฉะนั้นจะเกิดความผิดพลาดได้ นอกจากนี้การตรวจจับฮาร์มอนิกวิธีนี้ยังเหมาะสมเฉพาะกับวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ชดเชยฮาร์มอนิกทุกอันดับ เนื่องจากกระแสฮาร์มอนิกที่คำนวณได้จะประกอบไปด้วยฮาร์มอนิกทุกอันดับปนกันอยู่โดยไม่สามารถแยกตรวจจับเฉพาะอันดับที่ต้องการได้

ขั้นตอนในการคำนวณหากระแสฮาร์มอนิก เริ่มแรกเราจะต้องแปลงกระแสและแรงดัน 3 เฟสบนแกน u v w มาเป็นสเปซเวกเตอร์บนแกน $\alpha-\beta$ โดยใช้สมการที่ (2.2) และ (2.3) ตามลำดับ

$$\vec{i}=\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}=\sqrt{\frac{3}{2}}\begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} \tag{2.2}$$

$$\vec{e}=\begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix}=\sqrt{\frac{3}{2}}\begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} e_u \\ e_v \\ e_w \end{bmatrix} \tag{2.3}$$

โดยที่ "$\vec{(\bullet)}$" แสดงถึงปริมาณสเปซเวกเตอร์ $(\bullet)_\alpha$ และ $(\bullet)_\beta$ คือองค์ประกอบของสเปซเวกเตอร์บนแกน α และ β ตามลำดับ จากนั้นเราจะนำกระแสและแรงดันที่เป็นสเปซเวกเตอร์มาหาค่ากำลังขณะใดๆ (Instantaneous Power) โดยที่ p คือกำลังงานจริงขณะใดๆของระบบ 3 เฟสที่จ่ายจากแหล่งไปสู่โหลด มีค่าเท่ากับผลคูณสเกลล่า (Dot Product) ของ $\vec{e}$ กับ $\vec{i}$ ตามสมการที่(2.4) ส่วน q คือ กำลังงานรีแอกทีฟขณะใดๆ (Istantaneous Reactive Power) เป็นกำลังที่ถ่ายทอดกันเองระหว่างเฟส

ทั้ง 3 ของแหล่งจ่ายโดยไม่ทำให้เกิดกำลังสุทธิไปสู่โหลด มีค่าเท่ากับขนาดของผลคูณเวกเตอร์ (Cross Product) ของ $\vec{e}$ กับ $\vec{i}$ ตามสมการที่ (2.5)

$$p = \vec{e} \cdot \vec{i} \tag{2.4}$$

$$q = \left\| \vec{e} \times \vec{i} \right\| \tag{2.5}$$

จากสมการที่(2.4) และ (2.5) เราสามารถแสดงค่ากำลังงานจริงขณะใดๆ p และค่ากำลังงานรีแอกทีฟขณะใดๆ q ของระบบ 3 เฟสในของรูปเมตริกซ์ได้ ดังสมการที่ (2.6) หรือ (2.7)

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_\alpha & e_\beta \\ -e_\beta & e_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \tag{2.6}$$

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_\alpha & i_\beta \\ i_\beta & -i_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} \tag{2.7}$$

สมการที่ (2.6) เหมาะสำหรับใช้กับแหล่งจ่ายแรงดัน ส่วนสมการที่ (2.7) จะใช้กับแหล่งจ่ายกระแส จากสมการที่ (2.6) เมื่อดีเทอร์มีแนนท์ของเมตริกซ์ไม่เป็นศูนย์ เราสามารถคำนวณค่ากระแสจากค่ากำลังงานขณะใดๆได้ดังสมการ

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_\alpha & e_\beta \\ -e_\beta & e_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix}$$

$$= \frac{1}{e_\alpha^2 + e_\beta^2} \begin{bmatrix} e_\alpha & -e_\beta \\ e_\beta & e_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \tag{2.8}$$

ค่ากำลังงานจริงขณะใดๆ p และค่ากำลังงานรีแอกทีฟขณะใดๆ q มีองค์ประกอบทั้งที่เป็นไฟตรงและไฟสลับดังต่อไปนี้(Mauricio Aredes, 1995)

- องค์ประกอบไฟตรง เกิดจากกระแสที่มีความถี่และซีเควนซ์ตรงกับแรงดัน ยกตัวอย่างเช่น กระแสความถี่มูลฐานซีเควนซ์บวกกับแรงดันความถี่มูลฐานซีเควนซ์บวกเหมือนกัน หรือ กระแสฮาร์มอนิก 5 ซีเควนซ์ลบกับแรงดันฮาร์มอนิก 5 ซีเควนซ์ลบเป็นต้น

- องค์ประกอบไฟสลับ เกิดจากกระแสที่มีความถี่หรือซีเควนซ์ไม่ตรงกับแรงดัน

ดังนั้นในกรณีที่แรงดันแหล่งจ่ายสมดุลและไม่มีฮาร์มอนิก องค์ประกอบไฟตรงของ p และ q จะเกิดเฉพาะจากกระแสความถี่มูลฐานซีเควนซ์บวกเท่านั้น และองค์ประกอบไฟสลับของ p และ q จะเกิดมาจากกระแสความถี่มูลฐานซีเควนซ์ลบ (ในกรณีที่โหลดสมดุล) หรือเกิดจากกระแสฮาร์มอนิกเท่านั้น ในกรณีหลังนี้เราสามารถตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกได้โดยกรองแยกเอาองค์ประกอบไฟสลับออกมาด้วยวงจรกรองผ่านสูงซึ่งเมื่อเรานำองค์ประกอบนี้ไปแปลงกลับเป็นกระแสโดยใช้สมการที่ (2.9) ก็จะได้กระแสฮาร์มอนิกในรูปของสเปซเวกเตอร์

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha h} \\ i_{\beta h} \end{bmatrix} = \frac{1}{e_\alpha^2 + e_\beta^2} \begin{bmatrix} e_\alpha & -e_\beta \\ e_\beta & e_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \tag{2.9}$$

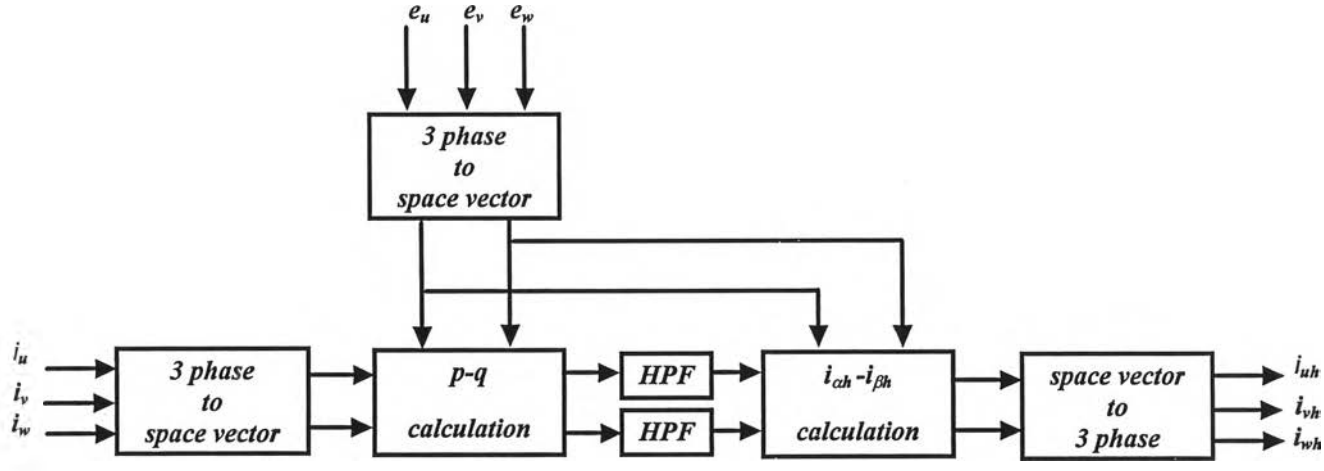
โดยที่ $i_{\alpha h}$ และ $i_{\beta h}$ คือองค์ประกอบของกระแสฮาร์มอนิกบนแกน α และ β ตามลำดับ ค่ากระแสฮาร์มอนิกในรูปสเปซเวกเตอร์สามารถนำไปแปลงกลับเป็นกระแสฮาร์มอนิกในระบบ 3 เฟสตามได้ตามสมการที่ (2.10)

$$\begin{bmatrix} i_{uh} \\ i_{hv} \\ i_{wh} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \sqrt{\frac{3}{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha h} \\ i_{\beta h} \end{bmatrix} \tag{2.10}$$

โดยที่ i_{uh} i_{vh} และ i_{wh} คือค่าของกระแสฮาร์มอนิกในระบบ 3 เฟสของเฟส u v และ w ตามลำดับ หลักการคำนวณหาค่ากระแสฮาร์มอนิกตามวิธีการที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปเป็นแผนภาพได้ตามรูปที่ 2.5

ในกรณีที่โหลดมีความไม่สมดุล เราจะต้องมีหลักการเพิ่มเติมในการกำจัดกระแสความถี่มูลฐานซีเควนซ์ลบออกไปซึ่งจะไม่ขอกล่าวถึงในที่นี้ ดังนั้นเราจะเห็นได้ว่าการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกโดยวิธีนี้ยังคงมีข้อจำกัดอยู่หลายประการคือ

- แรงดันแหล่งจ่ายต้องมีความสมดุล
- เมื่อมีฮาร์มอนิกอันดับต่ำในระบบ การกรองแยกเอาองค์ประกอบเหล่านั้นออกมาจากองค์ประกอบความถี่มูลฐานจะทำได้ยาก
- ไม่สามารถแยกตรวจจับเฉพาะบางฮาร์มอนิกได้



รูปที่ 2.5 แผนภาพแสดงการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกโดยอาศัยทฤษฎีกำลังงานรีแอกทีฟขณะใดๆ

2.2 การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกโดยใช้วิธีวงจรกรองบนแกนหมุน

การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกโดยวิธีการนี้เราสามารถที่จะตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกทุกอันดับหรือตรวจจับเฉพาะอันดับที่ต้องการก็ได้

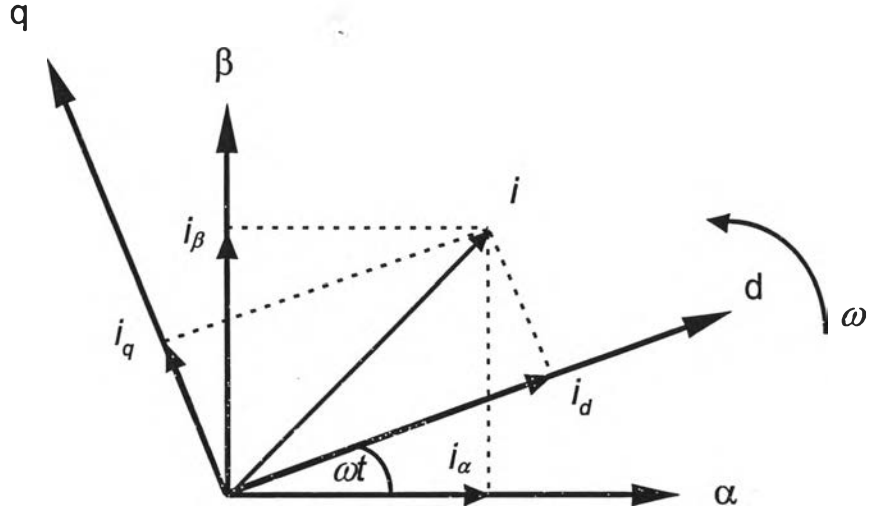
2.2.1 การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกทุกอันดับ

การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธีนี้มีหลักการสำคัญคือต้องกรองเอาสัญญาณกระแสความถี่มูลฐานทิ้งไปและเก็บเอาไว้เฉพาะสัญญาณกระแสฮาร์มอนิก โดยจะเริ่มจากแปลงกระแส 3 เฟสไปเป็นสเปซเวกเตอร์ จากนั้นจะทำการแปลงกระแสสเปซเวกเตอร์บนแกน α-β ไปอยู่บนแกนหมุน d-q ขององค์ประกอบความถี่มูลฐานดังแสดงในรูปที่ 2.6 การแปลงเวกเตอร์กระแสไปอยู่บนแกนหมุน d-q ที่ความถี่ 50 Hz สามารถทำได้โดยการคูณเวกเตอร์กระแสด้วย $e^{-j\omega t}$ เมื่อ ω คือค่าความถี่มูลฐานเป็น rad/s เราสามารถเขียนสมการการแปลงให้อยู่ในรูปสมการเมตริกซ์ได้ดังสมการที่ (2.11)

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \tag{2.11}$$

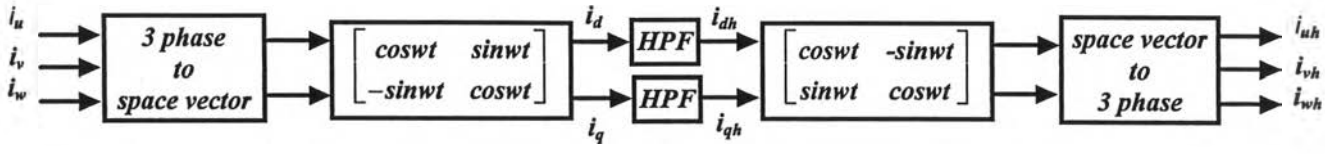
โดยที่ i_d และ i_q คือองค์ประกอบของกระแสบนแกนหมุน d และ q ขององค์ประกอบความถี่มูลฐานตามลำดับ บนแกนหมุน d-q กระแสความถี่มูลฐานอันดับบวกจะกลายมาเป็นสัญญาณกระแสตรงส่วนกระแสฮาร์มอนิกอื่นๆจะกลายเป็นสัญญาณกระแสสลับ เราสามารถกรองแยกเอาเฉพาะสัญญาณกระแสสลับออกมาได้โดยใช้วงจรกรองผ่านสูง จากนั้นจึงทำการแปลงกระแสบนแกน d-q กลับไปเป็นกระแสเปซเวกเตอร์บนแกน α-β โดยการคูณด้วย $e^{j\omega t}$ ซึ่งสามารถแสดงในรูปเมตริกซ์ดังสมการที่ (2.12)

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha h} \\ i_{\beta h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dh} \\ i_{qh} \end{bmatrix} \tag{2.12}$$



รูปที่ 2.6 เวกเตอร์กระแสและแกนอ้างอิงซึ่งหมุนไปด้วยความถี่ 50 Hz

โดยที่ i_{dh} และ i_{qh} คือองค์ประกอบของกระแสฮาร์มอนิกบนแกนหมุน d และ q ขององค์ประกอบความถี่มูลฐานตามลำดับ จากกระแสฮาร์มอนิกในรูปสเปซเวกเตอร์เมื่อทำการแปลงกลับมาเป็นกระแสในระบบ 3 เฟสก็จะได้กระแสฮาร์มอนิกตามต้องการ ในกรณีที่โหลดมีกระแสความถี่มูลฐานซีเควนซ์ลบอยู่ด้วยเราก็ต้องใช้หลักการนี้เพื่อกรองเอาสัญญาณกระแสความถี่มูลฐานอันดับลบทิ้งไปโดยจะใช้การแปลงไปอยู่บนแกนหมุนของกระแสความถี่มูลฐานอันดับลบแทนแล้วจึงกรองเอากระแสองค์ประกอบมูลฐานอันดับลบซึ่งจะเป็นกระแสตรงบนแกนหมุนทิ้งไป ขั้นตอนการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกในกรณีที่กระแสไม่มีองค์ประกอบความถี่มูลฐานอันดับลบแสดงโดยสรุปเป็นแผนภาพดังรูปที่ 2.7 (สรรค์ธิพงษ์ โฆษิต เกษม, 2540)



$\omega = 100\pi$ *rad/s.*
HPF = high-pass filter

รูปที่ 2.7 แผนภาพแสดงการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกทุกอันดับโดยใช้วิธีวงจรกรองบนแกนหมุน

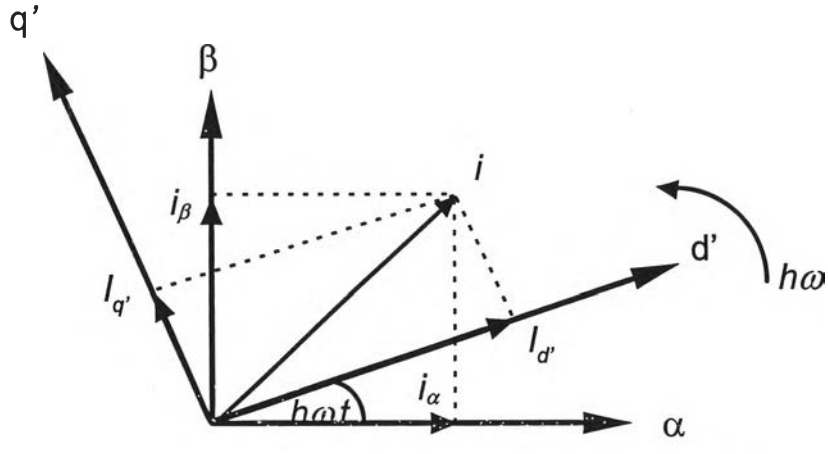
โดยวิธีการนี้จะเห็นได้ว่าเรายังคงสามารถตรวจจับฮาร์มอนิกได้อย่างถูกต้องแม้ว่าแรงดันด้านแหล่งจ่ายจะมีฮาร์มอนิกหรือความไม่สมดุล อย่างไรก็ดีความถี่ของระบบไฟฟ้าอาจมีการเปลี่ยนแปลงได้เล็กน้อยเสมอดังนั้นการแปลงแกนให้ได้ความถี่ตรงกับความถี่มูลฐานของระบบจริงย่อมต้องมีความผิดพลาดเกิดขึ้นซึ่งการตรวจจับก็จะเกิดความผิดพลาดขึ้นได้โดยมีค่ามากน้อยขึ้นอยู่กับความผิดเพี้ยนของความถี่ในการแปลงแกนและคุณลักษณะการกรองของวงจรกรองผ่านสูงที่ใช้ยิ่งวงจรกรองผ่านสูงมีการเปลี่ยนแปลงอัตราขยายและเฟสมากในย่านความถี่ต่ำความคลาดเคลื่อนเมื่อความถี่ผิดเพี้ยนก็จะมาก เราอาจต้องมีการทำเฟสล็อกลูปเพื่อให้ได้ความถี่การแปลงแกนมีความถูกต้องมากขึ้น

การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยทฤษฎีกำลังงานรีแอกทีฟขณะใดๆซึ่งใช้แรงดันเป็นตัวคูณในการหาค่า p และ q นั้น ในความเป็นจริงแล้วก็จะมีความคล้ายคลึงกับการแปลงแกนนั่นเองเพียงแต่ใช้แรงดันโดยตรงแทนที่จะใช้ $e^{j\omega t}$ ซึ่งจะทำให้ไม่เกิดปัญหาความถี่การแปลงแกนไม่ตรงกับความถี่ระบบกำลังแต่ก็จะมีปัญหาอื่นแทนดังได้กล่าวมาแล้ว การตรวจจับฮาร์มอนิกด้วยวิธีการหมุนแกนในกรณีที่ระบบมีฮาร์มอนิกอันดับต่ำปนอยู่ก็ยังคงมีปัญหาเช่นเดียวกับการใช้ทฤษฎีกำลังงานรีแอกทีฟขณะใดๆคือการกรองแยกกระแสฮาร์มอนิกอันดับต่ำเหล่านั้นออกจากกระแสองค์ประกอบความถี่มูลฐานจะทำได้ยาก

<u>2.2.2 การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับ</u> (N. Nanaumi,1996) (A. Salem nia,1996)

ในการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกเฉพาะอันดับกระทำได้โดยแปลงกระแสใน 3 เฟสไปเป็นสเปซเวกเตอร์ จากนั้นเราจะแปลงสเปซเวกเตอร์ของกระแสไปอยู่บนแกนหมุนที่ความถี่ฮาร์มอนิกอันดับและซีเควนซ์ที่ต้องการตรวจจับโดยการคูณด้วย $e^{-jh\omega t}$ เมื่อ h คืออันดับและซีเควนซ์ของฮาร์มอนิกที่ต้องการตรวจจับ (ยกตัวอย่างเช่น h = -5 หมายถึงฮาร์มอนิกที่ 5 ซีเควนซ์ลบ) และ ω

คือค่าความถี่มูลฐาน ดังแสดงในรูปที่ 2.8 โดยสมการการแปลงแกนหมุนที่อยู่ในรูปเมตริกซ์แสดงได้ดังสมการที่ (2.13)



รูปที่ 2.8 เวกเตอร์กระแสและแกนอ้างอิง ซึ่งหมุนไปด้วยความถี่ h ω

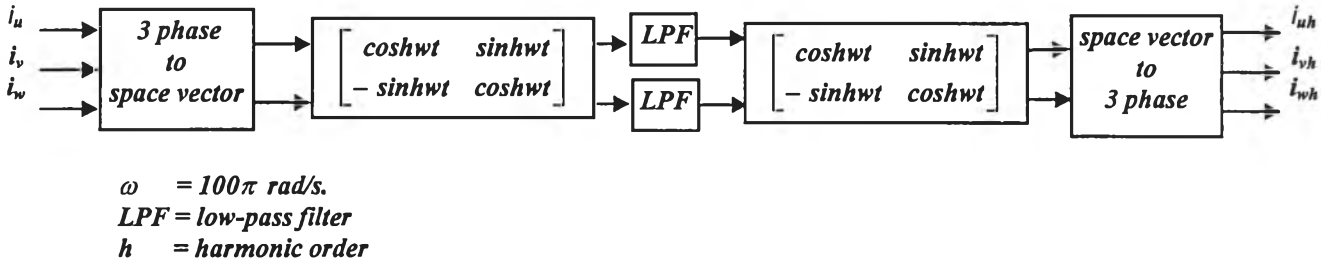
$$\begin{bmatrix} i_{d'} \\ i_{q'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(h\omega t) & \sin(h\omega t) \\ -\sin(h\omega t) & \cos(h\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \tag{2.13}$$

โดยที่ $i_{d'}$ และ $i_{q'}$ คือองค์ประกอบของกระแสบนแกนหมุน d' และ q' ขององค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกอันดับที่ h ตามลำดับ เมื่อทำการแปลงแกนแล้วกระแสฮาร์มอนิกที่มีอันดับและซีเควนซ์เดียวกับแกนหมุนจะกลายเป็นสัญญาณกระแสตรงซึ่งเราจะกรองเอาสัญญาณส่วนนี้เก็บเอาไว้โดยใช้วงจรกรองผ่านต่ำ ส่วนกระแสฮาร์มอนิกอื่นๆรวมทั้งกระแสความถี่มูลฐานจะกลายเป็นองค์ประกอบกระแสสลับบนแกนหมุนนี้และจะถูกกรองทิ้งไป จากนั้นเราจึงทำการแปลงกระแสฮาร์มอนิกที่กรองเก็บไว้ได้ในรูปกระแสตรงกลับมาอยู่บนแกนนิ่งโดยใช้สมการที่ (2.14)

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha h} \\ i_{\beta h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(h\omega t) & -\sin(h\omega t) \\ \sin(h\omega t) & \cos(h\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{d'h} \\ i_{q'h} \end{bmatrix} \tag{2.14}$$

โดยที่ $i_{d'h}$ และ $i_{q'h}$ คือองค์ประกอบของกระแสฮาร์มอนิกบนแกนหมุน d' และ q' ขององค์ประกอบความถี่ฮาร์มอนิกอันดับที่ h ตามลำดับ จากนั้นจึงทำการแปลงสเปซเวกเตอร์ของกระแสฮาร์มอนิกไปเป็นกระแสฮาร์มอนิกในระบบ 3 เฟสก็จะได้กระแสฮาร์มอนิกในอันดับและซีเควนซ์ที่ต้องการ หลักการคำนวณค่ากระแสฮาร์มอนิกตามที่กล่าวมาสามารถสรุปเป็นแผนภาพได้

ดังรูปที่ 2.9 การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก โดยวิธีนี้จะยังคงมีปัญหาในการกรองแยกเอาความถี่ฮาร์มอนิกที่อยู่ใกล้กันออกมาได้ยากเช่นเดียวกับวิธีการตรวจจับโดยใช้ทฤษฎีกำลังงานรีแอกทีฟขณะใดๆและวิธีการแปลงแกนหมุนแบบตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกทุกอันดับ แผนภาพโบเดในรูปที่ 2.10 แสดงผลตอบเชิงความถี่ของตัวตรวจจับเป็นตัวอย่างกรณีตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 ซีเควนซ์บวก โดยที่เราใช้วงจรกรองผ่านต่ำแบบอันดับ 1 เป็น $\frac{\omega_c}{s+\omega_c}$ เมื่อ ω_c คือความถี่หักมุม ในรูปที่ 2.10 ก. เราใช้ความถี่หักมุมค่าสูงซึ่งจะให้ผลตอบในสภาวะชั่วครู่ที่เร็วแต่การกรองทิ้งความถี่ที่อยู่ใกล้เคียงกับความถี่ที่จะตรวจจับและความถี่มูลฐานจะทำได้ไม่ดี ในขณะที่รูปที่ 2.10 ข. เมื่อใช้ความถี่หักมุมค่าต่ำการกรองทิ้งความถี่ที่ไม่ต้องการจะทำได้ดีแต่อย่างไรก็ตามตัวตรวจจับจะมีผลตอบสภาวะชั่วครู่ที่ช้า ดังนั้นจากปัญหาที่กล่าวมาเราสามารถสรุปได้ว่าการตรวจจับฮาร์มอนิกโดยวิธีการใช้วงจรกรองบนแกนหมุนจะไม่สามารถมีคุณลักษณที่ดีในการกรองแยกกระแสความถี่ที่ต้องการออกจากกระแสความถี่อื่นๆพร้อมกันกับการมีผลตอบสภาวะชั่วครู่ที่เร็วได้

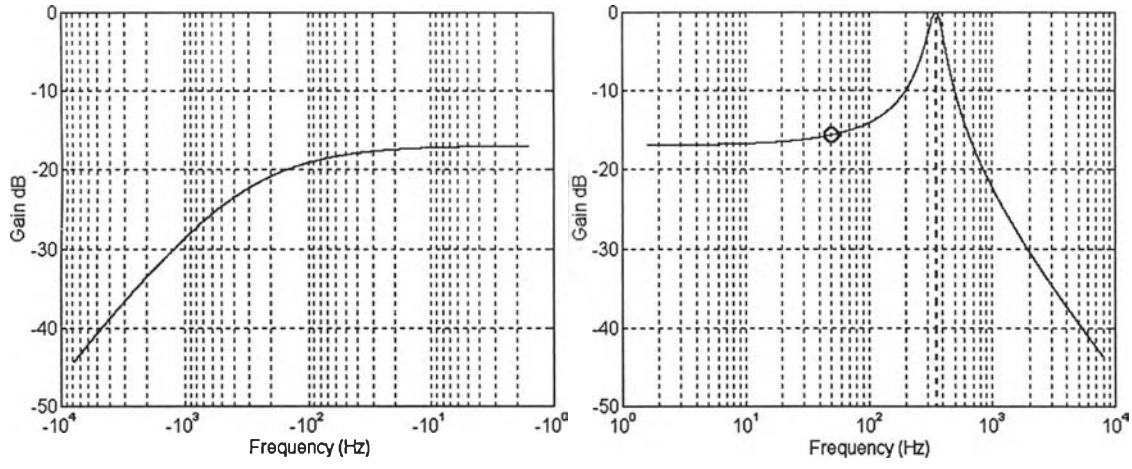


ω = 100π rad/s.
LPF = low-pass filter
h = harmonic order

รูปที่ 2.9 แผนภาพแสดงการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ h โดยใช้วงจรกรองบนแกนหมุน

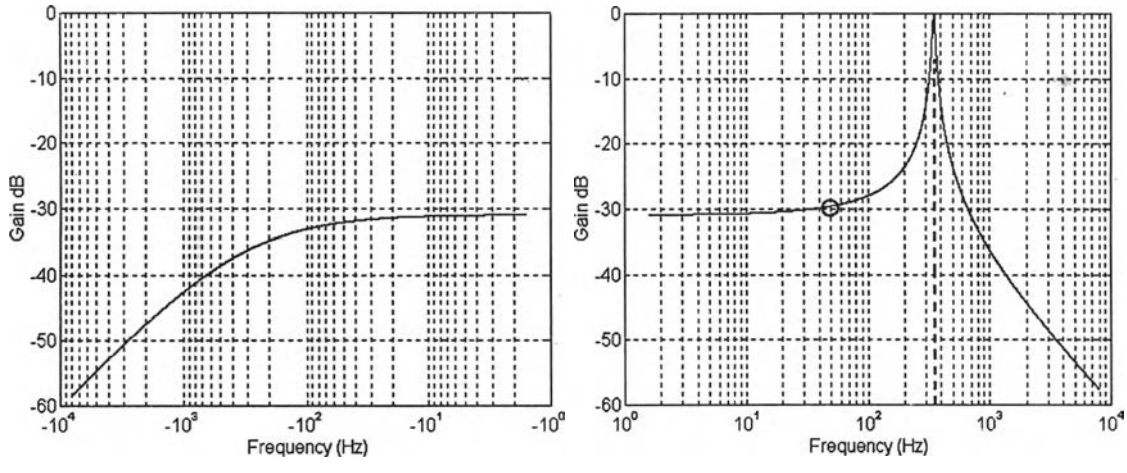
2.2.3 การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธีวิเคราะห์สเปกตรัม

การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกอาจทำได้โดยการนำกระแสมาวิเคราะห์หาสเปกตรัมโดยตรงด้วยการทำ DFT (Discrete Fourier Transform) ซึ่งนิยมใช้เทคนิคการคำนวณด้วยการทำ FFT (Fast Fourier Transform) (S. Bernard, 1996) หรืออาจใช้เทคนิคอื่นๆอย่างเช่น การคำนวณโดยใช้ Neural Network ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิเคราะห์สเปกตรัมโดยทั่วไปจะได้เป็นขนาดและเฟสของกระแสฮาร์มอนิกที่ต้องการ จากนั้นเราจะนำข้อมูลขนาดและเฟสของกระแสฮาร์มอนิกนี้ไปสร้างเป็นกระแสจริงเพื่อใช้จ่ายเป็นกระแสชดเชย ในการสร้างกระแสชดเชยจะต้องมีการทำเฟสล็อกลูปเพื่อทำให้กระแสที่สร้างได้มีความถี่ตรงกับระบบไฟฟ้ากำลังที่วงจรกรองกำลังแอกทีฟต่ออยู่ด้วย รายละเอียดของการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกโดยวิธีนี้จะขอละไว้แต่จะขอกล่าวถึงคุณลักษณะที่สำคัญบางประการ



Negative sequence Positive sequence

ก) $\omega_c = 100\pi$ rad/s



Negative sequence Positive sequence

ข) $\omega_c = 20\pi$ rad/s

รูปที่ 2.10 ลักษณะสมบัติการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธีวงจรกรองบนแกนหมุนเมื่อตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกอันดับที่ 7 ซีเควนซ์บวก

<u>การวิเคราะห์สเปกตรัมด้วยการทำ FFT</u>

<u>ข้อดี</u>

- ให้ค่า Fourier Transform ของทุกสเปกตรัมอย่างแม่นยำ สามารถแยกแยะกระแสฮาร์มอนิกที่อยู่ใกล้กันได้ดี

<u>ข้อด้อย</u>

- มีการคำนวณที่มากและยุ่งยาก

- ผลลัพธ์จากการคำนวณที่ได้จะเป็นข้อมูลขนาดและเฟสของกระแสฮาร์มอนิกที่ต้องการกำจัดไม่ใช่สัญญาณกระแสโดยตรง จึงต้องมีการคำนวณสร้างสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกที่ต้องการจากข้อมูลเหล่านี้อีกทีหนึ่ง
- ตัวตรวจจับไม่เป็นเชิงเส้นยากต่อการวิเคราะห์
- มีผลตอบที่ค่อนข้างช้าคือประมาณ 2 คาบเวลาของความถี่มูลฐาน 50 Hz โดยใช้ 1 คาบแรกสำหรับเก็บข้อมูลและอีกประมาณ 1 คาบสำหรับการคำนวณและสร้างกระแสชดเชย

การวิเคราะห์สเปกตรัมโดยใช้ Neural Network

คุณลักษณะต่างของการวิเคราะห์สเปกตรัมจะคล้ายกับการทำ FFT เพียงแต่เปลี่ยนวิธีการคำนวณมาใช้การคำนวณด้วย Neural Network (นเรศ เพ็ชรนิน, 2539) ที่ได้รับการฝึกสอนมาอย่างเหมาะสม ซึ่งสามารถให้ผลการคำนวณที่รวดเร็วเช่นกัน แต่ยังคงต้องรอเก็บข้อมูลกระแสให้ครบคาบก่อนจึงจะเริ่มทำการชดเชยได้เช่นเดียวกับวิธี FFT

นอกจาก 2 วิธีดังกล่าวข้างต้นการวิเคราะห์สเปกตรัมยังอาจทำได้ด้วยวิธีอื่น ซึ่งวิธีหนึ่งก็คือการทำ Recursive Discrete Fourier Transform (Recursive DFT) ซึ่งเป็นวิธีการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกสำหรับวงจรกรองกำลังแอกทีฟที่ใช้ในวิทยานิพนธ์นี้และจะได้กล่าวถึงรายละเอียดในบทต่อไป วิธี Recursive DFT มีคุณลักษณะที่ดีคือ

- ทำการคำนวณสเปกตรัมโดยเลือกทำเฉพาะบางความถี่
- มีการคำนวณที่ไม่มากและไม่ยุ่งยากซับซ้อน ถ้าเราทำการคำนวณค่าสเปกตรัมที่เฉพาะบางความถี่
- สามารถทำการคำนวณได้ในแบบ Real-Time คือ สามารถทำการคำนวณปรับค่า DFT ได้ทันภายใน 1 คาบการสุ่มค่าสัญญาณเข้ามาใหม่
- ตัวตรวจจับที่ได้เป็นฟังก์ชันเชิงเส้น สามารถหาฟังก์ชันโอนย้ายเพื่อการวิเคราะห์ได้
- สามารถนำไปใช้กับวงจรกรองกำลังแอกทีฟทั้งแบบที่กำจัดฮาร์มอนิกทุกอันดับหรือเฉพาะบางอันดับก็ได้
- มีผลตอบสนองรวดเร็วและมีการปรับค่าสัญญาณขาออกทันทีที่มีการสุ่มข้อมูลกระแสเข้ามาใหม่ ค่าที่ได้จากการทำ Recursive DFT จะเป็นสัญญาณกระแสฮาร์มอนิกที่ต้องการโดยตรง ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นคำสั่งกระแสชดเชยได้

3. การสร้างกระแสชดเชย

วงจรกรองกำลังแอกทีฟจะมีวงจรอินเวอร์เตอร์ทางด้านออกซึ่งทำหน้าที่ในการสร้างกระแสชดเชยตามกระแสคำสั่งที่คำนวณมาได้เพื่อจ่ายเข้าไปหักล้างกับกระแสฮาร์มอนิกในระบบ ในวิทยานิพนธ์นี้เราจะใช้อินเวอร์เตอร์แบบควบคุมกระแส 3 เฟสที่มีสวิตช์ 6 ตัวและมีคาปาซิเตอร์เป็นตัวสร้างบัสไฟตรง อินเวอร์เตอร์จะต่อกับระบบไฟฟ้าผ่านตัวเหนี่ยวนำซึ่งใช้ในการสร้างกระแส ดังแสดงในรูปที่ 2.12 อินเวอร์เตอร์จะสร้างแรงดันออก v เพื่อเอาชนะแรงดันของแหล่งจ่าย 3 เฟส e เพื่อให้แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำเชื่อมโยงระบบมีค่าเพียงพอที่จะทำให้กระแสไหลเข้าสู่ระบบ 3 เฟสได้ตามต้องการตามสมการที่ (2.15) - (2.17) จากคำอธิบายข้างต้นสามารถแสดงเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 2.11

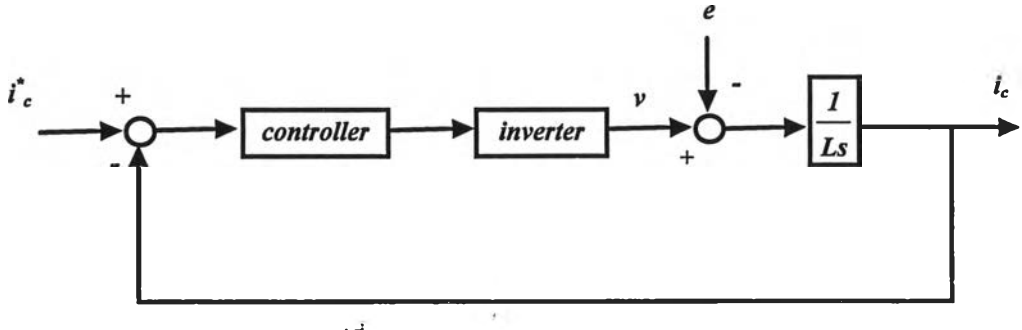
$$L\frac{di_{cu}}{dt} = v_u - e_u \tag{2.15}$$

$$L\frac{di_{cv}}{dt} = v_v - e_v \tag{2.16}$$

$$L\frac{di_{cw}}{dt} = v_w - e_w \tag{2.17}$$

โดยที่ L คือตัวเหนี่ยวนำที่เชื่อมต่ออินเวอร์เตอร์เข้ากับระบบไฟฟ้า

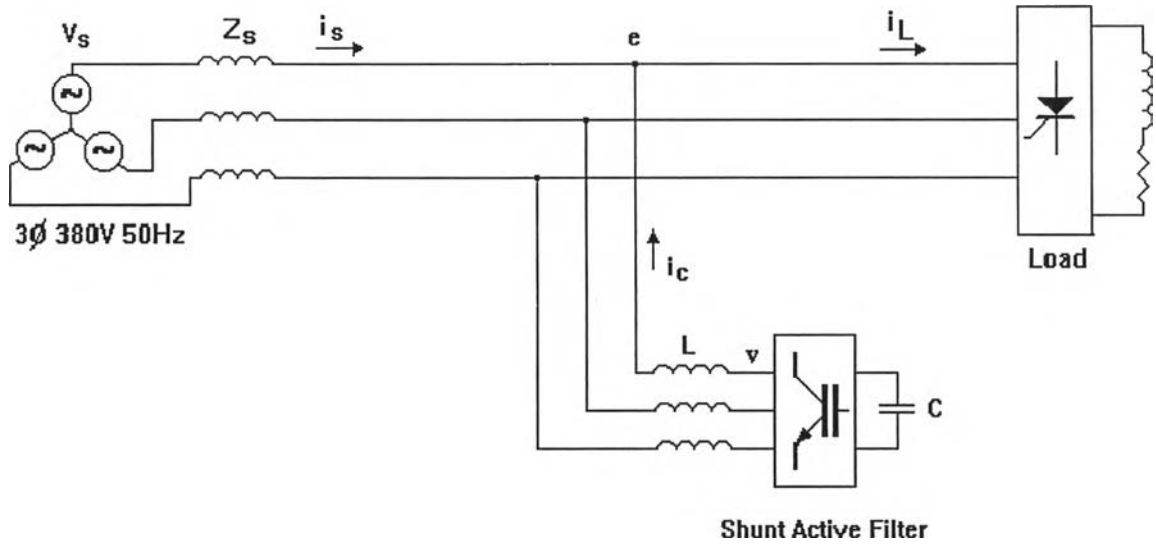
$(\bullet)_u$ $(\bullet)_v$ และ $(\bullet)_w$ คือปริมาณในเฟส u v และ w ตามลำดับ



รูปที่ 2.11 แผนภาพแสดงวงรอบการควบคุมกระแส

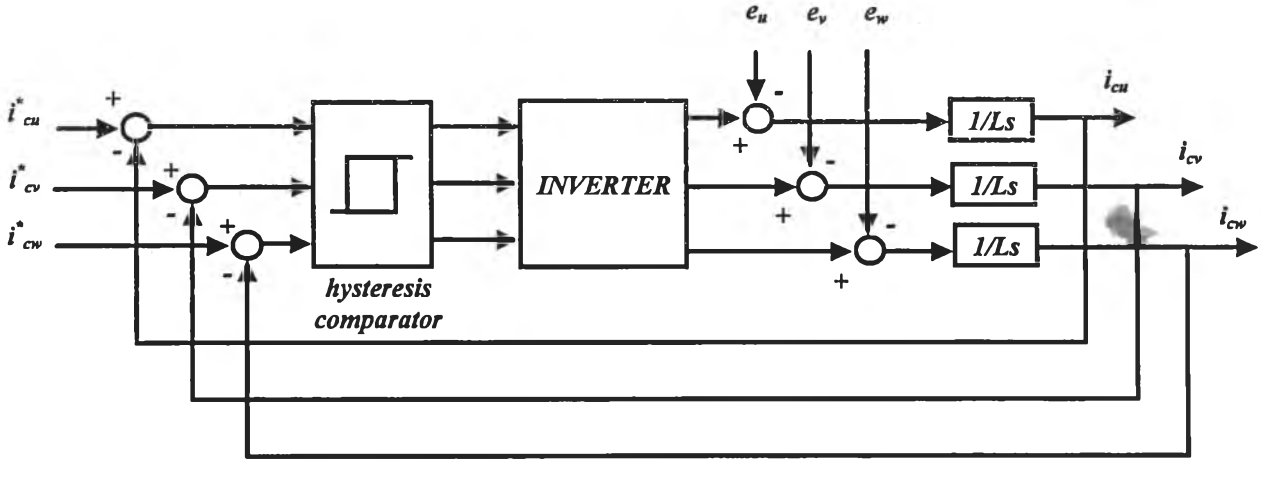
โดยที่ i_c^* คือ กระแสคำสั่ง

i_c คือ กระแสชดเชย



รูปที่ 2.12 การเชื่อมต่อวงจรกรองกำลังแอกทีฟเข้ากับระบบไฟฟ้า 3 เฟส

การสร้างกระแสชดเชยให้ได้ตามกระแสคำสั่งสามารถทำได้หลายแบบ เพื่อให้การควบคุมกระแสเป็นไปอย่างรวดเร็วในวิทยานิพนธ์นี้เราจะเลือกใช้การควบคุมกระแสวิธีฮีสเตอริซีส 3 เฟสอิสระแบบแอนะลอกซึ่งมีหลักการทำงานแสดงเป็นแผนภาพดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 บล็อกไดอะแกรมแสดงการควบคุมกระแสวิธีฮีสเตอริซีส 3 เฟสอิสระแบบแอนะลอก

การควบคุมกระแสวิธีนี้แต่ละเฟสจะทำงานแยกอิสระกัน โดยสวิตช์ 2 ตัวของแต่ละเฟสจะถูกควบคุมเพื่อให้สามารถสร้างกระแสเฟสของตนให้ได้ตามคำสั่ง คำสั่งกระแสในแต่ละเฟสจะถูกนำมาลบออกจากกระแสจริงซึ่งได้มาจากการวัด ผลลัพธ์ที่ได้จะได้เป็นค่าความคลาดเคลื่อนซึ่งจะถูกนำไปพิจารณาว่ามีค่ามากเกินแถบฮีสเตอริซิสหรือไม่ เพื่อนำไปกำหนดการเปิดปิดสวิตช์ ถ้า

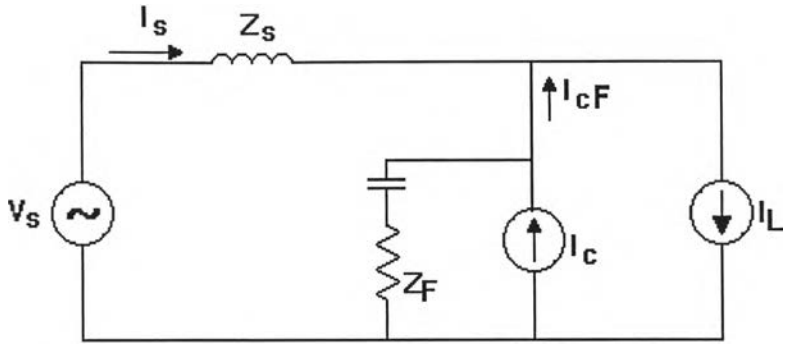
หอสมุดกลาง สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ความคลาดเคลื่อนยังอยู่ภายในแถบฮีสเตอริซีสจะไม่เกิดการเปลี่ยนลักษณะการสวิตช์ แต่ถ้าความคลาดเคลื่อนมากกว่าแถบฮีสเตอริซีส เช่นในกรณีที่ความคลาดเคลื่อนมีค่าบวก(กระแสจริง < กระแสคำสั่ง)ก็จะมีการสั่งให้ต่อสวิตช์ตัวบนและตัดสวิตช์ตัวล่าง เพื่อจ่ายแรงดันออกเป็นค่าบวกซึ่งจะทำให้ได้กระแสในเฟสนั้นมีค่าเพิ่มมากขึ้น และถ้าความคลาดเคลื่อนเป็นลบก็จะตัดสวิตช์ตัวบนและต่อสวิตช์ตัวล่างเพื่อจ่ายแรงดันออกเป็นค่าลบทำให้กระแสลดลง

การสร้างกระแสโดยวิธีนี้จะได้กระแสจริงที่จ่ายออกไปมีค่าใกล้เคียงกับกระแสคำสั่ง โดยมีระลอกที่ความถี่ความถี่การสวิตช์มีขนาดประมาณเท่ากับแถบฮีสเตอริซีส เนื่องจากควบคุมแบบ 3 เฟสอิสระอาจเกิดสภาวะที่สวิตช์ตัวบนหรือตัวล่างของทุกเฟสนำกระแสพร้อมๆกัน ทำให้อินเวอร์เตอร์ไม่สามารถควบคุมกระแสในช่วงนั้นได้ ค่าความคลาดเคลื่อนของกระแสอาจหลุดออกจากแถบฮีสเตอริซีสได้แต่จะมีค่าไม่เกิน 2 เท่าของแถบ

<u>วงจรกรองความถี่การสวิตช์ด้านออก</u>

เนื่องจากกระแสที่ได้จากการสร้างโดยอินเวอร์เตอร์จะมีระลอกคลื่นที่ความถี่การสวิตช์ปะปนอยู่มากดังนั้นทางด้านออกของอินเวอร์เตอร์จำเป็นต้องมีวงจรกรอง R-C เล็กๆเพื่อใช้กรองกระแสความถี่การสวิตช์ที่เกิดขึ้นนี้ ความถี่การสวิตช์ของอินเวอร์เตอร์มีค่าแปรผกผันกับขนาดของฮิสเตอริซีสแบนด์(ขนาดของระลอกกระแสที่ความถี่การสวิตช์) ถ้าขนาดแบนด์ยิ่งเล็กระลอกกระแสจะมีค่าต่ำแต่ความถี่การสวิตช์ก็จะยิ่งมาก เนื่องจากความถี่การสวิตช์มีค่าได้ไม่สูงนัก($\approx$ 10 kHz) ดังนั้นฮิสเตอริซีสแบนด์จึงยังคงต้องมีขนาดใหญ่อยู่พอสมควรซึ่งขนาดแบนด์ที่ใช้ในวิทยานิพนธ์เพื่อให้ความถี่การสวิตช์ประมาณ 10 kHz จึงเลือกใช้ฮีสเตอริซีสแบนด์มีค่าประมาณ 0.5 A ซึ่งทำให้ระลอกกระแสที่ความถี่การสวิตช์ยังคงมีค่าสูง ดังนั้นเราจึงจำเป็นต้องกรองค่าระลอกนี้ทิ้งก่อนจ่ายกระแสเข้าสู่ระบบไฟฟ้า โดยใช้วงจรกรอง R ต่ออนุกรมกับ C ต่อขนานเข้ามาในระบบ วงจรสมมูลของระบบเมื่อมีการต่อวงจรกรองความถี่การสวิตช์เพิ่มเข้ามาแสดงได้ดังรูปที่ 2.14 วงจรกรอง R - C สามารถทำงานได้ดีเนื่องจากแหล่งจ่ายมีอิมพีแดนซ์เป็นตัวเหนี่ยวนำซึ่งทำให้มีค่าอิมพีแดนซ์สูงที่ความถี่การสวิตช์



รูปที่ 2.14 วงจรสมมูล 1 เฟสของระบบเมื่อต่อวงจรกรองกระแสความถี่การสวิตช์

ระบบมีฟังก์ชั่นโอนย้ายจากกระแสชดเชยที่ออกจากอินเวอร์เตอร์ (i_c) ไปยังกระแสชดเชยที่ถูกกรองแล้ว (i_{cF}) ดังสมการที่ (2.18)

$$A(s) = \frac{i_{cF}(s)}{i_c(s)} = \frac{sRC + 1}{s^2 L_s C + sRC + 1} \tag{2.18}$$

เมื่อ $Z_s = sL_s$ โดยที่ L_s คือ ค่าความเหนี่ยวนำสมมูลของแหล่งจ่าย

R คือ ค่าความต้านทานของวงจรกรอง R - C

C คือ ค่าความจุของตัวเก็บประจุของวงจรกรอง R - C

ฟังก์ชันโอนย้าย A(s) จะเป็นวงจรกรองอันดับ 2 ซึ่งมีพารามิเตอร์ที่สำคัญคือ

- ขั้วของฟังก์ชันโอนย้าย
- ความถี่ $\frac{1}{\sqrt{L_s C}}$
- ความถี่ $\frac{1}{RC}$

เราจะมีหลักการออกแบบค่า R และ C ดังต่อไปนี้

1. เพื่อให้คุณสมบัติการกรองที่ความถี่สูงดี เราจะเลือกให้การกรองมีคุณสมบัติหลักเป็น L - C โดย R ที่ต่ออนุกรมกับ C จะช่วยลดการเรโซแนนซ์ ซึ่งจะได้เงื่อนไขคือ

$$\frac{1}{\sqrt{L_s C}} < \frac{1}{RC}$$

ซึ่งจะทำให้ได้ความถี่หักมุมของวงจรกรองโดยประมาณเป็น $\frac{1}{\sqrt{L_s C}}$ และมีศูนย์ที่ความถี่สูงที่ความถี่ $\frac{1}{RC}$

2. เนื่องจากเราไม่ต้องการให้วงจรกรองพาสซีฟรับภาระการกรองฮาร์มอนิกอันดับสูงของโหลดดังนั้นต้องเลือกค่า C เพื่อให้ความถี่หักมุมสูงพอ คือมากกว่าฮาร์มอนิกอันดับ19 จะได้เงื่อนไข

$$\frac{1}{\sqrt{L_s C}} > 2\pi \times 1kHz$$

3. ระบบจะเกิดเรโซแนนซ์ที่ความถี่ประมาณ $\frac{1}{\sqrt{L_s C}}$ ซึ่งทำให้เกิดการขยายฮาร์มอนิกในย่านนี้ โดยมีค่าอัตราขยายสูงสุดโดยประมาณตามสมการที่ (2.19)

$$\left\| A(j\omega) \right\|_{\omega=\frac{1}{\sqrt{L_s C}}} = \sqrt{1 + \frac{L_s}{R^2 C}} \qquad 2.19$$

เนื่องจากเราควบคุมกระแสแบบฮิสเตอริซีสซึ่งมีความถี่การสวิตช์ไม่ค่อยคงที่ จึงอาจมีกระแสฮาร์มอนิกในย่านนี้ถูกสร้างออกมาจากอินเวอร์เตอร์ได้เล็กน้อย ดังนั้นเราจึงต้องทำให้การเรโซแนนซ์มีค่าไม่สูงเพื่อป้องกันการขยายฮาร์มอนิกในย่านนี้ ค่าความต้องทานที่เลือกออกแบบจำเป็นต้องมีค่าสูงพอ

4. ระบบซึ่งประกอบไปด้วย R C L_s เป็นระบบอันดับ 2 มีช่วงเวลาสภาวะชั่วครู่ขึ้นอยู่กับค่าส่วนจริงของขั้วของฟังก์ชันโอนย้าย ฟังก์ชันโอนย้าย A(s) มีขั้วอยู่ที่

$$-\frac{R}{2L_s} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4L_s^2} - \frac{1}{L_s C}}$$

เวลาเข้าสู่สภาวะอยู่ตัว (Settling Time) มีค่าประมาณ $\frac{4}{R/(2L_s)}$ ซึ่งจะต้องมีค่าสั้นพอที่จะตอบสนองกับตัวตรวจจับที่รวดเร็วได้ เราออกแบบให้การตอบสนองน้อยกว่า 3 ms ($\approx$ 1/6 ของคาบสัญญาณ 50 Hz) จะได้เงื่อนไข

$$R > \frac{8}{3} \times 10^3 L_s$$

5. ในย่านความถี่ตั้งแต่ความถี่การสวิตช์ขึ้นไป ลักษณะการกรองจะกลายเป็นวงจร R-L โดยประมาณ เราเลือกให้การกรองกระแสฮาร์มอนิกที่ความถี่การสวิตช์มีค่าลดทอนไม่เกิน 0.3 (30%) ดังนั้นค่า R ต้องเป็นไปตามเงื่อนไข

$$\left\| \frac{R}{R + j\omega L_s} \right\|_{\omega=2\pi\times 10kHz} < 0.3$$

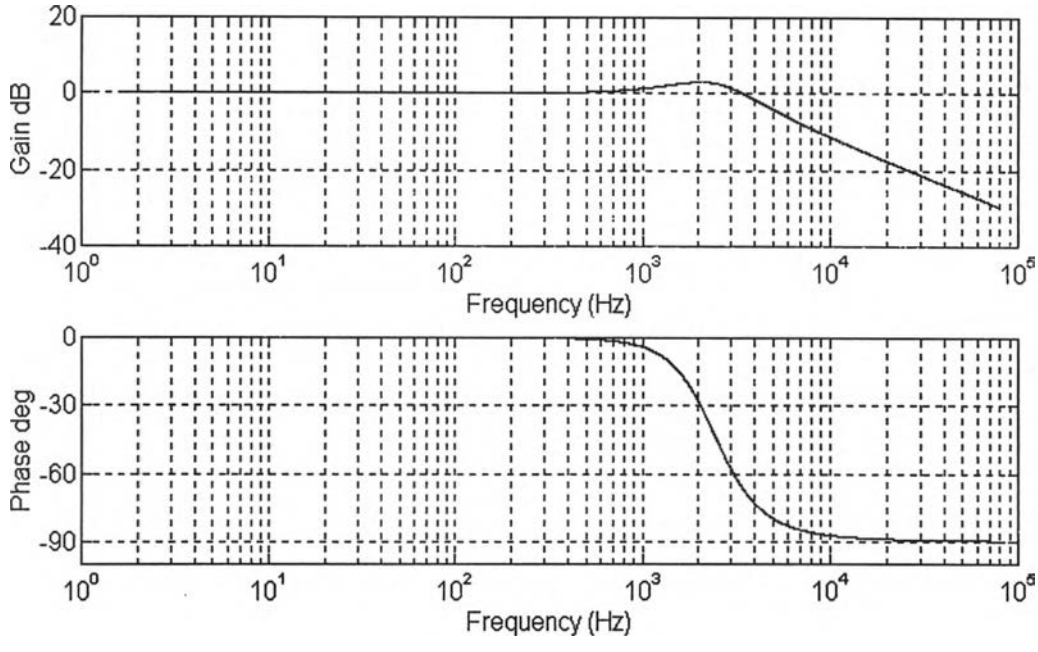
ซึ่งจะทำให้ค่า R ที่ใช้ควรมีค่าน้อยกว่า 170 โอห์ม

สังเกตุว่าถึงแม้เราจะเลือกให้การลดทอนที่ 10 kHz เหลือ 30% แต่กระแสที่เกิดจากอินเวอร์เตอร์ในความเป็นจริงจะมีค่าระลอกที่ความถี่โดยเฉลี่ยสูงกว่านี้ประมาณ 3 เท่าเนื่องจากเราใช้อินเวอร์เตอร์ 3 เฟส

จากหลักการออกแบบข้างต้นเราจะออกแบบโดยกำหนดให้ $L_s = 8.5$ mH ได้ดังนี้

1. เลือกค่า $C = 0.5\ \mu F$ ซึ่งจะให้ความถี่หักมุม $\frac{1}{\sqrt{LC}} = 2.44$ kHz
2. เลือกค่า R = 140 โอห์ม ซึ่งจะให้ค่าอัตราขยายที่ตำแหน่งเรโซแนนซ์ประมาณ 3 dB และให้ค่าเวลาเข้าสู่สภาวะอยู่ตัวของระบบน้อยกว่า 1 ms ซึ่งได้ตามเงื่อนไขและให้คุณสมบัติการกรองที่ความถี่การสวิตช์ตามต้องการ

จากค่าที่ออกแบบข้างต้นวงจรกรองกระแสความถี่การสวิตช์ที่ได้จะมีลักษณะสมบัติของฟังก์ชันโอนย้าย A(s) ดังรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 ลักษณะสมบัติของวงจรกรองกระแสความถี่การสวิตช์