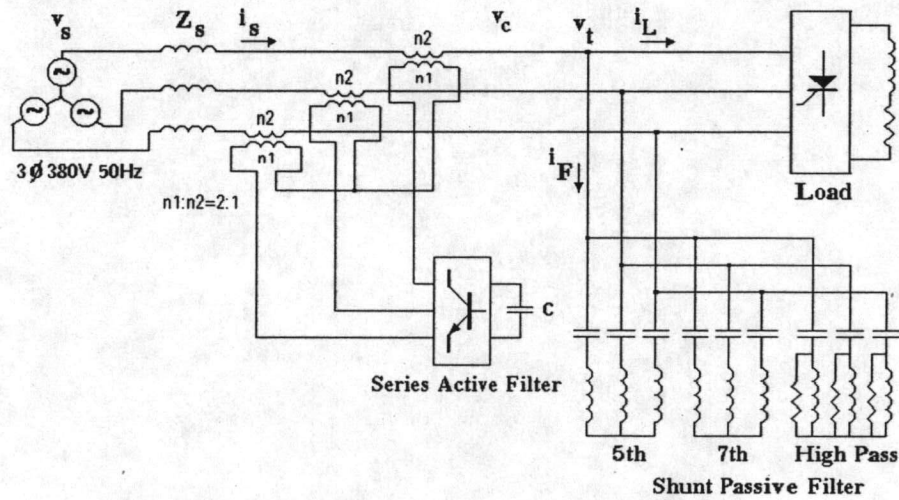


บทที่ 2

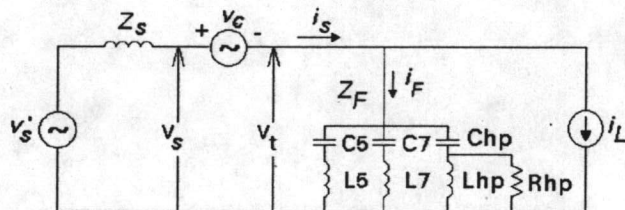
ทฤษฎีการลดกระแสฮาร์มอนิก

การลดกระแสฮาร์มอนิก

ในบทนี้จะกล่าวถึงรายละเอียดของหลักการในการลดกระแสฮาร์มอนิก สำหรับหลักการในการลดกระแสฮาร์มอนิกนั้น ค่าของแรงดันของวงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม (V_c) จะถูกควบคุมให้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมประพฤติตัวเสมือนเป็นค่าความต้านทานค่าสูง (K) สำหรับความถี่ฮาร์มอนิก จากระบบตามรูปที่ 2.1 เราสามารถเขียนเป็นวงจรสมมูลหนึ่งเฟสได้ตามรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 ระบบที่ใช้วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรม



โดยที่ Z_s = Source Impedance v_s = Source Voltage
 Z_F = Passive Filter Impedance v_s = Supply Voltage
 v_c = Active Filter Voltage v_t = Terminal Voltage
 i_s = Source Current i_L = Load Current

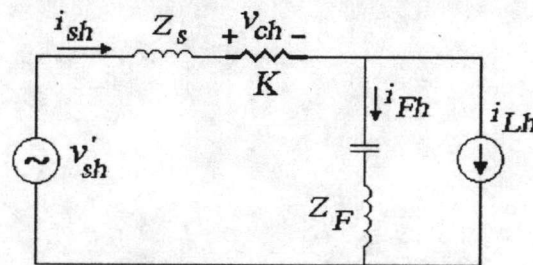
รูปที่ 2.2 วงจรสมมูลหนึ่งเฟสของวงจรกรองแอกทีฟแบบอนุกรม

จากวงจรสมมูลหนึ่งเฟสเมื่อให้วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมประพุดิตัวเสมือนเป็นค่าความต้านทาน K ดังนั้นเราจะได้วงจรสมมูลหนึ่งเฟสสำหรับความถี่ฮาร์มอนิกตามรูปที่ 2.3 และเมื่อพิจารณาฟังก์ชันโอนย้ายของกระแสจากแหล่งจ่าย จะสามารถแสดงได้เป็น

$$i_{sh}(s) = \frac{Z_F}{Z_s + Z_F + K} \cdot i_{Lh} + \frac{1}{Z_s + Z_F + K} \cdot v'_{sh} \quad (2.1)$$

โดยที่รชรชนี้ล่างตัวห้อย h หมายถึง องค์ประกอบที่ความถี่ฮาร์มอนิก

จากสมการที่ (2.1) ถ้าค่าความต้านทาน K มีค่าสูงกว่าค่าอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายมาก ๆ คุณสมบัติการกรอกของวงจรรอกพาสซีฟแบบขนาน ก็จะไม่ขึ้นอยู่กับอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่าย โดยที่กระแสฮาร์มอนิกจะถูกบังคับให้ไหลผ่านวงจรรอกกำลังพาสซีฟแบบขนาน แทนที่จะไหลผ่านไปยังแหล่งจ่ายกำลัง และในขณะเดียวกันกระแสฮาร์มอนิกที่เกิดขึ้นจากแหล่งจ่ายกำลังก็จะไหลไปทางด้านโหลดได้น้อยลง จะเห็นได้ว่าวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมสามารถที่จะแยกกระแสฮาร์มอนิกจากโหลดไม่ให้ไหลเข้าไปสู่แหล่งจ่ายกำลัง และในขณะเดียวกันก็ยังสามารถที่จะกันไม่ให้กระแสฮาร์มอนิกจากด้านแหล่งจ่ายกำลังไหลไปยังโหลดได้ด้วย หรืออาจกล่าวได้ว่าวงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมนี้ จะประพุดิตัวเสมือนเป็นตัวแบ่งกันฮาร์มอนิก (harmonic isolator)



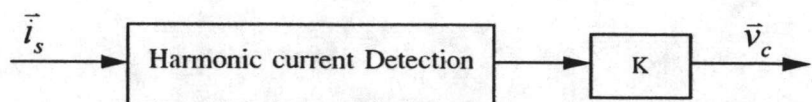
รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลหนึ่งเฟสของวงจรรอกแอกทีฟแบบอนุกรมสำหรับความถี่ฮาร์มอนิก

การคำนวณหาค่าแรงดันสำหรับลดกระแสฮาร์มอนิก

จากหลักการในการที่จะทำให้วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมประพุดิตัวเสมือนกับค่าความต้านทาน K นั้น วงจรรอกกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมจะต้องสร้างเวกเตอร์แรงดัน (voltage space vector) \vec{v}_c ซึ่งมีขนาดเป็น K เท่าของค่าเวกเตอร์กระแสฮาร์มอนิก (harmonic current space vector) ซึ่งสามารถแสดงเป็นบล็อกโคอะแกรมได้ดังรูปที่ 2.4 โดยที่นิยามของสเปซเวกเตอร์ของกระแสและแรงดันคือ

$$\vec{i}_s = \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{su} \\ i_{sv} \\ i_{sw} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$\vec{v}_c = \begin{bmatrix} v_{c\alpha} \\ v_{c\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{cu} \\ v_{cv} \\ v_{cw} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

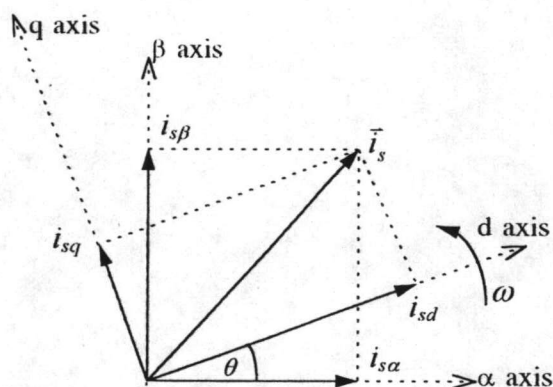


รูปที่ 2.4 บล็อกไดอะแกรมการคำนวณหาค่าแรงดันสำหรับลดกระแสฮาร์มอนิก

สำหรับการหาค่ากระแสในส่วนฮาร์มอนิกนี้ เราจะทำการวัดค่ากระแสจากแหล่งจ่าย \vec{i}_s เข้ามาแล้วทำการย้ายแกนในการพิจารณาไปอยู่บนแกน d-q ซึ่งหมุนไปด้วยความถี่ 50 Hz โดยที่เรานิยามสมการในการย้ายแกนเป็น

$$\begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

โดยที่ $\theta = \omega t = 2\pi \times 50 \times t$



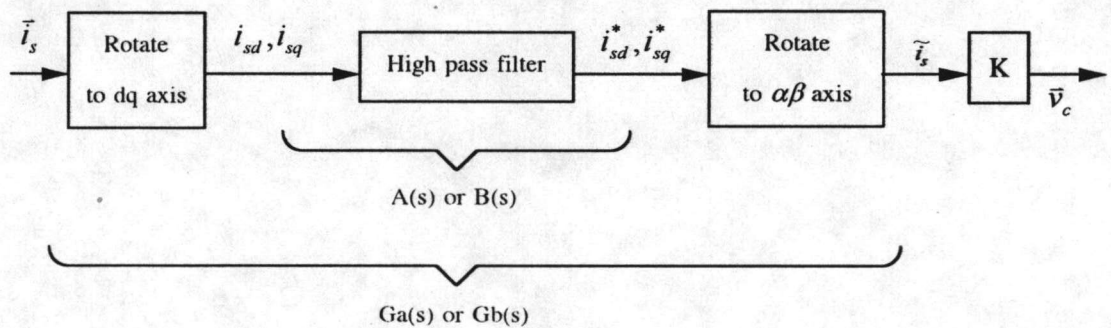
รูปที่ 2.5 เวกเตอร์กระแส และ แกนอ้างอิง d-q ซึ่งหมุนไปด้วยความถี่ 50 Hz

เมื่อเราพิจารณาค่ากระแส \vec{i}_s บนแกนหมุน d-q จะพบว่าค่าของกระแสที่ความถี่หลักมูล (50 Hz) จะเปลี่ยนไปเป็นสัญญาณกระแสตรง และค่ากระแสในส่วนฮาร์มอนิกจะยังคงเป็นสัญญาณกระแสสลับ ดังนั้นเราจะสามารถที่จะหากระแสในส่วนฮาร์มอนิกได้โดยการกรองสัญญาณของกระแสที่ความถี่หลักมูลทิ้งไปให้เหลือแต่ค่ากระแสในส่วนฮาร์มอนิก โดยการใช่วงจรกรองผ่านความถี่สูงกรองสัญญาณกระแสตรงออกไป เมื่อเราทราบค่ากระแสส่วนฮาร์มอนิกแล้ว เราสามารถที่จะคำนวณหาค่าแรงดัน \vec{v}_c สำหรับลดกระแสฮาร์มอนิกได้ โดยการนำเอาค่า

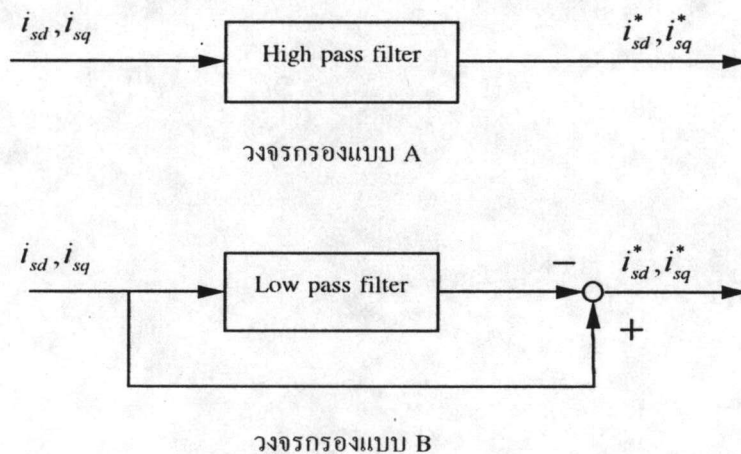
กระแสส่วนฮาร์มอนิกมาคูณด้วยอัตราขยาย K จากนั้นก็จะทำการแปลงสัญญาณแรงดันบนแกนหมุน d-q กลับไปยังแกนนิ่ง ก็จะได้ค่าแรงดันบนแกนนิ่งที่จะใช้สำหรับลดกระแสฮาร์มอนิก ซึ่ง จะทำการสร้างด้วยอินเวอร์เตอร์ต่อไป

การวิเคราะห์เสถียรภาพของการลดกระแสฮาร์มอนิก

จากที่กล่าวมาแล้วในข้างต้น ในส่วนการคำนวณหาค่าแรงดันชดเชยเพื่อที่จะไปลดกระแสฮาร์มอนิกนั้น เราจะต้องทำการวัดค่ากระแส \tilde{i}_s จากแหล่งจ่ายเข้ามาแล้วทำการย้ายแกนในการพิจารณาอยู่บนแกนหมุน d-q ซึ่งมีองค์ประกอบเป็น i_{sd}, i_{sq} จากนั้นจึงกรองผ่านด้วยวงจรกรองผ่านความถี่สูงได้เป็น i_{sd}^*, i_{sq}^* แล้วจึงแปลงค่ากลับไปยังแกนนิ่งเป็น \tilde{i}_s จากนั้นจึงนำมาคูณ ด้วยค่าคงที่ K ซึ่งค่าผลลัพธ์ที่ได้ก็จะเป็นค่าของแรงดันชดเชย ดังที่ได้แสดงเป็นบล็อกไดอะแกรม ในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 บล็อกไดอะแกรมการคำนวณค่าแรงดันชดเชยสำหรับลดกระแสฮาร์มอนิก



รูปที่ 2.7 บล็อกไดอะแกรม วงจรกรองผ่านความถี่สูงแบบ A และ B

ในวิทยานิพนธ์นี้ได้พิจารณาวงจรกรองผ่านความถี่สูง ที่ใช้ในส่วนการคำนวณหาค่าของแรงดันขดเคเบิลเพื่อที่จะไปลดกระแสฮาร์มอนิกนี้ในลักษณะต่างๆ 2 รูปแบบด้วยกันตามที่แสดงในรูปที่ 2.7 คือ

(1) แบบ A โดยการใช้วงจรกรองผ่านความถี่สูงโดยตรง

(2) แบบ B โดยการใช้วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำมาเป็นวงจรถูกกรองผ่านความถี่สูง ในเบื้องต้นเราจะพิจารณาลักษณะฟังก์ชัน โอนย้ายของวงจรทั้งสองแบบ

1.แบบ A โดยการใช้วงจรกรองผ่านความถี่สูงโดยตรง

โดยที่วงจรกรองผ่านความถี่สูงมีฟังก์ชัน โอนย้ายเป็น

$$A(s) = \frac{s^2}{(s + \omega_c)(s + \omega_c)} \quad (2.5)$$

เราสามารถคำนวณหาฟังก์ชัน โอนย้ายจาก \tilde{i}_s ไปยัง \tilde{i}_r ที่รวมผลของการย้ายแกนเข้าไปด้วยแล้วได้เป็น $Ga(s)$ ซึ่งหาได้โดยการแทนค่า s ในสมการ(2.5) ด้วย $s - j\omega$ (ภาคผนวก ก) และเราจะได้ฟังก์ชัน โอนย้ายรวมของการใช้วงจรกรองผ่านความถี่สูงโดยตรง (แบบ A) เป็นสมการ(2.6)

$$Ga(s) = \frac{(s - j\omega)^2}{(s + \omega_c - j\omega)(s + \omega_c - j\omega)} \quad (2.6)$$

2.แบบ B โดยการใช้วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ

ในที่นี้เราจะใช้วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำที่มีฟังก์ชัน โอนย้ายเป็น $B'(s)$ มาทำเป็นวงจรถูกกรองผ่านความถี่สูง ซึ่งจะได้อัตราการกรองผ่านความถี่สูงที่มีฟังก์ชันเป็น

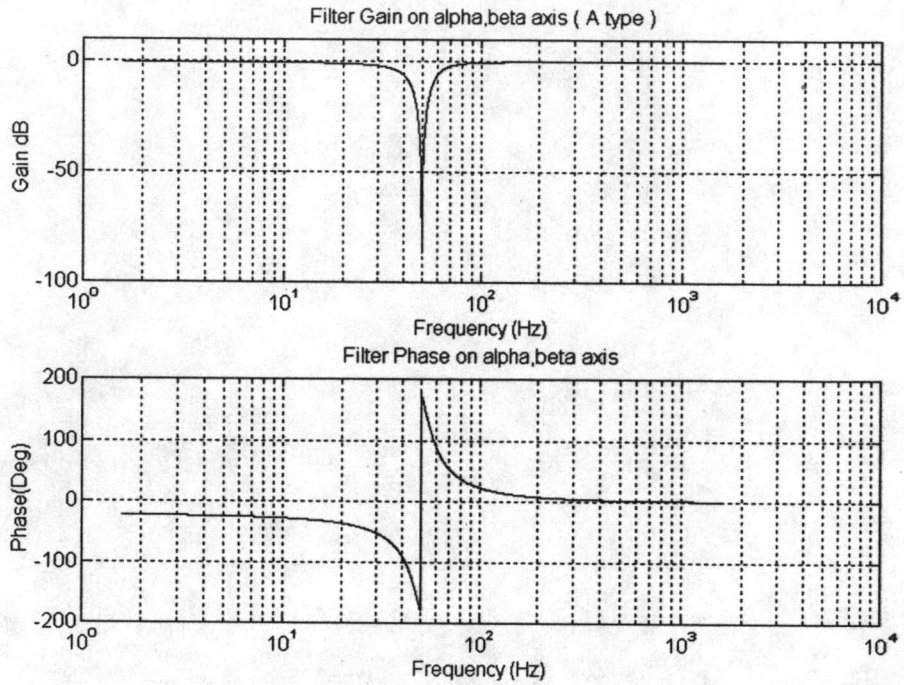
$$B(s) = 1 - B'(s) \quad (2.7)$$

$$\text{โดยที่ } B'(s) = \frac{\omega_c^2}{(s + \omega_c)(s + \omega_c)}$$

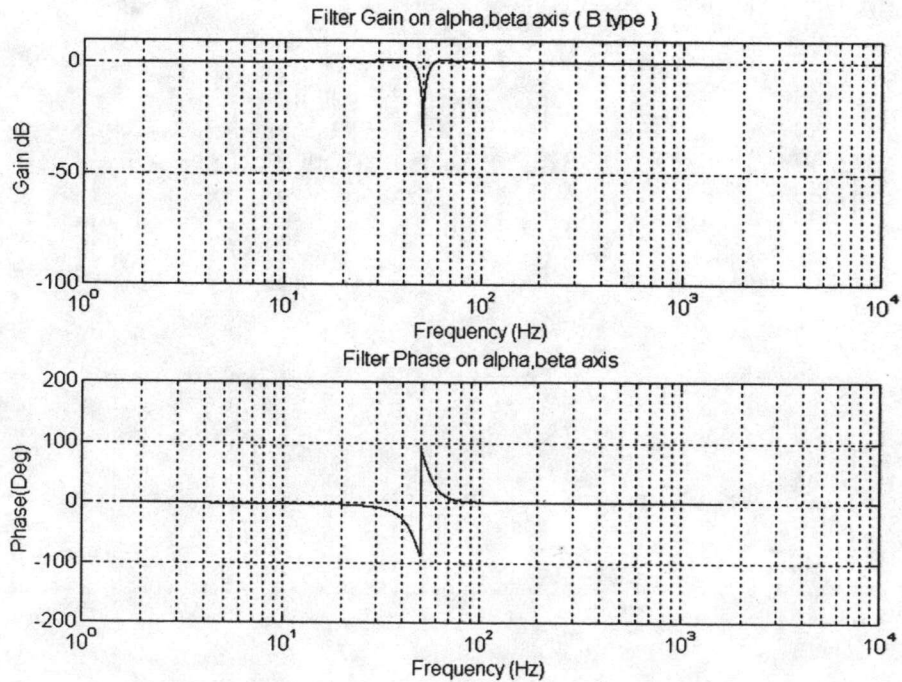
$$\text{ดังนั้น } B(s) = \frac{s^2 + 2\omega_c s}{(s + \omega_c)(s + \omega_c)} = \frac{s(s + 2\omega_c)}{(s + \omega_c)(s + \omega_c)} \quad (2.8)$$

ซึ่งเมื่อพิจารณาหาฟังก์ชัน โอนย้าย $Gb(s)$ ที่รวมผลของการย้ายแกนเข้าไปด้วยแล้วโดยการแทนค่า s ด้วย $s - j\omega$ จะได้ฟังก์ชัน โอนย้ายรวมของการใช้วงจรกรองแบบ B เป็นดังสมการ (2.9)

$$Gb(s) = \frac{(s - j\omega)(s + 2\omega_c - j\omega)}{(s + \omega_c - j\omega)(s + \omega_c + j\omega)} \quad (2.9)$$



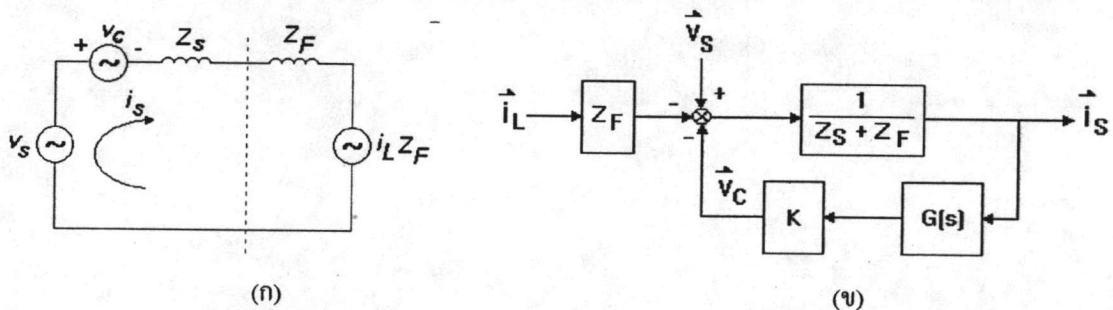
รูปที่ 2.8 กราฟอัตราขยายและมุมเฟสของระบบที่ใช้วงจรกรองแบบ A



รูปที่ 2.9 กราฟอัตราขยายและมุมเฟสของระบบที่ใช้วงจรกรองแบบ B

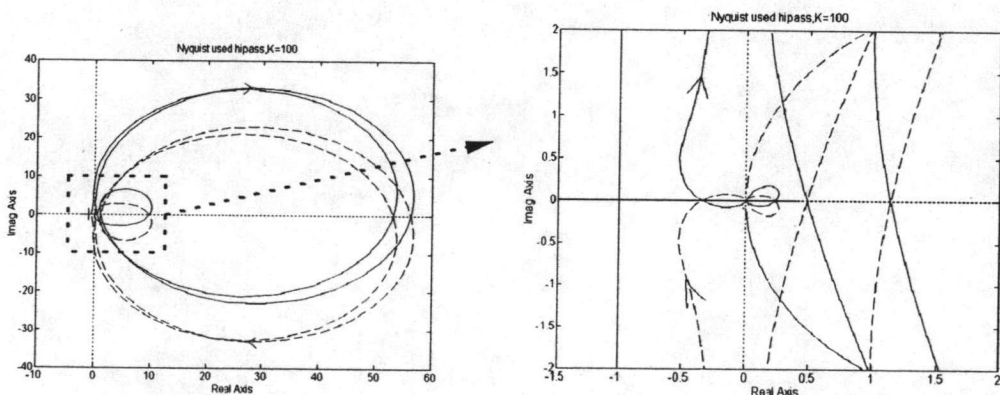
เมื่อนำ $G_a(s)$, $G_b(s)$ มาเขียนกราฟอัตราขยายและมุมเฟสจะสามารถแสดงได้ตามรูปที่ 2.8 และรูปที่ 2.9 ตามลำดับ จากรูปที่ 2.8 และ 2.9 จะเห็นได้ว่าฟังก์ชันโอนย้าย $G_a(s)$ และ $G_b(s)$ จะมีลักษณะเป็นวงจรรองผ่านแบบช่องบาก (notch filter) ทั้งคู่ โดยจะเห็นว่าวงจรรองแบบ A สามารถที่จะกรองความถี่หลักมูล (50 Hz) ออกได้ดีกว่าวงจรรองแบบ B แต่วงจรรองแบบ A จะให้ค่ามุมเฟสที่มากกว่าวงจรรองแบบ B ในย่านความถี่หลักมูลและในช่วงที่ความถี่ต่ำกว่าความถี่หลักมูลลงมา

ในการสร้างแรงดันสำหรับลดกระแสฮาร์มอนิก v_c นั้น จะทำให้เกิดการป้อนกลับแบบวงปิด เนื่องจากแรงดัน v_c จะมีผลทำให้กระแส i_s เปลี่ยนแปลง ซึ่งก็จะมีผลต่อเนื่องทำให้ v_c เปลี่ยนแปลงเช่นเดียวกัน ดังนั้นเมื่อเรานำระบบมาใช้งานจะต้องทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบเสียก่อนว่ามีเสถียรภาพจริง เนื่องจากในข้างต้นเราได้ศึกษาหาลักษณะฟังก์ชันโอนย้ายของวงจรรองเป็นที่เรียบร้อยแล้ว เราจึงสามารถที่จะวิเคราะห์เสถียรภาพของระบบในภาพรวมได้ โดยเมื่อพิจารณาจากวงจรมุมหนึ่งเฟสโดยแปลงแหล่งจ่ายกระแสไปอยู่ในรูปแหล่งจ่ายแรงดันจะได้วงจรมุมหนึ่งเฟสตามรูปที่ 2.10(ก) และสามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ตามรูปที่ 2.10(ข) โดย $G(s)$ เป็นฟังก์ชันโอนย้ายของวงจรรองที่รวมผลของการย้ายแกนเข้าไปแล้ว

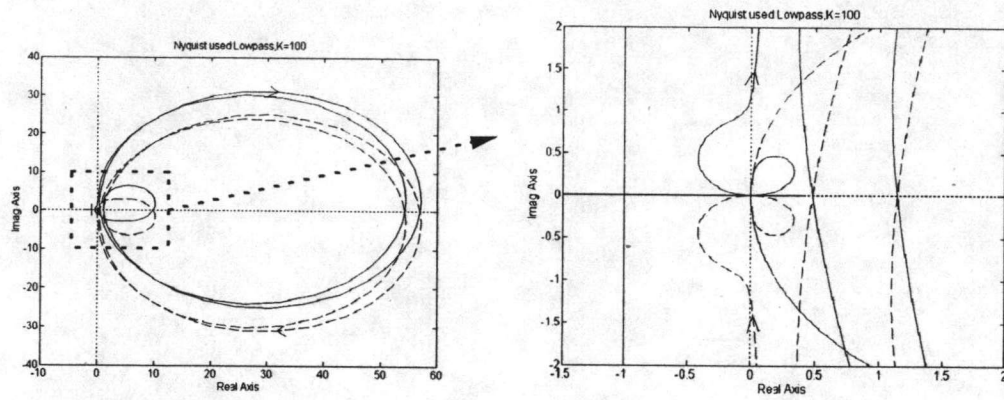


รูปที่ 2.10 วงจรมุมหนึ่งเฟส และ บล็อกไดอะแกรมของการลดกระแสฮาร์มอนิก

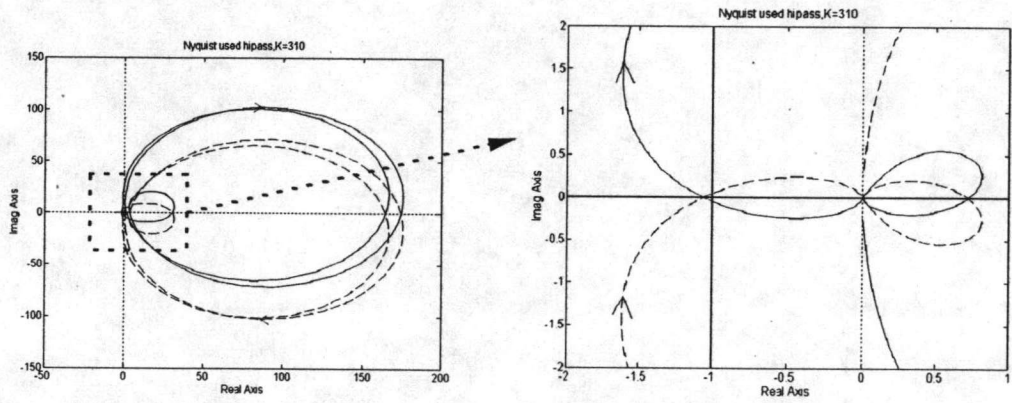
เมื่อแทน $G(s)$ ด้วย $G_a(s)$ หรือ $G_b(s)$ แล้วนำไปวิเคราะห์ด้วยแผนภูมิไนควิสต์ (Nyquist plot) โดยใช้ค่าอัตราขยาย $K=100$, 310 และ 400 จะได้ผลตามในรูปที่ 2.11 - รูปที่ 2.16 ตามลำดับ



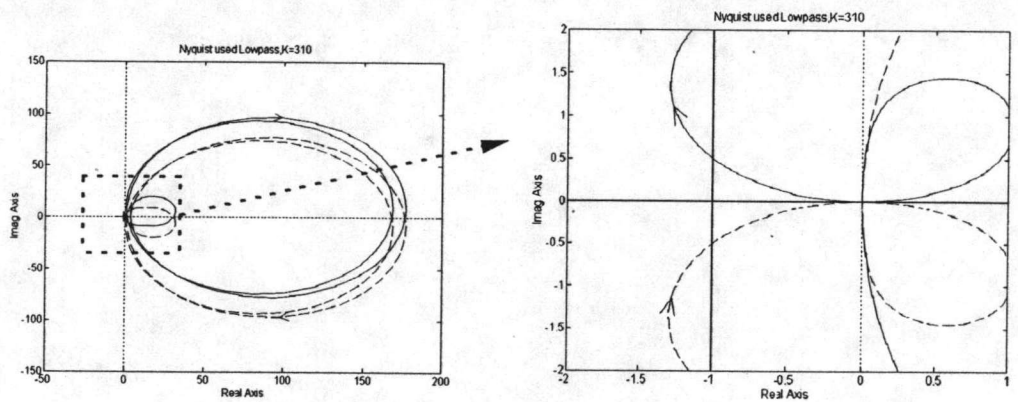
รูปที่ 2.11 แผนภูมิไนควิสต์ของระบบที่ใช้วงจรรองแบบ A ($K=100$)



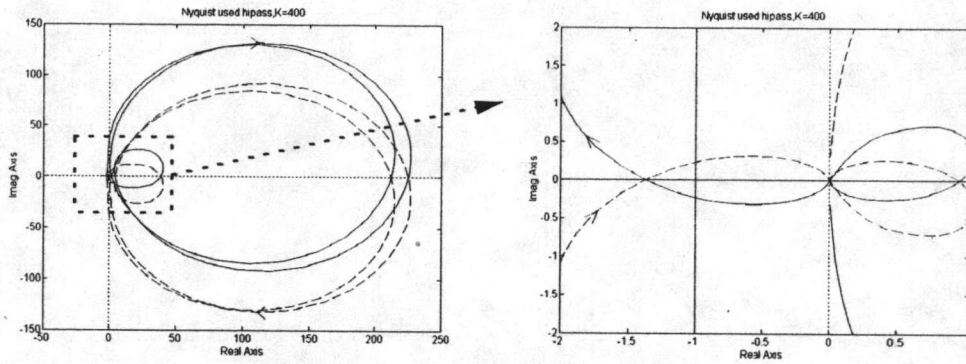
รูปที่ 2.12 แผนภูมิในควิสด์ของระบบที่ใช้วงจรกรองแบบ B (K=100)



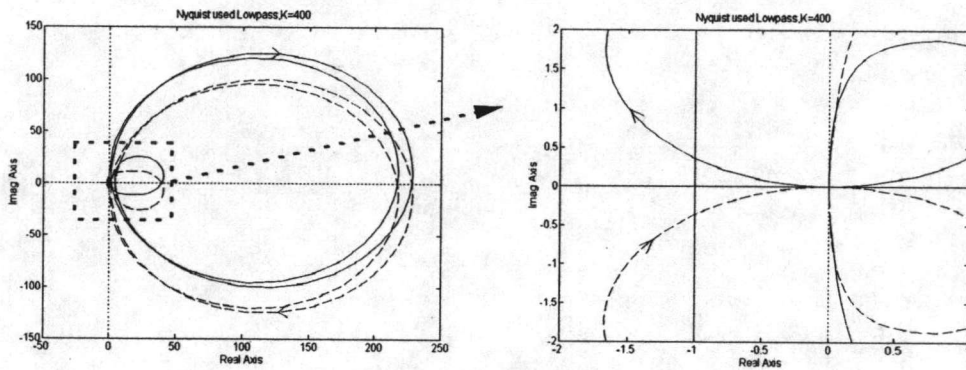
รูปที่ 2.13 แผนภูมิในควิสด์ของระบบที่ใช้วงจรกรองแบบ A (K=310)



รูปที่ 2.14 แผนภูมิในควิสด์ของระบบที่ใช้วงจรกรองแบบ B (K=310)



รูปที่ 2.15 แผนภูมิไนควิสต์ของระบบที่ใช้วงจรรองแบบ A (K=400)



รูปที่ 2.16 แผนภูมิไนควิสต์ของระบบที่ใช้วงจรรองแบบ B (K=400)

ตารางที่ 2.1 เสถียรภาพในการควบคุมของระบบที่ใช้วงจรรองแบบ A และ B ที่ค่าอัตราขยาย K ต่างๆ

ระบบที่ใช้ วงจรรองแบบ	ค่าอัตราขยาย		
	K = 100	K = 310	K = 400
A	Stable	Unstable	Unstable
B	Stable	Stable	Stable

จากรูปที่ 2.11 และ รูปที่ 2.12 แผนภูมิไนควิสต์แสดงให้เห็นว่าที่ค่าอัตราขยาย $K = 100$ ระบบที่ใช้วงจรรองแบบ A และ B เป็นระบบที่มีเสถียรภาพในการควบคุมทั้งคู่ แต่เมื่อเพิ่มค่าอัตราขยายมากขึ้นเป็น $K = 310$ เราจะได้แผนภูมิไนควิสต์แสดงดังรูปที่ 2.13 และ รูปที่ 2.14 ซึ่งจากรูปทั้งสองจะเห็นได้ว่าทางเดินของแผนภูมิไนควิสต์ของระบบที่ใช้วงจรรองแบบ A จะมีการวนรอบจุด $(-1,0)$ ตามเข็มนาฬิกาจำนวน 2 รอบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้วงจรรองในแบบ A ไม่มีเสถียรภาพที่ค่า $K = 310$ ในขณะที่ทางเดินของแผนภูมิไนควิสต์ของระบบที่ใช้วงจรรองแบบ B จะไม่มีการวนรอบจุด $(-1,0)$ แสดงว่าระบบที่ใช้วงจรรองแบบ B จะมีเสถียรภาพในการควบคุม และเมื่อเพิ่มค่าอัตราขยายมากขึ้นไปอีกเป็น $K = 400$ เราจะได้แผนภูมิไนควิสต์แสดงดังรูปที่ 2.15 และ รูปที่ 2.16 ซึ่งจะเห็นได้ว่าระบบที่ใช้วงจรรองแบบ A ไม่มีเสถียรภาพในการควบคุม ใน

ขณะที่ระบบที่ใช้วงจรกรองแบบ B ยังคงมีเสถียรภาพในการควบคุม ซึ่งสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 2.1 จากตารางที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าระบบที่ใช้วงจรกรองแบบ B จะเป็นระบบที่มีเสถียรภาพในการควบคุมมากกว่าระบบที่ใช้วงจรกรองในแบบ A ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วงจรกรองแบบ B ซึ่งจะให้เสถียรภาพในการควบคุมที่ดีกว่า