

## บทที่ 2

### ทฤษฎีการกำจัดกระแสฮาร์มอนิก

ในบทนี้จะกล่าวถึง รายละเอียดของหลักการและทฤษฎีที่ใช้ในการกำจัดฮาร์มอนิก ดังที่ได้กล่าวแล้วในบทที่ 1 ว่าในงานวิจัยนี้เราจะใช้วงจรกรองแอกทีฟแบบขนานที่ต่อร่วมกับวงจรกรองแบบพาสซีฟในการกำจัดฮาร์มอนิก ดังนั้นหลักการในการกำจัดฮาร์มอนิกที่จะกล่าวถึงในบทนี้จึงสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ส่วนหลักได้แก่ ส่วนของวงจรกรองพาสซีฟ และส่วนของวงจรกรองแอกทีฟ

#### 2.1 วงจรกรองพาสซีฟ

ในส่วนของวงจรกรองพาสซีฟจะประกอบไปด้วยองค์ประกอบที่เป็นพาสซีฟได้แก่ ตัวต้านทาน ตัวเหนี่ยวนำ และตัวเก็บประจุ ประกอบกันเป็นวงจรและต่อขนานเข้ากับโหลดที่ต้องการกำจัดฮาร์มอนิก ซึ่งหลักการสำคัญที่ใช้ในการกำจัดกระแสฮาร์มอนิกของวงจรก็คือ ตัววงจรจะพยายามทำตัวให้มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำ ๆ ที่ความถี่ของฮาร์มอนิกที่ต้องการกำจัด และมีค่าอิมพีแดนซ์สูง ๆ ที่ความถี่มูลฐาน(50 Hz) เพื่อที่กระแสฮาร์มอนิกจากโหลดที่ต้องการกำจัดสามารถไหลผ่านวงจรกรองได้อย่างสะดวก กระแสส่วนที่เหลือจากการกรองจึงมีฮาร์มอนิกลดลง และมีลักษณะใกล้เคียงไซน์มากขึ้น วงจรกรองพาสซีฟที่นิยมใช้มีอยู่สองลักษณะได้แก่ วงจรกรองแบบจูน (tuned filter) และวงจรกรองผ่านความถี่สูง (high-pass filter)

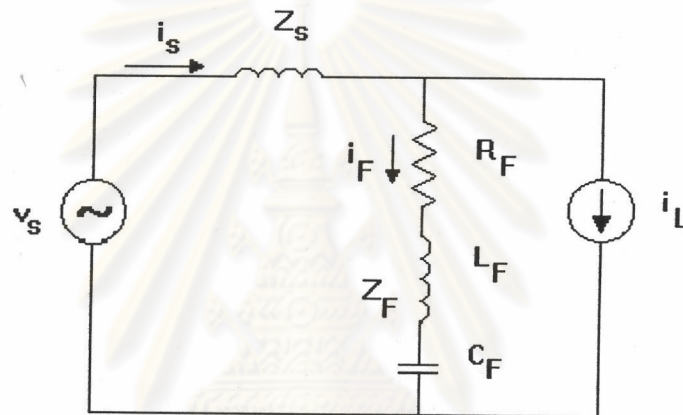
##### 2.1.1 วงจรกรองแบบจูน (tuned filter)

รูปที่ 2.1 แสดงวงจรสมมูลหนึ่งเฟสของวงจรกรองพาสซีฟแบบจูน สำหรับหลักการที่วงจรกรองสามารถทำตัวเองให้มีค่าอิมพีแดนซ์ต่ำ ๆ ที่ความถี่ของฮาร์มอนิกที่ต้องการกำจัดก็คือ การทำให้เกิดเรโซแนนซ์ระหว่างตัวเหนี่ยวนำและตัวเก็บประจุในวงจรที่ความถี่ฮาร์มอนิกนั่นเอง ซึ่งสามารถเขียนแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่ที่เกิดเรโซแนนซ์กับค่าองค์ประกอบในวงจรได้ดังนี้

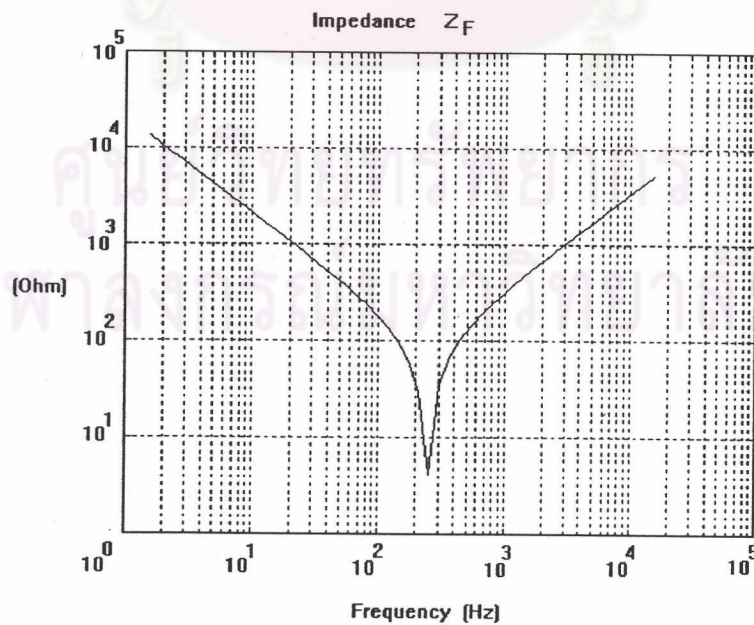
$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_F C_F}} \quad (2.1)$$

$$Q = \frac{2\pi f_o L_F}{R_F} \quad (2.2)$$

เมื่อ  $f_o$  คือความถี่ที่เกิดเรโซแนนซ์หรือความถี่ฮาร์มอนิกที่ต้องการกำจัด  
 $Q$  คือค่าตัวประกอบคุณภาพ



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลหนึ่งเฟสของวงจรกรองพาสซีฟแบบจูน



รูปที่ 2.2 แสดงค่า  $Z_F$  ที่ความถี่ต่าง ๆ

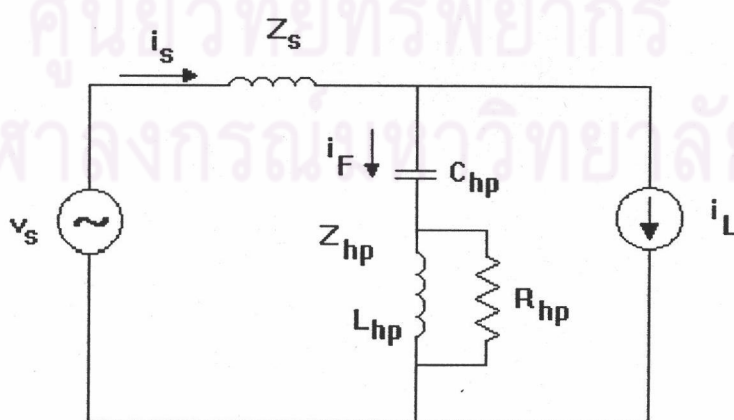
ตัวอย่างค่า  $Z_F$  ที่ความถี่ต่าง ๆ แสดงในรูปที่ 2.2 จากรูปเราจะเห็นว่าค่าอิมพีแดนซ์ของวงจรกรองพาสซีฟ ( $Z_F$ ) จะมีค่าต่ำเพื่อที่จะให้กระแสไหลผ่านได้ดีที่ความถี่เรโซแนนซ์ของตัวเก็บประจุ ( $C_F$ ) กับตัวเหนี่ยวนำ ( $L_F$ ) ซึ่งได้ออกแบบไว้ให้ตรงกับความถี่เรโซแนนซ์ที่ต้องการกำจัดการนั่นเอง ผลที่ตามมาก็คือ กระแสของแหล่งจ่ายที่เหลือจะมีเรโซแนนซ์ลดลงหรือมีรูปคลื่นใกล้เคียงไซน์มากขึ้น

### 2.1.2 วงจรกรองผ่านความถี่สูง (high-pass filter)

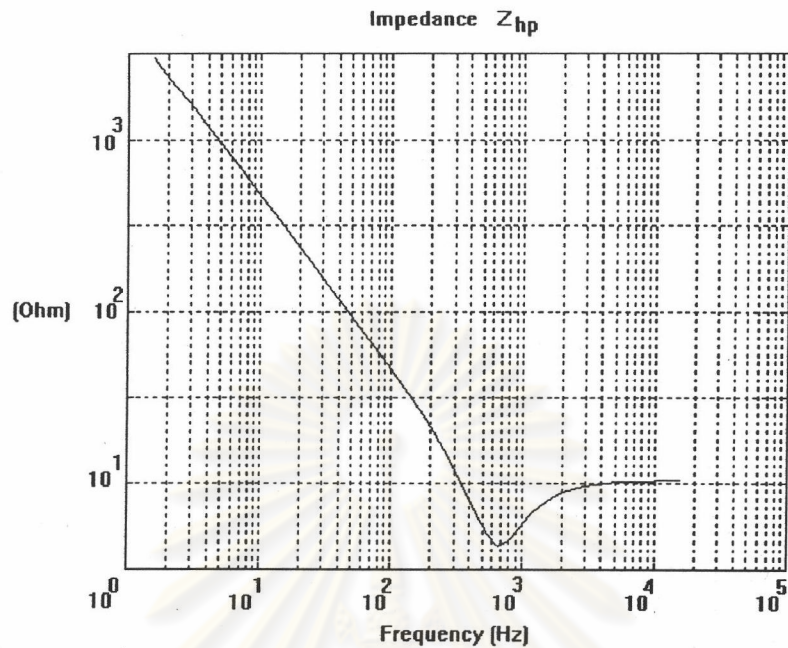
รูปที่ 2.3 แสดงวงจรสมมูลหนึ่งเฟสของวงจรกรองพาสซีฟแบบผ่านความถี่สูง วงจรแบบนี้อาศัยหลักการของเรโซแนนซ์เช่นเดียวกับวงจรกรองแบบจูน แต่จะมีตัวต้านทานต่อขนานกับตัวเหนี่ยวนำเพิ่มเข้ามาเพื่อทำให้มีลักษณะเป็นวงจรผ่านความถี่สูง กล่าวคืออิมพีแดนซ์ของวงจร ( $Z_{hp}$ ) จะมีค่าต่ำที่ความถี่สูง ดังแสดงในรูปที่ 2.4 สำหรับพารามิเตอร์สำคัญที่จะเป็นตัวกำหนดลักษณะสมบัติของวงจรกรองได้แก่ ค่าความถี่ที่กมม ( $f_c$ ) และ ค่าตัวประกอบคุณภาพซึ่งสามารถคำนวณได้ตามสมการที่ (2.3) และ (2.4) ตามลำดับ

$$f_c = \frac{1}{2\pi R_{hp} C_{hp}} \quad (2.3)$$

$$Q = \frac{R_{hp}^2 C_{hp}}{L_{hp}} \quad (2.4)$$

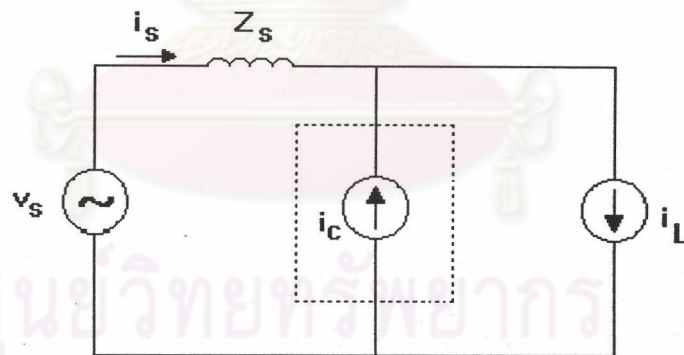


รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลหนึ่งเฟสของวงจรกรองพาสซีฟแบบผ่านความถี่สูง



รูปที่ 2.4 แสดงค่า  $Z_{hp}$  ที่ความถี่ต่าง ๆ

## 2.2 วงจรกรองแอกทีฟ



รูปที่ 2.5 วงจรสมมูลหนึ่งเฟสของวงจรกรองแอกทีฟ

ในส่วนของวงจรกรองแอกทีฟจะมีลักษณะการทำงานที่แตกต่างไปจากวงจรกรองพาสซีฟ กล่าวคือวงจรกรองแอกทีฟจะทำตัวเป็นแหล่งจ่ายกระแสซึ่งสามารถแสดงได้ดังวงจรสมมูลหนึ่งเฟสในรูปที่ 2.5 วงจรกรองแอกทีฟจะทำการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกจากระบบเข้ามาเพื่อคำนวณหาค่ากระแสที่จะต้องชดเชย จากนั้นจะสร้างกระแสชดเชยตามค่าที่คำนวณได้จ่ายกลับเข้าไปในระบบเพื่อหักล้างกับกระแสฮาร์มอนิก ทำให้รูปคลื่นกระแสทางด้านแหล่งจ่ายมีลักษณะใกล้เคียง

ไชน์มากขึ้น จากหลักการดังกล่าวจะพบว่าวงจรกรองแอกทีฟจะประกอบไปด้วยส่วนสำคัญ สาม ส่วนได้แก่

- ส่วนตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก
- ส่วนคำนวณหาค่ากระแสชดเชย
- ส่วนสร้างกระแสชดเชย

### 2.2.1 การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิก

วิธีการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปได้แก่ วิธีการซึ่งอาศัยทฤษฎีกำลังงานรีแอกทีฟขณะใด ๆ (Instantaneous Reactive Power) (H. Akagi, 1983) และ วิธีการหมุนแกนอ้างอิง

#### วิธีการซึ่งอาศัยทฤษฎีกำลังงานรีแอกทีฟขณะใด ๆ

วิธีการนี้จะเริ่มต้นจากการแปลงแรงดันและกระแสในระบบ 3 เฟส ไปสู่ระบบสเปซเวกเตอร์ ซึ่งสามารถเขียนเมตริกซ์การแปลงได้ดังสมการที่ (2.5) และ(2.6)

$$\vec{e} = \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_u \\ e_v \\ e_w \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

$$\vec{i} = \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_u \\ i_v \\ i_w \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

โดยที่ “÷” แสดงถึงปริมาณเวกเตอร์ พิจารณารูปที่ 2.6 ซึ่งแสดงสเปซเวกเตอร์  $e_\alpha$  ,  $e_\beta$  ,  $i_\alpha$  และ  $i_\beta$  บนแกน  $\alpha$ - $\beta$  เราสามารถแสดงค่ากำลังงานจริงขณะใด ๆ ( $p$ ; instantaneous real power) ของระบบ 3 เฟส ในเทอมของเวกเตอร์เหล่านี้ได้ดังสมการ (2.7)

$$p = \vec{e}_\alpha \cdot \vec{i}_\alpha + \vec{e}_\beta \cdot \vec{i}_\beta \quad (2.7)$$

เนื่องจากเวกเตอร์  $\vec{e}_\alpha$  มีทิศทางเดียวกับ  $\vec{i}_\alpha$  และ  $\vec{e}_\beta$  ก็มีทิศทางเดียวกับ  $\vec{i}_\beta$  ดังนั้นสมการ (2.7) จึงเขียนได้เป็น

$$p = e_\alpha i_\alpha + e_\beta i_\beta \quad (2.8)$$

ค่า  $p$  ที่ได้จากสมการ (2.8) จะเท่ากับค่า  $p$  ที่หาจากระบบ 3 เฟสตามสมการที่ (2.9)

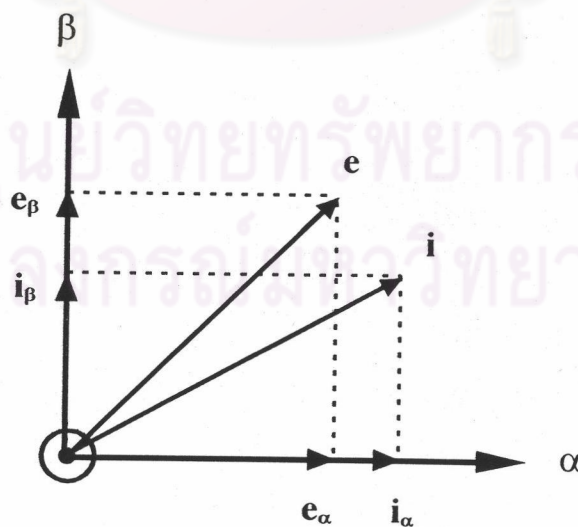
$$p = e_u i_u + e_v i_v + e_w i_w \quad (2.9)$$

สำหรับค่ากำลังงานรีแอกทีฟขณะใด ๆ (instantaneous reactive power) สามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2.10)

$$\vec{q} = \vec{e}_\alpha \times \vec{i}_\beta + \vec{e}_\beta \times \vec{i}_\alpha \quad (2.10)$$

เวกเตอร์  $\vec{q}$  จะตั้งฉากกับระนาบ  $\alpha$ - $\beta$  ตามกฎมือขวา เนื่องจาก  $\vec{e}_\alpha$  ตั้งฉากกับ  $\vec{i}_\beta$  และ  $\vec{e}_\beta$  ตั้งฉากกับ  $\vec{i}_\alpha$  ดังนั้นขนาดของ  $\vec{q}$  จึงแสดงได้ดังสมการ (2.11)

$$q = e_\alpha i_\beta - e_\beta i_\alpha \quad (2.11)$$



รูปที่ 2.6 สเปซเวกเตอร์ขณะใด ๆ ของแรงดัน  $\vec{e}$  และกระแส  $\vec{i}$

จากสมการ (2.8) และ (2.11) เราสามารถแสดงค่ากำลังงานจริงขณะใด ๆ ( $p$ ) และค่ากำลังงานรีแอกทีฟขณะใด ๆ ( $q$ ) ของระบบ 3 เฟสในรูปของเมตริกซ์ได้ดังสมการ (2.12) หรือ (2.13)

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_\alpha & e_\beta \\ -e_\beta & e_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_\alpha & i_\beta \\ i_\beta & -i_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

สมการ (2.12) เหมาะสำหรับใช้กับแหล่งจ่ายแรงดัน ส่วนสมการ (2.13) จะใช้กับแหล่งจ่ายกระแส จากสมการ (2.12) เมื่อดีเทอร์มิแนนต์ของเมตริกซ์ไม่เป็นศูนย์ จะสามารถเขียนได้เป็น

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} e_\alpha & e_\beta \\ -e_\beta & e_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \\ &= \frac{1}{e_\alpha^2 + e_\beta^2} \begin{bmatrix} e_\alpha & -e_\beta \\ e_\beta & e_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.14)$$

ค่ากำลังงานจริงขณะใด ๆ ( $p$ ) และกำลังงานรีแอกทีฟขณะใด ๆ ( $q$ ) สามารถแยกออกเป็นองค์ประกอบไฟตรงและไฟสลับคือ  $p = \bar{p} + \tilde{p}$ ,  $q = \bar{q} + \tilde{q}$  เมื่อแทนค่า  $p$  และ  $q$  ลงในสมการ (2.14) จะได้ค่ากระแสในเฟส  $\alpha$  ตามสมการ (2.15)

$$i_\alpha = \frac{e_\alpha}{e_\alpha^2 + e_\beta^2} \bar{p} + \frac{e_\alpha}{e_\alpha^2 + e_\beta^2} \tilde{p} + \frac{-e_\beta}{e_\alpha^2 + e_\beta^2} \bar{q} + \frac{-e_\beta}{e_\alpha^2 + e_\beta^2} \tilde{q} \quad (2.15)$$

จากสมการ (2.15) จะพบว่า เทอมที่ 1 เป็นค่าองค์ประกอบมูลฐานของกระแสที่ทำให้เกิดกำลังงานจริง(real power) และเทอมที่ 3 เป็นส่วนของกระแสที่ทำให้เกิดกำลังรีแอกทีฟ (reactive power) ส่วนเทอมที่ 2 และ 4 คือเทอมที่เป็นกระแสฮาร์มอนิก ซึ่งทำให้เกิด  $\tilde{p}$  และ  $\tilde{q}$  ตามลำดับ ค่ากระแสในเฟส  $\beta$  ก็มีลักษณะในทำนองเดียวกัน ดังนั้นการคำนวณหาค่ากระแสฮาร์มอนิกสามารถคำนวณได้ตามสมการ (2.16)

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha h} \\ i_{\beta h} \end{bmatrix} = \frac{1}{e_{\alpha}^2 + e_{\beta}^2} \begin{bmatrix} e_{\alpha} & -e_{\beta} \\ e_{\beta} & e_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

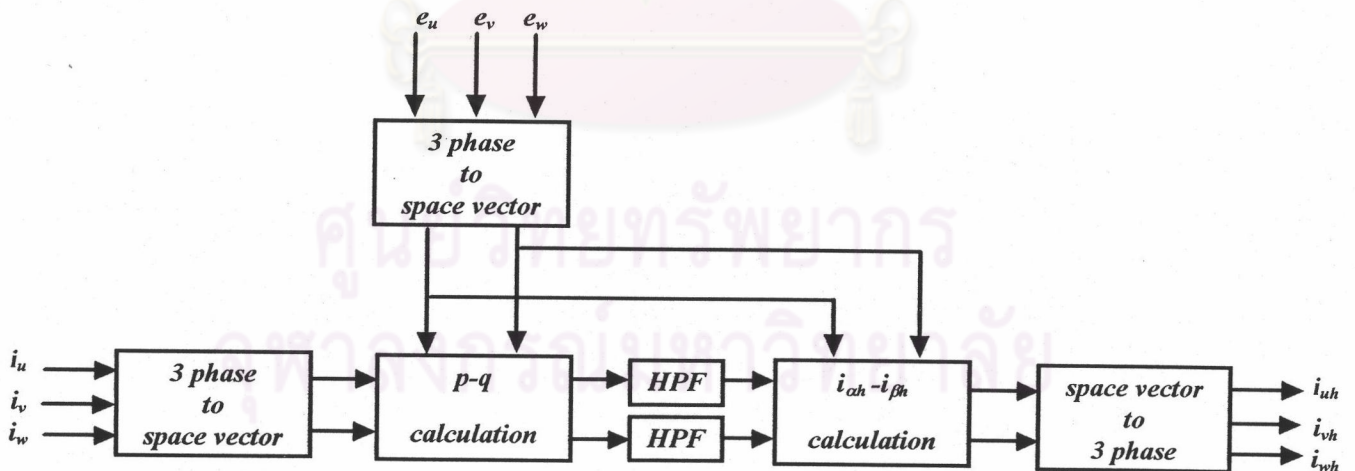
โดย  $i_{\alpha h}, i_{\beta h}$  คือกระแสฮาร์มอนิกในแกน  $\alpha$  และ  $\beta$  ตามลำดับ

สำหรับการกรองเอาองค์ประกอบไฟสลับ  $\tilde{p}$  และ  $\tilde{q}$  ออกจาก  $p$  และ  $q$  เพื่อใช้ในการคำนวณในสมการที่ (2.16) สามารถทำได้โดยใช้วงจรกรองผ่านความถี่สูง

ค่ากระแสฮาร์มอนิกที่คำนวณได้ตามสมการที่ (2.16) จะเป็นกระแสในระบบสเปซเวกเตอร์ซึ่งสามารถคำนวณกลับมาเป็นกระแสฮาร์มอนิกในระบบ 3 เฟสได้ตามสมการที่ (2.17)

$$\begin{bmatrix} i_{uh} \\ i_{vh} \\ i_{wh} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha h} \\ i_{\beta h} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

หลักการคำนวณหาค่ากระแสฮาร์มอนิกตามวิธีการที่กล่าวมาข้างต้นสามารถสรุปเป็นแผนภาพได้ดังรูปที่ 2.7



HPF = high-pass filter

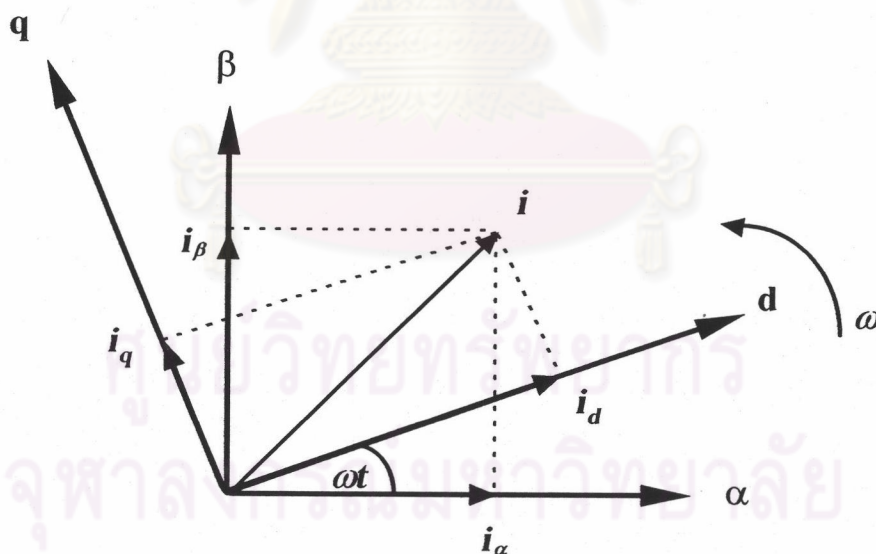
รูปที่ 2.7 แผนภาพแสดงการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกโดยอาศัยทฤษฎีกำลังงานรีแอกทีฟขณะใด ๆ

วิธีการหมุนแกนอ้างอิง



จากวิธีการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกโดยอาศัยทฤษฎีกำลังงานรีแอกทีฟขณะใด ๆ จะพบว่า การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธีการดังกล่าว จะต้องอาศัยการตรวจจับแรงดันจากภายนอกเข้ามา ดังนั้นหากแรงดันของระบบมีฮาร์มอนิกปะปนอยู่จะทำให้การตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกเกิดการผิดพลาดขึ้นได้ เพื่อเป็นการหลีกเลี่ยงความผิดพลาดดังกล่าวจึงได้มีการสร้างสัญญาณไซน์ขนาดหนึ่งหน่วยและมีความถี่เท่ากับความถี่มูลฐาน (50 Hz) ขึ้นมาแทนการใช้แรงดันจากภายนอกนำมาคูณกับค่ากระแสที่ตรวจจับมาได้ตามสมการที่ (2.18) จึงทำให้มีลักษณะเหมือนเป็นการหมุนแกนอ้างอิงด้วยความเร็วเท่ากับ ความถี่มูลฐาน ซึ่งจะทำให้เรามองเห็นกระแสความถี่มูลฐานหยุดนิ่งเป็นกระแสตรงและจะเห็นกระแสฮาร์มอนิกเป็นส่วนกระแสสลับที่ขึ้นอยู่กับกระแสตรง สำหรับขั้นตอนอื่น ๆ ก็ยังคงเหมือนกับวิธีการแรก กล่าวคือเริ่มตั้งแต่เมื่อตรวจจับกระแสจากระบบมาได้ก็จะทำการแปลงแกนจากระบบ 3 เฟสไปเป็น สเปซเวกเตอร์ ตามสมการ (2.6) จากนั้นก็จะทำการแปลงแกนอ้างอิงไปสู่แกนหมุน (d-q) ด้วยวิธีการที่กล่าวข้างต้นดังสมการ (2.18)

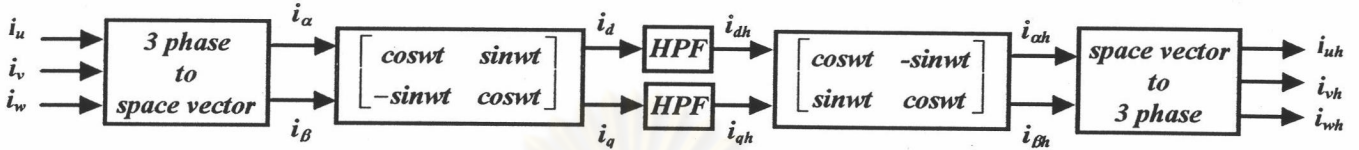
$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t \\ -\sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (2.18)$$



รูปที่ 2.8 เวกเตอร์กระแสและแกนอ้างอิง ซึ่งหมุนไปด้วยความถี่ 50 Hz

เมื่อได้ค่ากระแสซึ่งพิจารณาอยู่บนแกนหมุนแล้ว ก็จะนำค่ากระแสนี้ผ่านเข้าวงจรกรองผ่านสูง จากนั้นจึงทำการแปลงแกนอ้างอิงกลับมาพิจารณาบนแกนนิ่งโดยอาศัยสมการที่ (2.19) และใช้สมการที่ (2.17) คำนวณค่ากระแสสลับมาเป็นระบบ 3 เฟส ก็จะทำให้ได้ค่ากระแสฮาร์มอนิกตามต้องการ จากหลักการดังกล่าวข้างต้นสามารถแสดงได้ด้วยแผนภาพดังรูปที่ 2.9

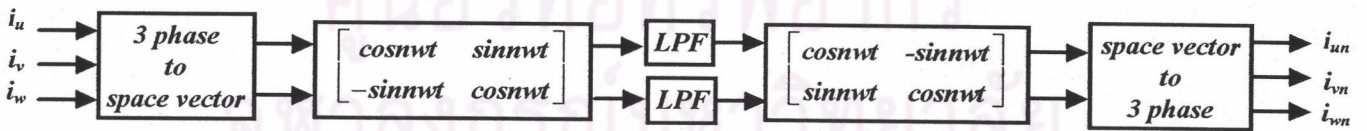
$$\begin{bmatrix} i_{ch} \\ i_{\beta h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \omega t & -\sin \omega t \\ \sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dh} \\ i_{qh} \end{bmatrix} \tag{2.19}$$



$\omega = 100\pi \text{ rad/s.}$   
 HPF = high-pass filter

รูปที่ 2.9 แผนภาพแสดงการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกด้วยวิธีการหมุนแกนอ้างอิง

วิธีการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกตามที่กล่าวมาทั้งหมดข้างต้นเป็นการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกทั้งหมดในระบบ หากต้องการออกแบบให้วงจรกรองแอกที่กำจัดฮาร์มอนิกเฉพาะบางความถี่ที่เป็นฮาร์มอนิกหลักของระบบเท่านั้นก็สามารถทำได้โดยใช้วิธีการที่คล้ายกับวิธีการข้างต้น แต่จะใช้การพิจารณาบนแกนอ้างอิงที่หมุนไปด้วยความถี่ฮาร์มอนิกที่ต้องการตรวจจับแทน ด้วยวิธีนี้จะทำให้มองเห็นกระแสฮาร์มอนิกความถี่ที่ต้องการตรวจจับเป็นไฟตรง ในขณะที่กระแสฮาร์มอนิกความถี่อื่น ๆ ตลอดจนกระแสความถี่มูลฐานจะถูกเห็นเป็นไฟสลับที่ขึ้นอยู่กับไฟตรง จากลักษณะดังกล่าวเมื่อใช้วงจรกรองผ่านความถี่ต่ำ (low pass filter) ก็จะทำให้สามารถกรองเอาเฉพาะความถี่ฮาร์มอนิกที่ต้องการได้ (N. Nanaumi, 1996) (A. Salem nia, 1996) รายละเอียดแสดงในแผนภาพรูปที่ 2.10



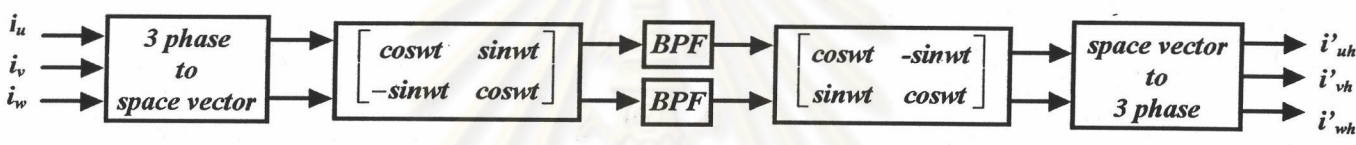
$\omega = 100\pi \text{ rad/s.}$   
 LPF = low-pass filter  
 n = harmonic order

รูปที่ 2.10 แผนภาพแสดงการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกที่ n

อย่างไรก็ตามการใช้วิธีการดังกล่าวในการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกเฉพาะบางความถี่ก็ยังมีข้อจำกัดอยู่กล่าวคือโดยทั่วไปแล้วกระแสฮาร์มอนิกที่ต้องการกำจัดมักจะเป็นฮาร์มอนิกอันดับต่ำ

ของระบบอันได้แก่ ฮาร์มอนิกที่ 5 และ 7 ซึ่งความถี่ฮาร์มอนิกทั้งสองนี้อยู่ก่อนข้างใกล้กับความถี่มูลฐานดังนั้นการออกแบบวงจรกรองผ่านความถี่ต่ำเพื่อให้สามารถกรองเอาเฉพาะฮาร์มอนิกที่ต้องการออกมาโดยไม่ให้มีองค์ประกอบหลักมูลปะปนมาด้วยจึงทำได้ยาก (องค์ประกอบหลักมูลที่ปะปนเข้ามาจะทำให้วงจรกรองแอกทีฟมีขนาด kVA ที่ใหญ่เกินความจำเป็น)

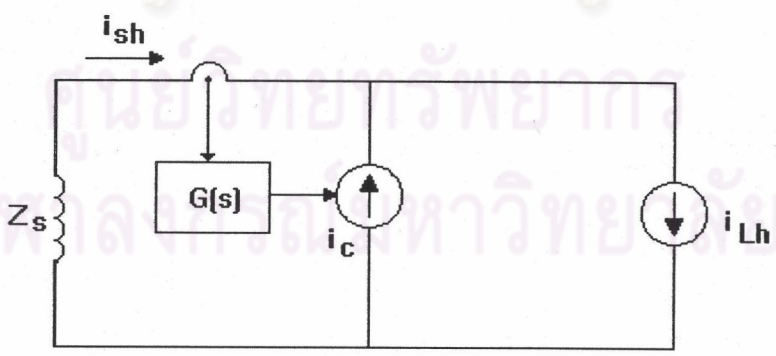
เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวในวิทยานิพนธ์นี้เราจึงได้เสนอวิธีการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกเฉพาะบางความถี่โดยอาศัยหลักการของการหมุนแกนอ้างอิงไปด้วยความเร็วเท่ากับความถี่มูลฐานเช่นเดิมเพียงแต่เปลี่ยนไปใช้วงจรกรองผ่านแถบ (band-pass filter) แทนการใช้วงจรกรองผ่านความถี่สูงแบบดั้งเดิมซึ่งจะเป็นการตรวจจับฮาร์มอนิกทุกความถี่ แผนภาพการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกโดยวิธีการที่ได้เสนอแสดงดังรูปที่ 2.11



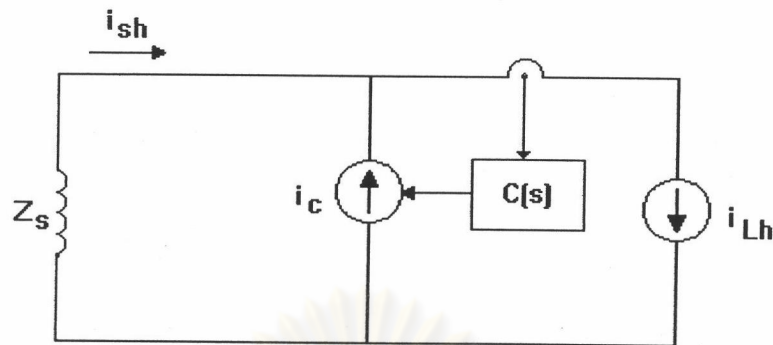
$\omega = 100\pi \text{ rad/s.}$   
 $BPF = \text{band-pass filter}$

รูปที่ 2.11 แผนภาพแสดงการตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกเฉพาะบางความถี่โดยการใช้วงจรกรองผ่านแถบ

### 2.2.2 การคำนวณหาค่ากระแสชดเชย



(ก)



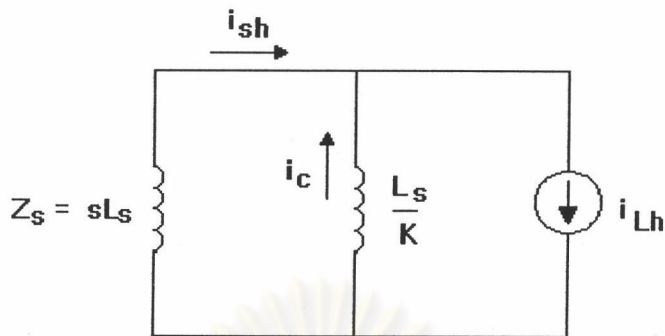
(ข)

รูปที่ 2.12 วงจรสมมูลหนึ่งเฟสที่ความถี่ฮาร์มอนิกแสดงการคำนวณหาค่ากระแสชดเชยของวงจรกรองแอกทีฟ  
(ก) เมื่อใช้การตรวจจับกระแสทางด้านแหล่งจ่าย (ข) เมื่อใช้การตรวจจับกระแสทางด้านโหลด

ในการคำนวณหาค่ากระแสชดเชยนั้นสามารถทำได้โดยการนำค่ากระแสฮาร์มอนิกที่ตรวจจับมาได้คูณกับฟังก์ชันควบคุมมีค่าเท่ากับ  $G(s)$  ในกรณีที่ใช้การตรวจจับกระแสจากทางด้านแหล่งจ่าย หรือมีค่าเป็น  $C(s)$  ในกรณีที่ใช้การตรวจจับกระแสจากทางด้านโหลด ดังแสดงในรูปที่ 2.12 สำหรับในการกำหนดฟังก์ชันควบคุมนั้น เราจะออกแบบฟังก์ชันควบคุมเพื่อให้วงจรกรองแอกทีฟทำตัวเป็นเสมือนอิมพีแดนซ์ค่าต่ำเฉพาะที่ความถี่ฮาร์มอนิกเพื่อเป็นทางให้กระแสฮาร์มอนิกสามารถแบ่งไหลได้โดยสะดวก ทำให้ทางด้านแหล่งจ่ายมีกระแสฮาร์มอนิกลดลง ซึ่งอิมพีแดนซ์ที่จะพิจารณามีลักษณะต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

#### วงจรกรองเป็นเสมือนตัวเหนี่ยวนำ

ในกรณีที่เรควบคุมให้วงจรกรองแอกทีฟทำตัวเป็นตัวเหนี่ยวนำที่มีค่าเป็น  $\frac{1}{K}$  เท่าของค่าความเหนี่ยวนำของแหล่งจ่าย  $L_s$  ดังแสดงในวงจรสมมูลรูปที่ 2.13 จะทำให้กระแสฮาร์มอนิกจากโหลดสามารถแยกไหลไปในตัวเหนี่ยวนำเสมือน  $(\frac{L_s}{K})$  ดังกล่าวได้และกระแสฮาร์มอนิกที่แยกไหลไปทางด้านแหล่งจ่ายจึงมีค่าลดลง นอกจากนี้แล้วข้อดีของอิมพีแดนซ์เสมือนที่เป็นตัวเหนี่ยวนำก็คือ จะช่วยทำให้ความถี่ที่เกิดเรโซแนนซ์ถูกเลื่อนไปที่ความถี่สูงขึ้นในกรณีที่เกิดเรโซแนนซ์ขึ้นในระบบด้วย ซึ่งจะได้กล่าวต่อไปในบทที่ 3



รูปที่ 2.13 วงจรสมมูลหนึ่งเฟสที่ความถี่ฮาร์มอนิกเมื่อวงจรกรองแอกทีฟทำตัวเป็นตัวเหนี่ยวนำ

เราสามารถคำนวณหาค่าฟังก์ชันควบคุม  $G(s)$  ในกรณีที่ตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกจากแหล่งจ่าย ( $i_{sh}$ ) ได้โดยพิจารณากระแสที่ส่วนต่าง ๆ จากวงจรสมมูลซึ่งจะได้ว่า

$$G(s) = \frac{i_c}{i_{sh}} = \frac{L_s}{L_s + \frac{L_s}{K}} = K \tag{2.20}$$

หรือในกรณีที่เรตรวจจับกระแสฮาร์มอนิกจากทางด้านโหลด ( $i_{Lh}$ ) ก็จะได้ว่า

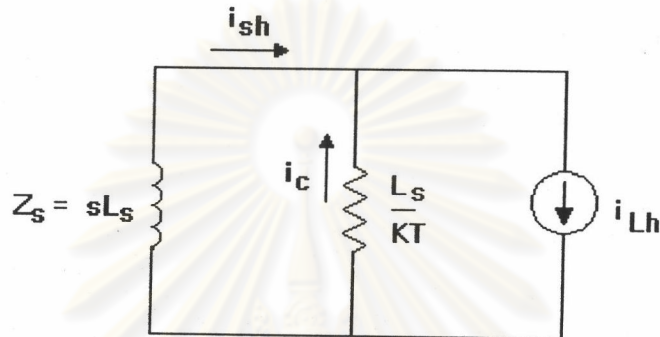
$$C(s) = \frac{i_c}{i_{Lh}} = \frac{L_s}{L_s + \frac{L_s}{K}} = \frac{K}{K+1} \tag{2.21}$$

นั่นคือหากต้องการให้วงจรกรองแอกทีฟทำตัวเป็นตัวเหนี่ยวนำจะต้องใช้ฟังก์ชันควบคุมที่มีลักษณะเป็นค่าคงที่ตามสมการที่ (2.20) หรือ (2.21)

วงจรกรองเป็นเสมือนตัวต้านทาน

ในกรณีที่เรควบคุมให้วงจรกรองแอกทีฟทำตัวเป็นตัวต้านทานที่มีค่าอิมพีแดนซ์เป็น  $(\frac{1}{KT})$  เท่าของค่าความเหนี่ยวนำของแหล่งจ่าย ซึ่งจะทำให้กระแสฮาร์มอนิกจากโหลดสามารถแยกไหลไปในตัวต้านทานเสมือน  $(\frac{L_s}{KT})$  ดังกล่าวได้เช่นเดียวกัน แต่สำหรับในกรณีนี้ค่าอิมพีแดนซ์เสมือนดังกล่าวจะมีค่าคงที่ตลอดทุกความถี่ซึ่งเมื่อพิจารณาจากอัตราการแบ่งไหลของกระแสฮาร์มอนิกระหว่างอิมพีแดนซ์ของแหล่งจ่ายกับอิมพีแดนซ์เสมือนจะพบว่าในกรณีของกระแสฮาร์มอนิกความถี่สูง กระแสฮาร์มอนิกจากโหลดสามารถแยกไหลผ่านตัวต้านทานเสมือนได้มากขึ้น

ทำให้อิมพีแดนซ์เสมือนในลักษณะนี้สามารถกำจัดฮาร์มอนิกอันดับสูงได้ดีกว่าฮาร์มอนิกอันดับต่ำ ซึ่งจะต่างไปจากในกรณีที่อิมพีแดนซ์เสมือนเป็นตัวเหนี่ยวนำที่อัตราการแยกไหลของกระแสฮาร์มอนิกจะคงที่ทุกความถี่ นอกจากนี้แล้วข้อดีของอิมพีแดนซ์เสมือนที่เป็นตัวต้านทานก็คือจะช่วยให้การหน่วงเรโซแนนซ์ในกรณีที่เกิดเรโซแนนซ์ขึ้นในระบบด้วย ซึ่งจะได้กล่าวต่อไปในบทที่ 3 ตัวต้านทานเสมือนดังกล่าวสามารถแสดงได้ดังในวงจรสมมูลรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 วงจรสมมูลหนึ่งเฟสที่ความถี่ฮาร์มอนิกเมื่อวงจรกรองแอกทีฟทำตัวเป็นตัวต้านทาน

เมื่อ  $T$  คือ ค่าคงตัวของฟังก์ชันควบคุม  
พิจารณาจากวงจรสมมูลจะได้ว่า

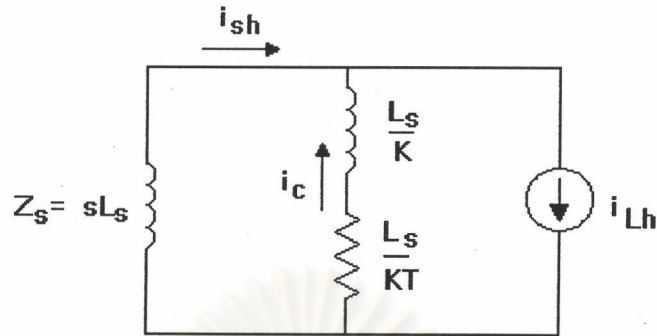
$$G(s) = \frac{i_c}{i_{sh}} = \frac{L_s s}{\frac{L_s}{KT}} = KTs \quad (2.22)$$

$$C(s) = \frac{i_c}{i_{Lh}} = \frac{L_s s}{L_s s + \frac{L_s}{KT}} = \frac{KTs}{KTs + 1} \quad (2.23)$$

นั่นคือหากต้องการให้วงจรกรองแอกทีฟทำตัวเป็นตัวต้านทานจะต้องใช้ฟังก์ชันควบคุมที่มีลักษณะตามสมการที่ (2.22) หรือ (2.23)

#### วงจรกรองเป็นเสมือนตัวต้านทานต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

ในกรณีนี้เราจะควบคุมให้วงจรกรองแอกทีฟทำตัวเป็นตัวต้านทานที่ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำซึ่งจะเป็นการรวมเอาข้อดีของอิมพีแดนซ์เสมือนที่มีลักษณะเป็นตัวเหนี่ยวนำและตัวต้านทานดังที่กล่าวมาแล้วไว้ด้วยกัน ดังแสดงในวงจรสมมูลรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 วงจรสมมูลหนึ่งเฟสที่ความถี่ฮาร์โมนิกเมื่อวงจรกรองแอกทีฟทำตัวเป็นตัวต้านทานที่ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำ

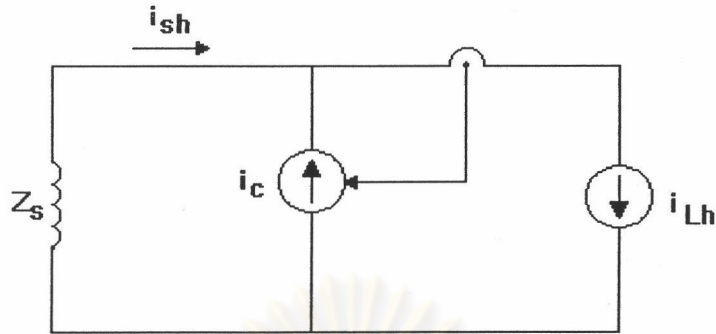
เมื่อพิจารณากระแสที่ส่วนต่าง ๆ จากวงจรสมมูลจะได้ว่า

$$G(s) = \frac{i_c}{i_{sh}} = \frac{L_s s}{\frac{L_s}{KT} + \frac{L_s s}{K}} = \frac{KTs}{1 + Ts} \quad (2.24)$$

$$C(s) = \frac{i_c}{i_{Lh}} = \frac{L_s s}{\frac{L_s}{KT} + (L_s + \frac{L_s}{K})s} = \frac{KTs}{(K+1)Ts + 1} \quad (2.25)$$

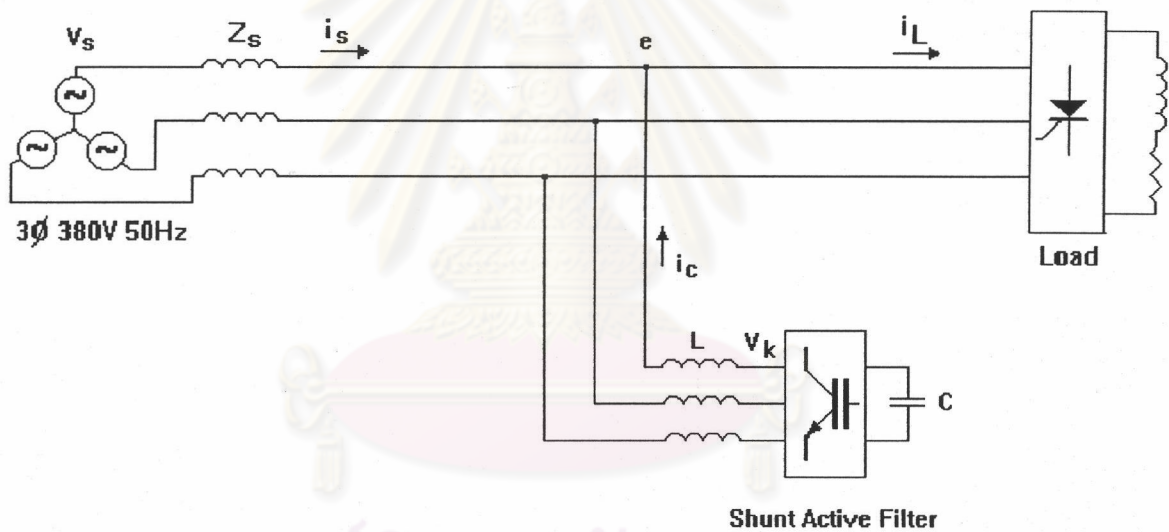
นั่นคือหากต้องการให้วงจรกรองแอกทีฟทำตัวเป็นตัวต้านทานที่ต่ออนุกรมกับตัวเหนี่ยวนำจะต้องใช้ฟังก์ชันควบคุมที่มีลักษณะตามสมการที่ (2.24) หรือ (2.25)

จากลักษณะของฟังก์ชันควบคุมทั้งหมดที่กล่าวมาในข้างต้นจะพบว่าหากค่าคงที่ (K) ของฟังก์ชันควบคุมยังมีค่าสูงมากก็จะยิ่งทำให้วงจรกรองแอกทีฟทำตัวเป็นค่าอิมพีแดนซ์ที่มีค่าต่ำมากเป็นผลทำให้กระแสฮาร์โมนิกที่ไหลผ่านไปทางด้านแหล่งจ่ายมีค่าน้อยลงตามไปด้วย ซึ่งหากพิจารณาให้ค่าคงที่ K มีค่าสูงจนเข้าใกล้อนันต์จะพบว่าวงจรกรองแอกทีฟจะทำตัวเป็นอิมพีแดนซ์ค่าศูนย์นั่นเอง หรือเมื่อพิจารณาฟังก์ชันควบคุม C(s) จะได้ว่าเมื่อ K เข้าสู่ออนันต์ C(s) จะมีค่าเข้าใกล้หนึ่งซึ่งอาจกล่าวได้ว่าเมื่อใช้การตรวจจับกระแสจากทางด้านโหลด เราสามารถจ่ายกระแสฮาร์โมนิกที่ตรวจจับมาได้กลับเข้าไปในระบบเพื่อหักล้างกับกระแสฮาร์โมนิก ของระบบได้โดยตรง ดังแสดงในวงจรสมมูลรูปที่ 2.16



รูปที่ 2.16 วงจรสมมูลหนึ่งเฟสที่ความถี่ฮาร์โมนิกของวงจรกรองแอกทีฟที่ใช้การตรวจจับกระแสทางด้านโหลด

### 2.2.3 การสร้างกระแสชดเชย



รูปที่ 2.17 แสดงการเชื่อมต่อวงจรกรองกำลังแอกทีฟเข้ากับระบบไฟฟ้า 3 เฟส

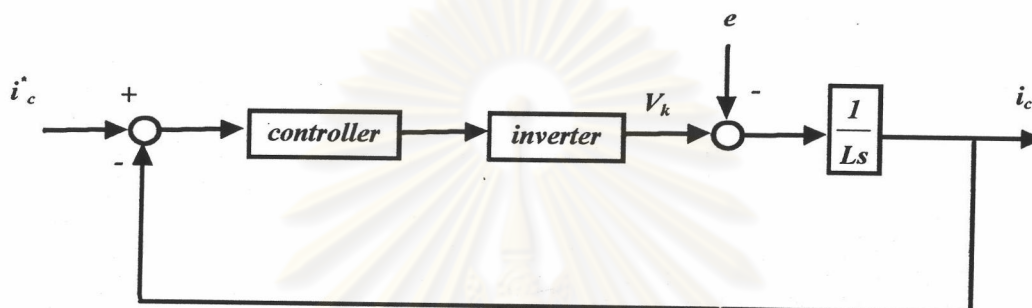
จากรูปจะพบว่าในการสร้างกระแสชดเชย  $i_c$  ตามค่าที่คำนวณได้จากฟังก์ชันควบคุมเพื่อจ่ายกลับเข้าไปในระบบทำได้โดยอาศัยการควบคุมกระแสผ่านอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดัน ซึ่งจะสร้างแรงดัน  $V_k$  เพื่อเอาชนะแรงดันของแหล่งจ่าย 3 เฟส  $e$  เพื่อให้แรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำเชื่อมโยงระบบ  $L$  มีค่าเพียงพอที่จะทำให้กระแสไหลเข้าสู่ระบบ 3 เฟสได้ตามต้องการ (ดูสมการที่ (2.26)-(2.28)) จากคำอธิบายข้างต้นสามารถแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ในรูปที่ 2.18

$$L \frac{di_{cu}}{dt} = V_{ku} - e_u \quad (2.26)$$



$$L \frac{di_{cv}}{dt} = V_{kv} - e_v \quad (2.27)$$

$$L \frac{di_{cw}}{dt} = V_{kw} - e_w \quad (2.28)$$



รูปที่ 2.18 แผนภาพแสดงวงรอบการควบคุมกระแส

โดยที่  $i_c^*$  คือ กระแสคำสั่ง

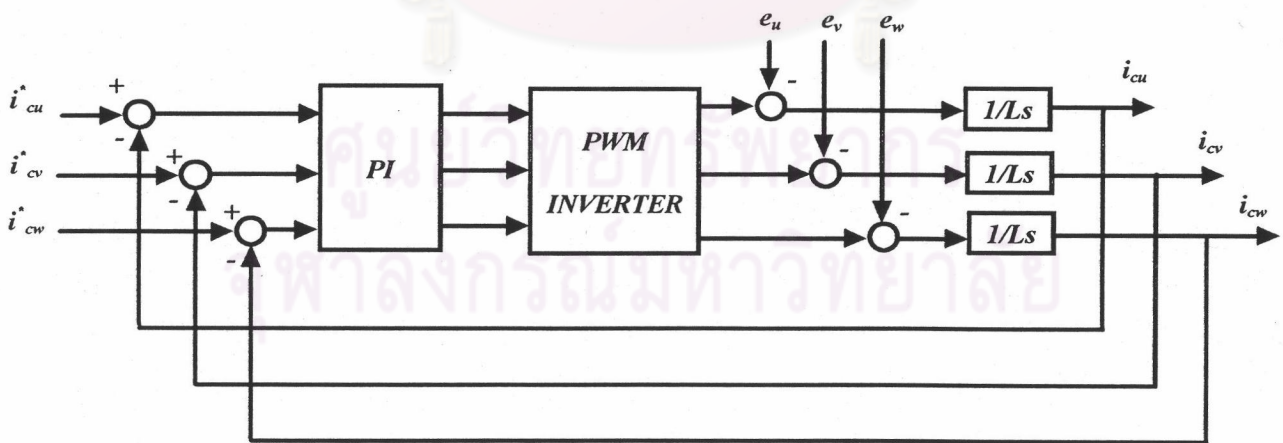
$i_c$  คือ กระแสที่สร้างได้

สำหรับระบบควบคุมกระแสที่นิยมใช้กันโดยทั่วไปสามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบได้แก่

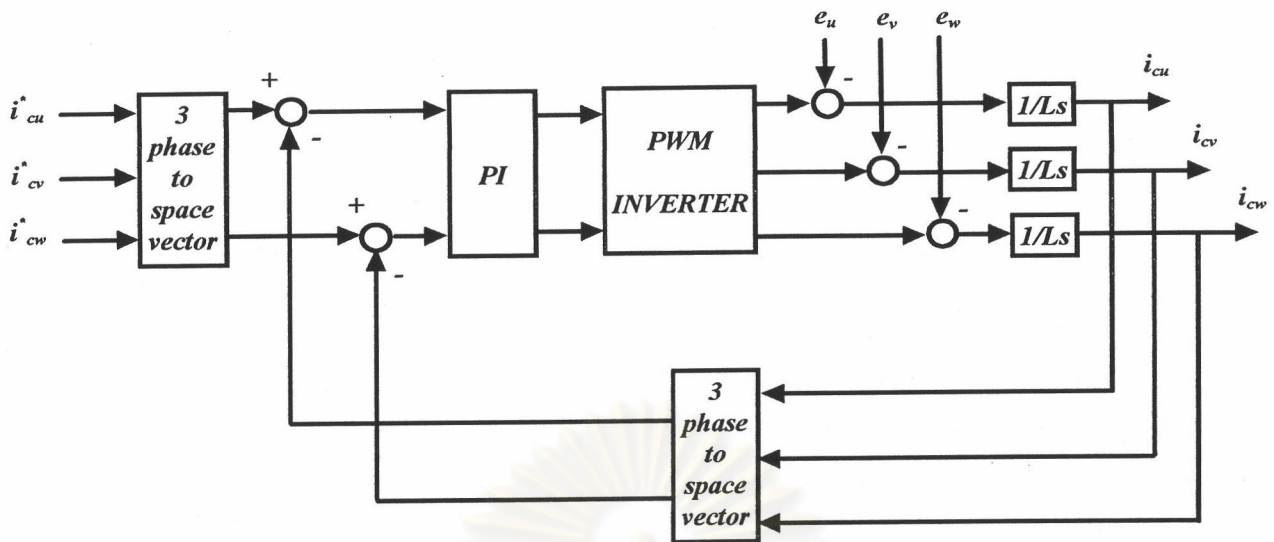
1) การควบคุมกระแสโดยใช้ตัวควบคุม PI บนแกนนิ่ง วิธีนี้จะเป็นการควบคุมกระแสโดยใช้ตัวควบคุม PI ที่พิจารณาบนแกนอ้างอิงปกติ (ไม่มีการหมุนแกน) ซึ่งอาจจะพิจารณาเป็นตัวควบคุม PI ในระบบ 3 เฟสแยกอิสระ (u,v,w) หรืออาจจะพิจารณาเป็นตัวควบคุม PI ในระบบสเปซเวกเตอร์ 2 แกน ( $\alpha$ - $\beta$ ) ก็ได้ และสามารถแสดงได้ดังบล็อกไดอะแกรมรูปที่ 2.19 และ 2.20 จากรูปจะพบว่าในแต่ละเฟส/แกน จะมีตัวควบคุม PI ซึ่งจะรับสัญญาณคลาดเคลื่อน (error) ระหว่างสัญญาณกระแสคำสั่งกับสัญญาณกระแสจริงแล้วส่งสัญญาณออกมาเป็นคำสั่งแรงดัน จากนั้นคำสั่งแรงดันดังกล่าวจะถูกส่งต่อไปยังอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันที่อาศัยการปรับความกว้างพัลส์ (PWM-inverter) เพื่อสร้างแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำเชื่อมโยระบบต่อไป

2) การควบคุมกระแสโดยใช้ตัวควบคุม PI บนแกนหมุน วิธีนี้จะเป็นการควบคุมกระแสโดยใช้ตัวควบคุม PI เช่นเดียวกันแต่จะเป็นการพิจารณาตัวควบคุม PI บนแกนอ้างอิงที่หมุนไปด้วยความถี่เท่ากับความเร็วของกระแสคำสั่ง ซึ่งสามารถแสดงเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ 2.21 ความแตกต่างของวิธี PI บนแกนนิ่งและ PI บนแกนหมุนก็คือวิธี PI บนแกนนิ่งจะสามารถกำจัดค่าความคลาดเคลื่อนในสถานะอยู่ตัว (steady state error) ให้เป็นศูนย์ได้เฉพาะในกรณีที่สัญญาณ

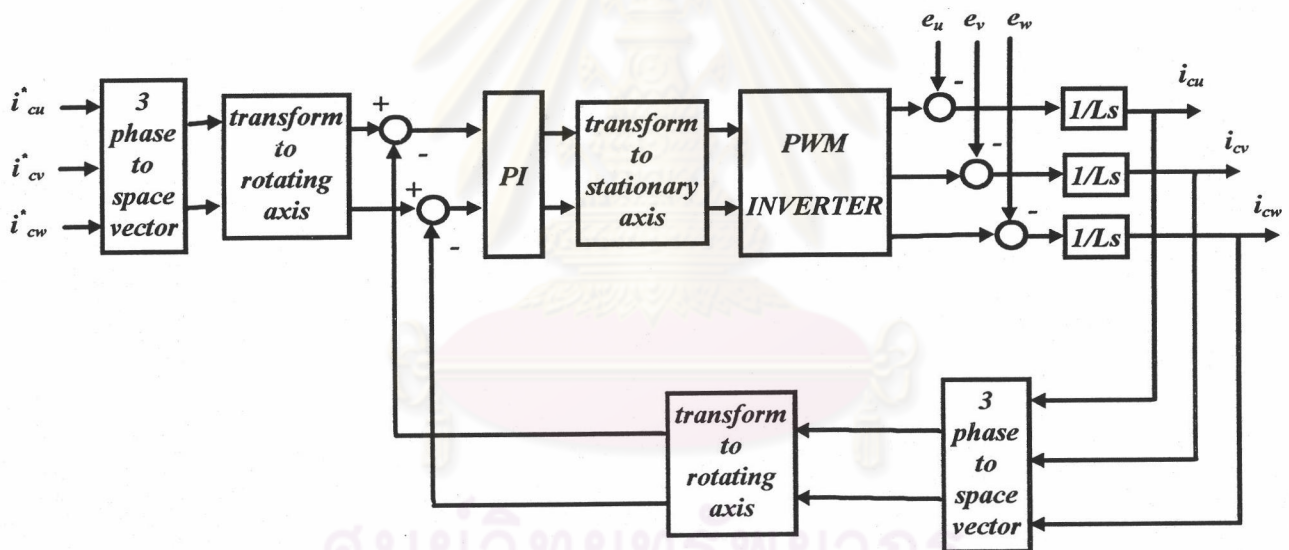
กระแสคำสั่งเป็นไฟตรง แต่ในกรณีที่สัญญาณกระแสคำสั่งเป็นคลื่นรูปไซน์วิธี PI บนแกนนิ่งจะไม่สามารถกำจัดค่าความคลาดเคลื่อนในสถานะอยู่ตัวให้เป็นศูนย์ได้เนื่องจากอัตราขยายของ PI มีค่าจำกัด (finite) ที่ความถี่อื่น ๆ ที่ไม่ใช่ไฟตรง สำหรับวิธี PI บนแกนหมุนนั้นจะสามารถแก้ปัญหาดังกล่าวได้ กล่าวคือ วิธี PI บนแกนหมุนจะเป็นการพิจารณาบนแกนที่หมุนไปด้วยความถี่เท่ากับความเร็วของกระแสคำสั่งจึงทำให้มองเห็นกระแสคำสั่งรูปไซน์เป็นไฟตรง ดังนั้นจึงทำให้สามารถกำจัดค่าความคลาดเคลื่อนในสถานะอยู่ตัวในกรณีที่สัญญาณกระแสคำสั่งเป็นคลื่นรูปไซน์ (ความถี่เดียว) ให้เป็นศูนย์ได้นั่นเอง แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากกระแสชดเชยของวงจรรองแอกที่ฟที่ต้องการสร้างนั้นเป็นสัญญาณความถี่สูงหลายความถี่ทำให้การใส่ตัวควบคุมอินทิกรัลไม่สามารถกำจัดค่าความคลาดเคลื่อนในสถานะอยู่ตัวได้หมด ดังนั้นการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองแอกที่ฟจึงใช้แต่เฉพาะตัวควบคุม P เท่านั้น และเนื่องจากกระแสชดเชยที่ต้องการสร้างนั้นมีความถี่ค่อนข้างสูง (แบนด์วิดท์สูง) จึงทำให้มีความจำเป็นที่จะต้องใช้อัตราขยายของตัวควบคุม P ที่ค่อนข้างสูงเพื่อลดความคลาดเคลื่อนในสถานะอยู่ตัว แต่เนื่องจากการคำนวณของไมโครคอนโทรลเลอร์จะทำให้เกิดการประวิงเวลา (delay time) ขึ้นในระบบซึ่งหากการประวิงเวลาดังกล่าวมีค่ามากก็จะทำให้ไม่สามารถใช้ค่าอัตราขยายของตัวควบคุม P ได้สูงมาก (หากใช้ค่าอัตราขยายสูงมากจะทำให้ระบบขาดเสถียรภาพ) จะเห็นได้ว่าวิธี PI ทั้งบนแกนนิ่งและแกนหมุนไม่เหมาะสมที่จะใช้ในการควบคุมกระแสชดเชยของวงจรรองแอกที่ฟ ดังนั้นในวิทยานิพนธ์นี้จึงเลือกใช้วิธีควบคุมกระแสแบบฮิสเตอร์ซิสต์จึงจะได้กล่าวต่อไป



รูปที่ 2.19 บล็อกไดอะแกรมแสดงการควบคุมกระแสแบบ PI บนแกนนิ่งในระบบ 3 เฟสแยกอิสระ



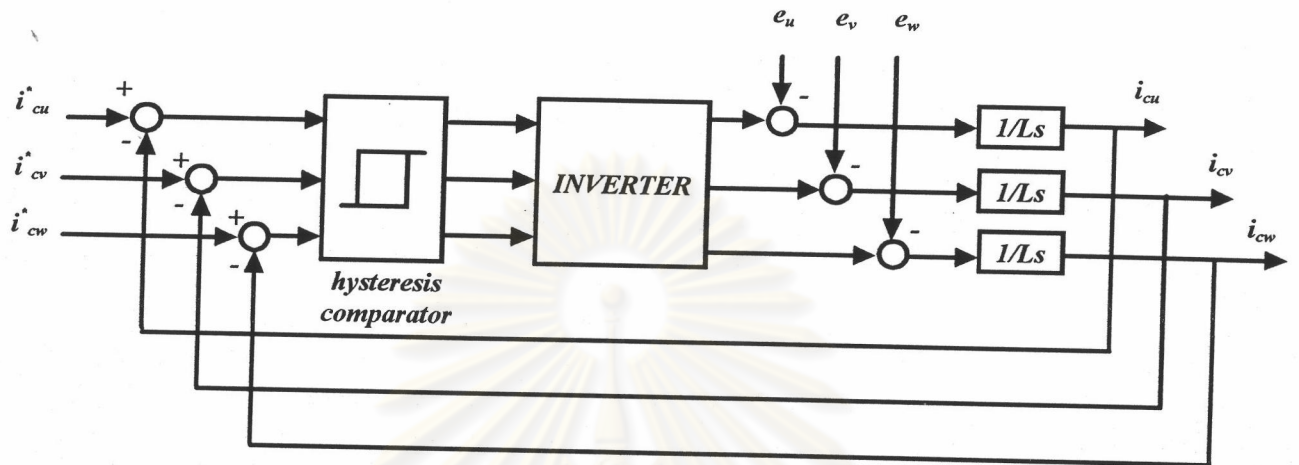
รูปที่ 2.20 บล็อกไดอะแกรมแสดงการควบคุมกระแสแบบ PI บนแกนนิ่งในระบบสเปซเวกเตอร์



รูปที่ 2.21 บล็อกไดอะแกรมแสดงการควบคุมกระแสแบบ PI บนแกนหมุน

3) การควบคุมกระแสโดยวิธีสวิตช์ 3 เฟสอิสระแบบแอนะล็อก วิธีนี้จะใช้การเปรียบเทียบกระแสที่สร้างได้จริงกับกระแสคำสั่งในแต่ละเฟส เพื่อหาความคลาดเคลื่อนของกระแส ค่าความคลาดเคลื่อนกระแสในแต่ละเฟสที่ได้จะถูกพิจารณาว่ามีค่าเกินขอบเขตที่กำหนดไว้หรือไม่ (แถบฮิสเตอร์ซิส) ถ้าเกินก็จะมีคำสั่งสวิตช์ ถ้าไม่เกินก็จะยังไม่มีคำสั่งสวิตช์สำหรับในแต่ละเฟส สัญญาณคำสั่งสวิตช์ในแต่ละเฟสที่ได้ดังกล่าวจะถูกส่งต่อไปยังอินเวอร์เตอร์เพื่อ

สร้างแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำเชื่อมโยระบบต่อไป บล็อกไดอะแกรมการควบคุมกระแสโดยวิธีฮิสเตอร์ซิสแสดงดังรูปที่ 2.22



รูปที่ 2.22 บล็อกไดอะแกรมแสดงการควบคุมกระแสวิธีฮิสเตอร์ซิส 3 เฟสอิสระแบบแอนะล็อก

ศูนย์วิทยทรัพยากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย