# รายการอ้างอิง

## ภาษาไทย


กิติพจน์ สิทธิเลิศพิศาล. วงจรกรองกำลังแอกทีฟแบบอนุกรมสำหรับลดฮาร์มอนิกและรักษาระดับแรงดัน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.

สรรค์ธิพงษ์ โฆษิตเกษม , สมบูรณ์ แสงวงค์วาณิชย์ , วงจรกรองกำลังแอกทีฟผสมพาสซีฟแบบขนานสำหรับลดฮาร์มอนิก , การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 19 , 2539


## ภาษาอังกฤษ


A.Salem nia and S.Saadate , "Digital Control Active Filter Suppressing Particular Harmonics : Numerical Simulation and Experimentation", Proc. of ICHQP-Las Vegas , pp.632-636, 1996.

F.Z.Peng , "The Combined System of Passive and Series Active Filters" , Dissertation , Nagaoka University of Technology , February 1990.

F.Z.Peng , H.Akagi , A.Nabae , "A Study of Active Filters Using Quad-Series Voltage-Source PWM Converters for Harmonic Compensation", IEEE/PESC , pp.204-211 , 1987.

F.Z.Peng , M.Kohata , and H.Akagi , "Compensation Characteristic of Shunt Active and Series Active Filters" , Chinese-Japanese Power Electronics Conference , pp.381-387 , 1992.

H.Akagi and A.Nabae , "Control Strategy of Active Power Filters Using Multiple Voltage-Source PWM Converters" , IEEE Tran. Ind. App. Vol. IA-22 , No.3 May/June , pp. 460-465 , 1986.

H.Akagi , Y.Kanazawa , and A.Nabae , "Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits" , Proc.of IPEC-Tokyo , pp.1375-1386 , 1983.

IEEE Standard 519-1992 , "IEEE Recommened Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems" , IEEE , pp. 78 , 1992.

K.Ito , M.Aoki , and Y.Tsunehiro , "Improving the Behavior of Active Filter for Power Distribution System" , T.IEE Japan , Vol.116-D , No.10 ,pp.1079-1080 , 1996.

M.Takeda , K.Ikeda , and Y.Tominaga ,"Harmonic Current Compensation with Active Filter", IEEE/PESC , pp.808-815 , 1987.

N.Nanaumi , S.Kuramoti , and M.Yano , "Comparision of Versatile Harmonics Current Compensation and Specific Harmonics Number Current Compensation" , Conf. Rec. of Japan IAS , pp.407-410 , 1996.

# ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

### การพิจารณาฟังก์ชันโอนย้ายของระบบเมื่อมีการหมุนแกนอ้างอิง

(กิติพจน์ สิทธิเลิศพิศาล, 2539)

ในการพิจารณาฟังก์ชันโอนย้ายของวงจรกรองผ่านแถบเพื่อคำนวณหาองค์ประกอบฮาร์มอนิกของกระแสนั้น เมื่อเราพิจารณาบนแกนอ้างอิงที่หมุนไปด้วยความเร็วเท่ากับความถี่หลักมูลจะได้ว่า

$$\begin{bmatrix} i_{sdh} \\ i_{sqh} \end{bmatrix} = F(s) \cdot \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} \tag{ก.1}$$

สมมุติให้ฟังก์ชันโอนย้าย F(s) =M(s)/N(s) โดยที่ M(s) , N(s) เป็นพหุนาม (polynomials) อันดับที่ m และ n ตามลำดับ เราจะสามารถเขียนสมการ(ก.1) ได้เป็น

$$N(s) \cdot \begin{bmatrix} i_{sdh} \\ i_{sqh} \end{bmatrix} = M(s) \cdot \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} \tag{ก.2}$$

จากสมการ(2.18) เราสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างการหาอนุพันธ์บนแกนหมุนกับการหาอนุพันธ์บนแกนนิ่งได้ดังต่อไปนี้คือ



$$s\begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = s\left[\begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix}\right] \tag{ก.3}$$

โดยที่

$$\begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{su} \\ i_{sv} \\ i_{sw} \end{bmatrix}$$

จากสมการ(ก.3) จะได้ว่า

$$s\begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = s\begin{bmatrix} i_{s\alpha}\cdot\cos(\omega t)+i_{s\beta}\cdot\sin(\omega t) \\ -i_{s\alpha}\cdot\sin(\omega t)+i_{s\beta}\cdot\cos(\omega t) \end{bmatrix}$$
$$=\begin{bmatrix} -i_{s\alpha}\cdot\omega\cdot\sin(\omega t)+\cos(\omega t)\cdot si_{s\alpha}+i_{s\beta}\cdot\omega\cdot\cos(\omega t)+\sin(\omega t)\cdot si_{s\beta} \\ -i_{s\alpha}\cdot\omega\cdot\cos(\omega t)-\sin(\omega t)\cdot si_{s\alpha}-i_{s\beta}\cdot\omega\cdot\sin(\omega t)+\cos(\omega t)\cdot si_{s\beta} \end{bmatrix}$$
$$=\begin{bmatrix} \cos(\omega t)\cdot(si_{s\alpha}+\omega\cdot i_{s\beta})+\sin(\omega t)\cdot(si_{s\beta}-\omega\cdot i_{s\alpha}) \\ -\sin(\omega t)\cdot(si_{s\alpha}+\omega\cdot i_{s\beta})+\cos(\omega t)\cdot(si_{s\beta}-\omega\cdot i_{s\alpha}) \end{bmatrix}$$
$$=\begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix}\begin{bmatrix} s & \omega \\ -\omega & s \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} \qquad (ก.4)$$

ในทำนองเดียวกันสำหรับการหาอนุพันธ์อันดับที่ n เราสามารถคำนวณได้ว่า

$$s^n\begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix}\begin{bmatrix} s & \omega \\ -\omega & s \end{bmatrix}^n\begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} \qquad (ก.5)$$

ดังนั้นจากสมการ(ก.2) เนื่องจากทั้ง *M(s)* และ *N(s)* เป็นพหุนาม เราจึงสามารถใช้ความสัมพันธ์(ก.5) แทนในแต่ละพจน์ของ *M(s)* และ *N(s)* ได้ และเราจะสามารถเขียนใหม่ได้เป็น

$$\begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix}\cdot N(\lambda)\Big|_{\lambda=\begin{bmatrix} s & \omega \\ -\omega & s \end{bmatrix}}\cdot\begin{bmatrix} i_{s\alpha h} \\ i_{s\beta h} \end{bmatrix} =$$
$$\begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix}\cdot M(\lambda)\Big|_{\lambda=\begin{bmatrix} s & \omega \\ -\omega & s \end{bmatrix}}\cdot\begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} \qquad (ก.6)$$

เมื่อพิจารณาฟังก์ชันโอนย้ายของวงจรกรองผ่านแถบบนแกนนิ่ง จะได้ว่า

$$N(\lambda)\Big|_{\lambda=\begin{bmatrix} s & \omega \\ -\omega & s \end{bmatrix}}\begin{bmatrix} i_{s\alpha h} \\ i_{s\beta h} \end{bmatrix} = M(\lambda)\Big|_{\lambda=\begin{bmatrix} s & \omega \\ -\omega & s \end{bmatrix}}\begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} \qquad (ก.7)$$

ดังนั้นเราจะได้ฟังก์ชันโอนย้ายบนแกนนิ่งเป็น

$$\begin{bmatrix} i_{s\alpha h} \\ i_{s\beta h} \end{bmatrix} = \left[N(\lambda)\Big|_{\lambda=\begin{bmatrix} s & \omega \\ -\omega & s \end{bmatrix}}\right]^{-1} * \left[M(\lambda)\Big|_{\lambda=\begin{bmatrix} s & \omega \\ -\omega & s \end{bmatrix}}\right]\begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} \qquad (ก.8)$$

เมื่อย้ายไปพิจารณาบนแกนลำดับบวก (positive sequence) และลำดับลบ (negative sequence) โดยมีนิยามการแปลงแกนดังนี้คือ

$$\begin{bmatrix} i_{sph} \\ i_{snh} \end{bmatrix} = [C]\begin{bmatrix} i_{s\alpha h} \\ i_{s\beta h} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} i_{sp} \\ i_{sn} \end{bmatrix} = [C]\begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \end{bmatrix} \quad \text{(ก.9)}$$

โดยที่

$$[C] = \frac{1}{\sqrt{2}}\begin{bmatrix} 1 & j \\ 1 & -j \end{bmatrix}$$

เราจะสามารถเขียนฟังก์ชันโอนย้ายตามสมการ(ก.8) บนแกนลำดับบวกและลำดับลบ ได้เป็น

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} i_{sph} \\ i_{snh} \end{bmatrix} &= [C]\left[ N(\lambda)\Big|_{\lambda=\begin{bmatrix} s & \omega \\ -\omega & s \end{bmatrix}} \right]^{-1} [C]^{-1}[C]\left[ M(\lambda)\Big|_{\lambda=\begin{bmatrix} s & \omega \\ -\omega & s \end{bmatrix}} \right][C]^{-1}\begin{bmatrix} i_{sp} \\ i_{sn} \end{bmatrix} \\
&= \left\{[C]\left[ N(\lambda)\Big|_{\lambda=\begin{bmatrix} s & \omega \\ -\omega & s \end{bmatrix}} \right][C]^{-1}\right\}^{-1} \left\{[C]\left[ M(\lambda)\Big|_{\lambda=\begin{bmatrix} s & \omega \\ -\omega & s \end{bmatrix}} \right][C]^{-1}\right\}\begin{bmatrix} i_{sp} \\ i_{sn} \end{bmatrix} \\
&= \left[ N(P)\Big|_{P=[C]\begin{bmatrix} s & \omega \\ -\omega & s \end{bmatrix}[C]^{-1}} \right]^{-1} \left[ M(P)\Big|_{P=[C]\begin{bmatrix} s & \omega \\ -\omega & s \end{bmatrix}[C]^{-1}} \right]\begin{bmatrix} i_{sp} \\ i_{sn} \end{bmatrix} \\
&= \left[ N(P)\Big|_{P=\begin{bmatrix} s-j\omega & 0 \\ 0 & s+j\omega \end{bmatrix}} \right]^{-1} \left[ M(P)\Big|_{P=\begin{bmatrix} s-j\omega & 0 \\ 0 & s+j\omega \end{bmatrix}} \right]\begin{bmatrix} i_{sp} \\ i_{sn} \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} i_{sph} \\ i_{snh} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F(s-j\omega) & 0 \\ 0 & F(s+j\omega) \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_{sp} \\ i_{sn} \end{bmatrix} \quad \text{(ก.10)}$$

สมการบนของสมการ (ก.10) สามารถเขียนได้เป็น

$$\left[i_{s\alpha h} + j\, i_{s\beta h}\right] = F(s-j\omega)\left[i_{s\alpha} + j\, i_{s\beta}\right] \quad \text{(ก.11)}$$

จากสมการ (ก.11) เมื่อเราใส่สังยุค (conjugate) ทั้งสองข้างของสมการ (โดยคิดว่า $s$ คือตัวดำเนินการอนุพันธ์ดังนั้น $s^* = s$) จะได้

$$\begin{aligned}
\left[i_{s\alpha h} + j\, i_{s\beta h}\right]^* &= \left\{F(s-j\omega)\ \left[i_{s\alpha} + j\, i_{s\beta}\right]\right\}^* \\
&= \left[F(s-j\omega)\right]^*\left[i_{s\alpha} + j i_{s\beta}\right]^*
\end{aligned}$$

$$= F(s^{*} + j\omega)\left[i_{s\alpha} - ji_{s\beta}\right]$$

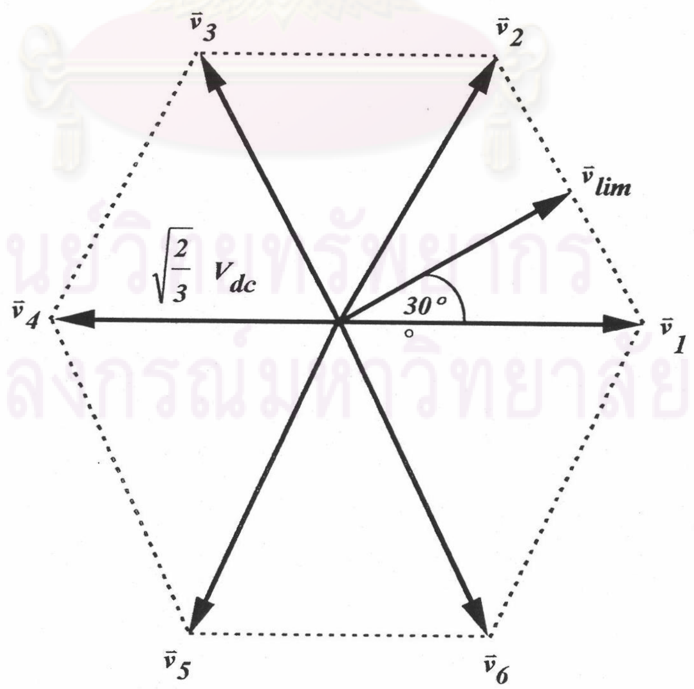
$$\left[i_{s\alpha h} - ji_{s\beta h}\right] = F(s + j\omega)\left[i_{s\alpha}^{*} - ji_{s\beta}\right] \quad (ก.12)$$

จะพบว่าสมการ (ก.12) เป็นสมการเดียวกันกับสมการล่างของสมการ (ก.10) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าสมการ (ก.10) ถึงแม้ว่าจะดูเหมือนมีลักษณะเป็นสมการอิสระ 2 สมการ แต่ในความเป็นจริงสมการทั้งสองเป็นเพียงค่าสังยุคของกันและกัน ดังนั้นเราจึงเลือกใช้เพียงสมการเดียวก็เพียงพอ และเนื่องจากระบบแกนอ้างอิงที่เราใช้นั้นเป็นแบบลำดับบวก เราจึงเลือกใช้ความสัมพันธ์ตามสมการ (ก.11)

กล่าวโดยสรุปก็คือเมื่อฟังก์ชันโอนย้ายของระบบที่พิจารณาบนแกนอ้างอิงที่หมุนไปด้วยความถี่ ω rad/s. เป็น F(s) เมื่อเรานำกลับมาพิจารณาบนแกนนิ่งจะได้ฟังก์ชันโอนย้ายของระบบเป็น F(s-jω) โดยกรณีที่สัญญาณเป็นลำดับบวกจะแทน s ด้วยค่าความถี่ที่เป็นบวกและจะแทน s ด้วยค่าความถี่ที่เป็นลบในกรณีที่สัญญาณเป็นลำดับลบ อย่างไรก็ตามในกรณีที่จะนำฟังก์ชันโอนย้ายดังกล่าวไปเขียนแผนภูมิโบเดนั้นเนื่องจากในการเขียนแผนภูมิโบเดจะเขียนได้เฉพาะความถี่ที่เป็นบวกเท่านั้น ดังนั้นจะต้องเขียนแผนภูมิโบเดจากฟังก์ชันโอนย้าย F(s-jω) สำหรับกรณีที่เป็นลำดับบวก และในกรณีที่เป็นลำดับลบจะต้องเขียนแผนภูมิโบเดจากฟังก์ชันโอนย้าย F(s+jω) โดยในกรณีนี้แผนภูมิโบเดจะให้เฟสที่มีเครื่องหมายตรงกันข้ามกับความเป็นจริง ( เนื่องจากสมการบนและสมการล่างของสมการ (ก.10) เป็นค่าสังยุคของกันและกันจึงให้เฟสที่มีเครื่องหมายตรงข้ามกัน )

## ภาคผนวก ข
## การออกแบบตัวควบคุม PI สำหรับควบคุมระดับแรงดันไฟตรง
**(กิติพจน์ สิทธิเลิศพิศาล, 2539)**

จากทฤษฎีกำลังงานรีแอกทีฟขณะใด ๆ (ดูบทที่ 2) จะพบว่ากำลังงานส่วนที่ทำให้เกิดกระแสฮาร์มอนิกนั้นจะเป็นองค์ประกอบไฟสลับ ($\tilde{p}$ และ $\tilde{q}$) ดังนั้นค่ากำลังงานที่ไหลเข้าออกจากอินเวอร์เตอร์ของวงจรกรองกำลังแอกทีฟใน 1 คาบเวลาจึงมีค่าเป็นศูนย์ ด้วยเหตุนี้เองส่วนของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในวงจรกรองกำลังแอกทีฟจึงไม่จำเป็นต้องมีวงจรเรียงกระแสเพื่อจ่ายกำลังงานให้กับตัวเก็บประจุไฟตรงเหมือนอินเวอร์เตอร์ทั่วไป แต่จะอาศัยการควบคุมกำลังงานที่ไหลเข้าออกจากระบบในการควบคุมแรงดันไฟตรงที่จำเป็นต่อการทำงานของอินเวอร์เตอร์แทน โดยในขณะที่แรงดันบัสไฟตรงมีค่าต่ำกว่าค่าที่กำหนด วงจรกรองกำลังแอกทีฟก็จะถูกควบคุมให้ดึงกำลังงานป้อนเข้าสู่อินเวอร์เตอร์เพื่อนำไปสะสมในตัวเก็บประจุทำให้แรงดันบัสไฟตรงคร่อมตัวเก็บประจุมีค่าสูงขึ้น ในทางกลับกันขณะที่แรงดันบัสไฟตรงมีค่าสูงกว่าค่าที่กำหนด วงจรกรองแอกทีฟก็จะถูกควบคุมให้จ่ายกำลังงานออกไปจากอินเวอร์เตอร์ทำให้แรงดันบัสไฟตรงมีค่าต่ำลง สำหรับการคำนวณหาค่าแรงดันที่จำเป็นต่อการทำงานของอินเวอร์เตอร์ในงานวิจัยนี้สามารถทำได้โดยเริ่มต้นจากการพิจารณาขอบเขตของขนาดเวกเตอร์แรงดันที่อินเวอร์เตอร์สามารถสร้างได้ดังแสดงในรูปที่ ข.1




รูปที่ ข.1 แสดงขอบเขตของขนาดเวกเตอร์แรงดันที่อินเวอร์เตอร์สามารถสร้างได้

เวกเตอร์แรงดันที่อินเวอร์เตอร์สามารถสร้างได้จะต้องมีขนาดไม่เกินหกเหลี่ยมดังนั้น จากรูปที่ ข.1 จะพบว่าขอบเขตต่ำที่สุดของขนาดเวกเตอร์แรงดันที่อินเวอร์เตอร์สามารถสร้างได้คือเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับแต่ละด้านของหกเหลี่ยมซึ่งมีค่าเป็นดังสมการ (ข.1)

$$\left|\bar{v}_{\mathrm{lim}}\right| = \sqrt{\frac{2}{3}}\; V_{dc}\cos 30^{\circ} = \frac{V_{dc}}{\sqrt{2}} \qquad \text{(ข.1)}$$

โดยที่ $V_{dc}$ คือค่าแรงดันบัสไฟตรงที่อินเวอร์เตอร์ใช้ในการสร้างเวกเตอร์แรงดัน

$\left|\bar{v}_{\mathrm{lim}}\right|$ คือขอบเขตต่ำที่สุดของขนาดเวกเตอร์แรงดันที่อินเวอร์เตอร์สามารถสร้างได้

เวกเตอร์แรงดันที่อินเวอร์เตอร์จะต้องสร้างเพื่อใช้ในการสร้างกระแสชดเชยสามารถคำนวณได้จากสมการ (ข.2) และจากสมการ (ข.2) เราสามารถเขียนทางเดินของเวกเตอร์แรงดันดังกล่าว (ในระนาบ $\alpha$-$\beta$) ได้ดังรูปที่ ข.2

$$\bar{v}^{*} = \bar{e} + L\frac{d\bar{i}_c}{dt} \qquad \text{(ข.2)}$$

โดยที่ $\bar{v}^{*}$ คือเวกเตอร์แรงดันที่อินเวอร์เตอร์ต้องสร้าง

$\bar{e}$ คือเวกเตอร์แรงดันของแหล่งจ่ายสามเฟส (ขนาดแรงดันระหว่างสายเท่ากับ 380 V.) ซึ่งคำนวณได้ตามสมการ (2.5)

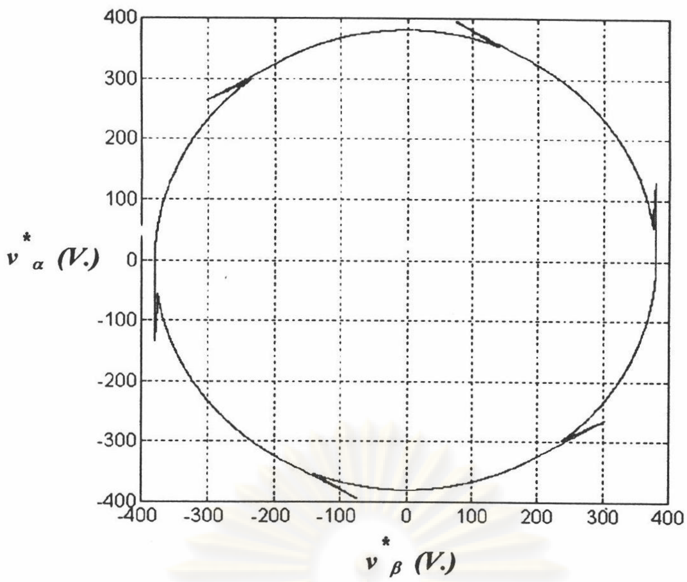
L คือค่าความเหนี่ยวนำรั่วไหลของหม้อแปลงที่ใช้เชื่อมโยงระบบมีค่าเท่ากับ 4.47 mH.

$\frac{di_c}{dt}$ คือค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงของกระแสชดเชยที่จะสร้าง(ดูขนาดและรูปคลื่นกระแสชดเชยที่ใช้ในการหาทางเดินของเวกเตอร์แรงดันได้ในผลการจำลองการทำงานกรณีที่ 1 บทที่ 4)

จากรูป ข.2 จะพบว่าช่วงที่มีการเปลี่ยนแปลงของกระแสอย่างมากขนาดของเวกเตอร์แรงดันที่อินเวอร์เตอร์ต้องสร้างจะมีค่ามาก ซึ่งจากรูปเราสามารถประมาณขนาดสูงสุดของเวกเตอร์แรงดันที่อินเวอร์เตอร์ต้องสร้างได้เท่ากับ 410 V. และจากขนาดสูงสุดดังกล่าวทำให้เราสามารถคำนวณค่าแรงดันบัสไฟตรงที่จำเป็นต่อการสร้างกระแสชดเชยได้ดังอสมการ (ข.3)

$$\left|\bar{v}_{\mathrm{lim}}\right| = \frac{V_{dc}}{\sqrt{2}} \geq 410$$

$$V_{dc} \geq 580 \quad \text{V.} \qquad \text{(ข.3)}$$




รูปที่ ข.2 แสดงทางเดินของเวกเตอร์แรงดันที่อินเวอร์เตอร์ต้องสร้าง

จากอสมการ (ข.3) หมายความว่าขนาดแรงดันบัสไฟตรงที่จำเป็นต่อการทำงานของอินเวอร์เตอร์จะต้องมีค่าอย่างน้อย 580 V. เพื่อให้ได้ผลการควบคุมกระแสที่ดีในงานวิจัยนี้จะเลือกใช้ค่าแรงดันบัสไฟตรงเท่ากับ 700 V. ซึ่งเมื่อใช้การควบคุมกระแสแบบฮีสเตอริซีสที่มีความกว้างของแถบฮีสเตอริซีสเท่ากับ ±0.5 A. ($\Delta$i = 1A.) จะทำให้ได้ความถี่การสวิตช์ ($f_{sw}$) โดยเฉลี่ยประมาณ 10 kHz (ดูสมการ ข.4)

$$f_{sw} = \frac{V_{dc} - e_{line}}{2\sqrt{3}L\Delta i} \qquad \text{(ข.4)}$$

โดยที่ $e_{line}$ คือค่ายอดของแรงดันระหว่างสายมีค่าเท่ากับ $380\sqrt{2}$ V.

แต่อย่างไรก็ตามเนื่องจากสวิตช์กำลังที่ใช้ในอินเวอร์เตอร์สามารถทนแรงดันได้สูงสุดไม่เกิน 600 V. ดังนั้นจึงใช้หม้อแปลงเชื่อมโยงระบบที่มีค่าอัตราส่วนจำนวนรอบเป็น 2:1 เพื่อลดขนาดแรงดันไฟตรงลงมา ซึ่งจะทำให้ค่าแรงดันบัสไฟตรงที่ใช้ลดลงมาเหลือเพียง 350 V. เท่านั้น

ในการออกแบบตัวควบคุม PI จะเริ่มจากการเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของส่วนควบคุมแรงดันบัสไฟตรงเป็นบล็อกไดอะแกรมซึ่งเมื่อรวมกับบล็อกไดอะแกรมในส่วนของตัวควบคุม PI และวงจรกรองสัญญาณรบกวนแล้วสามารถแสดงได้ดังรูปที่ ข.3 โดยที่ในการเขียนแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของส่วนควบคุมแรงดันบัสไฟตรงจะอาศัยสมการพลังงานดังในสมการที่ (ข.5)

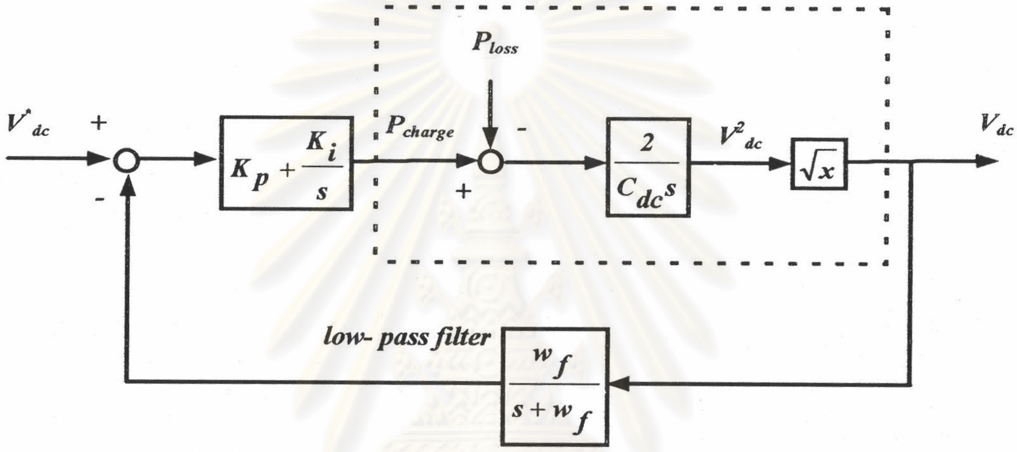
$$P_{charge}-P_{loss}=v_{dc}(t)i_{dc}(t)=v_{dc}(t)C_{dc}\frac{dv_{dc}}{dt}=\frac{1}{2}C_{dc}\frac{d(v^2{}_{dc})}{dt} \quad (ข.5)$$

โดยที่ $P_{charge}$ คือ ค่ากำลังงานที่ไหลเข้าอินเวอร์เตอร์

$P_{loss}$ คือ ค่ากำลังงานสูญเสียต่าง ๆ ของอินเวอร์เตอร์

$i_{dc}$ คือ ค่ากระแสที่ไหลเข้าออกจากอินเวอร์เตอร์

$C_{dc}$ คือ ตัวเก็บประจุไฟตรง




รูปที่ ข.3 บล็อกไดอะแกรมของส่วนควบคุมแรงดันบัสไฟตรงที่ใช้ในการออกแบบ

จากบล็อกไดอะแกรมจะพบว่ามีส่วนของการถอดรากที่สองซึ่งเป็นส่วนที่ไม่เชิงเส้น (nonlinear) ทำให้เกิดความยุ่งยากในการออกแบบ ดังนั้นจึงต้องทำการเปลี่ยนให้อยู่ในรูปแบบที่เป็นเชิงเส้น (linearlization) ในช่วงการทำงานแคบ ๆ โดยจะใช้อนุกรมเทย์เลอร์ถึงอันดับที่ 1 ในการประมาณการถอดรากที่สองให้เป็นความสัมพันธ์เชิงเส้น ณ จุดทำงานที่ $v_{dc}$= 350 V. หรือ $x_0 = 350^2$ $V^2$ ซึ่งสามารถแสดงดังนี้คือ

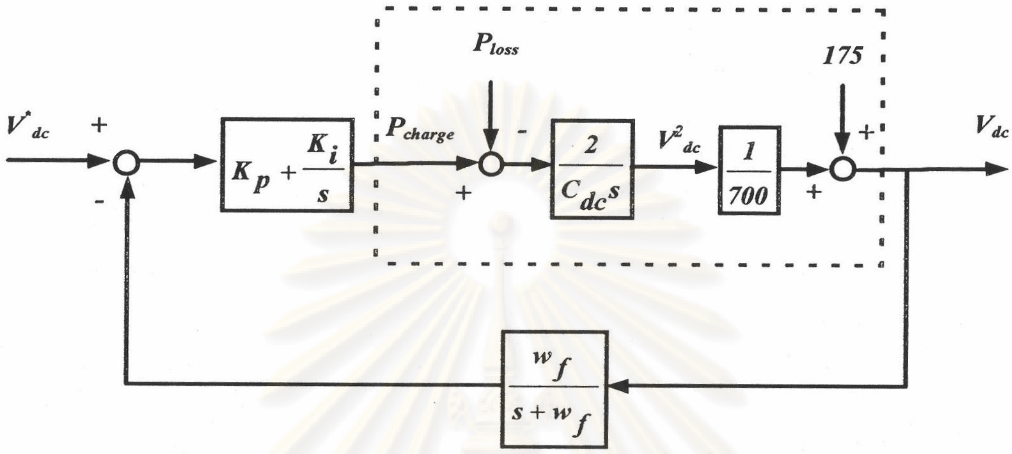
$$\begin{aligned} y(x)=\sqrt{x}=\sqrt{x_0+\Delta x} &\approx \sqrt{x_0}+\left.\frac{d\sqrt{x}}{dx}\right|_{x=x_0}\cdot\Delta x \\ &\approx \sqrt{x_0}+\frac{1}{2\sqrt{x_0}}\cdot\Delta x \\ &\approx \sqrt{x_0}+\frac{1}{2\sqrt{x_0}}\cdot(x-x_0) \quad (ข.6) \end{aligned}$$

เมื่อแทนค่า $x_0$= $350^2$ $V^2$ ลงในสมการ (ข.6) จะได้

$$y(x)\approx 350+\frac{1}{700}(x-350^2)$$

$$\approx 175+\frac{1}{700}x \qquad (ข.7)$$

เมื่อทำการประมาณเป็นเชิงเส้นแล้วสามารถเขียนเป็นบล็อกไดอะแกรมได้ดังรูปที่ ข.4 จากบล็อกไดอะแกรมสามารถเขียนฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิดได้ดังสมการ (ข.8)




รูปที่ ข.4 บล็อกไดอะแกรมของส่วนควบคุมแรงดันบัสไฟตรงเมื่อทำการประมาณเป็นเชิงเส้น

$$G_0(s)=(K_p+\frac{K_i}{s})\times(\frac{\omega_f}{s+\omega_f})\times(\frac{1}{350C_{dc}s}) \qquad (ข.8)$$

เมื่อแทนค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของระบบดังต่อไปนี้คือ $C_{dc}$ = 1260 μF , $\omega_f = 100\pi$ rad./s. จะได้ดังสมการ(ข.9)

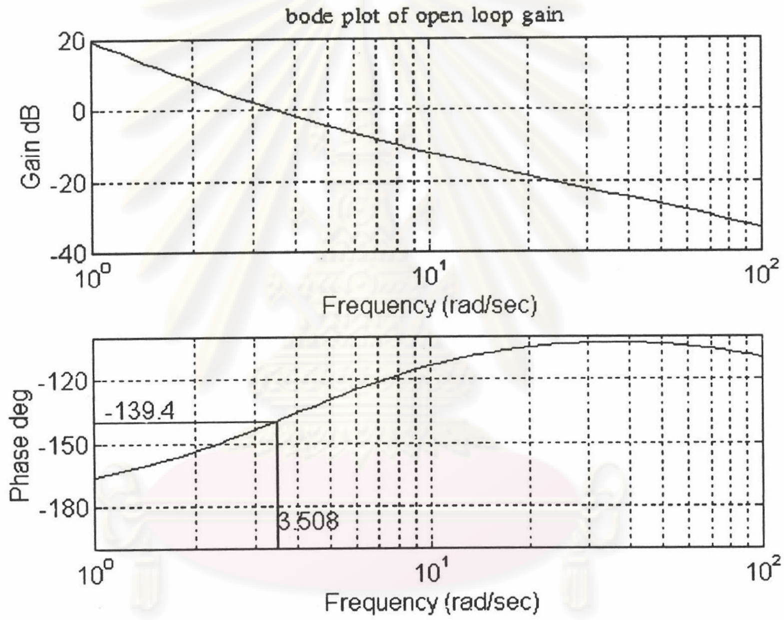
$$G_0(s)=\frac{712.38}{s(s+314.16)}\times(K_p+\frac{K_i}{s}) \qquad (ข.9)$$

เมื่อพิจารณาในเรื่องของความเร็วในการตอบสนองแล้วเราไม่ควรออกแบบวงรอบควบคุมแรงดันบัสไฟตรงให้มีความเร็วในการตอบสนองถึงย่านความถี่ของฮาร์มอนิกเพราะจะทำให้กำลังงานรีแอกทีฟเนื่องจากกระแสฮาร์มอนิกไม่สามารถไหลเข้าสู่วงจรกรองแอกทีฟได้ ซึ่งจะทำให้วงจรกรองแอกทีฟไม่ชดเชยฮาร์มอนิกในส่วนนี้ด้วย จากเหตุผลดังกล่าวในงานวิจัยนี้จึงออกแบบให้วงรอบการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงมีค่าความเร็วในการตอบสนองประมาณ 1.5 วินาที ซึ่งทำได้โดยเลือกความถี่ตัดข้าม (cross over frequency) $\omega_0$ = 3.5 rad/s. และเลือกค่าความถี่หักมุม (cut-off frequency) ของ PI ($K_i/K_p$) $\omega_c$ = 4 rad/s. ซึ่งเป็นค่าที่ให้

ช่วงปลอดภัยเชิงเฟส (phase margin) ที่เพียงพอสำหรับเสถียรภาพในการควบคุม ดังนั้นเราจะได้ว่า

$$\left|G_0(j\omega_0)\right| = \left|\frac{712.38}{(j3.5)(j3.5+314.16)} \times (K_p + \frac{4K_p}{j3.5})\right| = 1 \qquad (\text{ข}.10)$$

จากสมการ (ข.10) ทำให้สามารถหาค่า $K_p$ ได้เท่ากับ 1.02 และ $K_i = 4K_p = 4.08$ จากค่า $K_p$ และ $K_i$ ที่ได้เมื่อทำการเขียนแผนภูมิโบเดของฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิดดังรูปที่ ข.5 จะสามารถหาค่าช่วงปลอดภัยเชิงอัตราขยาย (gain margin) และช่วงปลอดภัยเชิงเฟสของระบบได้เป็น อนันต์ และ 40.6 องศา ตามลำดับ

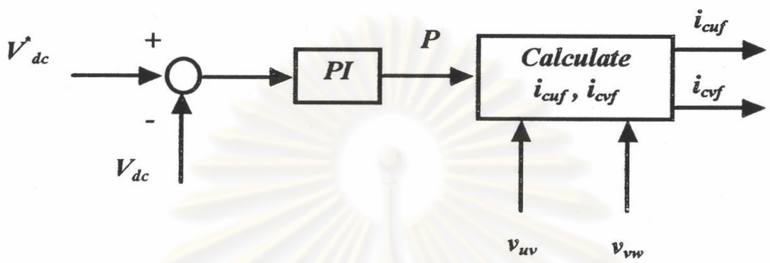



รูปที่ ข.5 ช่วงปลอดภัยเชิงอัตราขยายและช่วงปลอดภัยเชิงเฟสของระบบควบคุมแรงดันบัสไฟตรง

เนื่องจากสัญญาณที่ได้ออกมาจากตัวควบคุม PI จะเป็นค่ากำลังงาน P แต่ในทางปฏิบัติเราต้องการสัญญาณที่ออกมาเป็นคำสั่งกระแส ($i_{cf}$) ดังนั้นจึงต้องทำการเปลี่ยนค่ากำลังงาน P ไปเป็นคำสั่งกระแสโดยอาศัยสมการ (ข.11) และสามารถเขียนบล็อกไดอะแกรมแสดงส่วนการควบคุมแรงดันบัสไฟตรงได้ดังรูปที่ ข.6

$$\begin{bmatrix} i_{cuf} \\ i_{cvf} \\ i_{cwf} \end{bmatrix} = \left(\frac{1}{(v_{uv}+v_{vw})^2 - v_{uv}v_{vw}}\right) \begin{bmatrix} v_{uv} + \frac{v_{vw}}{2} \\ -\frac{v_{uv}}{2} + \frac{v_{vw}}{2} \\ -\frac{v_{uv}}{2} - \frac{v_{vw}}{2} \end{bmatrix} \cdot P \qquad (ข.11)$$

**เมื่อ $v_{uv}$ และ $v_{vw}$ คือแรงดันสายระหว่างเฟส u กับ v และ ระหว่างเฟส v กับ w ตามลำดับ**




รูปที่ ข.6 บล็อกไดอะแกรมแสดงส่วนควบคุมแรงดันบัสไฟตรงที่ใช้งานจริง

# ประวัติผู้เขียน

นายสรรค์ธิพงษ์ โฆษิตเกษม เกิดเมื่อวันที่ 15 ธันวาคม พ.ศ. 2516 ที่เขตบางขุนเทียน กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต (เกียรตินิยมอันดับสอง) สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (ไฟฟ้ากำลัง) จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2537 และ ได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (อิเล็กทรอนิกส์กำลัง) ณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2538