

## รายการอ้างอิง



### ภาษาไทย

- จิตรรา จูฑา. เฟสลิ้ออกรูปและการตรวจจับภาวะการทำงานโคคสำหรับอุปกรณั้แปลงพลังงานจากเซลล์แสงอาทิตย์. โครงการงานสำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
- วรวิทย์ ชัยชาวุฒิ , วิจารณ์ หวังคิ และ วุฒิชัย รัชญูธาดา. ชุดจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ โครงการงานสำหรับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2541.

### ภาษาอังกฤษ

- E. T. Schonholzer. “Inverters for utility interactive photovoltaic power plants”. MELECON '89., Mediterranean , 1989 : 16 –20.
- G. J. Vachtsevanos and H. Kang. “Simulation studies of islanded behavior of grid-connected photovoltaic systems”. Energy Conversion, IEEE Transactions on Volume: 4 2 , June 1989 : 177 –183.
- H. Kobayashi et al., “Method for preventing islanding phenomenon on utility grid with a number of small scale PV systems”. Photovoltaic Specialists Conference, Conference Record of the Twenty Second IEEE , vol. 1,1991 : 695 –700.
- H. Sugimoto and H. Dong. “A New Scheme For Maximum Photovoltaic Power Tracking Control”. Proceeding of PCC-Nagaoka'97,1997 : 691-696.
- I. Takahashi et al., “Development of a simple photovoltaic system for interconnection of utility power system”. Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial Growth, Proceedings of the 1996 International Conference on Volume: 1 , 1995 : 88 –93.
- K. H. Hussein and G. Zhao. “Maximum Photovoltaic Power Tracking :An Algorithm for Rapidly Changing Atmosphier Condition”. IEE Prog.-G, vol. 142 , no. 1 , Jan.1995 : 59-64.

- T. Kiyoshi and K. Hiromu . “A development of compact and reliable protective control unit for grid connected small residential PV systems”. 1994 IEEE First World Conference on Volume: 1 , 1994 : 1081 –1084.
- N. Mohan, T. Underland and W. P. Robin . Power electronics: Converters, applications, and design. Singapore: John Wiley & sons, 1989.
- T. Ishida et al., “Anti-islanding protection using a twin-peak band-pass filter in interconnected PV systems and substantiating evaluations”. 1994 IEEE First World Conference on Volume: 1 , 1994 : 1077 –1080.
- W. J. A. Teulings et al., “A new maximum power point tracking system ”. PESC '93 Record., 24th Annual IEEE , 1993 : 833 –838.
- Y. Masahide et al., “Development of a New Utility-Connected Photovoltaic Inverter LINE BACK”. Telecommunications Energy Conference, 1994. INTELEC '94., 16th International , 1994 : 676 –682 .

ภาคผนวก

## ภาคผนวก ก

### ลักษณะสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์

#### ก.1 ลักษณะสมบัติของกระแสกับแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

เซลล์แสงอาทิตย์มีคุณลักษณะสมบัติของกระแสไม่เป็นเชิงเส้นกับแรงดัน จุดทำงานขึ้นกับ โหลด ปริมาณแสงและอุณหภูมิแวดล้อม ความสัมพันธ์ของกระแส  $i_{pv}$  และแรงดันคร่อมเซลล์แสง-อาทิตย์  $v_{pv}$  แสดงได้ดังสมการที่ ก.1 และแสดงเป็นกราฟได้ดังรูปที่ ก.1

$$i_{pv} = n_p [I_{ph} - I_{rs} (\exp(\frac{qV_{pv}}{kTAn_s}) - 1)] \quad (ก.1)$$

โดยที่  $n_p$  คือ จำนวนเซลล์ที่ต่อขนานกัน

$n_s$  คือ จำนวนเซลล์ที่ต่ออนุกรมกัน

$I_{ph}$  คือ กระแสจากการกำเนิดของแสง (ขึ้นกับปริมาณแสงและอุณหภูมิ)

$I_{rs}$  คือ กระแสอิ่มตัวย้อนกลับ (ขึ้นกับอุณหภูมิ)

$q$  คือ ค่าประจุ มีค่าเท่ากับ  $1.6 \cdot 10^{-19}$  C

$k$  คือ ค่าคงที่โบลต์ซมันน์ มีค่าเท่ากับ  $1.38 \cdot 10^{-23}$  J/K

$A$  คือ ค่าตัวประกอบของรอยต่อ P-N

$T$  คือ อุณหภูมิหน่วยเป็นเคลวิน

#### ก.2 ลักษณะสมบัติของกำลังกับแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

จากความสัมพันธ์ที่ไม่เป็นเชิงเส้นของกระแสกับแรงดันในสมการที่ ก.1 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังกับแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์ในสมการที่ ก.2 จึงไม่เป็นเชิงเส้น ด้วย

$$P_{pv} = i_{pv} v_{pv} \quad (ก.2)$$

เซลล์แสงอาทิตย์จะจ่ายกำลังออกสูงสุด ณ จุดทำงานที่มีค่าอนุพันธ์ของกำลังเทียบกับแรงดัน เท่ากับศูนย์ ซึ่งเราสามารถหาค่าของอนุพันธ์ของกำลังเทียบกับแรงดันได้ดังนี้

$$\frac{dP_{pv}}{dv_{pv}} = i_{pv} + v_{pv} \frac{di_{pv}}{dv_{pv}} \quad (ก.3)$$

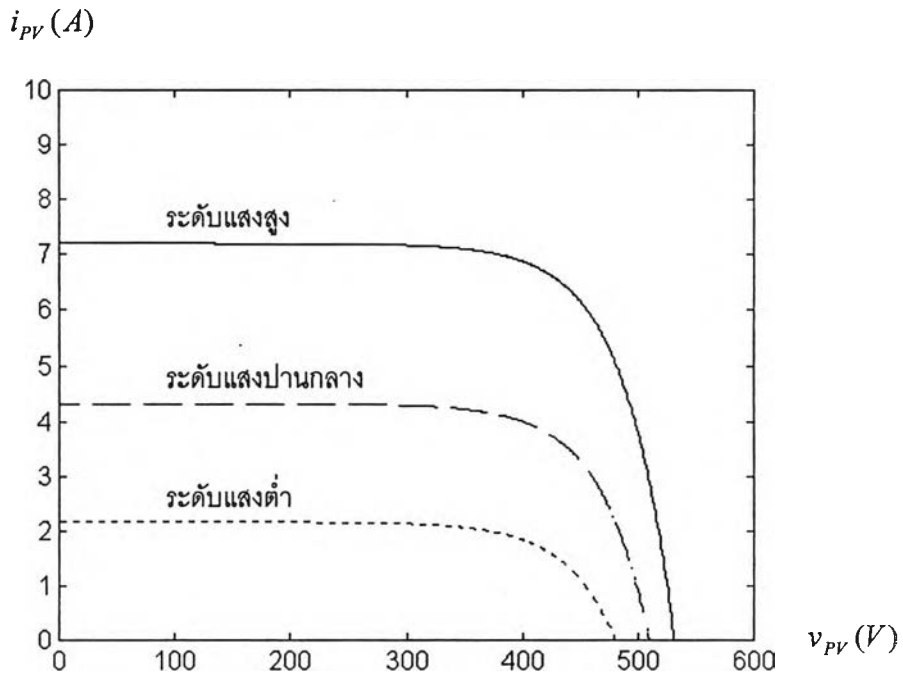
จากสมการที่ ก.1 เราสามารถแทนค่าอนุพันธ์ของกระแส เทียบกับแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์และเขียนสมการได้เป็น

$$\frac{dp_{PV}}{dv_{PV}} = i_{PV} - K_{PV} v_{PV} \quad (ก.4)$$

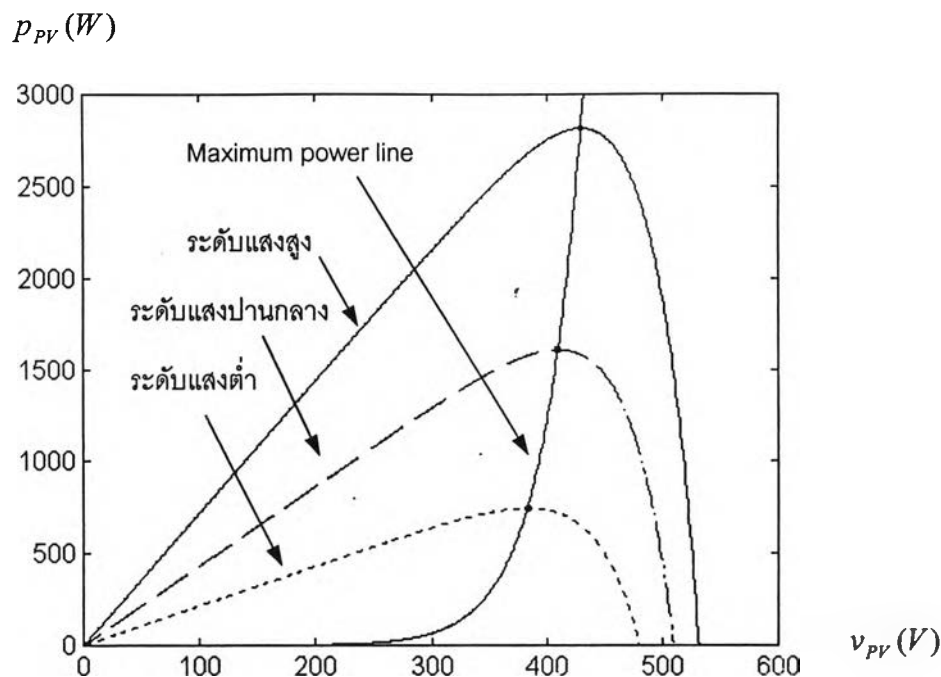
โดยที่ 
$$K_{PV} = -\frac{di_{PV}}{dv_{PV}} = n_p I_{rs} \exp\left(\frac{qv_{PV}}{kTAn_s}\right) \times \frac{q}{kTAn_s} \quad (ก.5)$$

เราสามารถหาผลเฉลยของสมการที่ ก.4 ที่เท่ากับศูนย์เพื่อหาจุดกำลังสูงสุด และเมื่อนำผลเฉลยแทนค่าลงในสมการที่ ก.2 จะเห็นได้ว่าแรงดันคร่อมเซลล์แสงอาทิตย์ ณ จุดกำลังสูงสุดไม่ได้คงที่แต่ขึ้นกับกำลังที่เซลล์แสงอาทิตย์จ่ายออกมาที่ระดับแสงต่างๆ กัน ความสัมพันธ์ของกำลังสูงสุดเทียบกับแรงดันเป็นดังสมการที่ ก.6 และแสดงเป็นกราฟได้รูปที่ ก.2

$$p_{\max} = K_{PV} \times v_{PV}^2 \quad (ก.6)$$



รูปที่ ก.1 ความสัมพันธ์ของกระแสกับแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์



รูปที่ ก.2 ความสัมพันธ์ของกำลังกับแรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์

### ก.3 แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กของเซลล์แสงอาทิตย์

เมื่อเราพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของสัญญาณขนาดเล็กๆ รอบๆ จุดทำงานหนึ่ง เราสามารถประมาณคุณสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ให้เป็นเชิงเส้นเพื่อความสะดวกในการวิเคราะห์และออกแบบวงจรควบคุม โดยเราจะหาแบบจำลองของระบบใน 2 ลักษณะดังนี้

#### 1) แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กระหว่างกระแสกับแรงดัน

เราสามารถประมาณการเปลี่ยนแปลงสัญญาณขนาดเล็กของกระแสกับแรงดันด้วยค่าอนุพันธ์ของกระแสเทียบกับแรงดันดังแสดงในสมการที่ ก.7 และจากสมการ ก.5 เราสามารถหาผลการเปลี่ยนแปลงขนาดเล็กของแรงดันคร่อมเซลล์แสงอาทิตย์ต่อกระแสได้ดังแสดงในสมการที่ ก.8

$$\frac{\Delta i_{PV}}{\Delta v_{PV}} \approx \frac{di_{PV}}{dv_{PV}} \quad (\text{ก.7})$$

$$\Delta i_{PV} = -K_{PV} \Delta v_{PV} \quad (\text{ก.8})$$

2) แบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กของอนุพันธ์ของกำลังเทียบกับแรงดัน

เราสามารถประมาณการเปลี่ยนแปลงสัญญาณขนาดเล็กของอนุพันธ์ของกำลังเทียบกับแรงดันด้วยค่าอนุพันธ์ของอนุพันธ์ของกำลังเทียบกับแรงดันดังแสดงในสมการที่ ก.9

$$\frac{\Delta\left(\frac{dp_{PV}}{dv_{PV}}\right)}{\Delta v_{PV}} \approx \frac{d\left(\frac{dp_{PV}}{dv_{PV}}\right)}{dv_{PV}} \quad (\text{ก.9})$$

เมื่อแทนสมการที่ ก.4 และ ก.5 ลงใน สมการ ก.9 จะได้

$$\frac{\Delta\left(\frac{dp_{PV}}{dv_{PV}}\right)}{\Delta v_{PV}} \approx \frac{d(i_{PV} - K_{PV}v_{PV})}{dv_{PV}} = -2K_{PV} - \frac{dK_{PV}}{dv_{PV}} \quad (\text{ก.10})$$

จากการแทนสมการ ก.5 ลงใน ก.10 เราสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างการเปลี่ยนแปลงสัญญาณขนาดเล็กของแรงดันคร่อมเซลล์แสงอาทิตย์กับอนุพันธ์ของกำลังเทียบกับแรงดันได้ดังแสดงในสมการที่ ก.11

$$\Delta\left(\frac{dp_{PV}}{dv_{PV}}\right) = -(2K_{PV} + K_d)\Delta v_{PV} \quad (\text{ก.11})$$

โดยที่

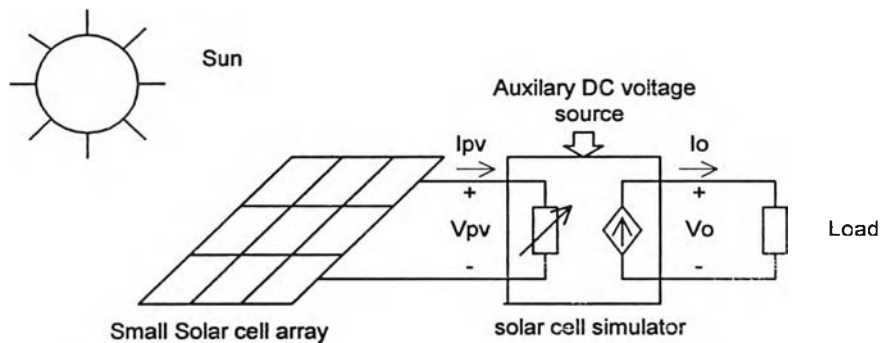
$$K_d = \frac{dK_{PV}}{dv_{PV}} = n_p I_{\pi} \exp\left(\frac{qv_{PV}}{kTAn_s}\right) \times \left(\frac{q}{kTAn_s}\right)^2 \quad (\text{ก.12})$$

ภาคผนวก ข

ตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

ข.1 แนวคิดและหลักการทำงาน

ตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ที่ดีต้องมีลักษณะสมบัติของกระแสกับแรงดันที่ขึ้นกับอุณหภูมิ ปริมาณแสงและโหลดเหมือนกับเซลล์แสงอาทิตย์จริง รูปที่ ข.1 แสดงแผนภาพบล็อกของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ ซึ่งประกอบด้วยแผงเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิงขนาดเล็ก วงจรอิเล็กทรอนิกส์กำลัง ซึ่งทำหน้าที่ขยายกำลัง และ โหลดเทียมของแผงเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิงที่สามารถปรับเปลี่ยนตาม โหลดจริง



รูปที่ ข.1 แผนภาพบล็อกของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

ลักษณะสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิงจะถูกถ่ายทอดไปยังตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการควบคุมอัตราขยายกระแสและอัตราขยายแรงดันให้คงที่ตามค่ากำหนดดังแสดงเป็นแผนภาพบล็อกในรูปที่ ข.2 การทำงานเริ่มจากการวัดแรงดันด้านออก  $V_o$  ผ่านอัตราลดทอน  $1/K_1$  เพื่อเป็นแรงดันอ้างอิงในการควบคุมแรงดันคร่อมเซลล์แสงอาทิตย์ โดยการปรับโหลดเทียมของเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิงจนได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ ข.1

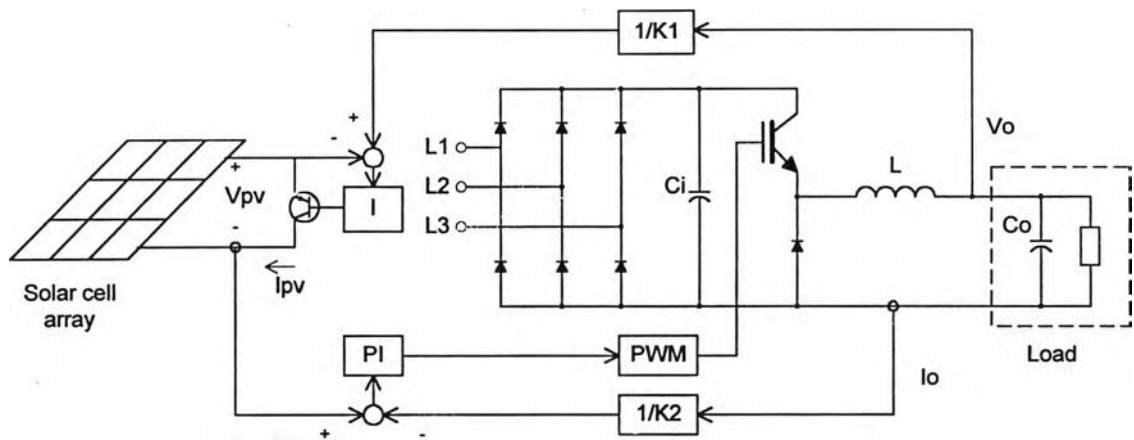
$$V_{PV} = \frac{1}{K_1} \cdot V_o \tag{ข.1}$$

ที่แรงดันคร่อมเซลล์แสงอาทิตย์  $V_{PV}$  เซลล์แสงอาทิตย์จะจ่ายกระแส  $I_{pv}$  ค่าหนึ่งออกมาตามลักษณะสมบัติของเซลล์แสงอาทิตย์ กระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จะเป็นกระแสอ้างอิงในการควบคุมกระแสด้านออก  $I_o$  ที่ถูกตรวจจับผ่านด้วยอัตราลดทอน  $1/K_2$  ตัวควบคุม PI จะปรับเปลี่ยนค่าวัฏจักรงานการสวิตช์ของวงจรถอนระดับเพื่อให้ได้ความสัมพันธ์ดังสมการที่ ข.2

$$I_o = K_2 I_{pv} \tag{ข.2}$$



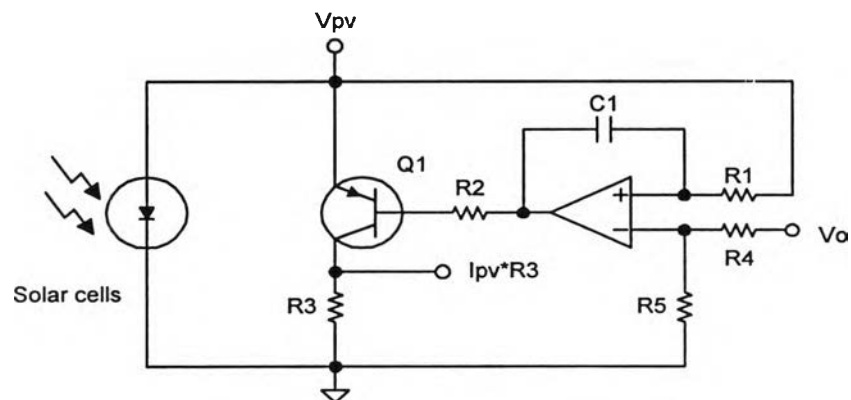
ความสัมพันธ์ของแรงดันและกระแสด้านออกของวงจรทอนระดับจึงมีคุณสมบัติเหมือนเซลล์แสงอาทิตย์กำลังสูงที่เกิดจากการนำเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิงมาต่อเพิ่มจำนวนแบบต่ออนุกรมเป็น  $K_1$  เท่า และต่อขนานเป็น  $K_2$  เท่า



รูปที่ ข.2 แผนภาพบล็อกการควบคุมของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

## ข.2 การควบคุมแรงดันคร่อมเซลล์แสงอาทิตย์

รูปที่ ข.3 แสดงถึงวงจรควบคุมแรงดันคร่อมเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง ทราานซิสเตอร์ Q1 จะทำหน้าที่เสมือนโวลต์ปรับค่าได้ ในสถานะอยู่ตัวกระแสคอลเลกเตอร์ของ Q1 จะเท่ากับกระแสที่จ่ายออกจากเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิงและถูกควบคุมโดยการปรับเปลี่ยนค่ากระแสเบสที่ได้จากตัวควบคุมอินทิเกรเตอร์ ตัวควบคุมจะปรับเปลี่ยนกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์จนให้แรงดันคร่อมเซลล์แสงอาทิตย์  $V_{pv}$  เท่ากับแรงดันอ้างอิงที่ได้มาจากการตรวจจับแรงดันด้านออก  $V_o$  ผ่านอัตราลดทอน  $K_1$  กระแสของเซลล์แสงอาทิตย์ที่ได้จะถูกตรวจจับผ่านแรงดันคร่อม  $R_3$  เพื่อใช้เป็นกระแสอ้างอิงในการควบคุมกระแสด้านออกของวงจรทอนระดับต่อไป



รูปที่ ข.3 วงจรควบคุมแรงดันคร่อมเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง

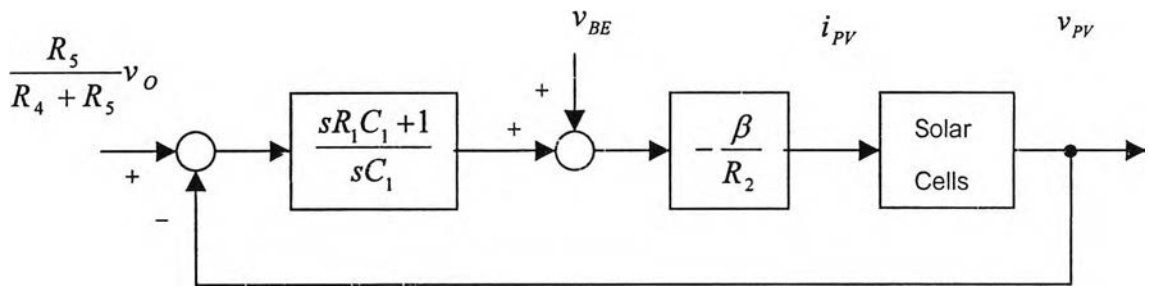
จาก KVL ของวงรอบกระแสเบส ในสมการที่ ข.3 และ ข.4 เราสามารถหาความสัมพันธ์ของกระแสเบสได้ดังสมการที่ ข.5

$$v_{BE} + i_B R_2 + \left( R_1 + \frac{1}{sC_1} \right) i_{R1} = 0 \quad (\text{ข.3})$$

$$i_{R1} = \left( \frac{R_5}{R_4 + R_5} v_O - v_{PV} \right) / R_1 \quad (\text{ข.4})$$

$$i_B = - \left[ v_{BE} + \left( R_1 + \frac{1}{sC_1} \right) \left( \frac{R_5}{R_4 + R_5} v_O - v_{PV} \right) / R_1 \right] / R_2 \quad (\text{ข.5})$$

เนื่องจาก  $R_1$  มีค่าสูง เราจึงประมาณค่ากระแสที่เซลล์แสงอาทิตย์จ่ายออกมาด้วยค่ากระแสคอลเลกเตอร์ของ Q1 ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $\beta i_B$  เมื่อ  $\beta$  คืออัตราขยายกระแสของทรานซิสเตอร์ และสามารถแสดงแผนภาพบล็อกของการควบคุมแรงดันคร่อมเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิงได้ดังรูปที่ ข.4



รูปที่ ข.4 แผนภาพบล็อกของการควบคุมแรงดันคร่อมเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง

เมื่อเราแทนแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กของเซลล์แสงอาทิตย์ตั้งในภาคผนวก ก ลงในแผนภาพบล็อก ข.4 เราสามารถหาอัตราขยายวงรอบเปิดและฟังก์ชันการโอนย้ายดังสมการที่ ข.6 และ ข.7 ตามลำดับ

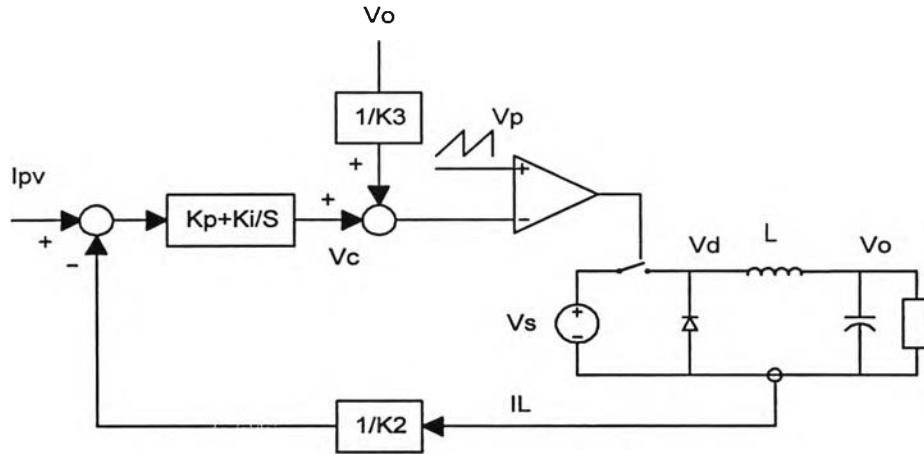
$$\text{open loop gain} = \left( \frac{\beta}{R_2 K_{PV}} \right) \left( \frac{sR_1 C_1 + 1}{sR_1 C_1} \right) \quad (\text{ข.6})$$

$$\frac{\Delta v_{PV}}{\Delta v_O / K_1} = \frac{sR_1 C_1 + 1}{sR_1 C_1 (R_2 K_{PV} / \beta + 1) + 1} \quad (\text{ข.7})$$

$$\text{โดยที่ } K_1 = \frac{R_5}{R_4 + R_5} \quad (\text{ข.8})$$

### ข.3 การควบคุมกระแสด้านออก

เราใช้การแปรค่าวัฏจักรงาน  $d$  เพื่อควบคุมค่ากระแสในตัวเหนี่ยวนำของวงจรทอนระดับ ดังแสดงเป็นแผนภาพบล็อกในรูปที่ ข.5



รูปที่ ข.5 แผนภาพบล็อกของวงจรควบคุมกระแสด้านออก

เราจะหาแบบจำลองของระบบโดยพิจารณากรณีกระแสในตัวเหนี่ยวนำต่อเนื่อง ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ของแรงดันเฉลี่ยหลังสวิตช์ดังสมการที่ ข.9 และแรงดันตกคร่อมตัวเหนี่ยวนำดังสมการที่ ข.10

$$v_d = d \cdot v_s \quad (\text{ข.9})$$

$$v_d - v_o = L \frac{di_L}{dt} \quad (\text{ข.10})$$

โดยที่  $d$  คือค่าวัฏจักรงาน

ค่าวัฏจักรงานจะถูกกำหนดตามสมการ ข.11 โดยการเปรียบเทียบสัญญาณคลื่นพาหะฟันเลื่อยที่มีค่ายอด  $v_p$  กับสัญญาณ  $v_c$  ที่มาจากตัวควบคุมPI และสัญญาณจากการป้อนไปหน้าของแรงดัน  $v_o$  ด้วยอัตราลดทอน  $1/K_3$  เพื่อลดผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงของโหลด

$$d = \frac{v_c + v_o / K_3}{v_p} \quad (\text{ข.11})$$

จากสมการที่ ข.9 - ข.11 เราสามารถหาสมการของแบบจำลองสัญญาณขนาดเล็กได้ดังนี้

$$\frac{V_s}{V_p} \Delta v_c + \left( \frac{V_s}{K_3 V_p} - 1 \right) \Delta v_o + \left( \frac{V_c}{V_p} + \frac{V_o}{K_3 V_p} \right) \Delta v_s = L \frac{d \Delta i_L}{dt} \quad (\text{ข.12})$$

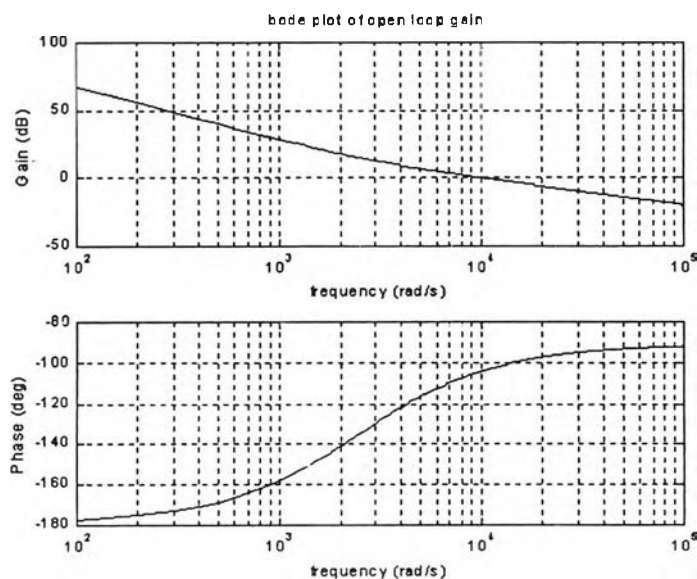
เราจะกำหนดค่า  $K_3$  ให้เท่ากับ  $V_s/V_p$  เพื่อเป็นการกำจัดผลของการเปลี่ยนแปลง  $\Delta v_o$  ต่อ  $\Delta i_L$  และเราจะเลือกค่าตัวเก็บประจุด้านเข้า  $C_i$  ในรูปที่ ข.4 ให้มีขนาดใหญ่พอที่จะลดขนาดของระลอกคลื่นของแรงดันด้านเข้า  $V_s$  ดังนั้นเราจึงสามารถละเลยผลของการเปลี่ยนแปลงแรงดันด้านเข้า  $\Delta v_c$  ได้ เราสามารถหาสมการของอัตราขยายวงรอบเปิดซึ่งใช้ในการออกแบบการควบคุมแบบ PI ได้ดังสมการที่ ข.13

$$\text{open loop gain} = \left( K_p + \frac{K_I}{s} \right) \left( \frac{V_s}{K_2 V_p L s} \right) \quad (\text{ข.13})$$

การออกแบบตัวควบคุมจะพิจารณาจากอัตราขยายวงรอบเปิดในสมการที่ ข.13 เราต้องการให้มีความเร็วในการตอบสนองประมาณ 1 ms (ต่ำกว่าคาบสายกำลัง 20 เท่า) ซึ่งทำได้โดยการเลือกค่าความถี่ตัดข้าม  $\omega_c = 10000 \text{ rad/s}$  และเลือกความถี่หักมุมของตัวควบคุม PI คือ  $K_I/K_p = \omega_c/4 = 2500 \text{ rad/s}$  ซึ่งเป็นค่าที่ให้ช่วงปลอดภัยเชิงเฟส (Phase margin) ที่เพียงพอสำหรับเสถียรภาพในการควบคุม ดังนั้นเราจะได้ว่า

$$|G(j\omega_c)| = \left| K_p \cdot \left( 1 + \frac{2500}{j10000} \right) \cdot \left( \frac{540}{j82 \cdot 2.5 \cdot 1.4m \cdot 10000} \right) \right| = 1 \quad (\text{ข.14})$$

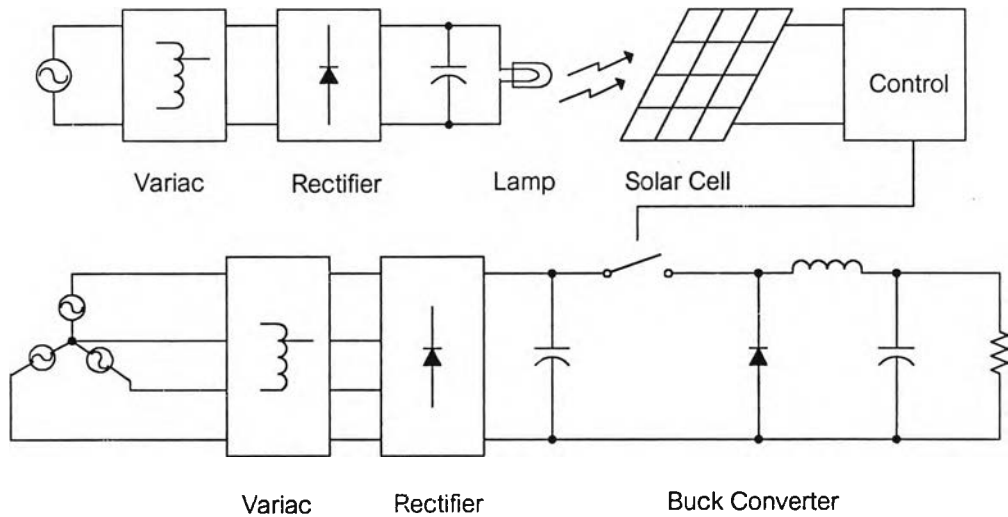
จากสมการที่ ข.14 ทำให้สามารถหาค่า  $K_p = 5.2$  และ  $K_I = 13000$  จากค่า  $K_p$  และ  $K_I$  ที่ได้เมื่อทำการเขียนแผนภูมิโบเดของฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิดดังรูปที่ ข.6 ค่าช่วงปลอดภัยเชิงขนาดจะเป็นอนันต์ และช่วงปลอดภัยเชิงเฟสจะเป็น 76 องศาตามลำดับ



รูปที่ ข.6 แผนภูมิโบเดของฟังก์ชันโอนย้ายวงรอบเปิดของระบบควบคุมกระแส

#### ข.4 การทดสอบระบบ

ในวงจรต้นแบบแหล่งจ่ายไฟตรง  $V_s$  จะสร้างมาจากวงจรเรียงกระแสสามเฟสแบบเต็มคลื่น โดยมีวารีแอกปรับค่าไฟสลับด้านเข้าให้ได้แรงดันไฟตรงประมาณ 540 V เพื่อจ่ายให้แก่วงจรทอนระดับ ดังแสดงในรูปที่ ข.7



รูปที่ ข.7 แผนภาพบล็อกชุดทดสอบตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

การเปลี่ยนระดับแสงของเซลล์แสงอาทิตย์ ทำได้โดยการปรับค่าแรงดันไฟตรงคร่อมหลอดไฟฟ้าแบบไส้ โดยใช้วารีแอกและวงจรเรียงกระแสแทนการใช้ไฟจากการไฟฟ้าโดยตรง ทั้งนี้เพื่อไม่ให้มีระลอกคลื่นที่จากความถี่ 100 Hz. ปนอยู่ในปริมาณแสง ค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในวงจรทดสอบแสดงในตารางที่ ข.1

ตารางที่ 1 ค่าขององค์ประกอบต่างๆ ของระบบ

L	1.4 mH	1/R1C1	5000 (rad/s)
Ci	950uF	$\beta/R2$	1000/18k
Co	110uF	Vp	2.5 V
K1	60	Kp	5.2
K2	82	Ki	13000
K3	216	Vs	540V

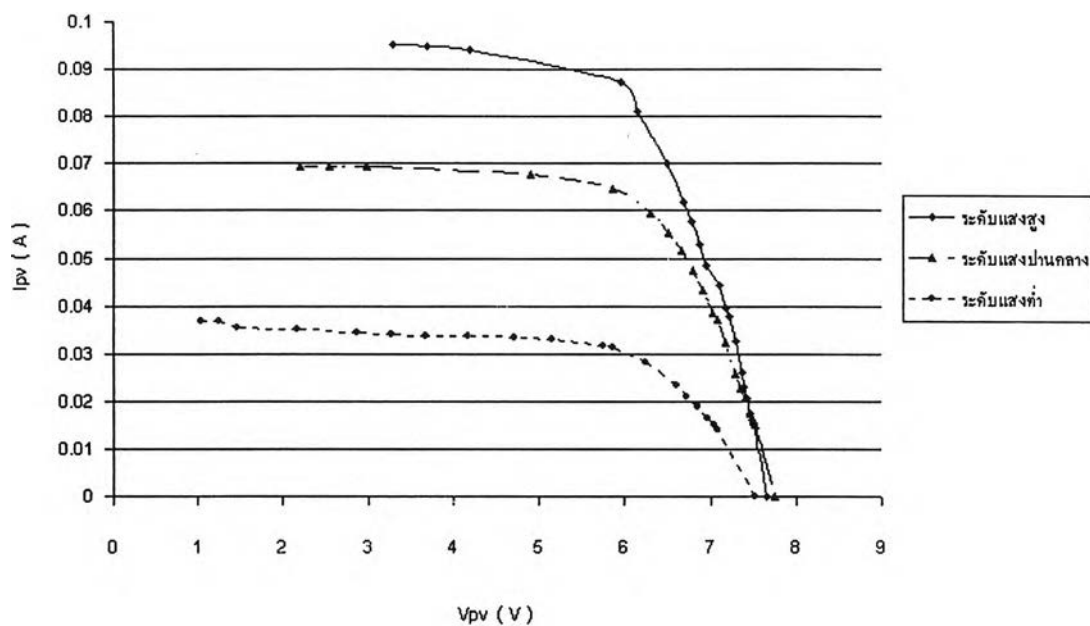
## ข.5 ผลการทดสอบ

รูปที่ ข.8 แสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะในภาวะอยู่ตัวของกระแสและแรงดันด้านออกของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์เมื่อต่อโหลดแบบความต้านทาน เปรียบเทียบกับคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิงในรูปที่ ข.9 จะเห็นได้ว่ารูปร่างที่ได้มีความใกล้เคียงกันในช่วงแรงดันค่าต่ำจนถึงแรงดันเปิดวงจรที่ระดับแสงต่างๆ

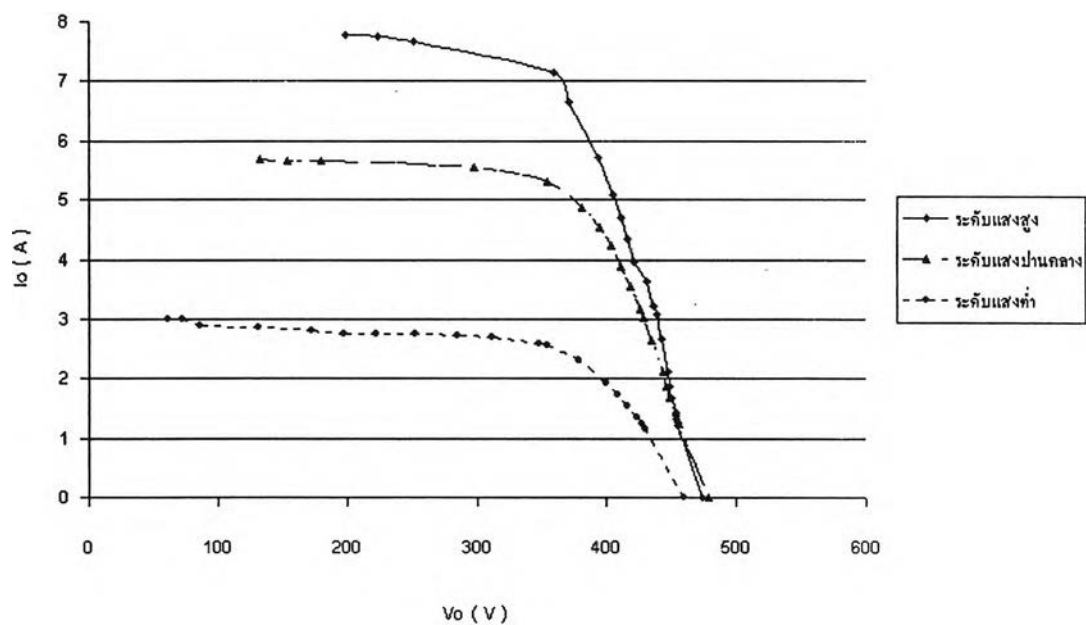
รูปที่ ข.10 แสดงให้เห็นถึงคุณลักษณะของกำลังและแรงดันด้านออกของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์เปรียบเทียบกับคุณลักษณะของเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิงในรูปที่ ข.11 จะเห็นได้ว่ารูปร่างที่ได้มีความใกล้เคียงกัน ทั้งนี้ระบบนี้ได้ถูกออกแบบไว้สำหรับใช้งานกับวงจรอินเวอร์เตอร์ แรงดันที่จุดทำงานที่ให้กำลังสูงสุดจึงอยู่ในช่วง 350 – 400 โวลต์ กำลังสูงสุดที่ได้มีค่าประมาณ 2.5 กิโลวัตต์

รูปที่ ข.12 แสดงความสัมพันธ์ของแรงดันด้านออกของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์เทียบกับแรงดันคร่อมเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง พบว่ามีอัตราขยายแรงดันประมาณ 60.5 เท่า ซึ่งมีค่าเท่ากับค่าอัตราขยาย  $K_1$  ที่ใช้ โดยมีความคลาดเคลื่อนสูงสุด 2 เปอร์เซ็นต์ รูปที่ ข.13 แสดงความสัมพันธ์ของกระแสด้านออกของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์เทียบกับกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง อัตราขยายกระแสประมาณ 82 เท่า เท่ากับค่าที่ออกแบบไว้คือ  $K_2 = 82$  โดยมีความคลาดเคลื่อนสูงสุด 1 เปอร์เซ็นต์

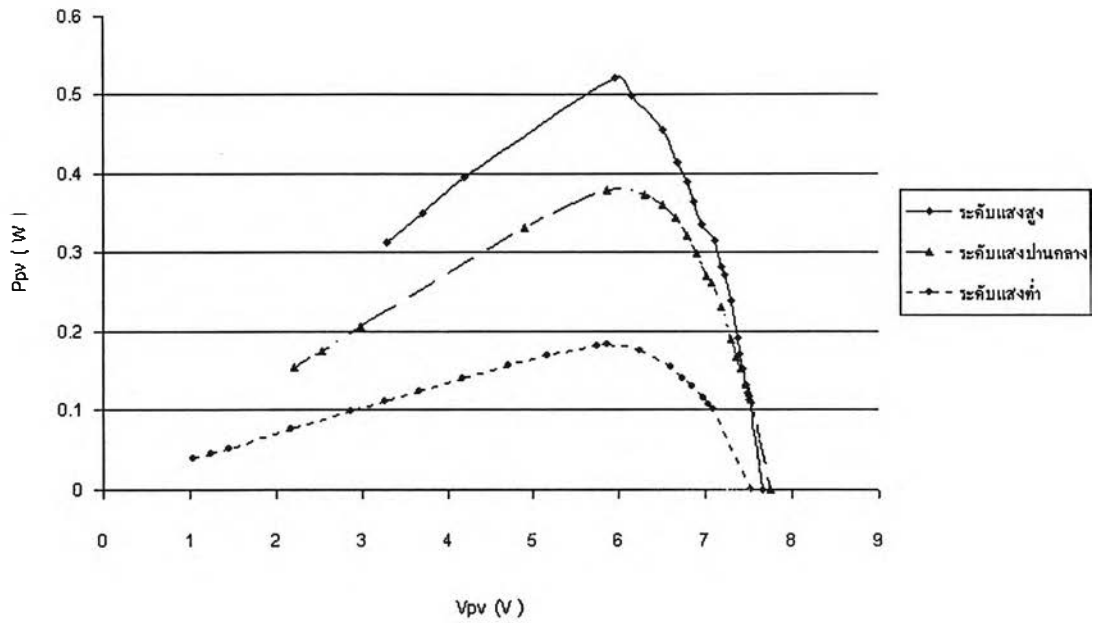
จากผลการทดสอบโดยการเปลี่ยนแปลงโหลดและปริมาณแสงต่างๆ กันแสดงให้เห็นว่า อัตราขยายกระแส อัตราขยายแรงดันของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์เทียบกับเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง เป็นไปตามที่กำหนดและมีค่าค่อนข้างคงตัว



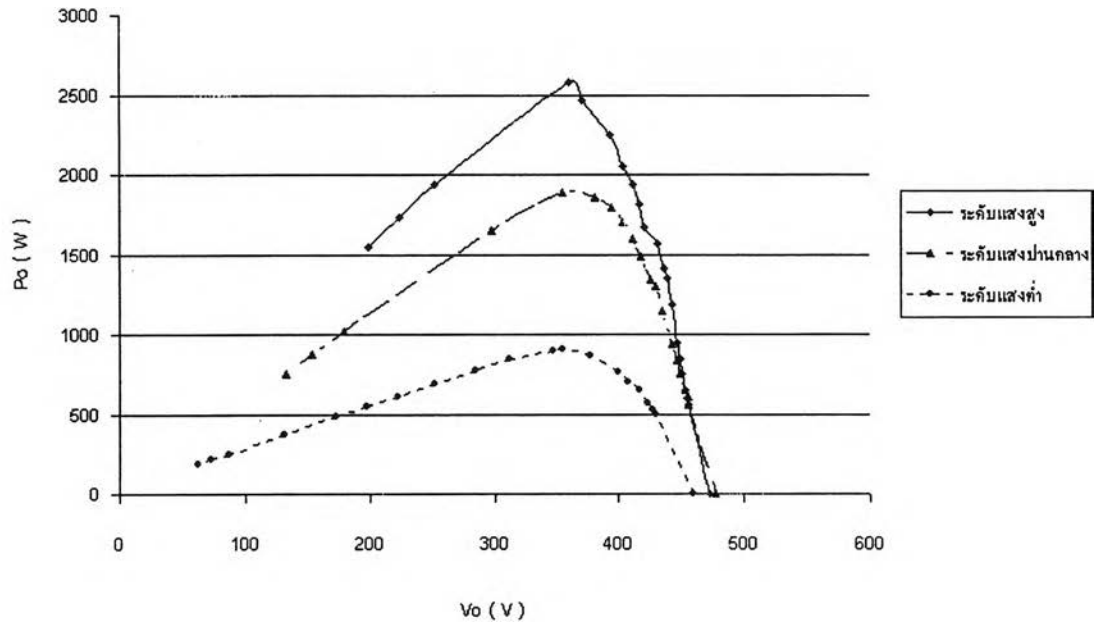
รูปที่ ข.8 คุณลักษณะของกระแส-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง



รูปที่ ข.9 คุณลักษณะของกระแส-แรงดันของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์

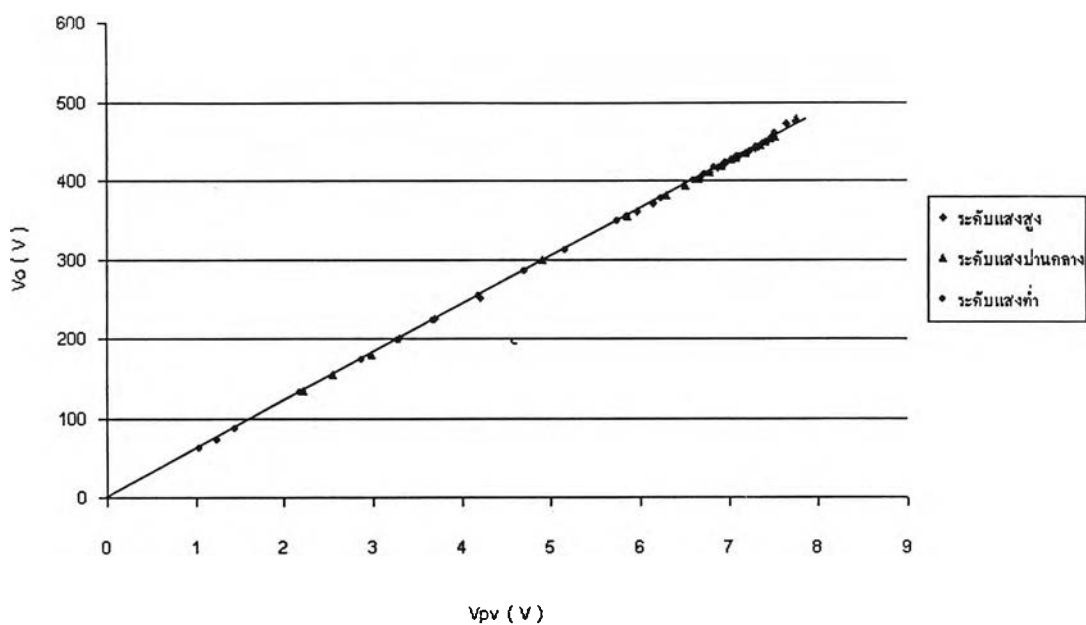


รูปที่ ข.10 คุณลักษณะของกำลัง-แรงดันของเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง

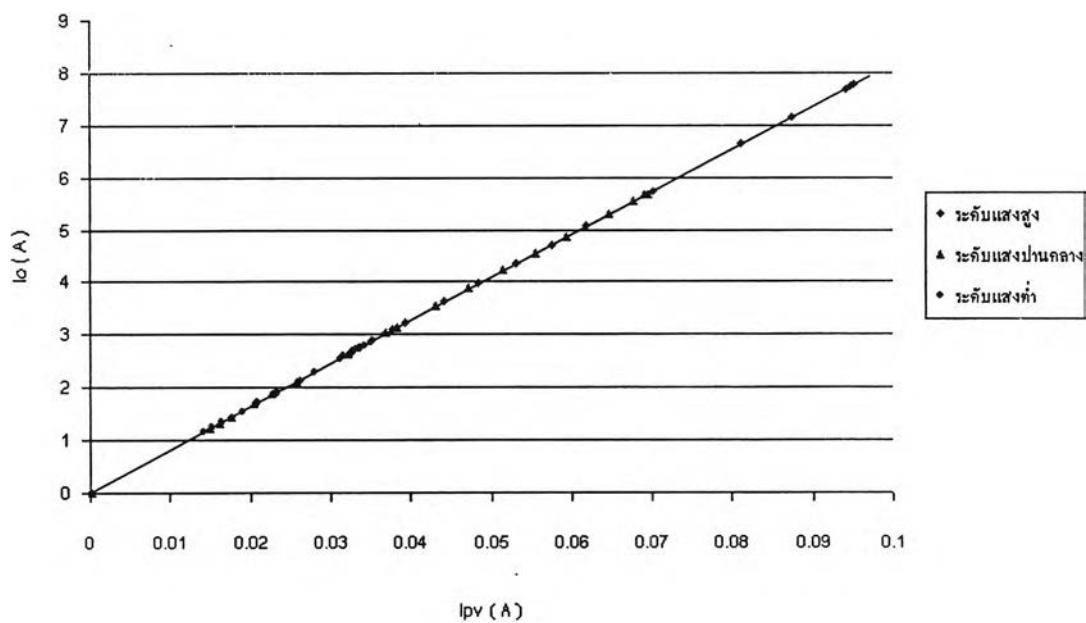


รูปที่ ข.11 คุณลักษณะของกำลัง-แรงดันของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์





รูปที่ ข.12 แรงดันค่านอกของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์  
เทียบกับแรงดันคร่อมเซลล์แสงอาทิตย์อ้างอิง



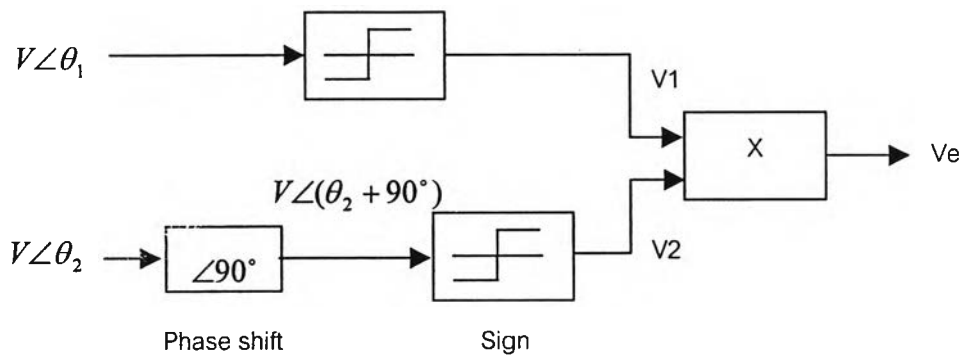
รูปที่ ข.13 กระแสค่านอกของตัวจำลองเซลล์แสงอาทิตย์  
เทียบกับกระแสของเซลล์แสงอาทิตย์

ภาคผนวก ค

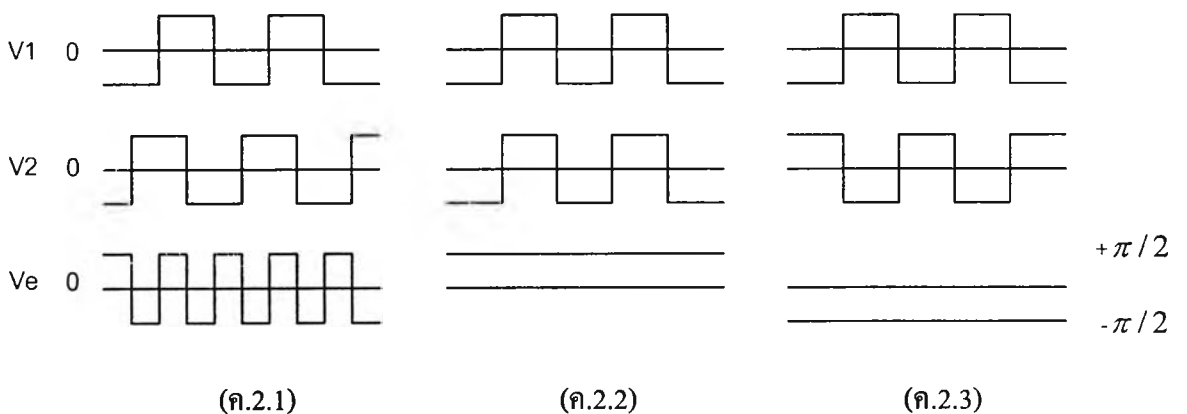
วงรอบล็อกเฟส

ค.1 ตัวเปรียบเทียบเฟส

ตัวเปรียบเทียบเฟสคือวงจรที่ให้สัญญาณออกเป็นปฏิภาคกับผลต่างระหว่างเฟสของสัญญาณเข้า 2 สัญญาณ รูปแบบหนึ่งของวงจรเปรียบเทียบเฟสคือ วงจรคูณสัญญาณซึ่งสามารถใช้ได้ทั้งสัญญาณเข้าที่เป็นรูปไซน์หรือสัญญาณรูปคลื่นสี่เหลี่ยม สัญญาณที่นำมาเปรียบเทียบกันจะต้องมีการเลื่อนเฟสของสัญญาณหนึ่งไป 90 องศา ก่อนเข้าวงจร ดังแสดงแผนภาพบล็อกของตัวเปรียบเทียบเฟสในรูปที่ ค.1



รูปที่ ค.1 แผนภาพบล็อกของตัวเปรียบเทียบเฟส



รูปที่ ค.2 สัญญาณจากตัวเปรียบเทียบเฟสที่ผลต่างเฟสของสัญญาณเข้าทั้งสอง เท่ากับ 0 องศา 90 องศา และ -90 องศา ตามลำดับ

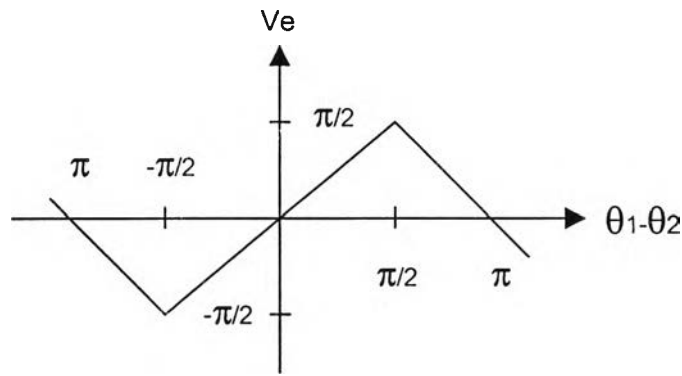
เมื่อพิจารณารูปที่ ค.2 ซึ่งแสดงสัญญาณออกจากตัวเปรียบเทียบเฟสที่มีผลต่างเฟสของสัญญาณเข้าต่างๆ กันดังนี้

รูปที่ ค.2.1  $\theta_2 = \theta_1$  จะได้สัญญาณออก  $V_e$  เป็นสัญญาณสี่เหลี่ยมที่มีความถี่ 2 เท่าของสัญญาณด้านเข้าและมีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์

รูปที่ ค.2.2  $\theta - \theta_2 = 90^\circ$  จะได้สัญญาณออก  $V_e$  เป็นสัญญาณไฟตรงขนาด  $+\pi/2$

รูปที่ ค.2.3  $\theta - \theta_2 = -90^\circ$  จะได้สัญญาณออก  $V_e$  เป็นสัญญาณไฟตรงขนาด  $-\pi/2$

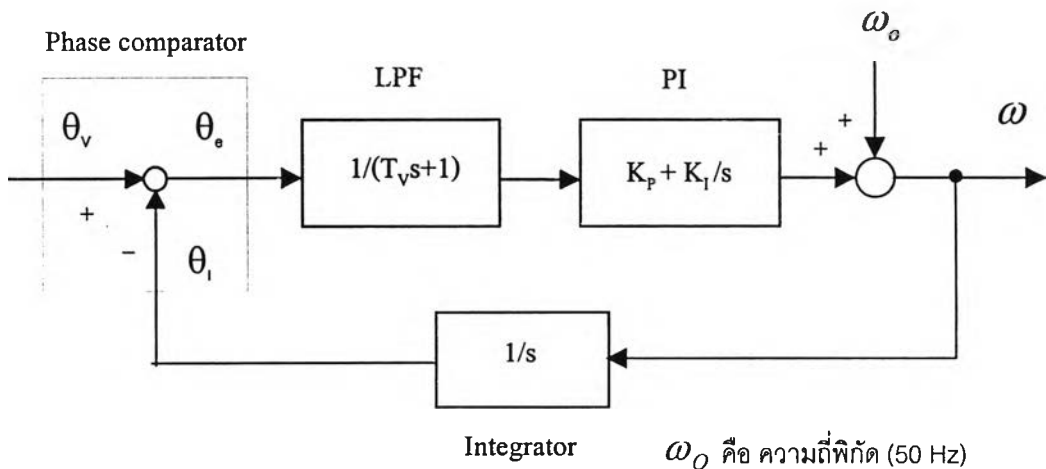
เราสามารถหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าเฉลี่ยสัญญาณออก  $V_e$  กับผลต่างเฟสของสัญญาณเข้าได้ดังแสดงในรูปที่ ค.3



รูปที่ ค.3 ค่าเฉลี่ยสัญญาณด้านออกเทียบกับผลต่างเฟสของสัญญาณด้านเข้า

ค.2 การออกแบบวงรอปล็อกเฟส

วงรอปล็อกเฟสโดยทั่วไปจะประกอบด้วย ตัวเปรียบเทียบเฟส (รายละเอียดในหัวข้อ ค.1) ตัวกรองผ่านต่ำ ตัวควบคุม PI และวงจรมินทิเกรเตอร์ ดังแสดงในรูปที่ ค.4



$\omega_0$  คือ ความถี่พิกัด (50 Hz)

รูปที่ ค.4 แผนภาพบล็อกของวงรอปล็อกเฟส

พารามิเตอร์สำหรับการออกแบบได้แก่ เกณฑ์  $K_p$  ,  $K_i$  ของตัวควบคุม และความถี่หักมุม ( $1/T_v$ ) ของตัวกรองผ่านต่ำ จากแผนภาพบล็อกรูปที่ ค.4 เราสามารถหาอัตราขยายวงรอบเปิดได้ดังแสดงในสมการที่ ค.1

$$G_o(s) = \frac{K_p s + K_i}{T_v s^3 + s^2} \quad (\text{ค.1})$$

ในการออกแบบเราจะคำนึงถึงผลตอบสนองของระบบและขนาดของระลอกคลื่นของความถี่ที่เกิดจากสัญญาณความถี่เป็นรูปสี่เหลี่ยมความถี่  $2\omega_o$  และมีฟังก์ชัน โอนย้ายคั้งแสดงในสมการที่ (ค.2)

$$G_\omega(s) = \frac{\omega(s)}{\theta_e(s)} = \frac{K_p s + K_i}{T_v s^2 + s} \quad (\text{ค.2})$$

กำหนดให้  $\omega_c$  คือความถี่ตัดข้าม เราจะเลือกความถี่หักมุมของตัวควบคุม  $\frac{K_i}{K_p}$  เท่ากับ  $\frac{\omega_c}{1.88}$  และความถี่หักมุม  $1/T_v$  เท่ากับ  $4.24\omega_c$  ซึ่งเป็นค่าที่ให้ช่วงปลอดภัยเฟสที่เพียงพอสำหรับเสถียรภาพในการควบคุม จากสมการที่ ค.1 เราจะได้ว่า

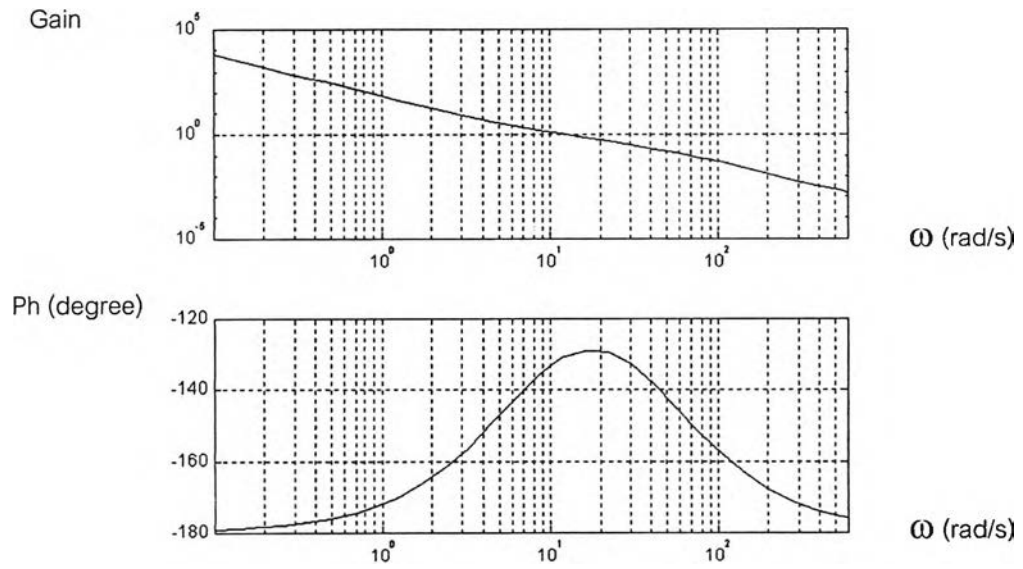
$$\begin{aligned} \left| G_o(j\omega_c) \right| &= \left| \frac{K_p(j\omega_c + \omega_c/1.88)}{(j\omega_c)^3/4.24\omega_c + (j\omega_c)^2} \right| = 1 \\ &\approx 1.1 \cdot \frac{K_p}{\omega_c} \end{aligned} \quad (\text{ค.3})$$

เมื่อพิจารณาผลตอบสนองของความถี่ที่ความถี่  $2\omega_o$  เราจะเลือกให้ขนาดอัตราขยาย  $G_\omega(j2\omega_o)$  เท่ากับ 0.95 (ให้ขนาดระลอกคลื่นของความถี่  $\omega$  มีค่าประมาณ  $\pm 0.3$  Hz.) จากสมการ ค.2 เราจะได้ว่า

$$\left| G_\omega(j2\omega_o) \right| \approx \frac{4.24\omega_c K_p}{2\omega_o} = 0.95 \quad (\text{ค.4})$$

แทนค่า  $\frac{K_p}{\omega_c}$  ที่ได้จากสมการ ค.3 ลงในสมการ ค.4 จะได้  $\omega_c = 11.8$  rad/s และสามารถหาค่า  $K_p$  ได้เท่ากับ 10.7 ,  $K_i$  เท่ากับ 67 และ  $1/T_v$  เท่ากับ 50 ตามลำดับ

จากค่า  $K_p$ ,  $K$ , และ  $T_v$  ที่ได้เมื่อทำการหาโพลพล็อตจะได้ดังรูปที่ ค.5 และมีช่วงปลอดภัยเชิงเฟส (Phase margin) เท่ากับ 48.8 องศา ที่ความถี่ตัดข้ามเท่ากับ 11.8 rad/s

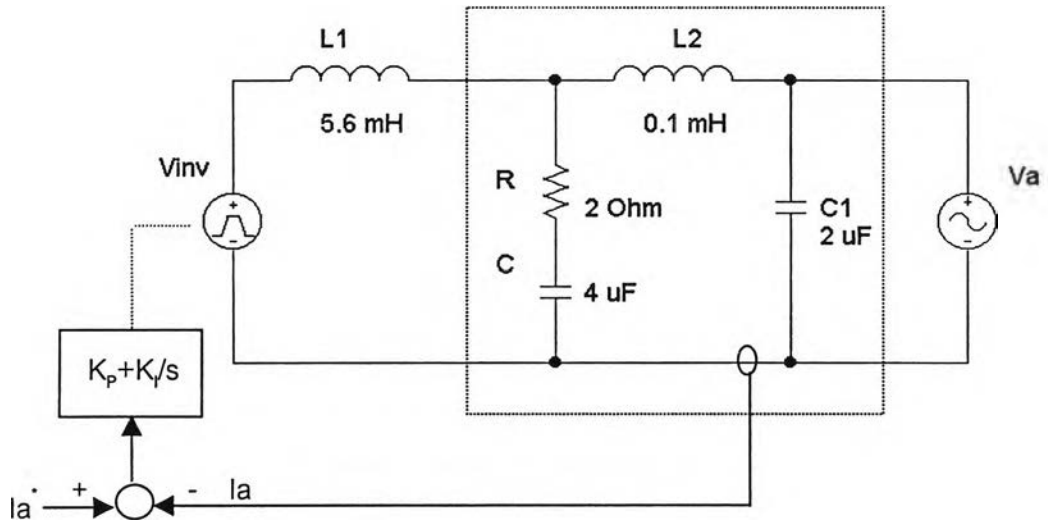


รูปที่ ค.2 ขนาดและเฟสของอัตราขยายวงรอบเปิดของวงรอบลูปเฟส

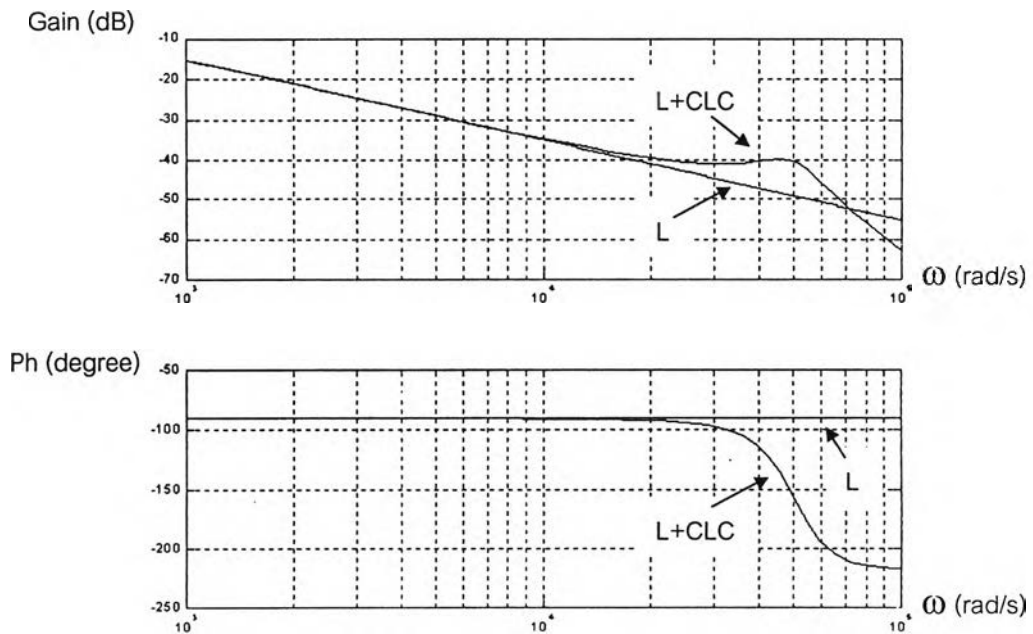
ภาคผนวก ง

การออกแบบตัวควบคุมของวงรอบควบคุมกระแส

วงรอบการควบคุมกระแสจะออกแบบมาจากวงจรงจริงที่เพิ่มวงจรงแบบ CLC แก่ตัวเหนี่ยวนำดังแสดงในรูปที่ ง.1 และอัตราขยายเชิงความถี่ของกระแสใน  $L_2$  ต่อแรงดันอินเวอร์เตอร์แสดงได้ดังรูปที่ ง.2



รูปที่ ง.1 แผนภาพบล็อกวงรอบการควบคุมกระแส



รูปที่ ง.2 อัตราขยายและเฟสของกระแสในตัวเหนี่ยวนำ  $L_2$  ต่อแรงดันอินเวอร์เตอร์

จากแผนภาพบล็อกการควบคุมกระแส เราสามารถหาอัตราขยายวงรอบเปิดของวงรอบการควบคุมได้ดังสมการที่ ง.1

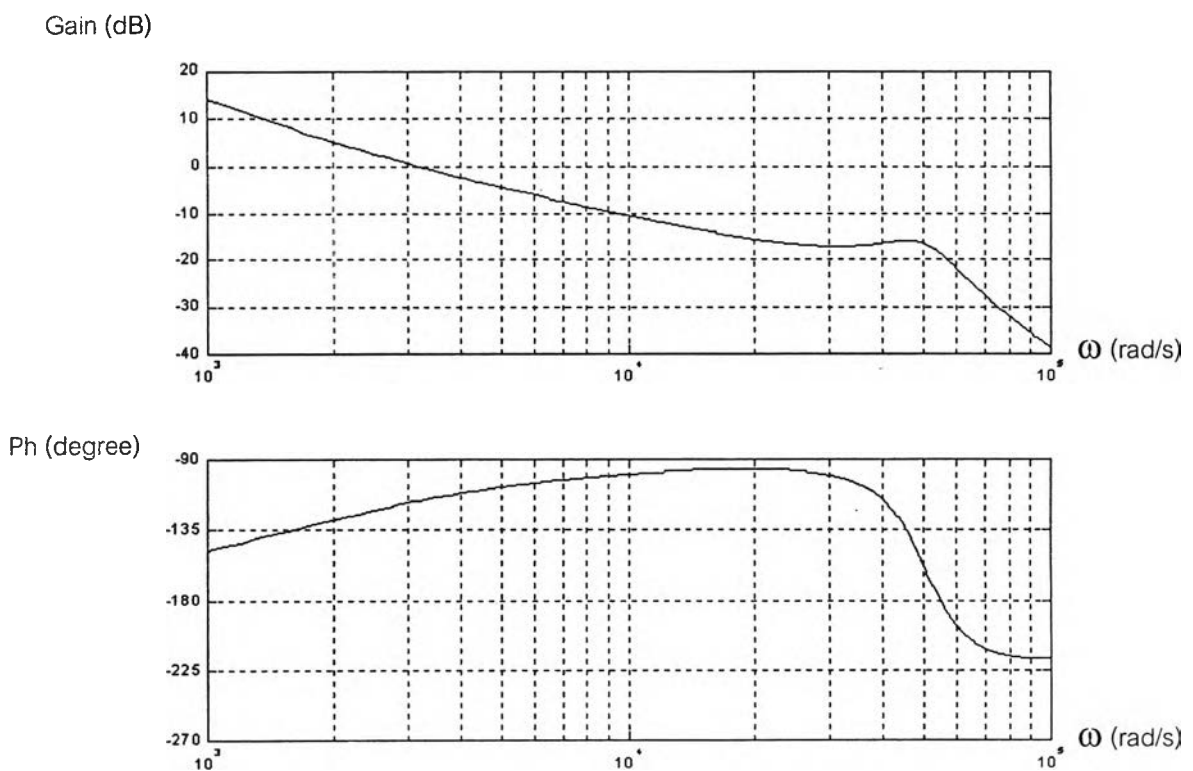
$$\text{open loop gain} = \frac{(K_p s + K_I)(RCs + 1)}{s^2 [CL_1 L_2 s^2 + CR(L_1 + L_2)s + (L_1 + L_2)]} \quad (\text{ง.1})$$

ต้องการให้ความถี่ตัดข้าม (cross over frequency :  $\omega_C$ ) เป็น 3140 rad/s และเลือกความถี่หักมุม (cut-off frequency) ของ PI  $K_i/K_p = \omega_C/2 = 1570$  ซึ่งจะให้ช่วงปลอดภัยเฟส (phase margin) ที่เพียงพอสำหรับเสถียรภาพในการควบคุม เราหาค่าเกณฑ์ของตัวควบคุมได้ดังนี้

$$K_p = 16$$

$$K_i = 25120$$

จากค่าเกณฑ์  $K_p$  และ  $K_i$  ที่ได้เมื่อทำการเขียนแผนภูมิโบเดของฟังก์ชัน โอนย้ายวงรอบเปิดดังรูปที่ ง.3 จะสามารถหาค่าช่วงปลอดภัยเชิงอัตราขยาย (Gain margin) และช่วงปลอดภัยเชิงเฟสของระบบได้เป็น 18.5dB และ 63.5 องศาตามลำดับ



รูปที่ ง.3 ช่วงปลอดภัยเชิงอัตราขยายและช่วงปลอดภัยเชิงเฟสของระบบควบคุมกระแส

## ประวัติผู้เขียน

นายสาคร ชีรชัยสกุล เกิดเมื่อวันที่ 27 มีนาคม พ.ศ. 2515 ที่จังหวัดเชียงราย ศึกษาระดับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (อิเล็กทรอนิกส์) จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีการศึกษา 2536 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า (อิเล็กทรอนิกส์กำลัง) ณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในภาคปลายปีการศึกษา 2540