

บทที่ 5

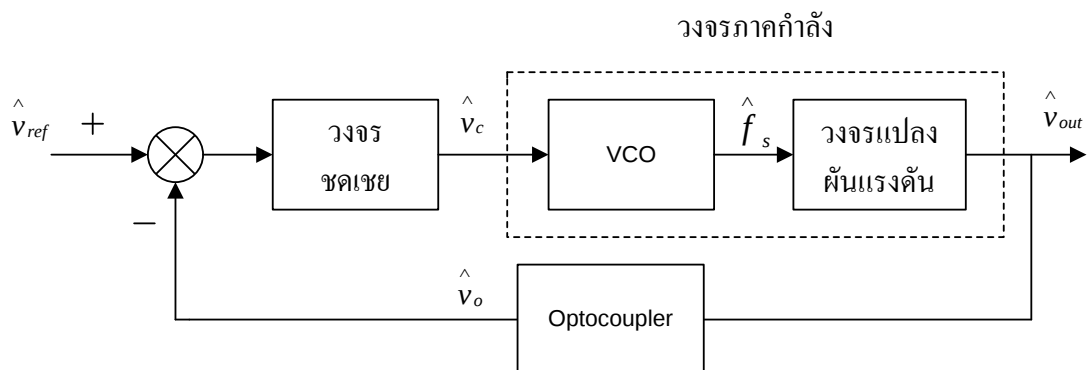
การออกแบบระบบควบคุมและวงจรควบคุม

5.1 บทนำ

การออกแบบระบบควบคุมและวงจรควบคุมโดยวิธีวิเคราะห์ผลตอบสนองของระบบต่อความถี่ในวิทยานิพนธ์นี้ใช้วิธีการออกแบบที่ง่าย ไม่จำเป็นต้องใช้ความรู้ทางคณิตศาสตร์ขั้นสูง การวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้สามารถวิเคราะห์คุณสมบัติเสถียรภาพของระบบได้ด้วย โดยพิจารณาจากฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดโดยรวมของระบบ (Open loop transfer function) การออกแบบวงจรควบคุมด้วยวิธีนี้กระทำบนแผนภาพ Bode โดยออกแบบวงจรควบคุมเพื่อให้แผนภาพ Bode ของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดโดยรวม (แผนภาพ Bode ของฟังก์ชันถ่ายโอนวงจรควบคุมรวมกับแผนภาพ Bode ของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรรากกำลัง และแผนภาพ Bode ของฟังก์ชันถ่ายโอนของส่วนวัดสัญญาณ) มีคุณสมบัติตามต้องการ ซึ่งจะนำเสนอต่อไปในบทนี้ [14]

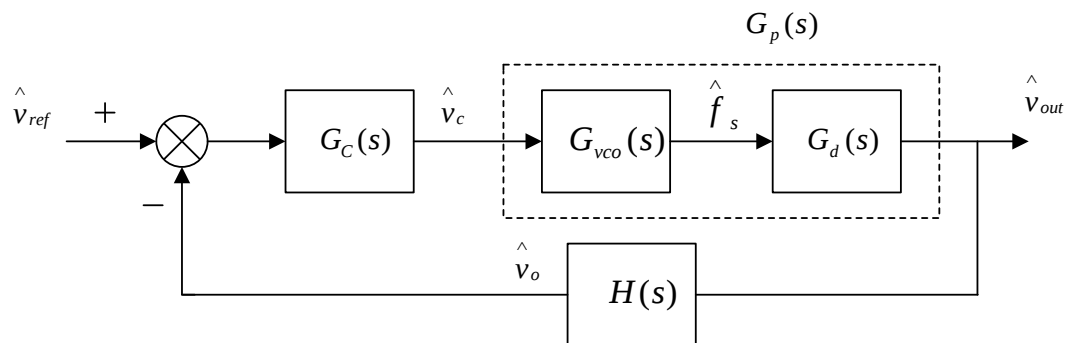
5.2 คุณสมบัติของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์ที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบ

แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์ที่ดีจะต้องมีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงาน คือสามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ทางดำนออกได้ดี และมีผลตอบสนองที่รวดเร็วเมื่อมีการรบกวนการทำงาน การออกแบบเพื่อให้บรรลุวัตถุประสงค์ดังกล่าว เริ่มต้นจากการพิจารณาโดยแสดงแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์ด้วยบล็อกไดอะแกรมตามรูปที่ 5.1 [14]



รูปที่ 5.1 บล็อกไดอะแกรมของการควบคุมของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์

รูปที่ 5.2 แสดงบล็อกไดอะแกรมชนิดสัญญาณขนาดเล็กของการควบคุมของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์



รูปที่ 5.2 บล็อกไดอะแกรมชนิดสัญญาณขนาดเล็กของการควบคุมของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ทางด้านทางออกและแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงแสดงได้ดังสมการที่ (5.1)

$$\frac{\hat{v}_{out}}{\hat{v}_{ref}} = \frac{R(s)}{1 + T(s)} \quad (5.1)$$

เมื่อ

$$T(s) = G_C(s)G_p(s)H(s)$$

$$R(s) = G_C(s)G_p(s)$$

โดยที่

$\hat{v}_{ref}$ คือ แรงดันไฟฟ้าอ้างอิงชนิดสัญญาณขนาดเล็กในรูปตัวแปรเชิงซ้อน s

$G_d(s)$ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ทางด้านทางออกกับความถี่ที่ทางด้านทางเข้าของคอนเวอร์เตอร์

$G_{vco}(s)$ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างความถี่ที่ทางด้านทางเข้าของคอนเวอร์เตอร์กับสัญญาณควบคุม

$G_C(s)$ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรควบคุม

$G_p(s)$ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรภาคกำลัง

$H(s)$ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนของ Optocoupler

$T(s)$ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของระบบควบคุม (Open loop transfer function)

$R(s)$ คือ ฟังก์ชันถ่ายโอนไปหน้าของระบบควบคุม (Forward loop transfer function)

คุณสมบัติต่าง ๆ ของระบบที่ต้องการจะพิจารณาจากฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดสมการที่ (5.1) มีดังต่อไปนี้

5.2.1 เสถียรภาพ

เสถียรภาพของระบบ คือ ความสามารถในการกลับเข้าสู่สภาพสมดุลเดิมของระบบ หลังจากถูกรบกวน สามารถตรวจสอบได้จากฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิด กล่าวคือ หากฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดของระบบมี Pole อยู่ทางด้านขวาของระนาบเชิงซ้อน (s) ระบบนั้นจะขาดเสถียรภาพ ซึ่งจากสมการที่ (5.1) Pole หรือตำแหน่งรากของพหุนามส่วนของฟังก์ชันถ่ายโอนวงปิดหาได้จากสมการที่ (5.2) [14]

$$1 + T(s) = 0 \quad (5.2)$$

สมการดังกล่าวถูกแสดงในรูปฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิด ดังนั้นเสถียรภาพของระบบจึงสามารถวิเคราะห์ได้จากฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดโดยการจัดรูปสมการที่ (5.2) ใหม่จะได้สมการที่แสดงเงื่อนไขที่ทำให้ระบบขาดเสถียรภาพ กล่าวคือ (5.3) [14]

$$T(s) = -1 = |1| \angle -180^\circ \quad (5.3)$$

ระบบจะขาดเสถียรภาพหาก Phase lag ของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดที่ Crossover frequency, f_{cv} [ความถี่ที่อัตราขยายของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดมีค่าเป็น 1 (0 dB)] มีค่าเท่ากับ 180° คุณสมบัติของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดที่ใช้พิจารณาเพื่อตรวจสอบเสถียรภาพของระบบ ได้แก่ Phase margin, PM และ Gain margin, GM [14]

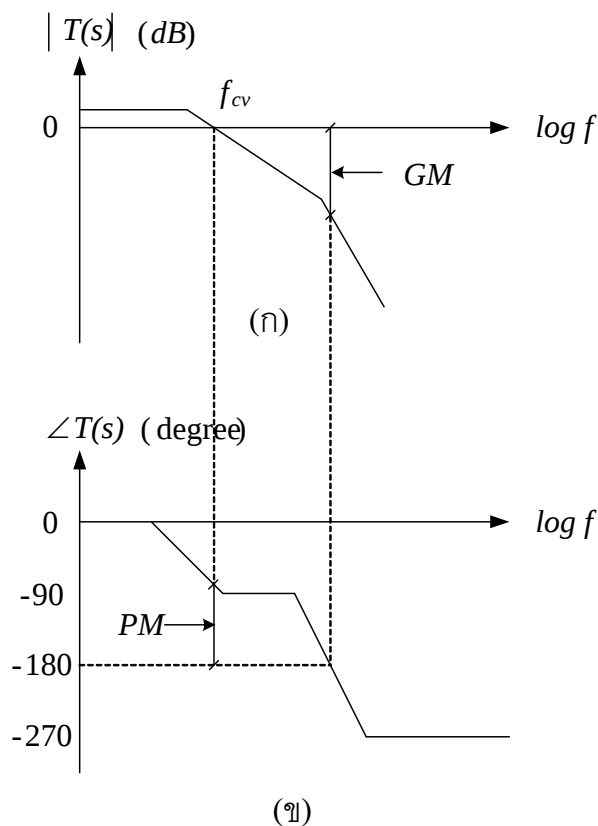
ก. Phase margin

คือ ผลต่างระหว่าง 180° กับ Phase lag ที่ Crossover frequency แสดงดังรูปที่ 5.3(ก) ระบบที่มีเสถียรภาพจะต้องมีค่า Phase margin เฟสเป็นบวกซึ่งก็คือ มีค่า Phase lag ที่ความถี่ Crossover frequency น้อยกว่า 180° นั่นเอง โดยที่ Phase margin นี้ถึงแม้ว่ามีค่าเป็นบวกแต่หากมีค่าเข้าใกล้ 0° มากเกินไปจะทำให้ความมีเสถียรภาพของระบบจะลดลงได้เนื่องจากแรงดันไฟฟ้าที่

ทางออกที่ได้จะเกิดการแกว่งมากเกินไป ในทางปฏิบัติ Phase margin ควรจะมีค่าเป็นบวกไม่น้อยกว่า 45° [14]

ข. Gain margin

คือ ผลต่างระหว่าง 0 dB กับอัตราขยายที่ความถี่ที่ Phase lag เป็น 180° แสดงดังรูปที่ 5.3(ข) ในทำนองเดียวกับ Phase margin ระบบที่มีเสถียรภาพจะต้องมีค่า Gain margin เป็นบวกซึ่งก็คือ มีค่าอัตราขยายที่ความถี่ที่ Phase lag เป็น 180° น้อยกว่า 0 dB นั่นเอง ในทางปฏิบัติ Gain margin ควรจะมีค่าเป็นบวกไม่น้อยกว่า 6 dB [14]



รูปที่ 5.3 กราฟแสดง Phase margin และ Gain margin ของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิด

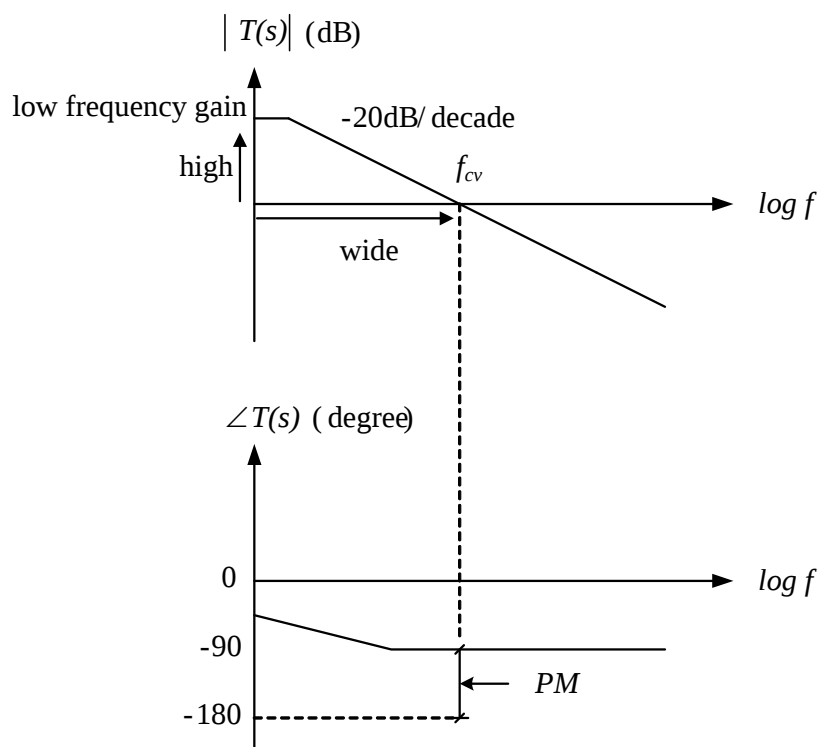
5.2.2 คุณสมบัติของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดที่ทำให้ระบบมีสมรรถนะที่ดี

คุณสมบัติของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์ที่จะทำให้ระบบมีสมรรถนะที่ดี ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้ [14]

1. Phase margin และ Gain margin ควรมีค่าเป็นบวกไม่น้อยกว่า 45° และ 6 dB ตามลำดับเพื่อความมีเสถียรภาพและไม่ให้แรงดันไฟฟ้าที่ทางออกแกว่งมากเกินไป

2. อัตราขยาย DC ควรมีค่ามากเพื่อให้มีการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกขณะสภาวะคงตัวได้ดี

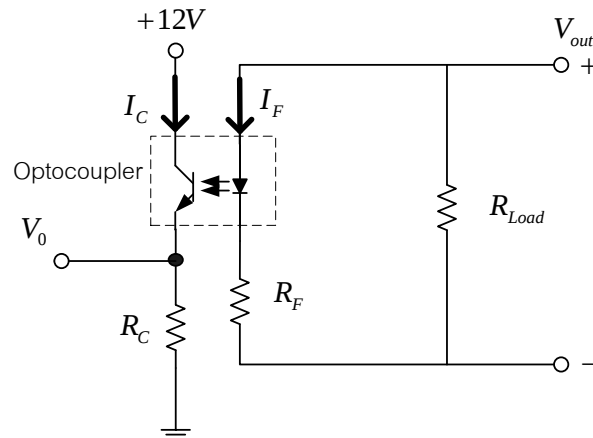
3. ความถี่ Crossover frequency, f_{cv} ควรมีค่ามากเพื่อให้แรงดันไฟฟ้าที่ทางออกตอบสนองได้อย่างรวดเร็ว แต่ไม่ควรเกิน 0.25 เท่าของความถี่ในการสวิตช์เพราะอาจทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ทางออกมีความถี่ของการสวิตช์ปรากฏที่ทางออก คุณสมบัติดังกล่าวสามารถสรุปแสดงเป็นแผนภาพ Bode ของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดได้ดังรูปที่ 5.4



รูปที่ 5.4 กราฟของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดที่ต้องการ

5.3 วงจรแบ่งแรงดันทางไฟฟ้าที่มี Optocoupler

ในการป้อนกลับแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกสำหรับวงจรเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์จำเป็นต้องสร้างวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกเพื่อแบ่งแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกของวงจรดังกล่าว (20 V) ให้ได้ค่าเท่ากับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงที่ใช้ (5 V) ซึ่งได้จากแรงดันไฟฟ้าอ้างอิงของ MC34067P (ไอซีควบคุมการทำงาน) Optocoupler จะทำหน้าที่ในการแยกกราวด์ของระบบภาคกำลังกับภาคระบบควบคุมโดยวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกแสดงดังรูปที่ 5.5 แสดงสมการระหว่างแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกและแรงดันไฟฟ้าที่ทางเข้าของวงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกแสดงได้ดังสมการที่ (5.7)



รูปที่ 5.5 วงจรแสดงการทำงานของ Optocoupler

สมการกระแสไฟฟ้าของ I_F

$$I_F = \frac{V_{out}}{R_F} \quad (5.4)$$

สมการกระแสไฟฟ้าของ I_C

$$I_C = \frac{V_o}{R_C} \quad (5.5)$$

สมการความสัมพันธ์ของ I_C กับ I_F โดยที่ K_d คืออัตราค่าการเปลี่ยนแปลงของ I_C กับ I_F

$$\frac{I_C}{I_F} = K_d \quad (5.6)$$

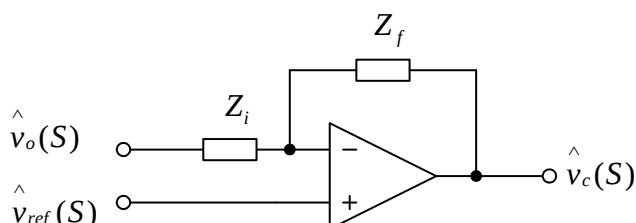
แทนสมการที่(5.4)และ(5.5)ลงในสมการที่(5.6)

$$\frac{V_o}{V_{out}} = \frac{K_d R_C}{R_F} \quad (5.7)$$

5.4 วงจรควบคุม

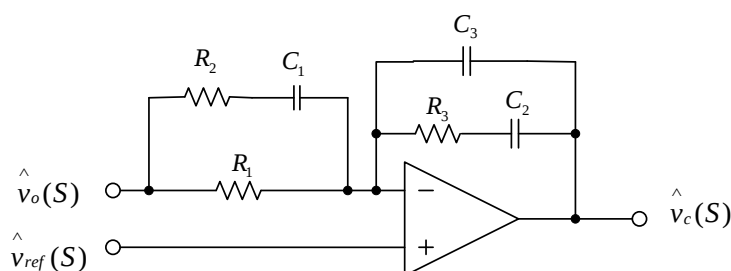
ในการนำแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์ไปใช้งาน แรงดันไฟฟ้าที่ทางออกจะต้องมีค่าอยู่ภายในย่านที่กำหนดถึงแม้แรงดันไฟฟ้าที่ทางเข้าหรือโหลดมีการเปลี่ยนแปลง การควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกให้คงที่จะกระทำโดยการป้อนกลับแบบลบ (รูปที่ 5.1) เพื่อให้ระบบปรับ

ความถี่ด้วยตัวเองอย่างอัตโนมัติโดยที่สัญญาณควบคุมความการปรับความถี่ถูกสร้างจากวงจรขยายสัญญาณความผิดพลาด (Error amplifier) ซึ่งขยายค่าความแตกต่างระหว่างแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง (Reference voltage, v_{ref}) กับค่าแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกดังแสดงในรูปที่ 5.6 ระบบจะทำการปรับความถี่ไปจนแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกเท่ากับแรงดันไฟฟ้าอ้างอิง [14]



รูปที่ 5.6 วงจรควบคุมที่สร้างด้วยวงจรขยายสัญญาณความผิดพลาด

แม้ว่าการป้อนกลับจะทำให้ระบบสามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าได้อย่างอัตโนมัติ แต่อาจเป็นต้นเหตุให้ระบบขาดเสถียรภาพได้ นอกจากนี้การตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกที่ได้ อาจจะไม่เป็นที่ต้องการ เช่นมีการตอบสนองช้า มีการแกว่งมากเกินไป หรือมีความคลาดเคลื่อนมากจากค่าที่ต้องการ ปัญหาเหล่านี้สามารถป้องกันและควบคุมได้ด้วยการออกแบบวงจรควบคุมให้เหมาะสม การออกแบบวงจรควบคุมจึงเป็นส่วนสำคัญในการออกแบบเพื่อให้แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์มีสมรรถนะที่ดี และจะนำเสนอในบทต่อไป ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงเฉพาะรูปแบบของวงจรควบคุม [14]



รูปที่ 5.7 วงจรควบคุมแบบ 3 – Pole 2 – Zero

วิทยานิพนธ์เล่มนี้ใช้วงจรควบคุมแบบแบบ 3 – Pole 2 – Zero แสดงดังรูปที่ 5.7 เป็นวงจรควบคุมที่ใช้วิธีการควบคุมแบบแรงดันไฟฟ้า ฟังก์ชันถ่ายโอนระหว่างสัญญาณควบคุมและแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกแสดงได้ดังสมการที่ (5.8) [14]

$$G_c(s) = \frac{\hat{v}_c(s)}{\hat{v}_o(s)} = K_C \frac{\left(1 + \frac{s}{\omega_{z1}}\right) \left(1 + \frac{s}{\omega_{z2}}\right)}{s \left(1 + \frac{s}{\omega_{p1}}\right) \left(1 + \frac{s}{\omega_{p2}}\right)} \quad (5.8)$$

โดยที่

$$K_C = R_1(C_2 + C_3)$$

$$\omega_{z1} = \frac{1}{R_3 C_3}$$

$$\omega_{z2} = \frac{1}{(R_1 + R_2)C_3}$$

$$\omega_{p1} = \frac{1}{R_2 C_1}$$

$$\omega_{p2} = \frac{1}{R_3 \frac{C_2 C_3}{C_2 + C_3}}$$

โดยที่

ω_{z1} คือ ความถี่เชิงมุมของ Zero ตัวที่หนึ่งของวงจรควบคุม

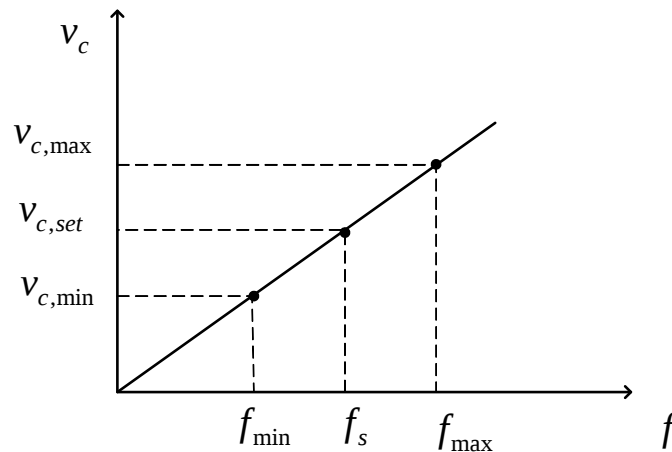
ω_{z2} คือ ความถี่เชิงมุมของ Zero ตัวที่สองของวงจรควบคุม

ω_{p1} คือ ความถี่เชิงมุมของ Pole ตัวที่หนึ่งของวงจรควบคุม

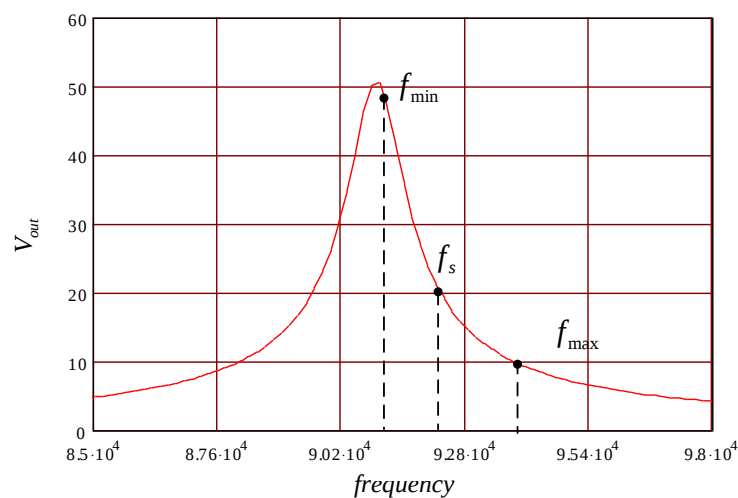
ω_{p2} คือ ความถี่เชิงมุมของ Pole ตัวที่สองของวงจรควบคุม

5.5 วงจรแปลงผันแรงดันไฟฟ้าเป็นความถี่ (VCO)

แรงดันไฟฟ้าที่ทางออกของวงจรเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์สามารถควบคุมได้ด้วยการปรับความถี่ของสวิตช์โดยที่ค่า Duty Cycle คงที่จากรูปที่ 5.8 เมื่อสัญญาณควบคุมที่มาจากวงจรควบคุม (v_c) มีค่ามากขึ้นวงจรแปลงผันแรงดันทางไฟฟ้าเป็นความถี่ (VCO) จะเพิ่มความถี่ขึ้นทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ทางออกของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ (V_{out}) ลดลง(รูปที่ 5.9) และเมื่อสัญญาณควบคุมที่มาจากวงจรชดเชย (v_c) มีค่าลดลงวงจรแปลงผันแรงดันทางไฟฟ้าเป็นความถี่ (VCO) จะลดความถี่ลงทำให้แรงดันไฟฟ้าที่ทางออกของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ (V_{out}) เพิ่มขึ้น (รูปที่ 5.9) จึงทำให้สามารถควบคุมแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ได้



รูปที่ 5.8 แผนภาพแสดงการทำงานของ VCO



รูปที่ 5.9 แผนภาพแสดงความสัมพันธ์ V_{out} กับความถี่

5.6 การวิเคราะห์ฟังก์ชันถ่ายโอนสัญญาณขนาดเล็กของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ไม่รวมวงจรควบคุม

การวิเคราะห์สัญญาณขนาดเล็กของฟังก์ชันถ่ายโอนเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ไม่รวมวงจรควบคุม วิทยานิพนธ์เล่มนี้จะใช้วิธีการหาด้วยการรบกวนด้วยสัญญาณขนาดเล็ก ($\hat{v}_C$) ตามรูปที่ 5.10 แล้วทำการเปรียบเทียบสัญญาณระหว่าง $\hat{v}_{out}$ และ $\hat{v}_C$ (รูปที่ 5.11) ซึ่งสมการของการรบกวนด้วยสัญญาณขนาดเล็กใช้สมการที่ (5.11) โดยเปลี่ยนความถี่เพิ่มขึ้นทำให้ได้ทั้งขนาดและมุมตามกราฟรูปที่ (5.12) หลังจากนั้นนำกราฟที่ได้ไปหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงจรของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ไม่รวมวงจรควบคุมโดยการทำ Curve fitting

สมการการการกวนด้วยสัญญาณขนาดเล็ก

$$V_C = V_C + \hat{v}_c \quad (5.9)$$

$$V_{out} = V_{out} + \hat{v}_{out} \quad (5.10)$$

สมการสัญญาณขนาดเล็ก

$$\hat{v}_c = A_C \sin(2\pi f_C) \quad (5.11)$$

$$\hat{v}_{out} = A_{out} \sin(2\pi f_C - \phi) \quad (5.12)$$

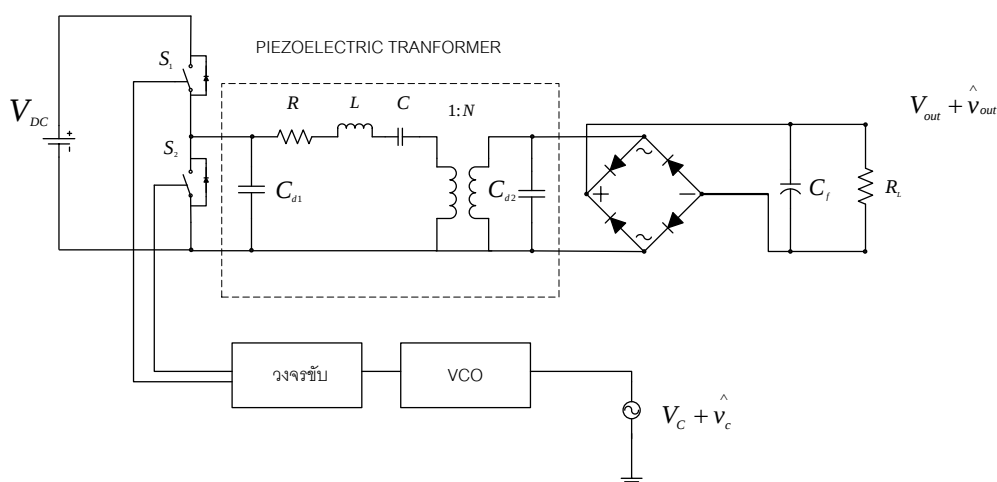
โดยที่

A_C คือขนาดของสัญญาณขนาดเล็กที่ไ้รับกวน

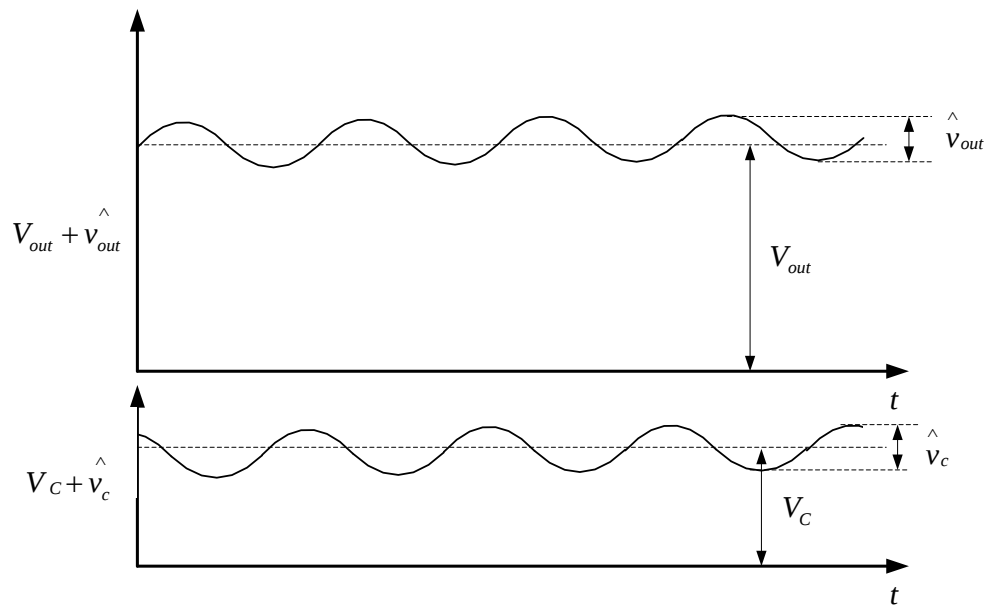
f_C คือความถี่ของสัญญาณขนาดเล็กที่ไ้รับกวน

A_{out} คือขนาดของสัญญาณขนาดเล็กด้านทางออกของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์

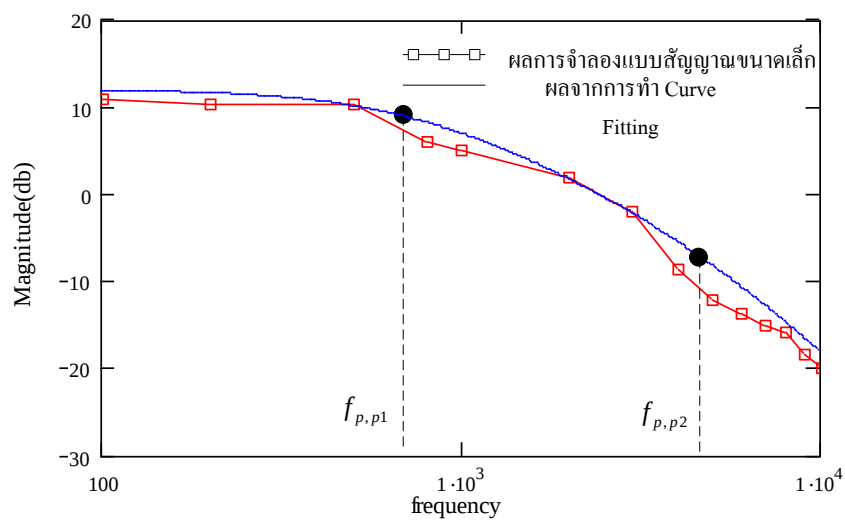
ϕ คือมุมของสัญญาณขนาดเล็กด้านทางออกของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 5.10 วงจรจำลองสัญญาณขนาดเล็กเพื่อวิเคราะห์ของฟังก์ชันถ่ายโอนเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ไม่รวมวงจรควบคุม



รูปที่ 5.11 แผนภาพแสดงสัญญาณขนาดเล็กของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ไม่รวมวงจรควบคุม



รูปที่ 5.12 แผนภาพแสดงการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ไม่รวมวงจรควบคุมและการทำ Curve fitting

การวาง Pole เพื่อวิเคราะห์ฟังก์ชันถ่ายโอนของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ ไม่รวมวงจรควบคุมทำโดยใช้เทคนิค Curve Fitting ได้สมการที่ (5.13)

$$G_p(S) = \frac{K_p}{\left(1 + \frac{S}{2\pi f_{p,p1}}\right) \left(1 + \frac{S}{2\pi f_{p,p2}}\right)} \quad (5.13)$$

โดยที่

K_p คือ อัตราขยายของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ ไม่รวมวงจร

ควบคุม

$f_{p,p1}$ คือ Pole ที่วางตัวที่หนึ่ง

$f_{p,p2}$ คือ Pole ที่วางตัวที่สอง

5.7 การออกแบบวงจรควบคุม

ในหัวข้อที่ 5.7 จะเห็นว่าฟังก์ชันถ่ายโอนของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ ไม่รวมวงจรควบคุม ได้จากผลคูณระหว่างฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรภาคกำลังกับ ฟังก์ชันถ่ายโอนของ Optocoupler $[G_p(s)H(s)]$ ในรูปที่ 5.2 หรืออีกนัยหนึ่งคือผลรวมของแผนภาพ Bode ของฟังก์ชันถ่ายโอนทั้งสอง, การออกแบบวงจรควบคุมจึงเป็นการออกแบบแผนภาพ Bode ของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรควบคุมซึ่งเมื่อรวมกับแผนภาพ Bode ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ $G_p(s)H(s)$ แล้วได้แผนภาพ Bode รวมของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดรวมที่มีคุณสมบัติตามที่ต้องการดังรูปที่ 5.13 ขั้นตอนการออกแบบวงจรควบคุมมีดังต่อไปนี้

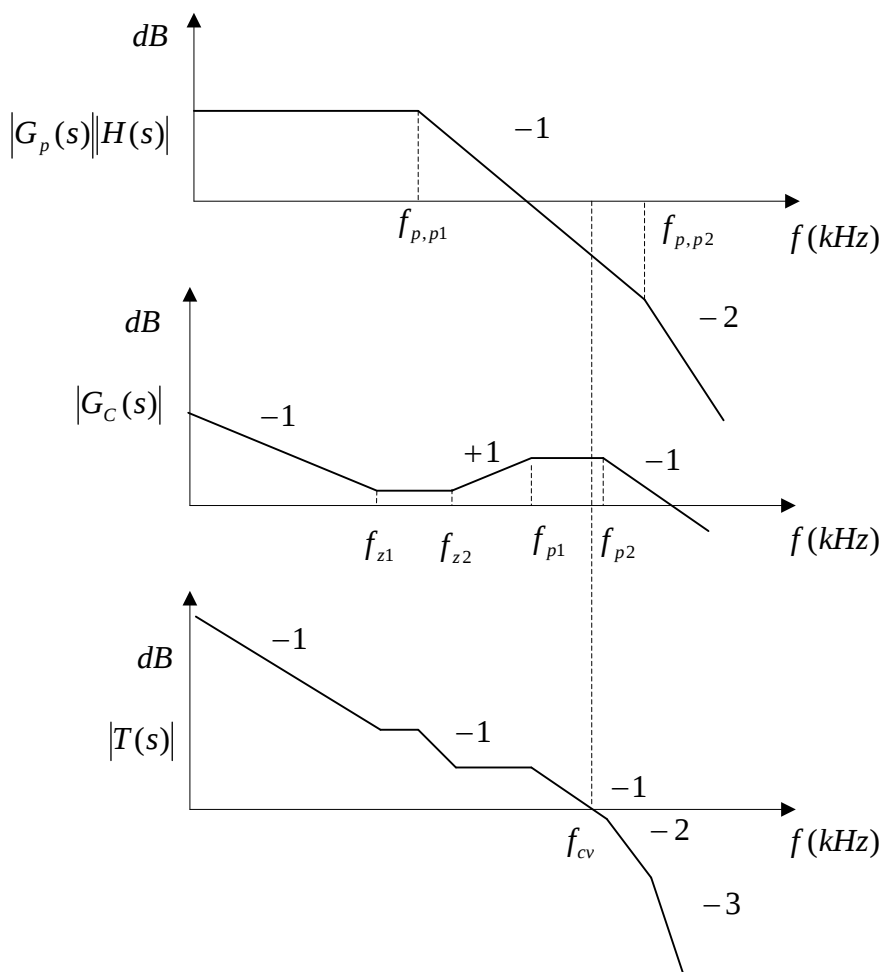
1. กำหนดความถี่ Crossover frequency แล้วคำนวณค่าอัตราขยายที่ตำแหน่งนั้นของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรควบคุมที่ต้องการ ซึ่งจะมีค่าเท่ากับอัตราขยายที่ความถี่ Crossover frequency ของฟังก์ชันถ่ายโอนของ $G_p(s)H(s)$ แต่เครื่องหมายตรงกันข้ามเพื่อให้อัตราขยายที่ความถี่ Crossover frequency ของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดรวมมีค่าเป็นศูนย์
2. วาง Pole ของวงจรควบคุมที่จุดกำเนิดหนึ่งตัวเพื่อให้อัตราขยายที่ความถี่ต่ำของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรควบคุมมีค่ามาก ส่งผลให้อัตราขยายที่ความถี่ต่ำของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดรวมมีค่ามากเช่นกัน
3. วาง Zero ตัวที่หนึ่งของวงจรควบคุมที่ความถี่ต่ำเพื่อให้อัตราขยายที่ความถี่ต่ำของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรควบคุมมี Slope เท่ากับศูนย์ ส่งผลให้อัตราขยายที่ความถี่ต่ำของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดรวมมีค่าคงที่
4. วาง Zero ตัวที่สองของวงจรควบคุมที่ความถี่มากกว่า Pole ตัวที่หนึ่งของฟังก์ชันถ่ายโอน $G_p(s)H(s)$ เล็กน้อย เพื่อให้ฟังก์ชันถ่ายโอนรวมมีความ Slope เท่ากับศูนย์ส่งผลให้ Crossover frequency เลื่อนไกลออกไป

5. วาง Pole ตัวที่สองของวงจรถบคุมที่ความถี่น้อยกว่าความถี่ Crossover frequency เพื่อให้อัตราขยายของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรถบคุมมี Slope เท่ากับศูนย์ ส่งผลให้อัตราขยายของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดรวมลดลงเข้าสู่ Crossover frequency

6. วาง Pole ตัวที่สามของวงจรถบคุมที่ความถี่มากกว่าความถี่ Crossover frequency เพื่อให้อัตราขยายของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรถบคุมมี Slope เท่ากับ -20 dB/Decade ทำให้อัตราขยายของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดรวมมีค่าความ Slope มาก ส่งผลให้อัตราขยายของฟังก์ชันถ่ายโอนรวมที่ความถี่สูงมีการลดทอนมาก

7. คำนวณค่าอัตราขยายที่ความถี่ของ Pole และ Zero ทั้งหมดของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรถบคุมโดยใช้ค่าที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 ถึงขั้นตอนที่ 6

8. คำนวณค่าอุปกรณ่วงจรถบคุม



รูปที่ 5.13 รูปกราฟของการออกแบบวงจรถบคุมแบบ 3 – Pole 2 – Zero

โดยที่

f_{z1}	คือ ความถี่ของ Zero ตัวที่หนึ่งของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรควบคุม
f_{z2}	คือ ความถี่ของ Zero ตัวที่สองของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรควบคุม
f_{p1}	คือ ความถี่ของ Pole ตัวที่หนึ่งของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรควบคุม
f_{p2}	คือ ความถี่ของ Pole ตัวที่สองของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรควบคุม
$f_{p,p1}$	คือ ความถี่ของ Pole ตัวที่หนึ่งของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรภาคกำลัง
$f_{p,p2}$	คือ ความถี่ของ Pole ตัวที่สองของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรภาคกำลัง
+1	คือ +20dB/ Decade
-1	คือ -20dB/Decade
-2	คือ -40dB/ Decade
-3	คือ -80dB/ Decade

5.8 สรุป

การออกแบบวงจรควบคุมโดยวิธีผลตอบสนองเชิงความถี่เป็นการออกแบบวงจรควบคุมเพื่อให้ได้แผนภาพ Bode ของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดรวมที่มีคุณสมบัติดังนี้ Phase Margin และ Gain Margin ควรมีค่าเป็นบวกไม่น้อยกว่า 45° และ 6 dB ตามลำดับ อัตราขยายที่ความถี่ต่ำควรมีค่ามาก และความถี่ Crossover frequency ควรมีค่าสูงแต่ไม่ควรเกิน 0.25 เท่าของความถี่ในการสวิตช์ เนื่องจากคุณสมบัติที่กล่าวมาจะทำให้ระบบมีเสถียรภาพโดยที่แรงดันไฟฟ้าที่ทางออกไม่แกว่งมากเกินไป มีการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกที่ดี และสามารถตอบสนองได้อย่างรวดเร็ว ตัวอย่างการออกแบบวงจรควบคุมจะนำเสนอในบทต่อไป