

บทที่ 6

การออกแบบวงจรเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์

6.1 บทนำ

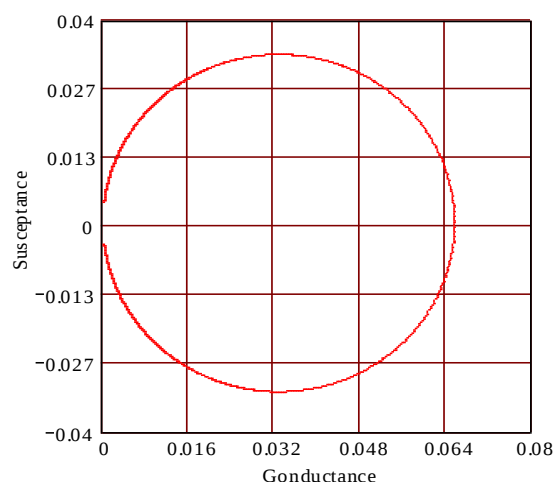
เปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์มีส่วนประกอบหลายส่วนและแต่ละส่วนต้องออกแบบให้ตรงกับความต้องการใช้งานและต้องให้เปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ทำงานที่ประสิทธิภาพสูงพร้อมทั้งสามารถรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกได้ตามต้องการและมีผลตอบสนองที่รวดเร็ว ในบทนี้แสดงการออกแบบวงจรต้นแบบเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ โดยรายละเอียดในการออกแบบสร้างวงจรแต่ละส่วนจะนำเสนอต่อไป

6.2 การวัดพารามิเตอร์ของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์

เปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ถูกนำมาวัดและวิเคราะห์หาพารามิเตอร์โดยใช้เครื่องวัด HP4194A Impedance Analyzer มีขั้นตอนการวัดสามขั้นตอนดังนี้

6.2.1 ขั้นตอนที่ 1

ลัดวงจรทางด้านทางออกตามรูปที่ 3.3 นำเครื่องวัด HP4194A Impedance Analyzer มาวัด Admittance ทางด้านทางเข้าที่ประกอบด้วย Susceptance และ Conductance นำค่าดังกล่าวมาแสดงกราฟ Circle measurement ตามรูปที่ 6.1 แล้วคำนวณพารามิเตอร์ตามหัวข้อที่ 3.3 ได้ดังนี้



รูปที่ 6.1 กราฟแสดงกราฟ G, B

$$G_{\max} = 0.065 \quad B_r = 0.00067 \quad f_r = 90722\text{Hz} \quad f_L = 90677\text{Hz} \quad f_H = 90774\text{Hz}$$

นำค่าดังกล่าวมาคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ตามรูปที่ 3.9 ได้ดังนี้

คำนวณหาค่า R

$$R = \frac{1}{G_{\max}}$$

$$R = 15.385$$

คำนวณหาค่า C_{d1}

$$C_{d1} = \frac{B_r}{2\pi f_r}$$

$$C_{d1} = 1.175nF$$

คำนวณหาค่า L

$$L = R \frac{1}{(2\pi f_H - 2\pi f_L)}$$

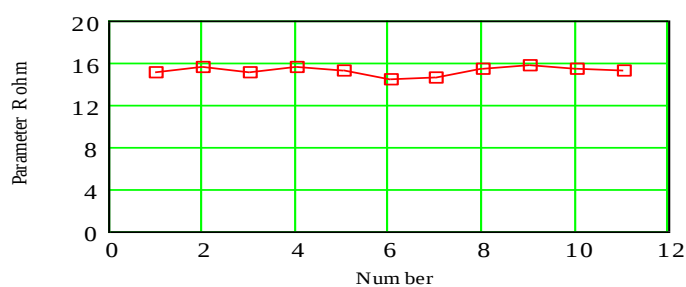
$$L = 25mH$$

คำนวณหาค่า C

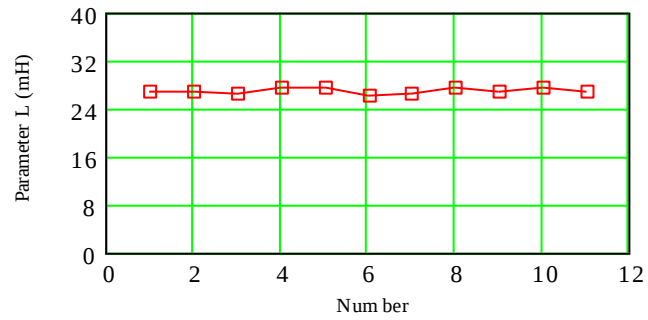
$$C = \frac{(2\pi f_H - 2\pi f_L)}{R(2\pi f_r)^2}$$

$$C = 115.34pF$$

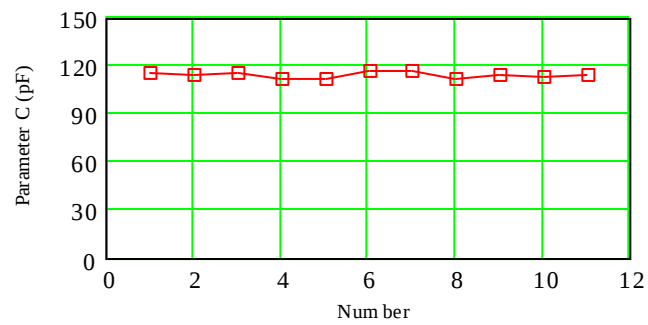
ทำการวัดซ้ำหลาย ๆ ครั้งแสดงตามรูปที่ 6.2 แล้วนำพารามิเตอร์ที่ได้ไปหาค่าเฉลี่ย โดยค่าเฉลี่ยที่ได้จะเป็นค่าที่จะนำไปใช้จริง



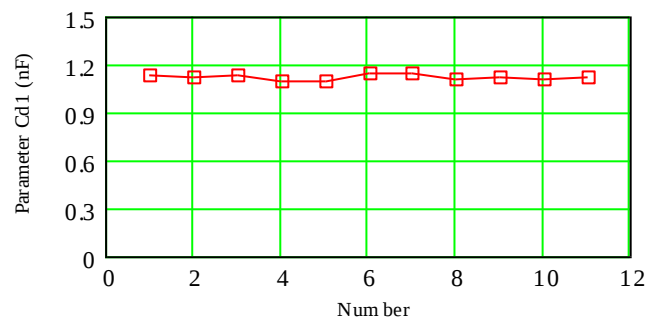
รูปที่ 6.2 กราฟแสดงการวัดพารามิเตอร์ R ด้านทางเข้า



รูปที่ 6.3 กราฟแสดงการวัดพารามิเตอร์ L ด้านทางเข้า



รูปที่ 6.4 กราฟแสดงการวัดพารามิเตอร์ C ด้านทางเข้า



รูปที่ 6.5 กราฟแสดงการวัดพารามิเตอร์ C_{dl} ด้านทางเข้า

จากรูปที่ 6.2 ถึงรูปที่ 6.5 วิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ด้านทางออกเฉลี่ยได้ดังนี้

$$R_{\text{ทางเข้า}} = 15.24 \, \Omega$$

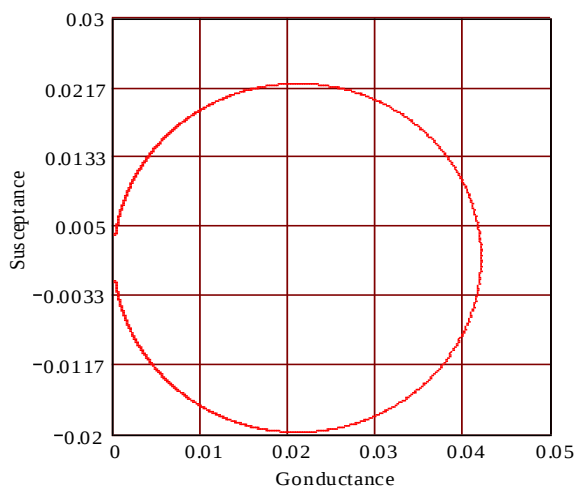
$$L_{\text{ทางเข้า}} = 26.93 \, mH$$

$$C_{\text{ทางเข้า}} = 114.26 \, pF$$

$$C_{dl} = 1.119 \, nF$$

6.2.2 ขั้นตอนที่ 2

ลัดวงจรทางดำนทางเข้าตามรูปที่ 3.6 นำเครื่องวัด HP4194A Impedance Analyzer มาวัด Admittance ทางดำนทางเข้าที่ประกอบด้วย Susceptance และ Conductance นำค่าดังกล่าวมาแสดง กราฟ Circle Admittance ตามรูปที่ 6.6 แล้วคำนวณพารามิเตอร์ตามหัวข้อที่ 3.3 ได้ดังนี้



รูปที่ 6.6 กราฟแสดง Circle Admittance

$$G_{\max} = 0.042, B_r = 0.0012, f_r = 90715\text{Hz}, f_L = 90667\text{Hz}, f_H = 90762\text{Hz}$$

นำค่าดังกล่าวมาคำนวณหาพารามิเตอร์ ได้ดังนี้

คำนวณหาค่า R

$$R = \frac{1}{G_{\max}}$$

$$R = 23.81$$

คำนวณหาค่า C_{d1}

$$C_{d1} = \frac{B_r}{2\pi f_r}$$

$$C_{d1} = 2.105\text{nF}$$

คำนวณหาค่า L

$$L = R \frac{1}{(2\pi f_H - 2\pi f_L)}$$

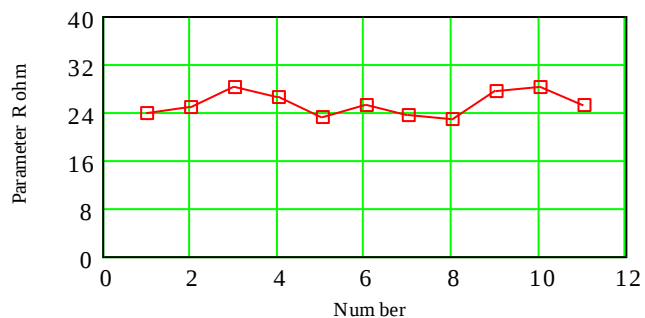
$$L = 40\text{mH}$$

คำนวณหาค่า C

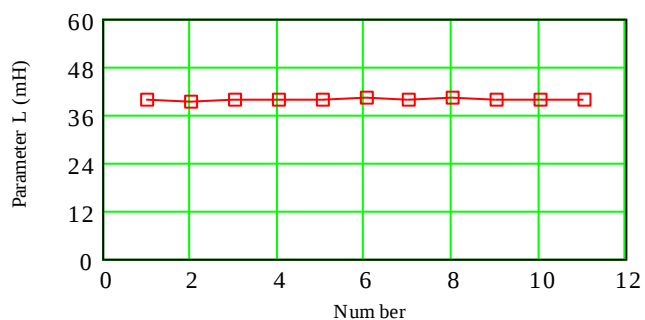
$$C = \frac{(2\pi f_H - 2\pi f_L)}{R(2\pi f_r)^2}$$

$$C = 7.72 \text{ pF}$$

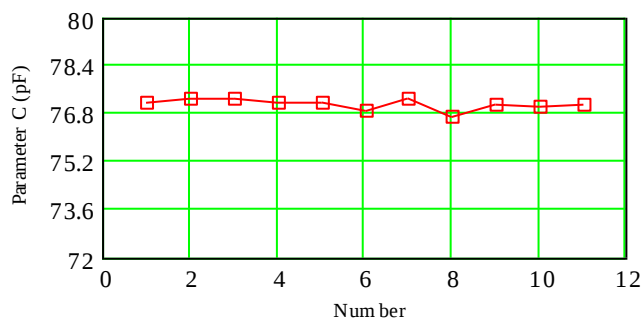
ทำการวัดซ้ำหลาย ๆ ครั้งแสดงตามรูปที่ 3.6 แล้วนำพารามิเตอร์ที่ได้ไปหาค่าเฉลี่ย โดยค่าเฉลี่ยที่ได้จะเป็นค่าที่จะนำไปใช้จริง



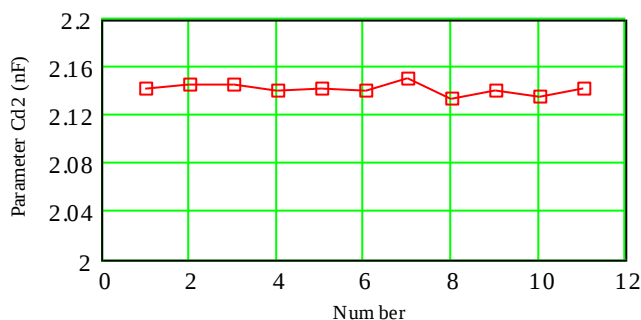
รูปที่ 6.7 กราฟแสดงการวัดพารามิเตอร์ R ด้านทางออก



รูปที่ 6.8 กราฟแสดงการวัดพารามิเตอร์ L ด้านทางออก



รูปที่ 6.9 กราฟแสดงการวัดพารามิเตอร์ C ด้านทางออก



รูปที่ 6.10 กราฟแสดงการวัดพารามิเตอร์ C_{d2} ด้านทางออก

จากรูปที่ 6.7 ถึงรูปที่ 6.10 วิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ด้านทางออกเฉลี่ยได้ดังนี้

$$R_{\text{ทางออก}} = 25.33\Omega$$

$$L_{\text{ทางออก}} = 39.86mH$$

$$C_{\text{ทางออก}} = 77.12pF$$

$$C_{d2} = 2.14 nF$$

6.2.3 ขั้นตอนที่ 3

สรุปผลการวัดพารามิเตอร์ ของวงจรสมมูลของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์ โดยใช้หลักการดังต่อไปนี้

- พารามิเตอร์ R , L และ C ของวงจรสมมูลของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์ ได้จากการวัดในขั้นตอนที่ 1

$$R_{\text{ทางเข้า}} = 15.24\Omega$$

$$L_{\text{ทางเข้า}} = 26.93mH$$

$$C_{\text{ทางเข้า}} = 114.25pF$$

- พารามิเตอร์ C_{d1} และ C_{d2} ของวงจรสมมูลของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์ ได้จากการวัดในขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 2 ตามลำดับ

$$C_{d1} = 1.12nF$$

$$C_{d2} = 2.14nF$$

- พารามิเตอร์ N ได้จากการวัดในครั้งที่ 2 โดยสมการ (3.7), (3.8) และ (3.9) โดยมีค่าดังนี้

$$N = \sqrt{\frac{R_{\text{ทางออก}}}{R_{\text{ทางเข้า}}}} = 1.216$$

สรุปผลการวัดพารามิเตอร์ ของวงจรสมมูลของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์

$$R = 15.24\Omega$$

$$L = 26.93mH$$

$$C = 114.25pF$$

$$C_{d1} = 1.12nF$$

$$C_{d2} = 2.12nF$$

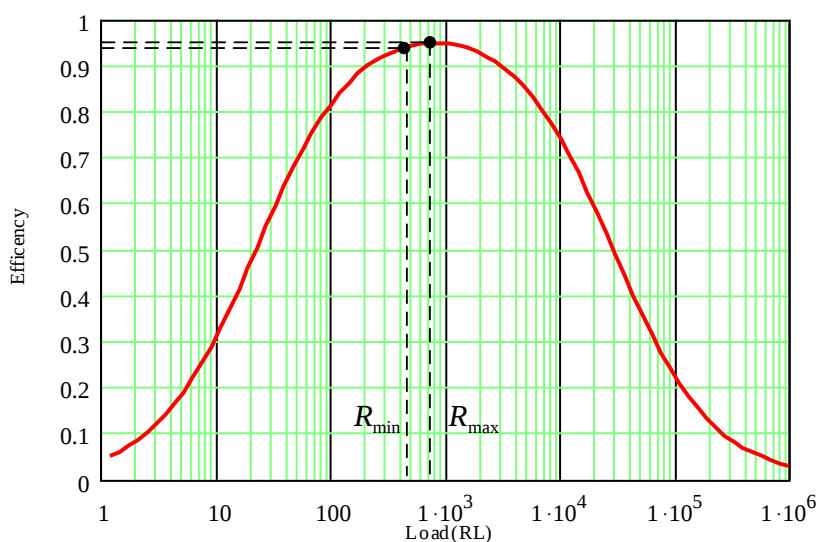
$$N = 1.216$$

6.3 การออกแบบวงจรภาคกำลัง

ในการออกแบบใช้เปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์และพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดในหัวข้อที่แล้วนำมาใช้ในการออกแบบ การออกแบบมีขั้นตอนการออกแบบดังนี้

6.3.1 ขั้นตอนที่หนึ่งคำนวณหาค่าโหลดที่เหมาะสม

เพื่อให้เปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์ทำงานมีประสิทธิภาพสูงสุดจะต้องคำนวณหาค่าโหลดที่เหมาะสมตามสมการที่ (3.50) นำมาแสดงเป็นกราฟได้ตามรูปที่ 6.2

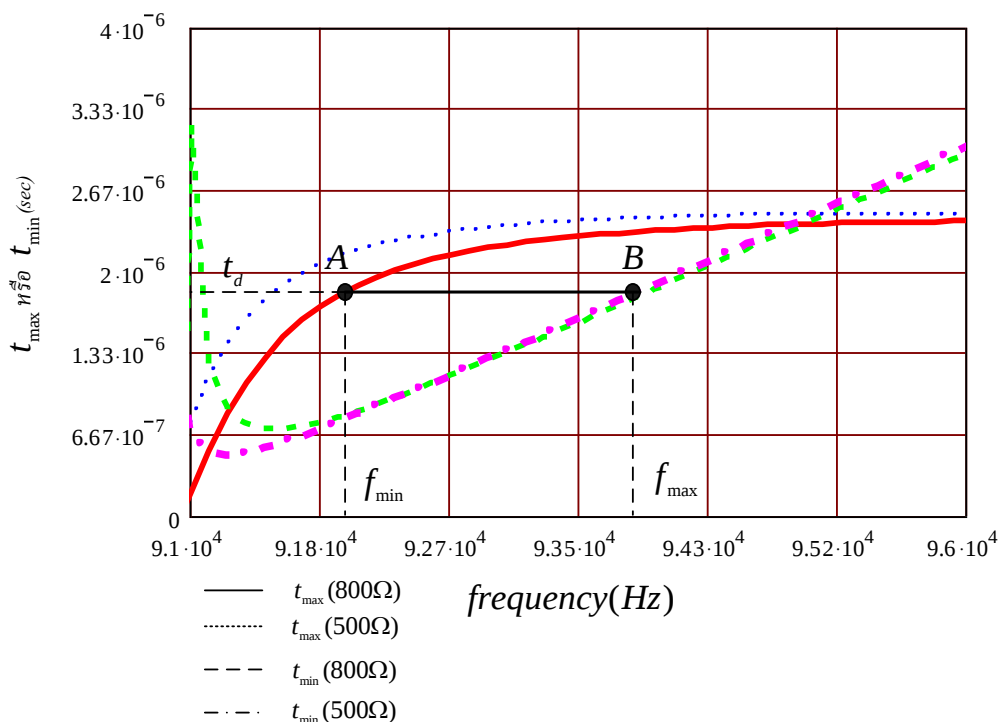


รูปที่ 6.11 กราฟแสดงโหลดที่เหมาะสม

กำหนดช่วงของโหลดที่เหมาะสมโดยกำหนดช่วงโหลดที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงกว่า 90% จากรูปที่ 6.11 กำหนดโหลดในช่วง $R_{min} = 500\Omega$ และ $R_{max} = 800\Omega$ โหลดที่ใช้คำนวณจะเป็นค่าของ R_{eq}

6.3.2 ขั้นตอนที่ 2 หาช่วงเวลา Dead-time

เพื่อให้สวิตช์ทำงานแบบ ZVS จะต้องหาช่วงเวลาที่น้อยที่สุด (t_{min}) และช่วงเวลาที่มากที่สุด (t_{max}) ในสมการที่ (4.15) และ (4.19) ตามลำดับ แล้วนำสมการมาแสดงเป็นกราฟโดยใช้ค่าโหลดตามขั้นตอนที่ 1 คือ $R_{min} = 500 \Omega$ และ $R_{max} = 800 \Omega$ ได้กราฟดังรูปที่ 6.12



รูปที่ 6.12 กราฟการแสดงผล Dead-time

การหาช่วงเวลาที่น้อยที่สุด (t_{min}) และช่วงเวลาที่มากที่สุด (t_{max}) ของค่าโหลด $R_{min} = 500 \Omega$ และ $R_{max} = 800 \Omega$ จากรูปที่ 6.12 จะมีช่วงเวลา dead-time ทำให้เกิด ZVS คือช่วงเวลาที่อยู่ต่ำกว่า t_{max} และสูงกว่า t_{min} โดยจะเลือกช่วงเวลา dead-time ที่อยู่ด้านในสุดเพื่อให้ครอบคลุมค่าโหลดได้ทั้งหมดจากการกำหนดค่า dead-time จะทำให้ได้ค่า f_{min} และ f_{max} ตามมา จากรูปสามารถกำหนดค่าต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$\text{Dead-time} = 1.8 \text{ us}$$

$$f_{min} = 91000 \text{ Hz}$$

$$f_{max} = 94000 \text{ Hz}$$

6.3.3 ขั้นตอนที่ 3 คำนวณหาช่วงแรงดันไฟฟ้า V_{DC} ที่เปลี่ยนแปลงได้

จากขั้นตอนที่หนึ่งและขั้นตอนที่สองได้ค่าช่วงโหลดที่ $R_{min} = 500 \Omega$ และ $R_{max} = 800 \Omega$ ค่า Dead-time = 1.8 us ค่าความถี่ต่ำสุด ($f_{min} = 91000 \text{ Hz}$) และ ค่าความถี่สูงสุด ($f_{max} = 94000 \text{ Hz}$) จาก

ค่าดังกล่าวนำมาวิเคราะห์การขยายระหว่าง V_{DC} กับ V_{out} โดยให้ V_{out} คงที่ เพื่อหาช่วงการเปลี่ยนแปลงของ V_{DC}

จากสมการ (6.4) สามารถวิเคราะห์ช่วงแรงดันไฟฟ้า V_{DC} ที่สามารถเปลี่ยนแปลงได้สูงสุด และต่ำสุดที่ยังทำให้เกิด ZVS และยังควบคุมแรงดันทางไฟฟ้า V_{out} ได้

สมการค่าหลักมูลของ V_{in} ซึ่ง V_{in} มีลักษณะเป็นสี่เหลี่ยมคางหมู

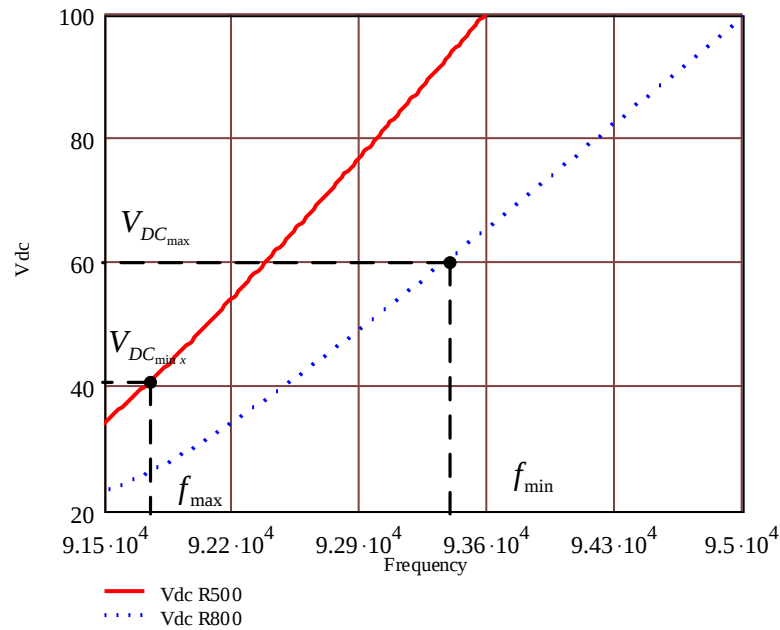
$$V_{in} = V_{DC} \frac{2 \sin(\pi_d f_s)}{\pi \pi_d f_s} \quad (6.1)$$

สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง V_{DC} และ V_{out}

$$V_{out} = V_{in} |A_V| \quad (6.2)$$

$$V_{out} = V_{DC} \frac{2 \sin(\pi_d f_s)}{\pi \pi_d f_s} |A_V| \quad (6.3)$$

$$V_{DC} = V_{out} \frac{\pi^2 t_d f_s}{2 \sin(\pi_d f_s) |A_V|} \quad (6.4)$$



รูปที่ 6.13 กราฟแสดงอัตราขยายระหว่าง V_{DC} และ V_{out}

จากรูปที่ 6.13 ในช่วงความถี่ f_{min} และ f_{max} จะได้ช่วงแรงดันไฟฟ้าที่ด้านทางเข้า (V_{DC}) ต่ำสุด และสูงสุดที่ยังทำให้เกิดสวิตช์ทำงานแบบ ZVS และยังควบคุมแรงดันทางไฟฟ้า V_{out} ได้

$$V_{DC} \text{ ต่ำสุด} = 40V$$

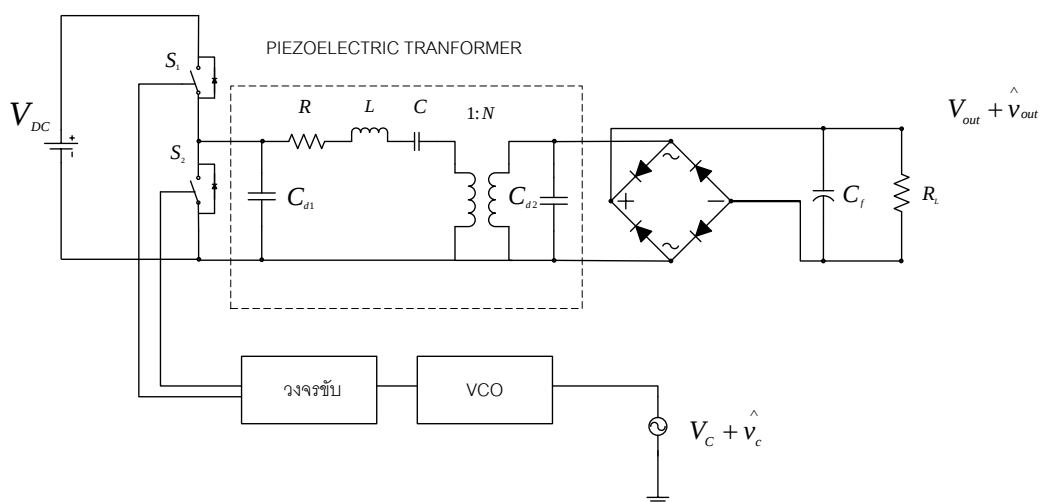
$$V_{DC} \text{ สูงสุด} = 60V$$

6.4 การออกแบบวงจรควบคุม

การออกแบบวงจรควบคุมเพื่อให้มีเสถียรภาพตลอดย่านการทำงาน มีการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกตามต้องการ และมีผลตอบสนองที่รวดเร็ว ในวิทยานิพนธ์เล่มนี้จะใช้วงจรควบคุมแบบ 3 – Pole 2 - Zero ขึ้นตอนการออกแบบแบ่งเป็นสองขึ้นตอนดังนี้

6.4.1 ขึ้นตอนที่ 1 วิเคราะห์ฟังก์ชันถ่ายโอนสัญญาณขนาดเล็กของภาคกำลัง

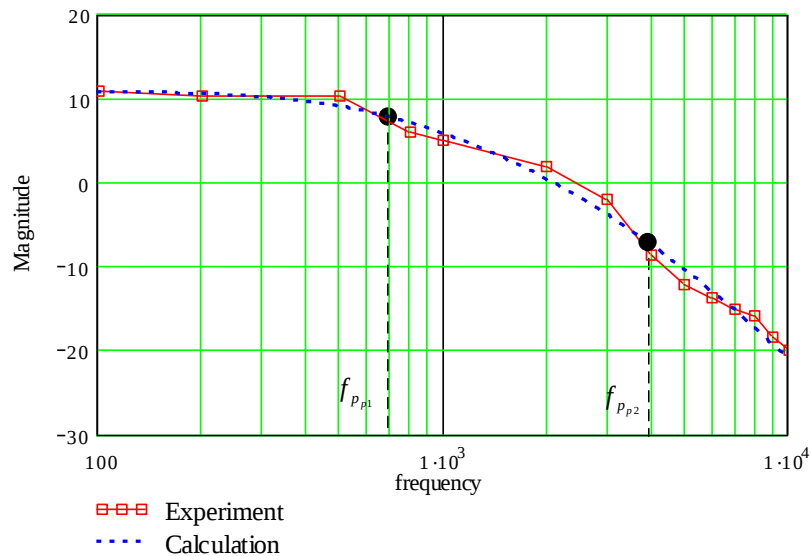
หลังจากที่ออกแบบวงจรภาคกำลังโดยใช้พารามิเตอร์ของ piezoelectric ทรานส์ฟอร์มเมอร์ที่ได้จากการวัดและค่า $R_{Load} = 500 \Omega$ Deat-time = 1.8 us, ค่าความถี่ในการสวิตช์ $f_s = 92100\text{Hz}$, $C_f = 10 \mu\text{F}$, $V_{in} = 50 \text{V}$ นำวงจรดังกล่าวมาทำการจำลองแบบในโปรแกรมตามรูปที่ 6.14



รูปที่ 6.14 วงจรจำลองสัญญาณขนาดเล็กของฟังก์ชันถ่ายโอน piezoelectric ทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ไม่รวมวงจรควบคุม

โดยที่เปลี่ยนความถี่ของ $\hat{v}_c$ ไป ดังนี้ 100 Hz , 200 Hz, 500 Hz, 800 Hz , 1 kHz, 2 kHz, 3 kHz, 4 kHz, 5 kHz, 6 kHz, 7 kHz, 8 kHz, 9 kHz, 10 kHz, แล้วนำผลการจำลองแบบของ $\hat{v}_c$ และ $\hat{v}_{out}$

ที่แต่ละความถี่มาหาขนาดอัตราขยายระหว่าง $\hat{v}_{out}$ และ $\hat{v}_c$ จากนั้นนำค่าอัตราขยายมาแสดงเป็นกราฟที่ความถี่ใดๆดังรูปที่ 6.15



รูปที่ 6.15 กราฟแสดงการหาฟังก์ชันถ่ายโอนวงจรภาคกำลังแบบ Small Signal และการทำ Curve Fitting

จากข้อมูลที่ได้ทำ Curve Fitting ได้ตำแหน่งของ Pole ตัวหนึ่งที่ความถี่ 700Hz , Pole ตัวที่สองที่ความถี่ 4 kHz และอัตราขยาย 3.58 ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของอัตราขยาย V_{out} และ V_c ดังนี้

$$G_p(s) = \frac{3.548}{\left(1 + \frac{s}{1257}\right) \left(1 + \frac{s}{6283}\right)}$$

6.4.2 ขั้นตอนที่ 2 ออกแบบวงจรควบคุม

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดได้จากผลคูณระหว่างฟังก์ชันถ่ายโอน ของวงจรภาคกำลังกับฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรควบคุมและฟังก์ชันถ่ายโอนของ Optocoupler, $[(G_p(s)G_c(s)H(s)]$ สามารถออกแบบวงจรควบคุมมีดังต่อไปนี้

1. กำหนดความถี่ Crossover frequency ที่ 3 kHz ค่าอัตราขยายที่ความถี่ Crossover frequency ของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรควบคุมที่ต้องการ 15 dB ซึ่งจะมีค่าเท่ากับอัตราขยายที่ความถี่ Crossover frequency ของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรภาคกำลังแต่เครื่องหมายตรงกันข้าม

2. วาง Pole ของวงจรควบคุมที่จุดกำเนิดหนึ่งตัว เพื่อให้อัตราขยายที่ความถี่ต่ำของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรควบคุมมีค่ามาก ส่งผลให้อัตราขยายที่ความถี่ต่ำของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดมีค่ามากเช่นกัน

3. วาง Zero ตัวที่หนึ่งของวงจรควบคุมที่ความถี่ 0.4 kHz เพื่อให้อัตราขยายที่ความถี่ต่ำของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรควบคุมมี Slope เท่ากับศูนย์ ส่งผลให้อัตราขยายที่ความถี่ต่ำของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดรวมมีค่าคงที่

4. วาง Zero ตัวที่สองของวงจรควบคุมที่ความถี่ 0.6 kHz เพื่อให้ฟังก์ชันถ่ายโอนรวมมีความ Slope เท่ากับศูนย์ส่งผลให้ Crossover frequency เลื่อนไกลออกไป

5. วาง Zero ตัวที่สองของวงจรควบคุมที่ความถี่ 6 kHz เพื่อให้อัตราขยายของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรควบคุมมี Slope เท่ากับศูนย์ ส่งผลให้อัตราขยายของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดรวมลดลงเข้าสู่ Crossover frequency

6. วาง Pole ตัวที่สามของวงจรควบคุมที่ความถี่ 7 kHz เพื่อให้อัตราขยายของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรควบคุมมี Slope เท่ากับ -20 dB/Decade ทำให้อัตราขยายของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดมีค่าความชัน -40 dB/Decade ส่งผลให้อัตราขยายของฟังก์ชันถ่ายโอนที่ความถี่สูงมีการลดทอนมาก

7. คำนวณค่าอัตราขยายที่ความถี่ของ Pole และ Zero ทั้งหมดของฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรควบคุมโดยใช้ค่าที่ได้จากขั้นตอนที่ 1 ถึงขั้นตอนที่ 4

$$K_C = 10^{\frac{|G_p(f_{cv})|}{20}} \frac{f_{cv}}{K_H} \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{f_{cv}}{f_{p1}}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{f_{cv}}{f_{p2}}\right)^2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_{cv}}{f_{z1}}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{f_{cv}}{f_{z2}}\right)^2}}$$

โดยที่

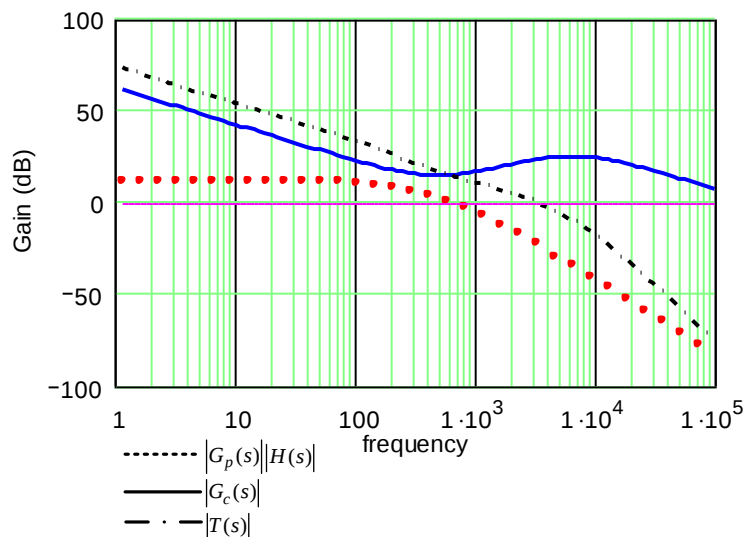
$$K_H = H(S) = \frac{5}{20} = 0.25$$

$$|G_p(f_{cv})| = 15dB$$

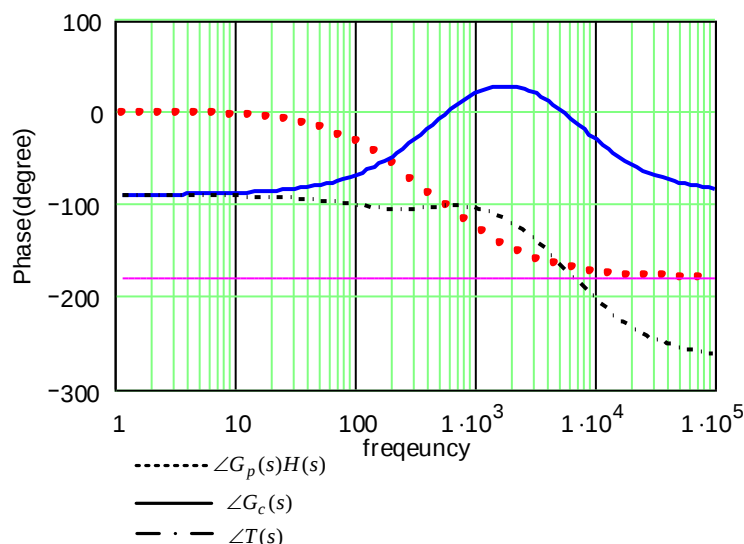
จะได้

$$K_C = 8145$$

นำฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดไม่รวมวงจรถอบคุม $G_p(s)H(s)$, ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดรวมฟังก์ชันถ่ายโอนวงจรถอบคุม $T(s)$, ฟังก์ชันถ่ายโอนวงจรถอบคุม $G_c(s)$ มาแสดงกราฟ ของขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนได้ตามรูปที่ 6.16 และแสดงเฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนได้ตามรูปที่ 6.17 ได้ Phase Margin และ Gain Margin มีค่าเป็น 47° และ 11 dB ตามลำดับ



รูปที่ 6.16 กราฟแสดงขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดไม่รวมวงจรถอบคุม $G_p(s)H(s)$, ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดรวมฟังก์ชันถ่ายโอนวงจรถอบคุม $T(s)$, ฟังก์ชันถ่ายโอนวงจรถอบคุม $G_c(s)$

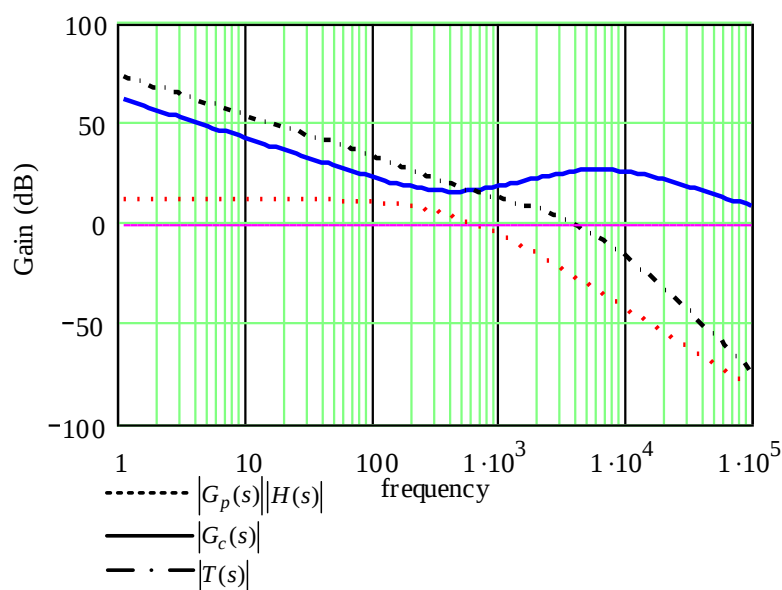


รูปที่ 6.17 กราฟแสดงเฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดไม่รวมวงจรถอบคุม $G_p(s)H(s)$, ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดรวมฟังก์ชันถ่ายโอนวงจรถอบคุม $T(s)$, ฟังก์ชันถ่ายโอนวงจรถอบคุม $G_c(s)$

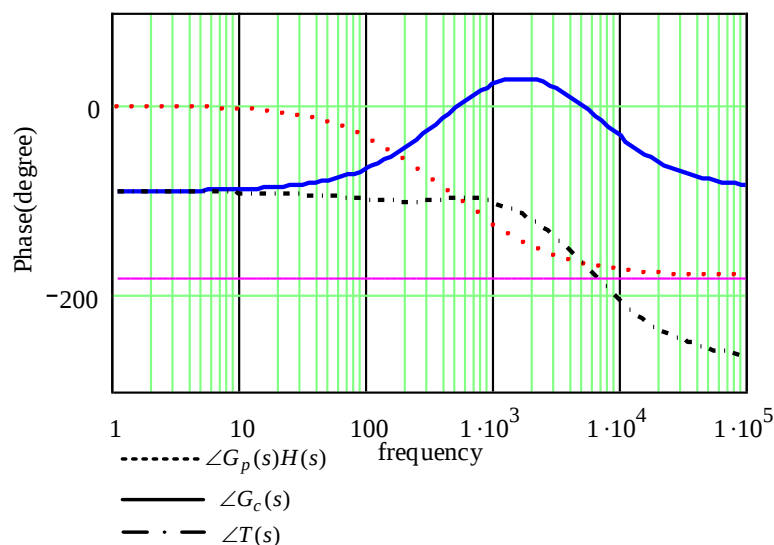
8. คำนวณค่าอุปกรณ์ของวงจรควบคุมที่ใช้ได้แก่ $R_1=1.2 \text{ k}\Omega$, $R_2=130 \text{ k}\Omega$, $R_3=30 \text{ k}\Omega$, $C_1=220 \text{ nF}$, $C_2 = 15\text{nF}$, และ $C_3 = 820\text{pF}$ นำค่าอุปกรณ์ของวงจรควบคุมไปแทนในสมการที่ (5.8) ได้ฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรควบคุมดังสมการดังนี้

$$\frac{\hat{v}_c(s)}{\hat{v}_o(s)} = 8384 \frac{\left(1 + \frac{s}{2222}\right) \left(1 + \frac{s}{3418}\right)}{s \left(1 + \frac{s}{3497}\right) \left(1 + \frac{s}{4287}\right)}$$

นำค่าอุปกรณ์ที่คำนวณได้มาทดสอบโดยแสดงฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดไม่รวมวงจรควบคุม, ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดรวมฟังก์ชันถ่ายโอนวงจรควบคุม, ฟังก์ชันถ่ายโอนวงจรควบคุมที่ได้จากค่าอุปกรณ์ มาแสดงขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนได้ตามรูปที่ 6.18 และแสดงเฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนได้ตามรูปที่ 6.19 ได้ Phase Margin และ Gain Margin มีค่าเป็น 45° และ 8 dB ตามลำดับ



รูปที่ 6.18 กราฟแสดงขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดไม่รวมวงจรควบคุม $G_p(s)H(s)$, ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดรวมฟังก์ชันถ่ายโอนวงจรควบคุม $T(s)$, ฟังก์ชันถ่ายโอนวงจรควบคุม $G_c(s)$ จากการคำนวณ



รูปที่ 6.19 กราฟแสดงเฟสของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดไม่รวมวงจรควบคุม, $G_p(s)H(s)$, ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดรวมฟังก์ชันถ่ายโอนวงจรควบคุม $T(s)$, ฟังก์ชันถ่ายโอนวงจรควบคุม $G_c(s)$ จากการคำนวณ

6.5 สรุป

การออกแบบเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์วงจรต้นแบบออกแบบให้วงจรมีการทำงานที่ประสิทธิภาพสูง คือออกแบบให้ทำงานที่โหลดเหมาะสม และ ให้สวิตช์ทำงานแบบ ZVS ในการออกแบบวงจรควบคุมสำหรับวงจรเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ต้นแบบในส่วนของภาคกำลังฟังก์ชันถ่ายโอนมี Pole 2 ตัว เลือกใช้วงจรควบคุมแบบ 3 – Pole 2 – Zero วงจรควบคุมชนิดนี้จะส่งผลให้ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดมีอัตราขยายที่ความถี่ต่ำสูงและ ความถี่ Crossover frequency อยู่ตำแหน่งความถี่สูง