

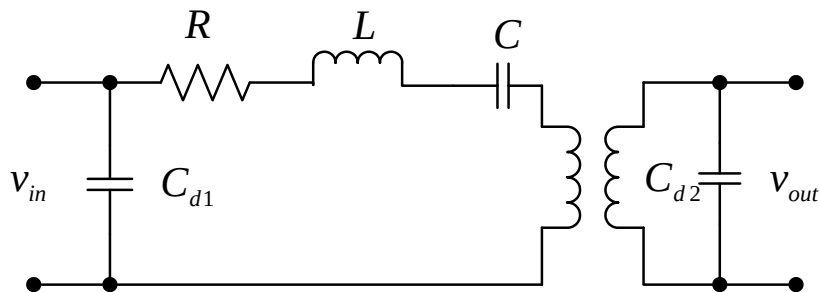
บทที่ 3

การวัดและวิเคราะห์พารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์

3.1 บทนำ

การนำเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์มาใช้งาน จำเป็นต้องทราบค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ภายในของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ ซึ่งพารามิเตอร์บางพารามิเตอร์ไม่สามารถวัดได้โดยตรงเพราะพารามิเตอร์เหล่านั้นเป็นพารามิเตอร์ทางกล แต่อย่างไรก็ตามสามารถศึกษาการทำงานของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ได้โดยใช้วงจรสมมูลทางไฟฟ้าที่ได้กล่าวไปในบทที่ 2 ดังนั้นขั้นตอนที่สำคัญของการศึกษาเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คือ การวิเคราะห์พารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ต่อไป

เปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์สามารถจำลองได้ด้วยวงจรสมมูล ตามรูปที่ 3.1 โดยที่ R , L , และ C เป็นพารามิเตอร์ที่จำลองของการทำงานทางกล C_{d1} , C_{d2} เป็นค่าตัวเก็บประจุเสมือนทางด้านเข้าและทางด้านออกตามลำดับ, N คืออัตราการเปลี่ยนรูปแบบของพลังงานรวมของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ดังที่ได้กล่าวมาแล้ว [4]



รูปที่ 3.1 วงจรสมมูลของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์

3.2 หลักการวัด

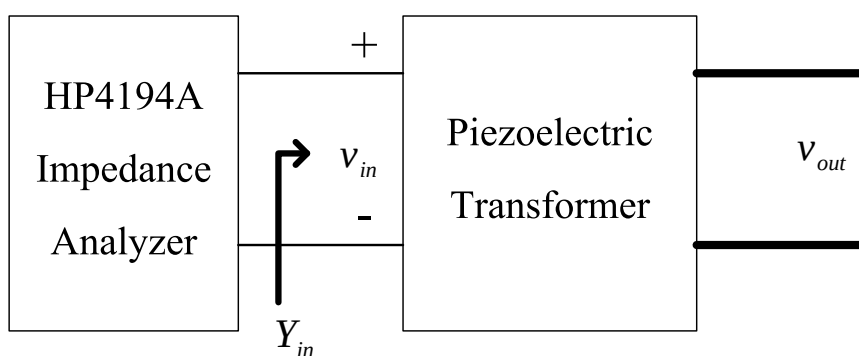
ค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ สามารถวัดได้ตามรูปที่ 3.2 โดยแบ่งออกเป็นสามขั้นตอนดังต่อไปนี้



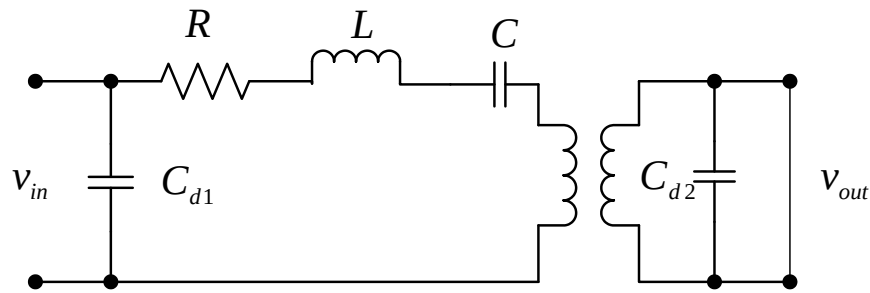
รูปที่ 3.2 การวัดพารามิเตอร์ของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์

3.2.1 ขั้นตอนที่ 1

นำเครื่องวัด Impedance Analyzer HP4194A วัดค่า Admittance ทางด้านทางเข้าของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ขณะที่ลัดวงจรทางด้านทางออกตามรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.4 ค่า Admittance ที่ได้จากการวัดประกอบด้วย Susceptance และ Conductance ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาพารามิเตอร์ของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ตามหัวข้อที่ 3.3 [4]



รูปที่ 3.3 การวัดค่า Admittance ที่ทางเข้าและลัดวงจรด้านทางออก



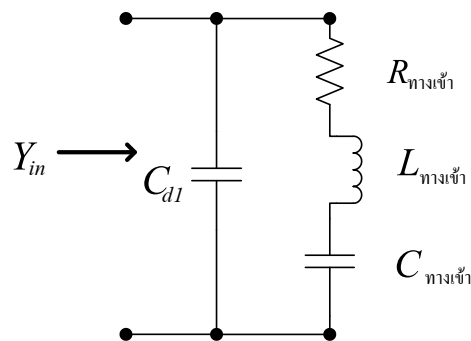
รูปที่ 3.4 วงจรสมมูลที่ได้จากการวัดพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอเมอร์ตามรูปที่ 3.3

ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดเมื่อเทียบกับพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอเมอร์ได้ดังนี้

$$R_{\text{ทางเข้า}} = R \quad (3.1)$$

$$L_{\text{ทางเข้า}} = L \quad (3.2)$$

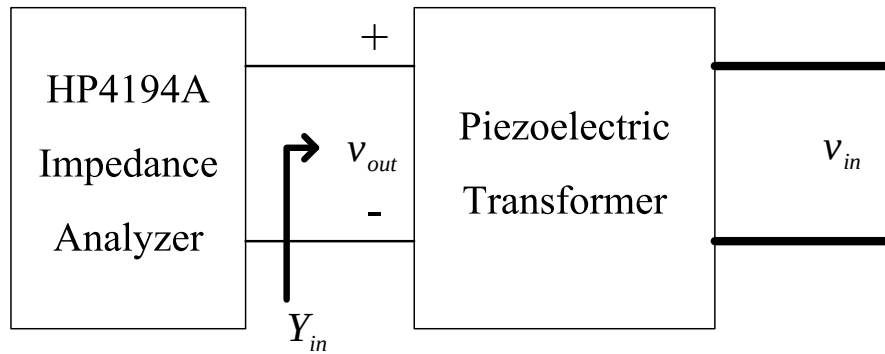
$$C_{\text{ทางเข้า}} = C \quad (3.3)$$



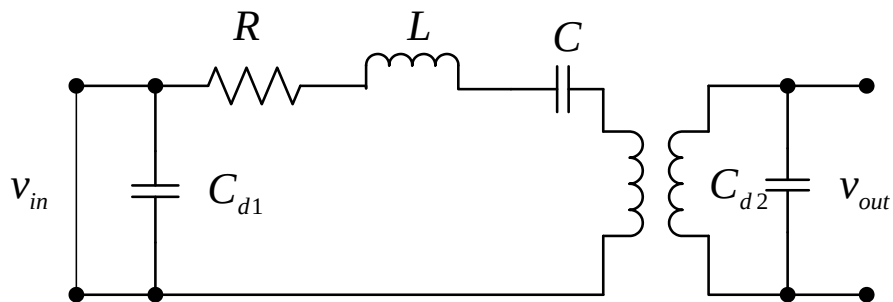
รูปที่ 3.5 Admittance ด้านทางเข้าเมื่อลัดวงจรที่ด้านทางออก

3.2.2 ขั้นตอนที่ 2

นำเครื่องวัด Impedance Analyzer HP41941A วัดค่า Admittance ทางด้านทางออกของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอเมอร์ขณะที่ลัดวงจรทางด้านทางเข้าตามรูปที่ 3.6 และรูปที่ 3.7 ค่า Admittance ที่ได้จากาวัดประกอบด้วย Susceptance และ Conductance ซึ่งสามารถนำมาคำนวณหาพารามิเตอร์ของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอเมอร์ตามหัวข้อที่ 3.3 [4]



รูปที่ 3.6 การวัด Admittance ทางออกด้วยวงจรด้านทางเข้า



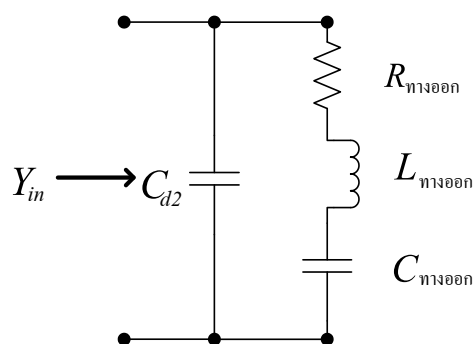
รูปที่ 3.7 วงจรสมมูลที่ได้จากการวัดพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์เมอร์ตามรูปที่ 3.6

ค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการวัดเมื่อเทียบกับพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์เมอร์ได้ดังนี้

$$R_{\text{ทางออก}} = RN^2 \quad (3.4)$$

$$L_{\text{ทางออก}} = LN^2 \quad (3.5)$$

$$C_{\text{ทางออก}} = \frac{C}{N^2} \quad (3.6)$$



รูปที่ 3.8 Admittance ด้านทางเข้าเมื่อลัดวงจรที่ด้านทางเข้า

3.2.3 ขั้นตอนที่ 3 การคำนวณค่า N

N คืออัตราการเปลี่ยนรูปแบบของพลังงานรวมของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์สามารถคำนวณได้จาก วงจรสมมูลของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์เช่นเดียวกับทรานส์ฟอร์มเมอร์

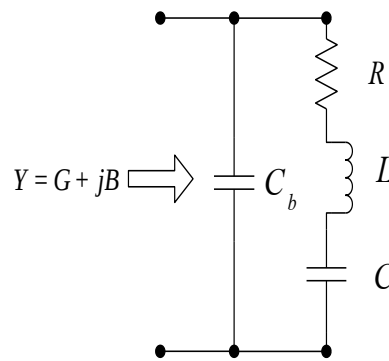
$$N = \sqrt{\frac{R_{\text{ทางออก}}}{R_{\text{ทางเข้า}}}} \quad \text{หรือ} \quad (3.7)$$

$$N = \sqrt{\frac{L_{\text{ทางออก}}}{L_{\text{ทางเข้า}}}} \quad \text{หรือ} \quad (3.8)$$

$$N = \sqrt{\frac{C_{\text{ทางเข้า}}}{C_{\text{ทางออก}}}} \quad (3.9)$$

3.3 สมการที่เกี่ยวข้อง

การวัดเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ตามรูปที่ 3.3 และรูปที่ 3.6 สามารถจำลองวงจรสมมูลทั่วไปของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ได้ตามรูปที่ 3.9 ซึ่งสามารถแสดงสมการทั่วไปที่เกี่ยวข้องได้ดังนี้ [6] [7] [8] [9]



รูปที่ 3.9 วงจรสมมูลทั่วไปของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ขณะลัดวงจรด้านทางเข้าหรือทางออก

$$Y = \frac{R}{R^2 + (X_L - X_C)^2} + j \left(\frac{R^2 + (X_L - X_C)^2 - X_{C_b}(X_L - X_C)}{X_{C_b}(R^2 + (X_L - X_C)^2)} \right) \quad (3.10)$$

$$Y = G + jB \quad (3.11)$$

$$G = \frac{R}{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (3.12)$$

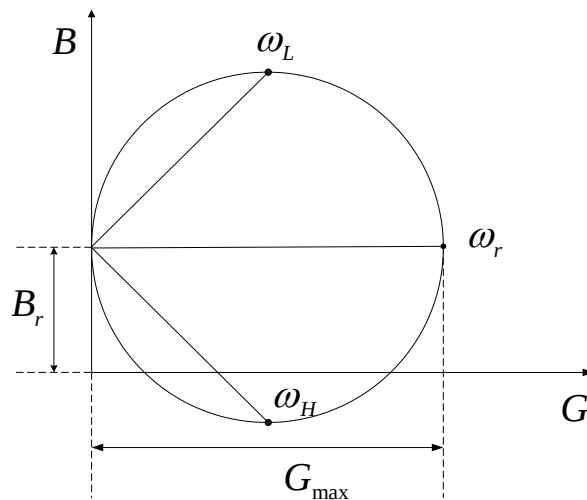
$$B = \frac{R^2 + (X_L - X_C)^2 - X_{C_b}(X_L - X_C)}{X_{C_b}(R^2 + (X_L - X_C)^2)} \quad (3.13)$$

Impedance ของ C_b มากกว่า Impedance ของ R, L, C และ กำหนดความถี่ที่ความถี่ Series Resonance $\omega = \omega_r \Rightarrow X_L = X_C$, คำนวณค่า G และ B ที่ความถี่ $\omega = \omega_r$ กำหนด $G(\omega_r) = G_{\max}$, $B(\omega_r) = B_r$

$$G_{\max} = \frac{1}{R} \Rightarrow R = \frac{1}{G_{\max}} \quad (3.14)$$

$$C_b = \frac{B_r}{\omega_r} \quad (3.15)$$

พิจารณาความถี่ที่ตำแหน่งต่ำสุด (ω_L) และความถี่ที่ตำแหน่งสูงสุด (ω_H) ของ Admittance ตามรูปที่ 3.10



รูปที่ 3.10 การแสดงการวัดพารามิเตอร์ของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ด้วย Admittance circle

ถ้าพิจารณา Impedance ของ C_{dl} มีค่ามากกว่า ค่าของ L, R และ C

Q คือ Mechanical Quality Factor ของวงจร Series Resonance

$$Q = \frac{\omega_r}{\omega_H - \omega_L} \quad (3.16)$$

พิจารณาค่าพารามิเตอร์ L

$$Q = \omega_r \frac{L}{R} \quad (3.17)$$

$$L = R \frac{1}{\omega_H - \omega_L} \quad (3.18)$$

พิจารณาค่าพารามิเตอร์ C

$$Q = \frac{1}{RC\omega_r} \quad (3.19)$$

$$C = \frac{\omega_H - \omega_L}{R(\omega_r)^2} \quad (3.20)$$

สรุปการวัดและการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของเปียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์คือ
จากรูปที่ 3.4

R : คำนวณจากสมการ (3.14)

$C_{dl} = C_b$: คำนวณจากสมการ (3.15)

L : คำนวณจากสมการ (3.18)

C : คำนวณจากสมการ (3.20)

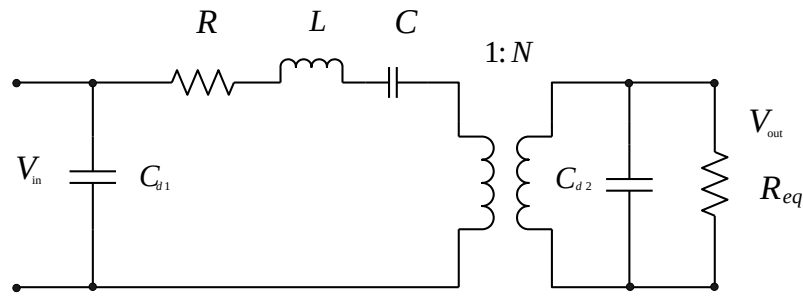
จากรูปที่ 3.7

$C_{d2} = C_b$: เช่นเดียวคำนวณจากสมการ (3.15)

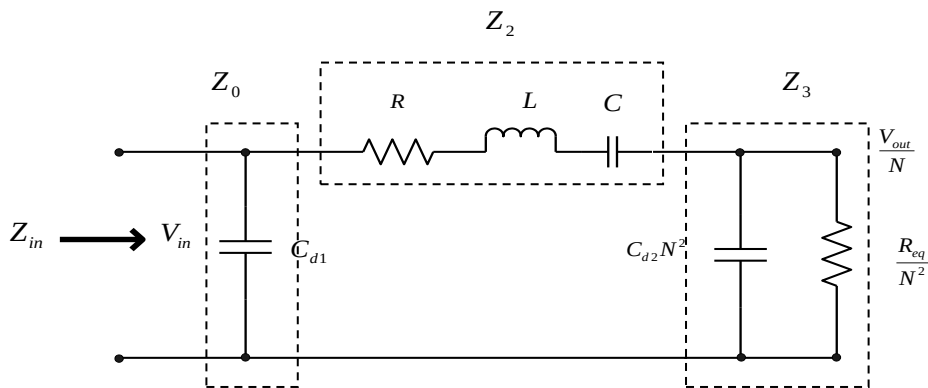
N : คำนวณจากสมการ (3.7) หรือ (3.8) หรือ (3.9)

3.4 Input Impedance

ค่าของ Input Impedance คำนวณได้ตามรูปที่ 3.11 ซึ่งวงจรสมมูลที่มีโหลด (R_{eq}) ต่ออยู่ และได้สมการ Input Impedance (Z_{in}) ตามสมการที่ (3.25) ซึ่งสมการดังกล่าวสามารถแยกวิเคราะห์ได้สองส่วน คือขนาดของ Input Impedance และมุมของ Input Impedance ตามสมการที่ (3.26) และสมการที่ (3.27) [3]



รูปที่ 3.11 วงจรเทียบโซ่อิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ก่อนการยุบวงจรเพื่อวิเคราะห์ Input Impedance



รูปที่ 3.12 วงจรเทียบโซ่อิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์หลังการยุบวงจรเพื่อวิเคราะห์ Input Impedance

โดยที่

$$Z_3 = \frac{N^2 \times \frac{1}{SC_{d2}} \times \frac{R_L}{N^2}}{N^2 \times \frac{1}{SC_{d2}} + \frac{R_L}{N^2}} \quad (3.21)$$

$$Z_2 = R + \frac{1}{SC} + LS \quad (3.22)$$

$$Z_0 = \frac{1}{SC_{d1}} \quad (3.23)$$

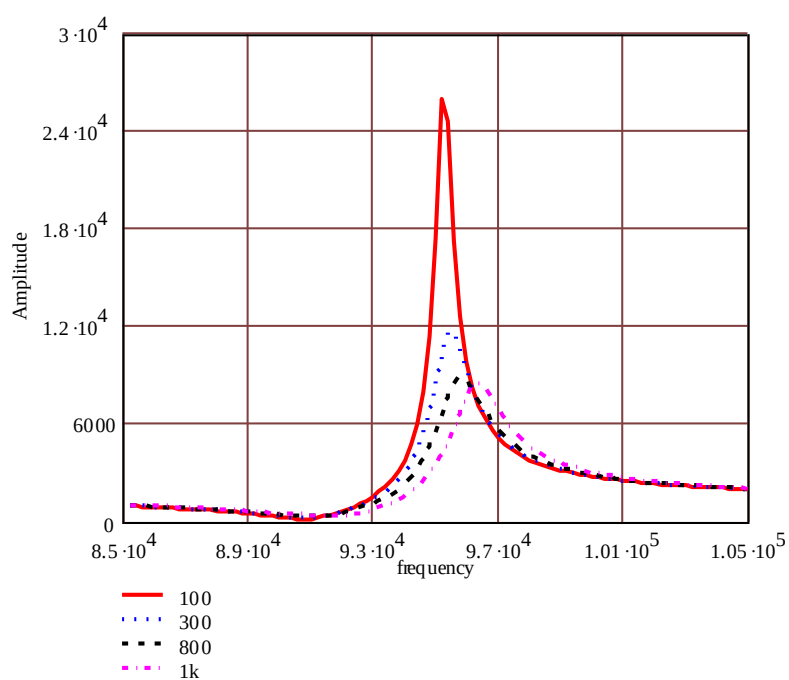
$$Z_1 = Z_2 + Z_3 \quad (3.24)$$

$$Z_{in} = \frac{Z_1 \times Z_0}{Z_1 + Z_0} \quad (3.25)$$

จากสมการที่(3.25)นำมาวิเคราะห์หาขนาดของ Input Impedance ได้ดังนี้

$$|Z_{in}| = \left| \frac{Z_1 \times Z_0}{Z_1 + Z_0} \right| \quad (3.26)$$

จากสมการที่ (3.26) นำมาแสดงเป็นกราฟได้ดังต่อไปนี้



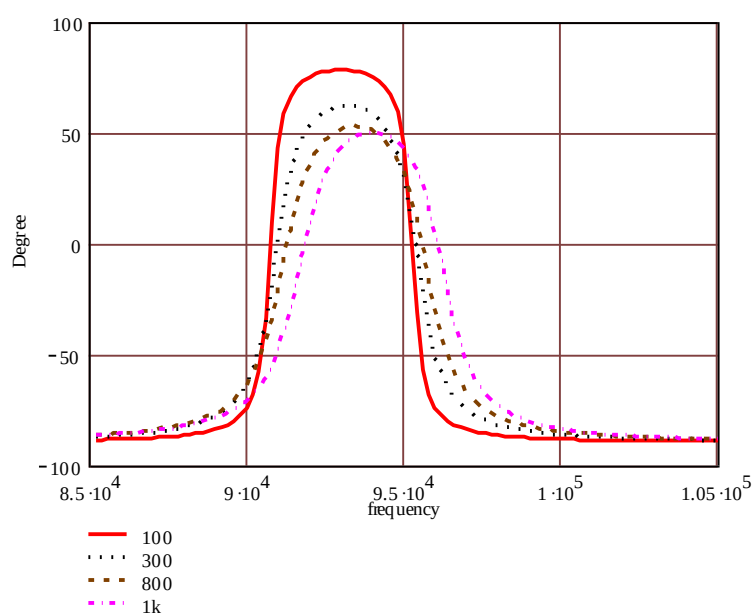
รูปที่ 3.13 กราฟของขนาด Input Impedance

จากรูปที่ 3.13 ถ้าขนาดของโหลดเพิ่มมากขึ้นที่ความถี่หลังความถี่ resonant ขนาดของ Input Impedance มีขนาดเล็กลง

จากสมการที่(3.25)นำมาวิเคราะห์หามุมของ Input Impedance ได้ดังนี้

$$\phi_{in} = a \tan \left[\frac{\text{Im}(Z_{in})}{\text{Re}(Z_{in})} \right] \quad (3.27)$$

จากสมการที่ (3.27) นำมาแสดงเป็นกราฟได้ดังต่อไปนี้

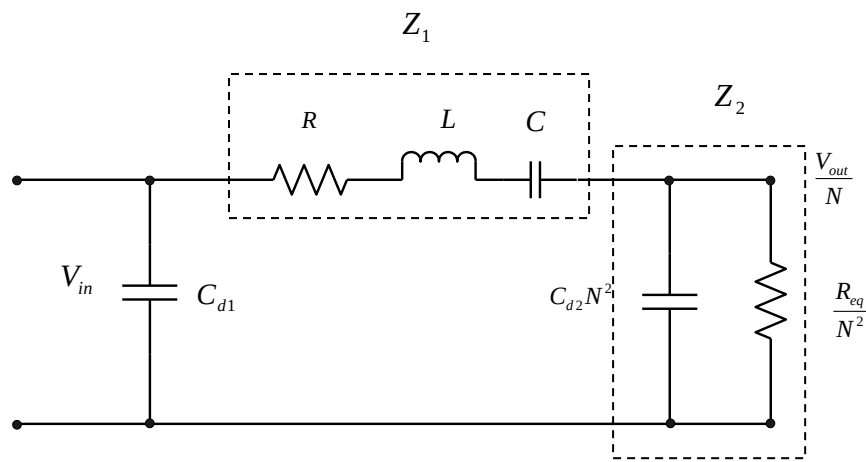


รูปที่ 3.14 กราฟของมุม Input Impedance

จากรูปที่ 3.14 ถ้าขนาดของโหลดเพิ่มมากขึ้น จะทำให้มุมของ Input Impedance จะมีขนาดเป็นบวกน้อยลงซึ่งจะทำให้กระแสไฟฟ้าที่ทางเข้าตามหลังหลังแรงดันไฟฟ้าลดลง

3.5 อัตราการขยายความแรงดันไฟฟ้า (Voltage Gain)

อัตราการขยายแรงดันไฟฟ้าระหว่างด้านทางออกของเพียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์และด้านทางเข้าของเพียโซอิเล็กทริกทรานฟอเมอร์ สามารถคำนวณได้จากรูปที่ 3.15 และได้สมการอัตราการขยายแรงดันไฟฟ้าตามสมการที่ (3.31) ซึ่งสมการดังกล่าวสามารถนำมาแยกวิเคราะห์ได้สองส่วน คือขนาดของอัตราการขยายระหว่างแรงดันไฟฟ้าด้านทางเข้าของเพียโซอิเล็กทริกทรานฟอเมอร์กับแรงดันไฟฟ้าด้านทางออกของเพียโซอิเล็กทริกทรานฟอเมอร์ ตามสมการที่ (3.32) และมุมของอัตราการขยายระหว่างแรงดันไฟฟ้าด้านทางเข้าของเพียโซอิเล็กทริกทรานฟอเมอร์กับแรงดันไฟฟ้าด้านทางออกของเพียโซอิเล็กทริกทรานฟอเมอร์ ตามสมการที่ (3.33) [3]



รูปที่ 3.15 วงจรวิเคราะห์อัตราการขยายของแรงดันไฟฟ้า

$$Z_2 = \frac{N^2 \times \frac{1}{SC_{d2}} \times \frac{R_L}{N^2}}{N^2 \times \frac{1}{SC_{d2}} + \frac{R_L}{N^2}} \quad (3.28)$$

$$Z_1 = R + \frac{1}{SC} + LS \quad (3.29)$$

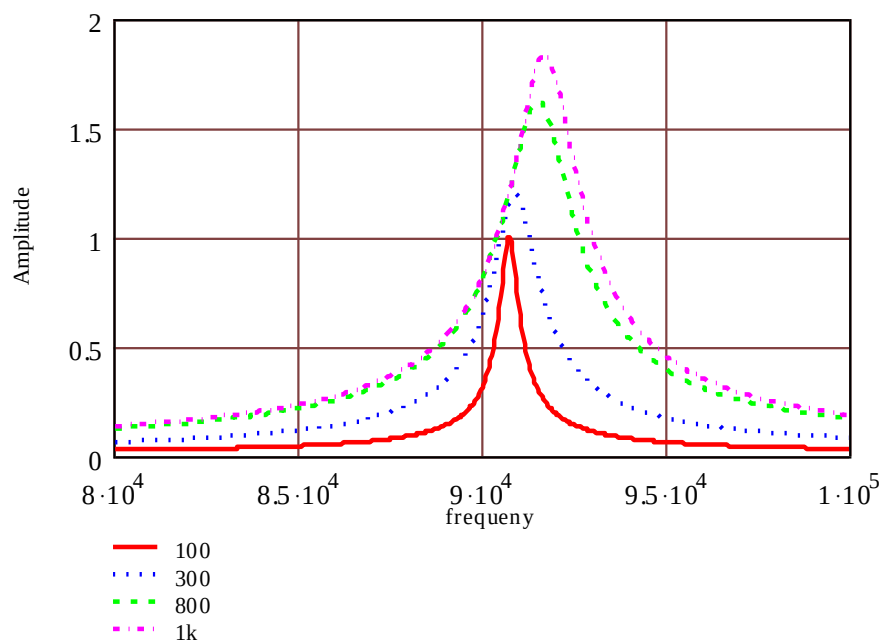
$$\frac{V_{out}}{N} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} V_{in} \quad (3.30)$$

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} N \quad (3.31)$$

จากสมการที่(3.31)นำมาวิเคราะห์ขนาดของอัตราการขยายของแรงดันไฟฟ้าได้ดังนี้

$$|A_v| = \left| \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} N \right| \quad (3.32)$$

จากสมการที่(3.32)นำมาแสดงเป็นกราฟได้ดังต่อไปนี้

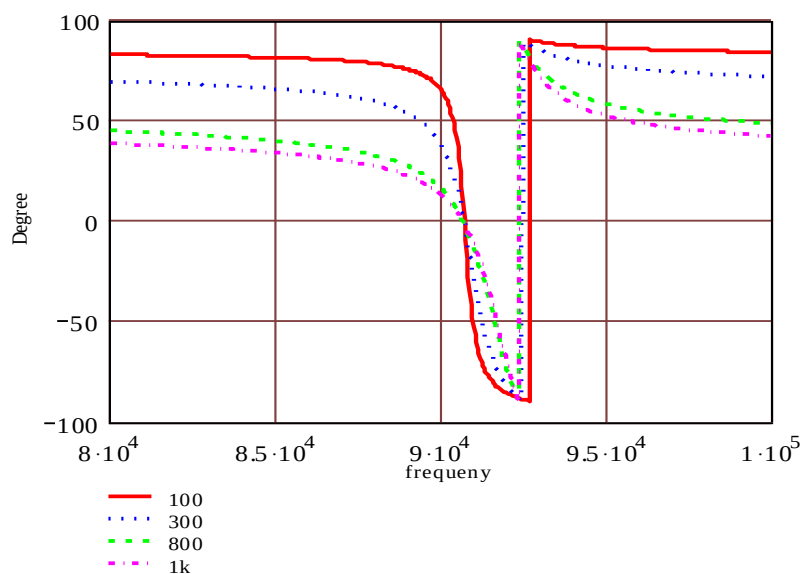


รูปที่ 3.16 ขนาดของอัตราการขยายของแรงดันไฟฟ้า

จากสมการที่(3.31)นำมาวิเคราะห์มุมของอัตราการขยายของแรงดันไฟฟ้าได้ดังนี้

$$\phi_{AV} = a \tan \left[\frac{\text{Im}(A_v)}{\text{Re}(A_v)} \right] \quad (3.33)$$

จากสมการที่(3.33)นำมาแสดงเป็นกราฟได้ดังต่อไปนี้



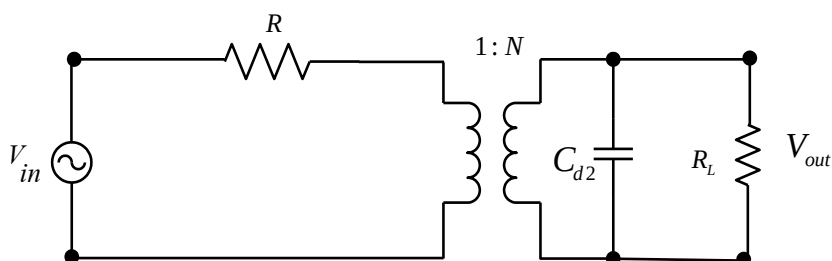
รูปที่ 3.17 มุมของอัตราขยายของแรงดันไฟฟ้า

3.6 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพและโหลดที่เหมาะสมของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์

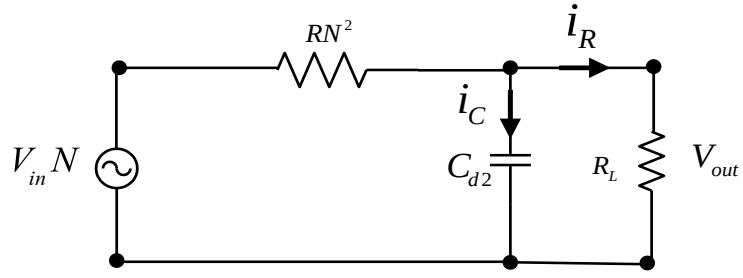
การออกแบบคอนเวอร์เตอร์ที่ทำงานร่วมกับเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ ให้มีประสิทธิภาพสูงต้องทราบว่าเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ทำงานที่โหลดที่เหมาะสมหรือไม่ ถ้าทำงานร่วมกับโหลดที่เหมาะสมก็จะส่งผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมของคอนเวอร์เตอร์มีประสิทธิภาพสูงไปด้วย [10]

เปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์สามารถจำลองแทนได้ด้วยวงจรสมมูล ตามรูปที่ 3.1 [2][3] โดยที่ R , L และ C เป็นพารามิเตอร์ที่จำลองผลการทำงานทางกล C_{d1} , C_{d2} เป็นตัวเก็บประจุเสมือนทางด้านเข้าและทางด้านออกตามลำดับ N คืออัตราการใช้รูปของพลังงานรวมของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์

ที่ $\omega = \omega_r$ และ C_{d1} มีค่า Impedance สูง



รูปที่ 3.18 เปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ที่ความถี่ ω_r



รูปที่ 3.19 ย้าย V_{in} และ R ด้านทางเข้าไปยังมาทางด้านทางออก

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (3.34)$$

$$A_v = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{N}{\left(\frac{N^2 R}{R_L} + jN^2 R \omega_r C_{d2} + 1 \right)} \quad (3.35)$$

$$|A_v| = \frac{N}{\sqrt{\left(\frac{N^2 R}{R_L} + 1 \right)^2 + (N^2 R \omega_r C_{d2})^2}} \quad (3.36)$$

กำลังงานทางไฟฟ้าด้านทางออกคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$P_{out} = \frac{|V_{out}|^2}{R_L} \quad (3.37)$$

$$|V_{out}| = V_{in} |A_v| \quad (3.38)$$

$$P_{out} = \frac{N^2 V_{in}^2}{R_L \left[\left(1 + \frac{N^2 R}{R_L} \right)^2 + (\omega_r C_{d2} N^2 R)^2 \right]} \quad (3.39)$$

สมการของกำลังงานทางไฟฟ้าด้านทางออก(3.39) สามารถคำนวณกำลังงานทางไฟฟ้าด้านทางออกสูงสุด ของวงจรที่โหลดใดๆ ได้จากการ Differentiation สมการที่(3.39) เปรียบเทียบกับ R_L และกำหนดให้ผลที่มีเท่ากับศูนย์ [10]

$$\frac{d(P_{out})}{dR_L} = 0 \quad (3.40)$$

โหลดที่ทำให้เกิดกำลังงานทางไฟฟ้าด้านทางออกสูงสุดของเพียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์ดังต่อไปนี้

$$R_{L,P_{out,max}} = \frac{N^2 R}{\sqrt{1 + (\omega_r C_{d2} N^2 R)^2}} \quad (3.41)$$

เมื่อ $(\omega_r C_{d2} N^2 R)^2 \ll 1$

$$R_{L,P_{out,max}} = N^2 R \quad (3.42)$$

แทนสมการที่ (3.42) ลงในสมการที่ (3.39) ได้กำลังงานทางไฟฟ้าด้านทางออกสูงสุดของเพียโซอิเล็กทริกทรานฟอร์มเมอร์ดังต่อไปนี้

$$P_{out,max} = \frac{N^2 V_{in}^2}{2R \left(1 + \sqrt{1 + (\omega_r C_{d2} N^2 R)^2} \right)} \quad (3.43)$$

เมื่อ $(\omega_r C_{d2} N^2 R)^2 \ll 1$

$$P_{out,max} = \frac{N^2 V_{in}^2}{4R} \quad (3.44)$$

กำลังงานด้านทางเข้ามีค่าดังต่อไปนี้

$$P_{in} = N^2 R |i_C + i_R|^2 + P_{out} \quad (3.45)$$

$$P_{in} = V_{out}^2 \left[\frac{N^2 R + R_L}{R_L^2} + (\omega_r C_{d2})^2 N^2 R \right] \quad (3.46)$$

สมการ (3.44) และ (3.46) สามารถคำนวณประสิทธิภาพของวงจรได้ดังนี้

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (3.47)$$

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{N^2 R}{R_L} + (\omega_r C_{d2})^2 N^2 R R_L} \quad (3.48)$$

สมการสามารถคำนวณประสิทธิภาพสูงสุดของวงจรที่โหลดใดๆได้จากการ Differentiation สมการที่ (3.48) เปรียบเทียบกับ R_L และกำหนดให้ผลที่มีเท่ากับศูนย์

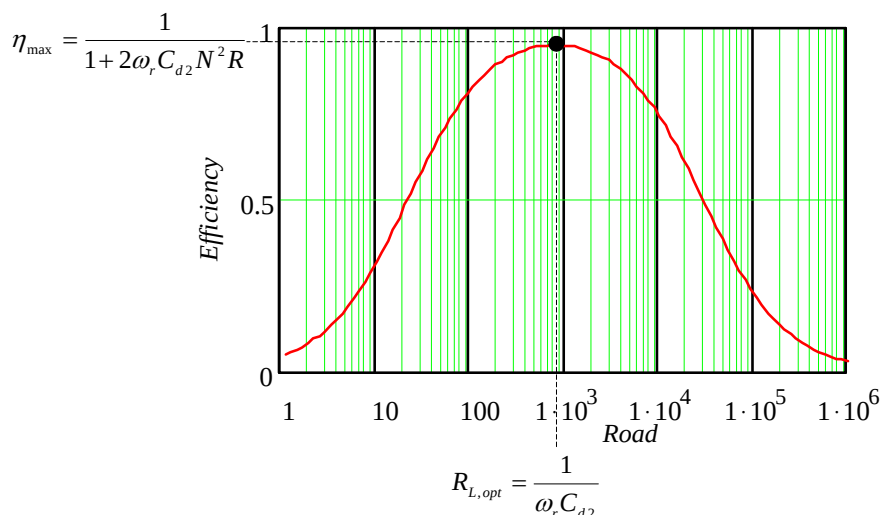
สมการของประสิทธิภาพสูงสุดของวงจรดังต่อไปนี้

$$\eta_{\max} = \frac{1}{1 + 2\omega_r C_{d2} N^2 R} \quad (3.49)$$

โดยที่

$$R_{L,opt} = \frac{1}{\omega_r C_{d2}} \quad (3.50)$$

จากสมการที่(3.48) นำมาแสดงกราฟได้ตามรูปที่3.20 โดยตำแหน่งที่เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ($\eta_{\max}$) ได้จากโหลดที่เหมาะสม ($R_{L(opt)}$) ตามสมการที่ (3.48) (3.49) (3.50)



รูปที่ 3.20 ประสิทธิภาพสูงสุดและโหลดที่เหมาะสม

3.7 สรุป

ในการนำ piezoelectric transducer ไปใช้งานต้องทราบค่าพารามิเตอร์ของวงจรและสามารถวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของวงจร piezoelectric transducer ซึ่งทำได้โดยการนำ piezoelectric transducer มาทำการลัดวงจรทางด้านทางออก แล้วหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรโดยใช้เทคนิค Admittance circle หลังจากนั้นก็ทำการลัดวงจรทางด้านทางเข้า แล้ววิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของวงจรโดยใช้เทคนิค Admittance circle เหมือนกับตอนแรก จากนั้นนำค่าที่ได้ไปคำนวณพารามิเตอร์ของวงจรสมมูล piezoelectric transducer ก็จะได้พารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของ piezoelectric transducer

ในการนำ piezoelectric transducer ไปออกแบบใช้งานต่างๆ สิ่งที่สำคัญมากไม่ยิ่งหย่อนไปกว่าการวิเคราะห์พารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของ piezoelectric transducer คือการวิเคราะห์คุณลักษณะเฉพาะของ piezoelectric transducer ทั้งนี้เพราะ piezoelectric transducer มีการทำงานที่ความถี่ช่วงหนึ่งเท่านั้น และโหลดกับความถี่ที่ทำงานต้องมีความเหมาะสม จึงจะทำให้วงจรทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ