

บรรณานุกรม

- [1] <http://www.americanpiezo.com>
- [2] นายมนทล นาวงษ์, “การศึกษาเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์สำหรับการประยุกต์ใช้งานในวงจรจ่ายกำลังแบบสวิตซ์ซิง”, วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2546.
- [3] Weixing Huang, “**Design of a Radial Mode Piezoelectric Transformer for a Charge Pump Electronic Ballast with High Power Factor and Zero Voltage Switching**”, Master of Science in Electrical Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001.
- [4] Lin, R.L. et. al. , “**Piezoelectric Transformer Characterization and Application of Electronic Ballast**”, Doctor of Philosophy in Electrical Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001.
- [5] Lin, C., “**Design and Analysis of Piezoelectric Transformer Converters**”, Doctor of Philosophy in Electrical Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1997.
- [6] R. Holland and E. P. Eernisse, “**Accurate measurement of coefficients in a ferroelectric ceramic**”, IEEE Trans. Sonic and Ultrasonics, Vol. SU-14, No. 4, pp. 173-181, Oct.1969.
- [7] Y. Tsuzuki and M. Toki, “**Precise determination of equivalent circuit parameters of quartz crystal resonators**”, Proc. of IEEE, pp. 1249-1250, Aug. 1976.
- [8] M. Toki, Y. Tsuzuki, and O. Kawano, “**A new equivalent circuit for piezoelectric disk resonators**” Proc. of IEEE, Vol. 68, No. 8, pp. 1032-1033, Aug. 1980.
- [9] E. Hanfner, “**The piezoelectric crystal unit -- definition and methods of measurement**” Proc. of IEEE, Vol. 57, No. 2, pp. 179-201, Feb. 1969.
- [10] T. Zaitzu, T. Inoue, O. Ohnishi and A. Iwamoto, “**2 - MHz Power Converter with Piezoelectric Ceramic Transformer**”, Proceedings of IEEE INTELEC.92, pp. 430-437.
- [11] Ray L. Lin, Fred C. Lee, Eric M. Bake and Dan Y. Chen, “**Inducter – less Piezoelectric Transformer Electronic Ballast for linear fluorescent lamp**”, Proceedings of IEEE INTELEC.92, pp. 664-669.

- [12] M. Sanz, P. Alou, A. Soto, RPrieto, J.A. Cobos and JUceda, **“Magnatic-less Converter based on Piezoelectric Transformers for step – down DC/DC and low power application”** Proceedings of IEEE INTELEC.92, pp. 615-621.

- [13] Svetlana Bronstein and Sam Ben-Yaakov, **“Design Considerations for Achieving ZVS in a Half Bridge Inverter that Drives a Piezoelectric Transformer with No Series Inductor ”**, IEEE PESC’02, vol.02, pp. 585-590.

- [14] กันติชา กิตติพิรชด, **“การออกแบบวงจรควบคุมของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์**
วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม, สถาบัน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

**โปรแกรม MathCAD สำหรับการวิเคราะห์และการออกแบบ วงจรเปียโซอิเล็กทริก
ทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์**

Programing Analysis Gain For Piezoelectric Trnsformers PT_01

$$m := 10^{-3} \quad n := 10^{-9} \quad p := 10^{-12} \quad k := 10^3$$

Parameters set

$$\begin{aligned} R &:= 15.24422 & L &:= 26.93489\text{m} & C &:= 114.258\text{p} \\ Cd1 &:= 1.119211\text{n} & Cd2 &:= 2.141935\text{n} & N &:= 1.216549539 \end{aligned}$$

Set Load

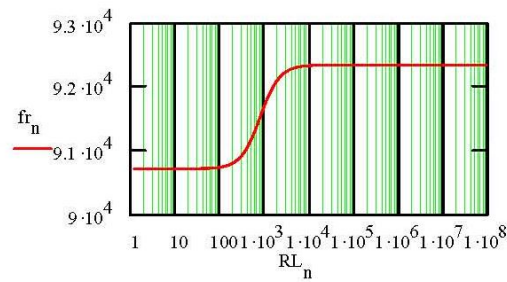
$$RL_{\min} := 1 \quad RL_{\max} := 100000\text{k} \quad f_{\text{mpt}} := 100 \quad n := 1..f_{\text{mpt}}$$

$$RL_n := 10^{\frac{\log(RL_{\max}) \cdot n}{f_{\text{mpt}}}}$$

Resonant Frequency

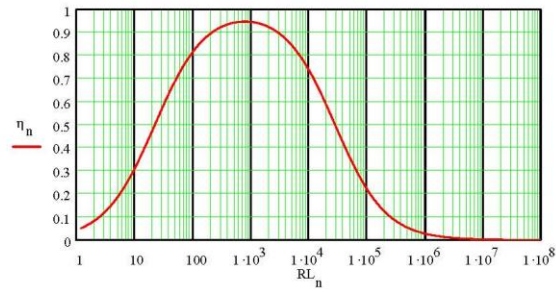
$$\Delta_n := L^2 C^2 N^4 + 2L \cdot C \cdot N^4 \cdot Cd2^2 \cdot (RL_n)^2 - 2L \cdot C^2 \cdot N^2 \cdot Cd2 \cdot (RL_n)^2 + N^4 \cdot Cd2^4 \cdot (RL_n)^4 + 2Cd2^3 \cdot (RL_n)^4 \cdot C \cdot N^2 + Cd2^2 \cdot (RL_n)^4 \cdot C^2$$

$$f_{r_n} := \frac{\sqrt{2L \cdot C \left[-L \cdot C \cdot N^2 + N^2 \cdot Cd2^2 \cdot (RL_n)^2 + Cd2 \cdot (RL_n)^2 \cdot C + \sqrt{\Delta_n} \right]}}{4\pi L \cdot C \cdot N \cdot Cd2 \cdot RL_n}$$



Efficiency at Resonance Frequency

$$\eta_n := \frac{1}{\left[1 + \left[1 + \left(2 \cdot \pi \cdot f_{r_n} \cdot Cd2 \cdot RL_n \right)^2 \right] \cdot N^2 \cdot \frac{R}{RL_n} \right]}$$



Frequency set

$$f_{\min} := 80k \quad f_{\max} := 100k \quad f_{\text{mpt}} := 500 \quad h := 0..f_{\text{mpt}}$$

$$f_{s_h} := f_{\min} + \frac{(f_{\max} - f_{\min})}{f_{\text{mpt}}} \cdot h$$

$$R_{eq} := 100$$

$$Av01_h := N \cdot \frac{\left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{s_h} \cdot Cd2 \cdot N^2)} \cdot \frac{R_{eq}}{N^2} \right]}{\left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{s_h} \cdot Cd2 \cdot N^2)} + \left(\frac{R_{eq}}{N^2} \right) \right]} \cdot \left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{s_h} \cdot Cd1)} \right]$$

$$\left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{s_h} \cdot Cd2 \cdot N^2)} \cdot \frac{R_{eq}}{N^2} \right] + \left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{s_h} \cdot L)} + \frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{s_h} \cdot C)} + R \right] \cdot \left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{s_h} \cdot Cd1)} \right]$$

$$R_{eq} := 300$$

$$Av02_h := N \cdot \frac{\left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{s_h} \cdot Cd2 \cdot N^2)} \cdot \frac{R_{eq}}{N^2} \right]}{\left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{s_h} \cdot Cd2 \cdot N^2)} + \left(\frac{R_{eq}}{N^2} \right) \right]} \cdot \left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{s_h} \cdot Cd1)} \right]$$

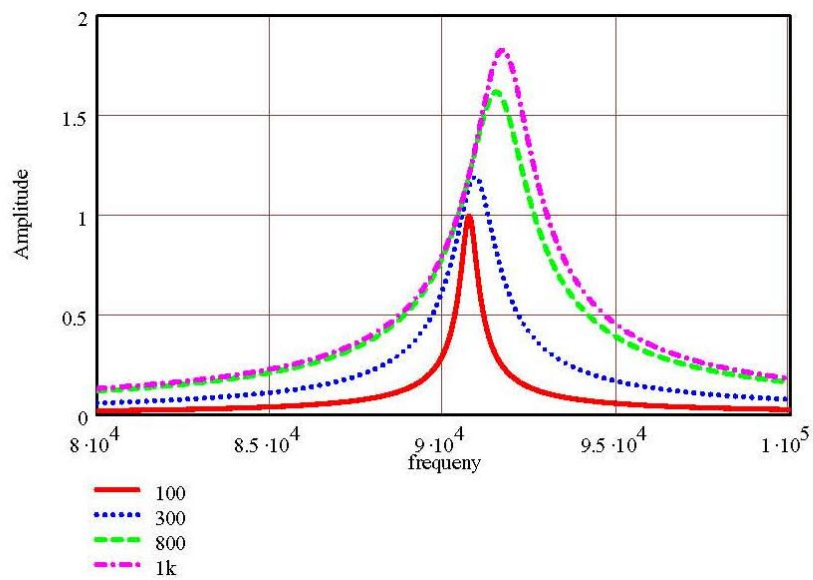
$$\left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{s_h} \cdot Cd2 \cdot N^2)} \cdot \frac{R_{eq}}{N^2} \right] + \left[(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{s_h} \cdot L) + \frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{s_h} \cdot C)} + R \right] \cdot \left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_{s_h} \cdot Cd1)} \right]$$

$$\text{Req} := 800$$

$$\text{Av03}_h := N \cdot \frac{\left[\frac{\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot \text{fs}_h \cdot \text{Cd2} \cdot N^2)} \cdot \frac{\text{Req}}{N^2}}{\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot \text{fs}_h \cdot \text{Cd2} \cdot N^2)} + \left(\frac{\text{Req}}{N^2} \right)} \right] \cdot \left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot \text{fs}_h \cdot \text{Cd1})} \right]}{\left[\frac{\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot \text{fs}_h \cdot \text{Cd2} \cdot N^2)} \cdot \frac{\text{Req}}{N^2}}{\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot \text{fs}_h \cdot \text{Cd2} \cdot N^2)} + \left(\frac{\text{Req}}{N^2} \right)} \right] + \left[(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot \text{fs}_h \cdot L) + \frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot \text{fs}_h \cdot C)} + R \right] \cdot \left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot \text{fs}_h \cdot \text{Cd1})} \right]}$$

$$\text{Req} := 1k$$

$$\text{Av04}_h := N \cdot \frac{\left[\frac{\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot \text{fs}_h \cdot \text{Cd2} \cdot N^2)} \cdot \frac{\text{Req}}{N^2}}{\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot \text{fs}_h \cdot \text{Cd2} \cdot N^2)} + \left(\frac{\text{Req}}{N^2} \right)} \right] \cdot \left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot \text{fs}_h \cdot \text{Cd1})} \right]}{\left[\frac{\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot \text{fs}_h \cdot \text{Cd2} \cdot N^2)} \cdot \frac{\text{Req}}{N^2}}{\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot \text{fs}_h \cdot \text{Cd2} \cdot N^2)} + \left(\frac{\text{Req}}{N^2} \right)} \right] + \left[(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot \text{fs}_h \cdot L) + \frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot \text{fs}_h \cdot C)} + R \right] \cdot \left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot \text{fs}_h \cdot \text{Cd1})} \right]}$$

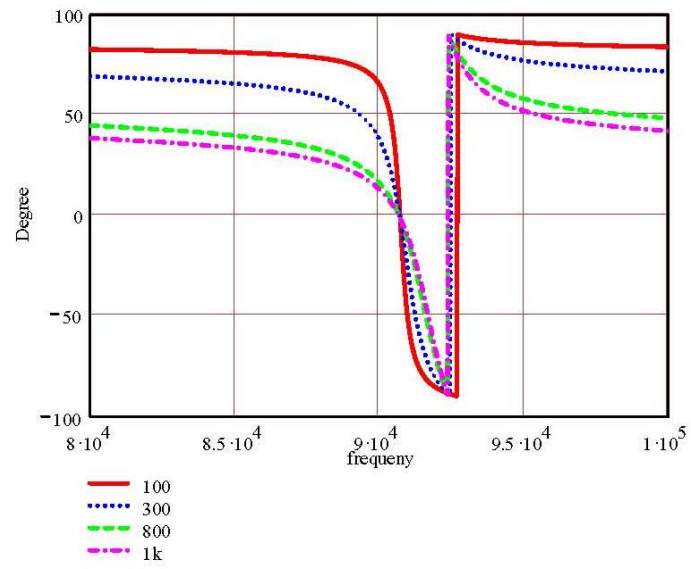


$$\theta_h := \frac{\operatorname{atan}\left(\frac{\operatorname{Im}(Av01_h)}{\operatorname{Re}(Av01_h)}\right) \cdot 180}{\pi}$$

$$\theta1_h := \frac{\operatorname{atan}\left(\frac{\operatorname{Im}(Av02_h)}{\operatorname{Re}(Av02_h)}\right) \cdot 180}{\pi}$$

$$\theta2_h := \frac{\operatorname{atan}\left(\frac{\operatorname{Im}(Av03_h)}{\operatorname{Re}(Av03_h)}\right) \cdot 180}{\pi}$$

$$\theta3_h := \frac{\operatorname{atan}\left(\frac{\operatorname{Im}(Av04_h)}{\operatorname{Re}(Av04_h)}\right) \cdot 180}{\pi}$$



Programing Impedence Analysis For Piezoelectric Trnsformers

$$m := 10^{-3} \quad n := 10^{-9} \quad p := 10^{-12} \quad k := 10^3$$

Parameters set

$$R := 15.24422 \quad L := 26.93489\text{m} \quad C := 114.258\text{p}$$

$$\text{Cd1} := 1.119211\text{n} \quad \text{Cd2} := 2.141935\text{n} \quad N := 1.216549539$$

Frequency set

$$\text{fmin} := 85\text{k} \quad \text{fmax} := 105\text{k} \quad \text{fmpt} := 100 \quad h := 1 \dots \text{fmpt}$$

$$f_h := \text{fmin} + \frac{(\text{fmax} - \text{fmin})}{\text{fmpt}} \cdot h$$

$$\text{RL} := 100$$

$$Z_{in_h} := \frac{\left[\frac{\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot \text{Cd2} \cdot N^2)} \cdot \frac{\text{RL}}{N^2}}{\left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot \text{Cd2} \cdot N^2)} \right] + \left(\frac{\text{RL}}{N^2} \right)} + \left[(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot L) + \frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot C)} + R \right] \cdot \left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot \text{Cd1})} \right] \right]}{\left[\frac{\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot \text{Cd2} \cdot N^2)} \cdot \frac{\text{RL}}{N^2}}{\left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot \text{Cd2} \cdot N^2)} \right] + \left(\frac{\text{RL}}{N^2} \right)} + \left[(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot L) + \frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot C)} + R \right] + \frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot \text{Cd1})} \right]}$$

$$\text{RL} := 300$$

$$Z_{in1_h} := \frac{\left[\frac{\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot \text{Cd2} \cdot N^2)} \cdot \frac{\text{RL}}{N^2}}{\left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot \text{Cd2} \cdot N^2)} \right] + \left(\frac{\text{RL}}{N^2} \right)} + \left[(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot L) + \frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot C)} + R \right] \cdot \left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot \text{Cd1})} \right] \right]}{\left[\frac{\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot \text{Cd2} \cdot N^2)} \cdot \frac{\text{RL}}{N^2}}{\left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot \text{Cd2} \cdot N^2)} \right] + \left(\frac{\text{RL}}{N^2} \right)} + \left[(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot L) + \frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot C)} + R \right] + \frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot \text{Cd1})} \right]}$$

$$RL := 800$$

$$Zin2_h := \frac{\left[\left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot Cd2 \cdot N^2)} \cdot \frac{RL}{N^2} \right] + \left[(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot L) + \frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot C)} + R \right] \cdot \left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot Cd1)} \right] \right]}{\left[\left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot Cd2 \cdot N^2)} \cdot \frac{RL}{N^2} \right] + \left[(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot L) + \frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot C)} + R \right] + \frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot Cd1)} \right]}$$

$$RL := 1k$$

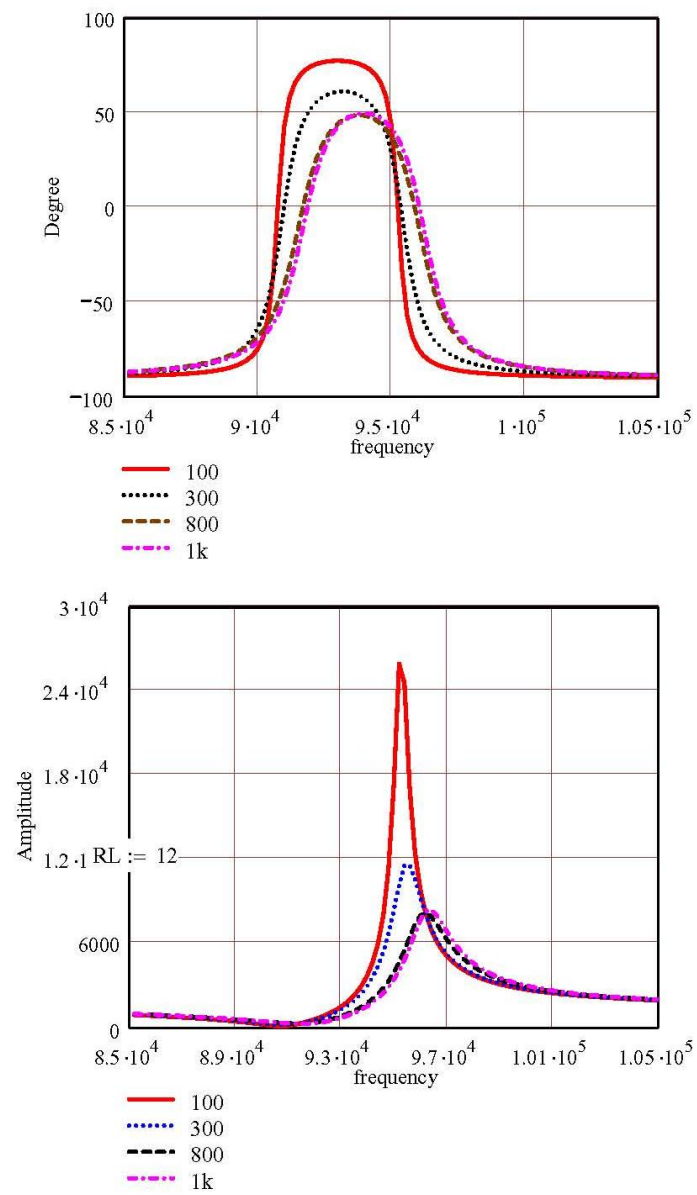
$$Zin3_h := \frac{\left[\left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot Cd2 \cdot N^2)} \cdot \frac{RL}{N^2} \right] + \left[(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot L) + \frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot C)} + R \right] \cdot \left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot Cd1)} \right] \right]}{\left[\left[\frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot Cd2 \cdot N^2)} \cdot \frac{RL}{N^2} \right] + \left[(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot L) + \frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot C)} + R \right] + \frac{1}{(i \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_h \cdot Cd1)} \right]}$$

$$\psi_h := \frac{\operatorname{atan}\left(\frac{\operatorname{Im}(Zin_h)}{\operatorname{Re}(Zin_h)}\right) \cdot 180}{\pi}$$

$$\psi1_h := \frac{\operatorname{atan}\left(\frac{\operatorname{Im}(Zin1_h)}{\operatorname{Re}(Zin1_h)}\right) \cdot 180}{\pi}$$

$$\psi2_h := \frac{\operatorname{atan}\left(\frac{\operatorname{Im}(Zin2_h)}{\operatorname{Re}(Zin2_h)}\right) \cdot 180}{\pi}$$

$$\psi3_h := \frac{\operatorname{atan}\left(\frac{\operatorname{Im}(Zin3_h)}{\operatorname{Re}(Zin3_h)}\right) \cdot 180}{\pi}$$



Programing Analysis For Piezoelectric Trnsformers PT_01

$$m := 10^{-3} \quad n := 10^{-9} \quad p := 10^{-12} \quad k := 10^3$$

Parameters set

$$R := 15.24422 \quad L := 26.93489 \text{m} \quad C := 114.258 \text{p}$$

$$\text{Cd1} := 1.119211 \text{n} \quad \text{Cd2} := 2.141935 \text{n} \quad N := 1.216549539$$

Condition 1: Minimizing Dead Time for ZVS Condition

$$f_{\min} := 88 \text{k} \quad f_{\max} := 100 \text{k} \quad f_{\text{mpt}} := 100 \quad n := 1 \dots f_{\text{mpt}}$$

$$f_{s_n} := f_{\min} + \frac{(f_{\max} - f_{\min})}{f_{\text{mpt}}} \cdot n$$

$$R_l := 800$$

$$V_{\text{in}} := 50 \quad R_{\text{eq}} := \frac{\pi}{8} R_l \quad V_m := \frac{2 \cdot V_{\text{in}}}{\pi}$$

$$R_{\text{in}_n} := R + \frac{R_{\text{eq}}}{N^2 \cdot \left[1 + \left(2 \pi \cdot f_{s_n} \cdot \text{Cd2} \cdot R_{\text{eq}} \right)^2 \right]}$$

$$X_{\text{in}_n} := 2 \pi \cdot f_{s_n} \cdot L - \frac{1}{\left(2 \pi \cdot f_{s_n} \cdot C \right)} - \frac{\left(2 \pi \cdot f_{s_n} \cdot R_{\text{eq}} \cdot \text{Cd2} \right)^2}{\left(2 \pi \cdot f_{s_n} \cdot N^2 \cdot \text{Cd2} \right) \cdot \left[1 + \left(2 \pi \cdot f_{s_n} \cdot R_{\text{eq}} \cdot \text{Cd2} \right)^2 \right]}$$

$$Z_n := \sqrt{\left(R_{\text{in}_n} \right)^2 + \left(X_{\text{in}_n} \right)^2} \quad \psi m_n := \text{atan} \left(\frac{X_{\text{in}_n}}{R_{\text{in}_n}} \right)$$

$$I_{m_n} := \frac{V_m}{Z_n}$$

$$t_{\text{min}_n} := \frac{\text{Cd1} \cdot V_{\text{in}}}{I_{m_n} \sin(\psi m_n)}$$

$$R_l := 500$$

$$R_{\text{eq}} := \frac{\pi}{8} R_l$$

$$R_{\text{in}_n} := R + \frac{R_{\text{eq}}}{N^2 \cdot \left[1 + \left(2 \pi \cdot f_{s_n} \cdot \text{Cd2} \cdot R_{\text{eq}} \right)^2 \right]}$$

$$X_{\text{in}_n} := 2 \pi \cdot f_{s_n} \cdot L - \frac{1}{\left(2 \pi \cdot f_{s_n} \cdot C \right)} - \frac{\left(2 \pi \cdot f_{s_n} \cdot R_{\text{eq}} \cdot \text{Cd2} \right)^2}{\left(2 \pi \cdot f_{s_n} \cdot N^2 \cdot \text{Cd2} \right) \cdot \left[1 + \left(2 \pi \cdot f_{s_n} \cdot R_{\text{eq}} \cdot \text{Cd2} \right)^2 \right]}$$

$$Z_n := \sqrt{\left(R_{in_n}\right)^2 + \left(X_{in_n}\right)^2} \quad \psi_{m_n} := \operatorname{atan}\left(\frac{X_{in_n}}{R_{in_n}}\right)$$

$$I_{m_n} := \frac{V_m}{Z_n}$$

$$t_{min1_n} := \frac{Cd1 \cdot V_{in}}{I_{m_n} \sin(\psi_{m_n})}$$

Condition 2: Maximizing Dead Time for ZVS Condition

$$f_{min} := 88k \quad f_{max} := 100k \quad f_{mpt} := 100 \quad n := 1..f_{mpt}$$

$$f_{s_n} := f_{min} + \frac{(f_{max} - f_{min})}{f_{mpt}} \cdot n$$

$$Rl := 800$$

$$Req := \frac{\pi}{8} Rl$$

$$R_{in_n} := R + \frac{Req}{N^2 \cdot \left[1 + \left(2\pi \cdot f_{s_n} \cdot Cd2 \cdot Req\right)^2\right]}$$

$$X_{in_n} := 2\pi \cdot f_{s_n} \cdot L - \frac{1}{\left(2\pi \cdot f_{s_n} \cdot C\right)} - \frac{\left(2\pi \cdot f_{s_n} \cdot Req \cdot Cd2\right)^2}{\left(2\pi \cdot f_{s_n} \cdot N^2 \cdot Cd2\right) \cdot \left[1 + \left(2\pi \cdot f_{s_n} \cdot Req \cdot Cd2\right)^2\right]}$$

$$\psi_n := \operatorname{atan}\left(\frac{X_{in_n}}{R_{in_n}}\right) \cdot \frac{180}{\pi}$$

$$Rl := 500$$

$$Req := \frac{\pi}{8} Rl$$

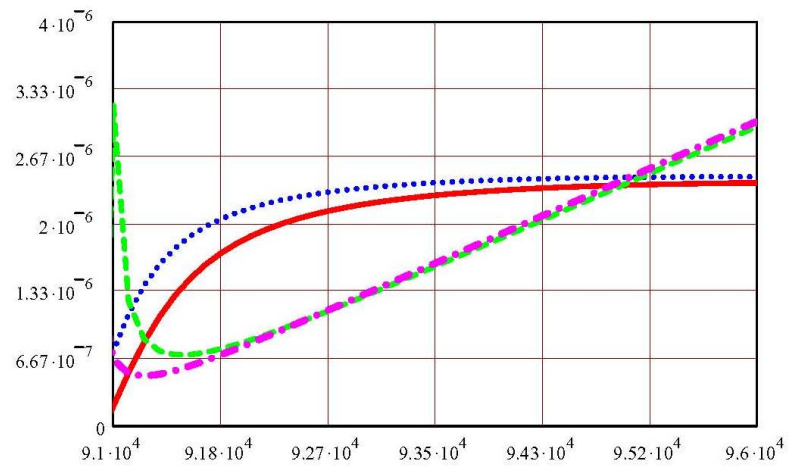
$$R_{in1_n} := R + \frac{Req}{N^2 \cdot \left[1 + \left(2\pi \cdot f_{s_n} \cdot Cd2 \cdot Req\right)^2\right]}$$

$$X_{in1_n} := 2\pi \cdot f_{s_n} \cdot L - \frac{1}{\left(2\pi \cdot f_{s_n} \cdot C\right)} - \frac{\left(2\pi \cdot f_{s_n} \cdot Req \cdot Cd2\right)^2}{\left(2\pi \cdot f_{s_n} \cdot N^2 \cdot Cd2\right) \cdot \left[1 + \left(2\pi \cdot f_{s_n} \cdot Req \cdot Cd2\right)^2\right]}$$

$$\psi1_n := \text{atan}\left(\frac{Xin1_n}{Rin1_n}\right) \cdot \frac{180}{\pi}$$

$$tmax_n := \frac{\psi_n}{360} \cdot \frac{1}{fs_n}$$

$$tmax1_n := \frac{\psi1_n}{360} \cdot \frac{1}{fs_n}$$



ภาคผนวก ข.

ผลงานวิจัยที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่

การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 27
27th Electrical Engineering Conference

Volume I

สาขาบทความ

- ไฟฟ้ากำลัง (PW)
- อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
- งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมไฟฟ้า (GN)

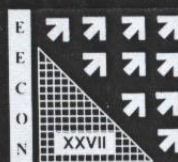
11-12 พฤศจิกายน 2547

โรงแรมโซฟิเทล ราชา ออคิด ขอนแก่น



ดำเนินการจัดประชุมโดย

ภาคีวิศวกรไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์



การวัดและวิเคราะห์พารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์

Measurement and Analysis Equivalent Circuit Parameters of Piezoelectric Transformers

ประสิทธิ์ พลหาญ นนทวัฒน์ จุลเดช

ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ และสำนักวิจัยสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520
โทร.(02) 3264221 Email s6067008@kmitl.ac.th

PE06

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอขั้นตอนการทดลองเพื่อหาพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ ด้วยการวัดค่า Admittance ที่ทางเข้าและทางออก โดยใช้ Impedance Analyzer แล้วนำข้อมูลที่ได้อาวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Admittance Circle Measurement ซึ่งทำให้สามารถคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรสมมูลของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ ผลการคำนวณนี้ได้นำไปทดลองโดยเปรียบเทียบกับการตอบสนองต่อความถี่ของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์จริงกับของวงจรสมมูลที่ได้ซึ่งได้ผลการทดลองใกล้เคียงกัน

คำสำคัญ: เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ พารามิเตอร์

Abstract

This paper presents a method for deriving the equivalent circuit parameters of a piezoelectric transformer. Based on the measured input and output admittance of the device, the parameter are calculated by the admittance circle technique. The simulated frequency response of the equivalent circuit is found be corresponding with the measurement results confirming the validity of the calculation method.

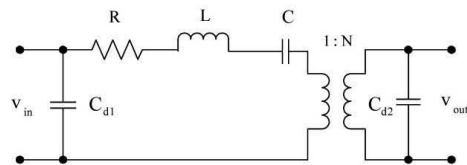
1. บทนำ

คุณสมบัติของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์รูปที่ 1.1 ได้จากการรวมเอาคุณสมบัติของเพียโซอิเล็กทริกที่เรียกว่า Conversion Piezoelectric Effect กับ Piezoelectric Effect รวมเข้าด้วยกัน



รูปที่ 1.1 เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์

เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์สามารถเขียนแทนได้ด้วยวงจรสมมูลตามรูปที่ 1.2 โดยที่ R , L , C , เป็นพารามิเตอร์ที่จำลองของการทำงานทางกล [1] C_{d1} , C_{d2} เป็น Capacitance ทางด้านเข้าและทางด้านออกตามลำดับ N คืออัตราส่วนเปลี่ยนรูปของพลังงานรวมของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์



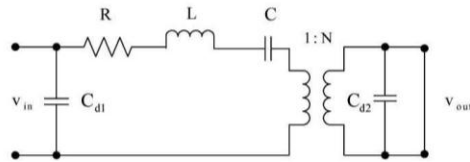
รูปที่ 1.2 วงจรสมมูลของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์

การนำเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์มาใช้งาน [2], [3] จำเป็นต้องทราบพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรสมมูลของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ แต่ในปัจจุบันนี้ผู้ผลิตเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ไม่ได้ให้ข้อมูลมาครบถ้วนดังนั้นจำเป็นต้องมีการหาเทคนิคเพื่อวัดและวิเคราะห์หาค่าวงจรสมมูลดังกล่าว

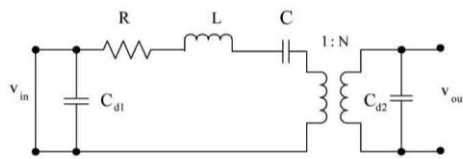
2. การวัดค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์

2.1 หลักการวัด

ค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ สามารถวัดและวิเคราะห์ได้โดยคำนวณจากค่า Admittance ซึ่งประกอบด้วย Susceptance และ Conductance ที่ความถี่ต่างๆ โดยวัดค่า Admittance ด้านทางเข้าในขณะที่ด้านทางออกถูกสัณฐานวงจรตามรูปที่ 2.1 และวัด Admittance ด้านทางออกในขณะที่ด้านทางเข้าถูกสัณฐานตามรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 การวัด Admittance ทางเข้า

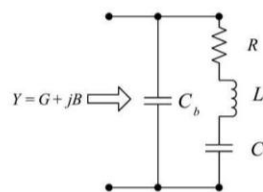


รูปที่ 2.2 การวัด Admittance ทางออก

ค่าของ Admittance (Susceptance, Conductance) ที่ได้จาก
การวัดถูกนำมาวิเคราะห์โดยใช้เทคนิค Admittance Circle Measurement

2.2 สมการที่เกี่ยวข้อง

การวัดเฟสของโวลเตจและกระแสของโวลเตจและกระแสตามรูปที่ 2.1 และ
รูปที่ 2.2 สามารถเขียนสมการทั่วไปของเฟสของโวลเตจและกระแสตามรูปที่ 2.3
ซึ่งแสดงสมการทั่วไปที่เกี่ยวข้องได้ดังนี้

รูปที่ 2.3 วงจรสมมูลทั่วไปของเฟสของโวลเตจและกระแสตามรูปที่ 2.1 และ
ขณะสัณฐานทางด้านเข้าหรือทางออก

$$Y = \frac{R}{R^2 + (X_L - X_C)^2} + j \left(\frac{R^2 + (X_L - X_C)^2 - X_{C_b} (X_L - X_C)}{X_{C_b} (R^2 + (X_L - X_C)^2)} \right) \quad (1)$$

$$Y = G + jB \quad (2)$$

$$G = \frac{R}{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (3)$$

$$B = \frac{R^2 + (X_L - X_C)^2 - X_{C_b} (X_L - X_C)}{X_{C_b} (R^2 + (X_L - X_C)^2)} \quad (4)$$

ถ้า Impedance ของ C_b มากกว่า Impedance ของ R, L, C และ กำหนด
ความถี่ที่ความถี่ Series Resonance $\omega = \omega_s \Rightarrow X_L = X_C$ ที่ความถี่ G
และ B ที่ความถี่ $\omega = \omega_s$ กำหนด $G(\omega_s) = G_{max}, B(\omega_s) = B_s$

$$G_{max} = \frac{R}{R^2 + (X_L - X_C)^2} \quad (5)$$

$$R = \frac{1}{G_{max}} \quad (6)$$

$$B_s = \frac{R^2 + (X_L - X_C)^2 - X_{C_b} (X_L - X_C)}{X_{C_b} (R^2 + (X_L - X_C)^2)} \quad (7)$$

$$C_b = \frac{B_s}{\omega_s} \quad (8)$$

พิจารณาความถี่ที่ตำแหน่งสูงสุด (ω_s) และความถี่ที่ตำแหน่งต่ำสุด (ω_L)
ของ Susceptance ตามรูปที่ 2.4

Q คือ Mechanical Quality Factor

$$Q = \frac{\omega_s}{\omega_H - \omega_L} \quad (9)$$

พิจารณาค่าพารามิเตอร์ L

$$Q = \omega_s \frac{L}{R} \quad (10)$$



$$L = R \frac{I}{\omega_H - \omega_L} \quad (11)$$

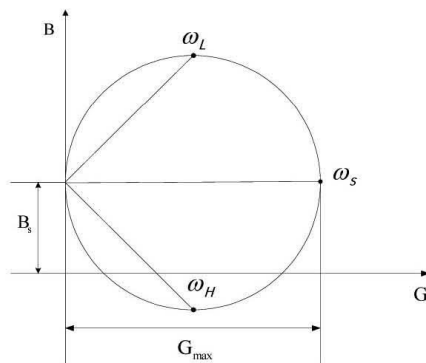
พิจารณาค่าพารามิเตอร์ C

$$Q = \frac{I}{RC \omega_s} \quad (12)$$

$$C = \frac{\omega_H - \omega_L}{R (\omega_s)^2} \quad (13)$$

2.3 การหาค่า Admittance Circle และวงจรสมมูลของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์

ขั้นตอนที่หนึ่ง: วัดค่า G, B ตามรูปที่ 2.1 และรูปที่ 2.2 โดยวัดในย่านความถี่ครอบคลุมความถี่ Resonance ของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ด้วยเครื่อง Impedance Analyzer และนำมาเขียนกราฟตามรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 Admittance Circle measurement

ขั้นตอนที่สอง: รูปที่ 2.4 ได้ค่า G_{max} , B_s ที่ความถี่ Resonance ($\omega = \omega_s$) และจากสมการ (6), (8), (11), (13) สามารถคำนวณค่า R, C, L และ C_p ของวงจรที่ทางเข้าและทางออกของวงจรสมมูลของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ในรูปที่ 2.1 และรูปที่ 2.2

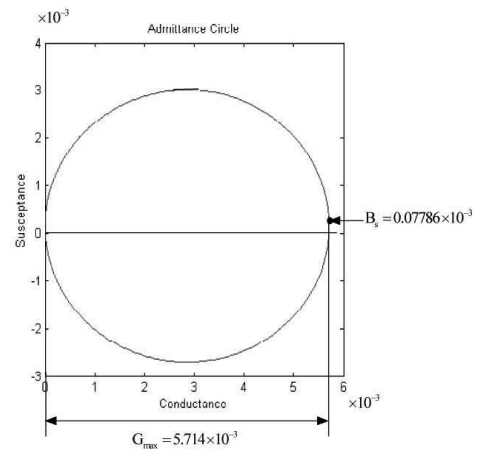
ขั้นตอนที่สาม: คำนวณหาค่า N ได้จากสมการ

$$L_{max} = N^2 L_{mason}$$

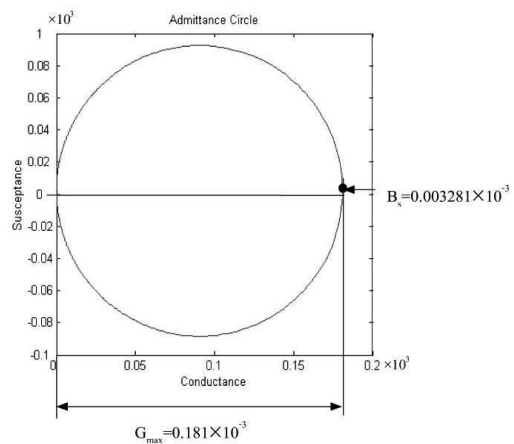
จากทั้งสามขั้นตอนจะได้วงจรสมมูลของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์

3. ผลการทดลองวัดพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์

การทดลองได้ทดลองวัดเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ชนิด Rosen Type เบอร์ PT112R0 - 01 ได้ Admittance Circle ที่ทางเข้าตามรูปที่ 3.1 และที่ทางออกตามรูปที่ 3.2

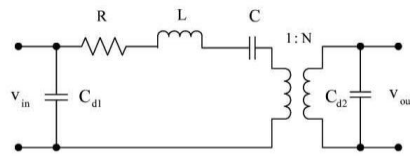


รูปที่ 3.1 Admittance Circle ทางเข้า



รูปที่ 3.2 Admittance Circle ทางออก

ซึ่งนำค่าที่ได้ไปคำนวณได้วงจรสมมูลรวมของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ตามรูปที่ 3.3



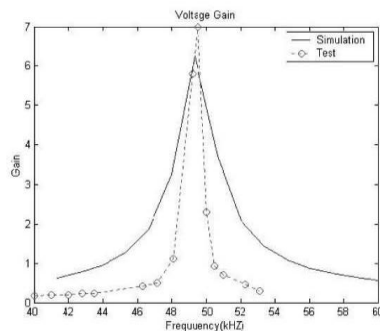
$$R = 174.991 \, \Omega \quad C = 29.68 \, \text{pF} \quad L = 0.353 \, \text{H}$$

$$C_{d1} = 251.9 \, \text{pF} \quad C_{d2} = 10.62 \, \text{pF} \quad N = 5.254$$

รูปที่ 3.3 พารามิเตอร์ของวงจรจากการคำนวณ

4. ผลการทดลอง

พารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์เมอร์ ได้นำมาทดสอบความถูกต้องโดยทดสอบวัดอัตราขยายของแรงดันไฟฟ้าที่ความถี่รอบตำแหน่งความถี่ Resonance ของวงจรสมมูลเปรียบเทียบกับเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์เมอร์จริงที่โหลด $120 \, \text{k}\Omega$ แสดงผลในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ผลการตอบสนองต่อความถี่

5. สรุป

การทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์เมอร์ โดยใช้เทคนิค Admittance Circle Measurement ซึ่งทำให้สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ของวงจรสมมูลของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์เมอร์ผลการทดลองได้นำมาทดลองเปรียบเทียบการตอบสนองต่อความถี่ของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์เมอร์จริงกับของวงจรสมมูลที่ได้ซึ่งได้ผลการทดลองใกล้เคียงกัน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงไปได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลือด้านเครื่องมือวัดจากห้องปฏิบัติการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ จึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Sam ben – Yaakov and Simon Lineykin, "Frequency Tracking to maximum power of piezoelectric transformer HV converters under load variation", IEEE Pesc 02. 2002 IEEE 33rd Annual, Volume: 2, pp23-27 June 2002.
- [2] มนจล นาวงษ์ นนทวัฒน์ จุลเดชะ, "การประยุกต์ใช้งานของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์เมอร์ในวงจรจ่ายกำลังแบบสวิตชิ่ง", การประชุมวิชาการทางไฟฟ้า ครั้งที่ 25, 2545 หน้า 61-65.
- [3] มนจล นาวงษ์ นนทวัฒน์ จุลเดชะ, "การออกแบบระบบควบคุมแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตชิ่งที่ใช้เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์เมอร์", การประชุมวิชาการทางไฟฟ้า ครั้งที่ 26, 2546.



นายประสิทธิ์ พลหาญ การศึกษาระดับปริญญาตรีสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยราชธานี พ.ศ. 2545 ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาโทที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



ดร. นนทวัฒน์ จุลเดชะ การศึกษาระดับปริญญาเอกจาก INSA de Lyon, France พ.ศ. 2535 ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

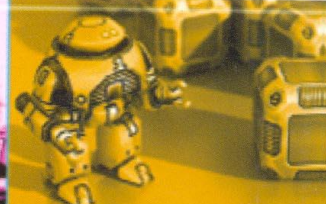
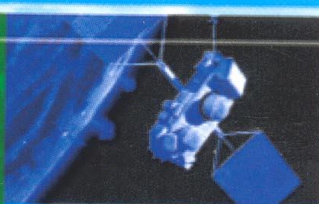
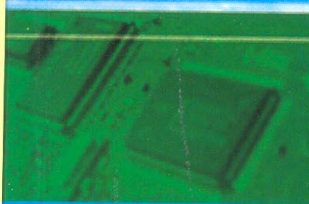
การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 28 28th Electrical Engineering Conference



Volume I

Electrical Engineering
Electrical Engineering

ระบบควบคุมและการวัดคุม (CT)
อิเล็กทรอนิกส์กำลัง (PE)
ไฟฟ้ากำลัง (PW)



Western
Digital®



ศูนย์เทคโนโลยีอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
20 - 21 ตุลาคม 2548
ณ โรงแรม เฟิร์ล วิลเลจ จ.ภูเก็ต

การวิเคราะห์ค่าโหลดที่เหมาะสมของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์

Analysis Optimal Load of Piezoelectric Transformers

ประสิทธิ์ พลหาญ นนพวัฒน์ จุลเดช

ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ และสำนักวิจัยสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถนนลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520
โทร. (02)3264221 Email s6067008@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการวิเคราะห์ค่าโหลดที่ทำให้เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ทำงานที่มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยคำนวณจากวงจรสมมูลของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ และใช้พารามิเตอร์ที่ได้จากวิธีการวัดในงานวิจัยที่ได้นำเสนอไปแล้ว[1] การคำนวณค่าประสิทธิภาพของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ที่ความถี่ Series Resonant (ω) ผลปรากฏว่าเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์มีประสิทธิภาพสูงสุด (94.8%) ที่โหลดค่าเหมาะสมที่คำนวณได้ ($R_{L,opt} = 819\Omega$) และการทดลองได้ประสิทธิภาพ 93.1% เมื่อนำผลการทดลองค่าประสิทธิภาพจริงที่โหลดใดๆ ไปเปรียบเทียบกับค่าคำนวณจะเห็นว่าผลลัพธ์ใกล้เคียงกัน

คำสำคัญ: เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์, DC/DC คอนเวอร์เตอร์

Abstract

This paper presents the analysis of an optimal load for a piezoelectric transformer that gives maximum efficiency. The calculation is based on the equivalent circuit, whose parameters were determined from the technique in [1]. It is calculated that at the series resonant frequency the piezoelectric transformer exhibits the maximum efficiency (94.8%) when the load $R_{L,opt} = 819\Omega$. This corresponds well with the experimental result where the maximum efficiency is measured to be 93.1%. The calculated and measured efficiency also agree well at other load values.

Keywords: Piezoelectric Transformer DC/DC Converter

1. บทนำ

ในอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่ต้องการขนาดพื้นที่จำกัดมีความจำเป็นต้องใช้คอนเวอร์เตอร์จ่ายกำลังไฟฟ้าที่มีขนาดเล็กและบาง เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ (รูปที่ 1.1) เป็นทางเลือกหนึ่งที่จะนำมาทดแทนเมกเนติกทรานส์ฟอร์มเมอร์ที่ขนาดใหญ่กว่าและสร้างปัญหา EMC นอกจากรานั้น เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ยังมีประสิทธิภาพสูง ไม่มี

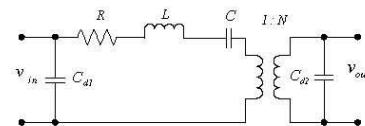
สนามแม่เหล็กออกมารบกวน ในการออกแบบคอนเวอร์เตอร์ที่ทำงานร่วมกับเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ ให้มีประสิทธิภาพสูงต้องทราบว่าเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ทำงานที่โหลดที่เหมาะสมหรือไม่ ถ้าทำงานร่วมกับโหลดที่เหมาะสมก็จะส่งผลให้ประสิทธิภาพโดยรวมของคอนเวอร์เตอร์มีประสิทธิภาพสูงไปด้วย



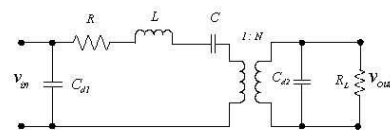
รูปที่ 1.1 เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์

2. การวิเคราะห์โหลดที่เหมาะสมของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์

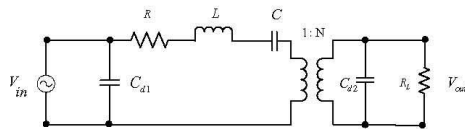
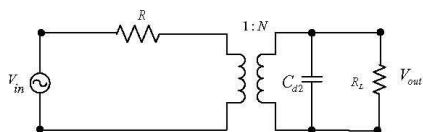
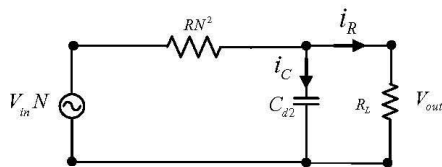
เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์สามารถเขียนแทนได้ด้วยวงจรสมมูล ตามรูปที่ 2.1 [2][3] โดยที่ R , L และ C เป็นพารามิเตอร์ที่จำลองผลการทำงานทางกล C_{d1} , C_{d2} เป็น Capacitance ทางด้านเข้าและทางด้านออกตามลำดับ N คืออัตราการเปลี่ยนรูปของพลังงานรวมของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์



รูปที่ 2.1 วงจรสมมูลของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์



รูปที่ 2.2 เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ต่อกับ R_L

รูปที่ 2.3 เปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ต่อกับ V_{in} รูปที่ 2.4 เปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ที่ความถี่ ω รูปที่ 2.5 ย้าย V_{in} และ R ด้านประจณภูมิมาทางด้านทุติยภูมิ

วงจรตามรูปที่ 2.3 สามารถคำนวณประสิทธิภาพของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์โดยใช้ความถี่ Series Resonant (ω) ของทั้ง R , L และ C ที่อนุกรมกันอยู่ ซึ่งทำให้ค่าอิมพีแดนซ์ของพารามิเตอร์ L และ C มีค่าเท่ากัน ($X_L = X_C$) ดังนั้นทั้ง R , L และ C ที่อนุกรมกัน จะเหลือแค่พารามิเตอร์ R เพียงพารามิเตอร์เดียว, C_{d2} มีค่าอิมพีแดนซ์มากกว่า R มาก ทำให้ได้วงจรตามรูปที่ 2.4 จากนั้นย้าย V_{in} และ R ทางด้านประจณภูมิมาด้านทุติยภูมิตามรูปที่ 2.5 ซึ่งสามารถเขียนสมการอัตราขยายแรงดันไฟฟ้าได้ดังต่อไปนี้ [4]

ที่ความถี่ Series Resonant (ω)

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

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

$$|A_v| = \frac{N}{\sqrt{\left(\frac{N^2 R}{R_L} + 1\right)^2 + (N^2 R \omega C_{d2})^2}} \quad (3)$$

กำลังงานทางไฟฟ้าด้านทางออกคำนวณได้ดังต่อไปนี้

$$P_{out} = \frac{|V_{out}|^2}{R_L} \quad (4)$$

$$|V_{out}| = V_{in} |A_v| \quad (5)$$

$$P_{out} = \frac{N^2 V_{in}^2}{R_L \left[\left(1 + \frac{N^2 R}{R_L}\right)^2 + (\omega C_{d2} N^2 R)^2 \right]} \quad (6)$$

สมการของกำลังงานทางไฟฟ้าด้านทางออก(6) สามารถคำนวณกำลังงานทางไฟฟ้าด้านทางออกสูงสุด ของวงจรที่โหลดใดๆ ได้จากการ Differentiation สมการที่ (6) เทียบกับ R_L และกำหนดให้เท่ากับศูนย์

$$\frac{d(P_{out})}{dR_L} = 0 \quad (7)$$

ได้โหลดที่ทำให้เกิดกำลังงานด้านทางออกสูงสุดของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ดังต่อไปนี้

$$R_{L(P_{out,max})} = \frac{N^2 R}{\sqrt{1 + (\omega C_{d2} N^2 R)^2}} \quad (8)$$

เมื่อ $(\omega C_{d2} N^2 R)^2 \ll 1$

$$R_{L(P_{out,max})} = N^2 R \quad (9)$$

แทนสมการที่ (8) ลงในสมการที่ (6) ได้กำลังงานด้านทางออกสูงสุดของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ดังต่อไปนี้

$$P_{out(max)} = \frac{N^2 V_{in}^2}{2R \left(1 + \sqrt{1 + (\omega C_{d2} N^2 R)^2}\right)} \quad (10)$$

เมื่อ $(\omega C_{d2} N^2 R)^2 \ll 1$

$$P_{out(max)} = \frac{N^2 V_{in}^2}{4R} \quad (11)$$

กำลังงานด้านทางเข้ามีค่าดังต่อไปนี้

$$P_{in} = N^2 R |i_C + i_R|^2 + P_{out} \quad (12)$$

$$P_{in} = V_{in}^2 \left[\frac{N^2 R + R_L}{R_L^2} + (\omega C_{d2})^2 N^2 R \right] \quad (13)$$

สมการ (6) และ (13) สามารถคำนวณประสิทธิภาพของวงจรได้ดังนี้

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (14)$$

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{N^2 R}{R_L} + (\omega C_{d1})^2 N^2 R R_L} \quad (15)$$

สมการสามารถคำนวณประสิทธิภาพสูงสุดของวงจรที่โหลดใดๆ ได้จากการ Differentiation สมการที่ (15) และกำหนดให้เท่ากับศูนย์

$$\frac{d\eta}{dR_L} = 0 \quad (16)$$

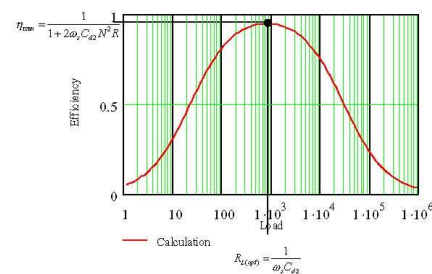
สมการของประสิทธิภาพสูงสุดของวงจรดังต่อไปนี้

$$\eta_{max} = \frac{1}{1 + 2\omega C_{d1} N^2 R} \quad (17)$$

โดยที่

$$R_L = R_{L(opt)} = \frac{1}{\omega C_{d2}} \quad (18)$$

จากสมการที่(15) นำมาแสดงกราฟได้ตามรูปที่ 2.6 โดยตำแหน่งที่เกิดประสิทธิภาพสูงสุด (η_{max}) ได้จากโหลดที่เหมาะสม ($R_{L(opt)}$) ตามสมการที่ (15) (17) (18)



รูปที่ 2.6 ประสิทธิภาพสูงสุด และ โหลดที่เหมาะสม

3. ผลการทดลองและการคำนวณ

การทดลองได้นำ piezoelectric transducer สองตัวอย่างที่มีพารามิเตอร์ต่างกันมาทดลองเพื่อยืนยันความถูกต้อง มีค่าพารามิเตอร์ตามตารางที่ 1.1 การทดลองใช้ความถี่ที่ความถี่จุด Series Resonant

(ω_s) และให้ขนาดของแรงดันไฟฟ้าด้านทางเข้าคงที่ โดยเปลี่ยนแปลงค่าของโหลด (R_L)

พารามิเตอร์	เพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์	
	ตัวอย่างที่ 1	ตัวอย่างที่ 2
R(Ω)	15.24422	26.08965
L(mH)	26.93489	21.1955
C(pF)	114.258	147.3455
C _{d1} (nF)	1.119211	1.031281
C _{d2} (nF)	2.141935	2.462234
N	1.21655	0.95583
ω_s (rad/sec)	570000	565900

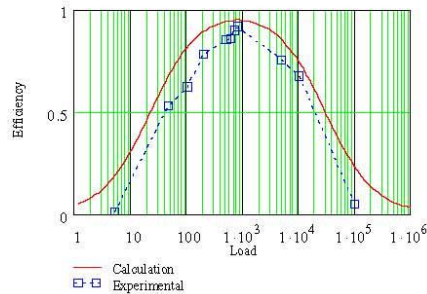
ตารางที่ 1.1 พารามิเตอร์ของเพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์

ตารางที่ 1.2 แสดงตารางของประสิทธิภาพเทียบกับโหลดใดๆ ตามลำดับ โดยที่มีผลของการคำนวณและการทดลองวัดจริงเปรียบเทียบกัน ทั้งสองตัวอย่าง

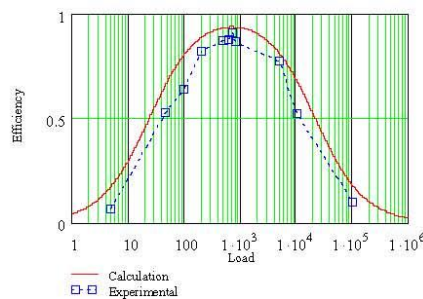
โหลด (Ω)	ประสิทธิภาพ			
	ตัวอย่างที่ 1		ตัวอย่างที่ 2	
	การทดลอง	คำนวณ	การทดลอง	คำนวณ
5	0.0123	0.18871	0.065155	0.17439
47	0.52852	0.67889	0.52847	0.66352
100	0.62145	0.81504	0.63821	0.8059
200	0.78014	0.89381	0.82268	0.88677
510	0.85496	0.94207	0.86883	0.93421
610	0.85586	0.94558	0.87521	0.93691
710	0.89583	0.94726	0.91133	0.93771
820	0.93102	0.94778	0.86699	0.93716
5k	0.75188	0.85191	0.77278	0.80897
10k	0.67253	0.74877	0.51924	0.6823
100k	0.046823	0.22755	0.099877	0.17737

ตารางที่ 1.2 ประสิทธิภาพของเพียโซอิเล็กทริกทรานสดิวเซอร์

รูปที่ 3.1 แสดงกราฟของประสิทธิภาพเทียบกับโหลดใดๆ ตามลำดับ โดยที่กราฟมีผลของการคำนวณและการทดลองวัดจริงเปรียบเทียบกันทั้งสองตัวอย่าง



รูปที่ 3.1 ประสิทธิภาพของวงจรกับโหลดใดๆ ตัวอย่างที่ 1



รูปที่ 3.2 ประสิทธิภาพของวงจรกับโหลดใดๆ ตัวอย่างที่ 2

การคำนวณค่าโหลดที่เหมาะสม (R_{Lopt}) เฉพาะตัวอย่างที่ 1 ได้เท่ากับ 819Ω ทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด 94.8% และในการทดลองใช้โหลด 820Ω ทำให้เกิดประสิทธิภาพ 93.1%

4. สรุป

ผลการทดลองหาประสิทธิภาพของเบี่ยงโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์โดยการคำนวณจากวงจรสมมูลของเบี่ยงโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์และการทดลองวัดจริง สังกัดได้ว่าผลของการทดลองวัดจริงกับการคำนวณจากวงจรสมมูลของเบี่ยงโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์ค่าของประสิทธิภาพจะมีค่าสูงสุดที่ โหลดเหมาะสมค่าหนึ่ง และผลการทดลองจริงกับการคำนวณมีค่าใกล้เคียงกันทั้งสองตัวอย่าง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลือด้านเครื่องมือวัดและเบี่ยงโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์จากห้องปฏิบัติการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้า และของวัสดุ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ จึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] ประสิทธิ์ พลหาญ นนทวัฒน์ จุลเดชะ, “การวัดและวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของเบี่ยงโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์”, การประชุมวิชาการทางไฟฟ้า ครั้งที่ 27, 2547 หน้า 329-332.
- [2] มนชล นาวงษ์ นนทวัฒน์ จุลเดชะ, “การประยุกต์ใช้งานของเบี่ยงโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์ในวงจรจ่ายกำลังแบบสวิตชิ่ง”, การประชุมวิชาการทางไฟฟ้า ครั้งที่ 25, 2545 หน้า 61-65.
- [3] มนชล นาวงษ์ นนทวัฒน์ จุลเดชะ, “การออกแบบระบบควบคุมแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตชิ่งที่ใช้เบี่ยงโซอิเล็กทริกทรานฟอร์เมอร์”, การประชุมวิชาการทางไฟฟ้า ครั้งที่ 26, 2546 หน้า 812-816.
- [4] Toshiyuki Zaitzu, Takeshi Inoue, Osamu Ohnishi and Akio Iwamoto, “2 MHz Power Converter With piezoelectric Ceramic Transformer”, Telecommunications Energy Conference, 1992. INTELEC '92, 14th International 4-8 Oct. 1992 Page(s):430 - 437



นายประสิทธิ์ พลหาญ การศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยราชธานี พ.ศ.2545 ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาโท ที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



ดร. นนทวัฒน์ จุลเดชะ การศึกษาระดับปริญญาเอกจาก INSA de Lyon, France พ.ศ.2535 ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



การประชุมวิชาการทางวิศวกรรมไฟฟ้า ครั้งที่ 29

29th Electrical Engineering Conference (EECON-29)

9 – 10 พฤศจิกายน 2549

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



[View Proceeding](#)

[Install
Acrobat Reader](#)

[Exit](#)



การออกแบบวงจรเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์แบบที่สวิตช์ทำงานที่แรงดันไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์

Design of Piezoelectric Transformer Converter using Zero-Voltage-Switch Technique

นนทวัฒน์ จุลละระ* ประสิทธิ์ พลหาญ**

ห้องวิจัยการควบคุมการแปลงรูปพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สำนักวิจัยสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

โทร:(02) 3264221 Email : knontaw@kmitl.ac.th*, s6067008@kmitl.ac.th**

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบวงจรแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์ที่ใช้เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ทดแทนแมกเนติกทรานส์ฟอร์มเมอร์ โดยออกแบบให้สวิตช์ทำงานขณะที่มีแรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสวิตช์มีค่าเป็นศูนย์ และออกแบบให้วงจรทำงานในช่วงโหลดที่เหมาะสม เพื่อให้วงจรมีประสิทธิภาพสูง ผลการทดลองปรากฏว่าวงจรคอนเวอร์เตอร์ทำงานตามที่ได้ออกแบบไว้ คือสวิตช์มีการทำงานที่แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสวิตช์มีค่าเป็นศูนย์ และ วงจรมีประสิทธิภาพสูง ($\approx 90\%$)

คำสำคัญ: เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์

Abstract

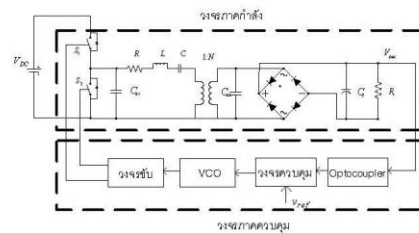
This paper presents the designing piezoelectric transformer DC/DC converter for switched-mode power supplies, where the magnetic transformer is replaced by piezoelectric transformer. The switched circuit is working in zero voltage-switch and under with the optimal load in order to obtain the high efficiency. The experimental result is used to verify the proposed model.

1. บทนำ

ปัจจุบันแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์สำหรับอุปกรณ์บางชนิดต้องการให้มีขนาดบางลงเช่น ส่วนจ่ายกำลังให้กับจอของ Notebook หรือ TV จอแบน เป็นต้น โดยทั่วไปแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์ใช้แมกเนติกทรานส์ฟอร์มเมอร์ (Magnetic Transformer) เป็นอุปกรณ์ส่งถ่ายกำลัง ทำให้วงจรแหล่งจ่ายกำลังดังกล่าวมีขนาดใหญ่และมีสนามแม่เหล็กไฟฟ้ารบกวน ไม่นานมานี้มีการคิดค้นอุปกรณ์ชนิดใหม่ เรียกว่าเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์มาใช้แทนแมกเนติกทรานส์ฟอร์มเมอร์ โดยนำมาสร้างเป็นเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ ซึ่งเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์มีคุณสมบัติหลายประการเช่น มีขนาดบาง การทำงานที่ความถี่สูง และประสิทธิภาพสูง

เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ ตามรูปที่ 1

ประกอบด้วยโครงสร้างสองโครงสร้างคือ ภาคกำลังและภาคควบคุม งานวิจัยนี้กล่าวถึงเฉพาะการออกแบบในส่วนภาคกำลัง ซึ่งทำหน้าที่ในการส่งถ่ายพลังงานจากแรงดันไฟฟ้าตรง เป็นแรงดันไฟฟ้าตรงอีกระดับหนึ่งทางด้านทางออก อย่างไรก็ตามสิ่งที่ต้องคำนึงถึงในการออกแบบและสร้างคอนเวอร์เตอร์สำหรับเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คือ วงจรคอนเวอร์เตอร์ทำงานแบบรีโซเนนซ์กล่าวคือ แรงดันไฟฟ้าที่ทางออกถูกควบคุมด้วยความถี่ของการสวิตช์[1] นอกจากนี้เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ทำงานที่ความถี่สูง ซึ่งทำให้เกิดกำลังสูญเสียขณะสวิตช์ ดังนั้นจึงต้องทำให้สวิตช์ทำงานแบบที่สวิตช์ทำงานที่แรงดันไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์(ZVS) การออกแบบให้สวิตช์ทำงานแบบนี้ต้องใช้ L , C ช่วยในการทำงาน แต่การใช้ L , C ทำขนาดของวงจรใหญ่ขึ้น จึงได้มีงานวิจัยที่พัฒนาวงจรที่ทำให้เกิด ZVS ที่สวิตช์โดยใช้ L และ C แพล่งที่อุปกรณ์อื่นๆ[2][3] งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาวงจรที่ทำให้เกิด ZVS ที่สวิตช์โดยใช้ L และ C แพล่งซึ่งอยู่ในเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ [4]

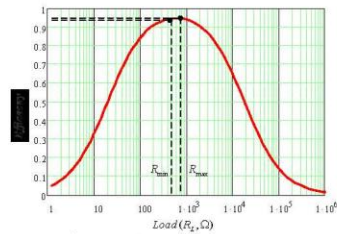


รูปที่ 1 โครงสร้างเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์

2. การวิเคราะห์ค่าโหลดที่เหมาะสม

เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ สามารถทำงานให้ได้รับประสิทธิภาพสูงสุด จะต้องกำหนดค่าโหลดที่เหมาะสมตามสมการที่ (1) นำมาแสดงเป็นกราฟได้ตามรูปที่ 2 [4]

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{N^2 R}{R_{eq}} + (\omega L C_{d1})^2 N^2 R R_{eq}} \quad (1)$$

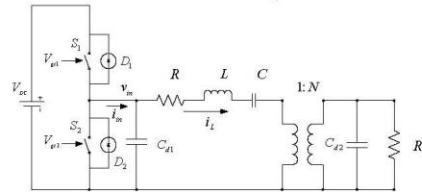


รูปที่ 3 ค่าโหลดที่เหมาะสมประสิทธิภาพสูงสุด

การกำหนดช่วงของโหลดที่เหมาะสมโดยกำหนดช่วงโหลดที่ทำให้เกิดประสิทธิภาพสูงกว่า 90% จากรูปที่ 2 ($R_{min} < R < R_{max}$)

3. หลักการทำงานของสวิตช์แบบที่สวิตช์ทำงานที่แรงดันไฟฟ้าค่าเป็นศูนย์ (ZVS)

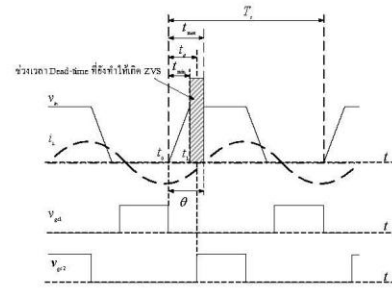
หลังจากงานวิจัยที่ผ่านมา[4] ทำให้ทราบว่าเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์เมอร์มีคุณสมบัติของ L และ C_{d1} อยู่ภายใน ซึ่งงานวิจัยนี้จะมาใช้ประโยชน์เป็น L และ C ของการทำให้เกิด ZVS การทำงานแบบ ZVS คือต้องให้แรงดันทางไฟฟ้าที่ตกคร่อมสวิตช์มีค่าเป็นศูนย์ก่อนที่จะมีการเปิดหรือปิดสวิตช์ การออกแบบต้องกำหนด Dead-time (t_d) ที่จะทำให้เกิดแรงดันทางไฟฟ้าที่ตกคร่อมสวิตช์มีค่าเป็นศูนย์ ในการกำหนดค่าเวลา Dead-time (t_d) ต้องอยู่ภายใต้เงื่อนไขสองประการคือ ค่าเวลา t_d ที่น้อยที่สุด $t_d = t_{min}$ และค่าเวลา t_d ที่มากที่สุด $t_d = t_{max}$ ที่จะทำให้เกิดแรงดันทางไฟฟ้าที่ตกคร่อมสวิตช์มีค่าเป็นศูนย์



รูปที่ 3 วงจรการทำงานของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์เมอร์คอนเวอร์เตอร์

3.1 เงื่อนไขค่าเวลา t_d ที่น้อยที่สุด $t_d = t_{min}$

ค่าเวลา t_d ที่น้อยที่สุด $t_d = t_{min}$ ได้จากการวิเคราะห์สมการของช่วงเวลา C_{d1} เก็บประจุแสดงการวิเคราะห์สมการและเงื่อนไขของการวิเคราะห์ให้ดังนี้



รูปที่ 4 ช่วงเวลาเมื่อเกิด ZVS ที่สวิตช์

เงื่อนไขของการวิเคราะห์

ประการที่หนึ่ง: เพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์เมอร์มี Quality Factor (Q) สูงจึงสามารถประมาณกระแสไฟฟ้าที่ L เป็นสัญญาณ Sinusoidal ดังนี้

$$i(t) = I_L \sin(\omega t - \theta) \quad (2)$$

ประการที่สอง: การเก็บประจุของ C_{d1} ในช่วงเวลา $t_d < t < t_r$ ในรูปที่ 4 เป็นช่วงเวลาสั้นๆเมื่อเปรียบเทียบกับหนึ่งคาบเวลาการทำงานเพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณ จึงประมาณกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้า C_{d1} เป็นค่าคงที่ค่าหนึ่ง โดยกำหนดกระแสไฟฟ้าที่ไหลเข้า C_{d1} ดังนี้

$$[S_1, S_2 = \text{OFF} \Rightarrow i_{C_{d1}} = -i(t)]$$

$$i_{C_{d1}}(t_d) = I_{Cd1} = -I_L \sin(-\theta) \quad (3)$$

$$I_{C_{d1}} = I_L \sin(\theta) \quad (4)$$

$$i_{C_{d1}} = C_{d1} \frac{dv_{in}}{dt} \quad (5)$$

$$dt = \frac{C_{d1}}{I_{C_{d1}}} dv_{in} \quad (6)$$

อินทิเกรตสมการทั้งสองข้าง

$$\int dt = \int \frac{C_{d1}}{I_{C_{d1}}} dv_{in} \quad (7)$$

$$t = \frac{C_{d1}}{I_{C_{d1}}} v_{in} \quad (8)$$

ที่ $t = t_{min} \Rightarrow v_{in} = V_{dc}$

$$t_{min} = \frac{C_{d1} V_{DC}}{I_L \sin(\theta)} \quad (9)$$

ประการที่สาม: แรงดันทางไฟฟ้าที่ v_{in} เป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมู ทำให้การคำนวณจำนวนจังก์ชัน v_{in} เป็นสัญญาณรูปสี่เหลี่ยมเพราะมีสัญญาณหลักมูล (fundamental) ใกล้เคียงกันโดยที่ v_{in} มีค่าสัญญาณหลักมูล (fundamental) สูงสุดคือ

$$V_{in,p,1} = \frac{2V_{DC}}{\pi} \quad (10)$$

Impedance ด้านทางเข้าโดยไม่รวม Impedance ของ C_{d1} (รูปที่ 3)

$$Z_{in} = R_{in} + X_{in} \quad (11)$$

$$R_{in} = R + \frac{R_{eq}}{N^2 (1 + (2\pi f_s C_{d2} R_{eq})^2)} \quad (12)$$

$$X_{in} = 2\pi f_s L - \frac{1}{2\pi f_s C} - \frac{(2\pi f_s C_{d2} R_{eq})^2}{(2\pi f_s C_{d2} N^2)(1 + (2\pi f_s C_{d2} R_{eq})^2)} \quad (13)$$

$$|Z_{in}| = \sqrt{R_{in}^2 + X_{in}^2} \quad (14)$$

$$\theta = \alpha \tan \left[\frac{X_{in}}{R_{in}} \right] \quad (15)$$

คำนวณกระแสไฟฟ้าที่ L ได้

$$I_L = \frac{V_{in,p,1}}{|Z_{in}|} = \frac{2V_{DC}}{\pi |Z_{in}|} \quad (16)$$

แทนค่าสมการ(16) ลงในสมการที่ (9)

$$t_{min} = \frac{\pi C_{d1} |Z_{in}|}{2 \sin(\theta)} \quad (17)$$

3.2 เงื่อนไขค่าเวลา t_d ที่มากที่สุด $t_d = t_{max}$

รูปที่ 4 ถ้า $S_1 = ON$ หลังจากกระแสไฟฟ้า i_L เริ่มเป็นบวกทำให้ก่อนหน้านั้น $[t(i_L = 0) < t < t(i_L > 0 \text{ และ } S_2 = ON)]$ C_{d1} จะจ่ายกระแสไฟฟ้าแทน V_{DC} เพราะ $S_1, S_2 = OFF$, ดังนั้นเมื่อ $S_2 = ON$ ที่ $t(i_L > 0)$ จึงไม่เกิดการทำงานแบบ ZVS ทำให้เกิดการสูญเสียขึ้น สรุปได้ว่า $t_{max} = t$ ($i_L = 0$)

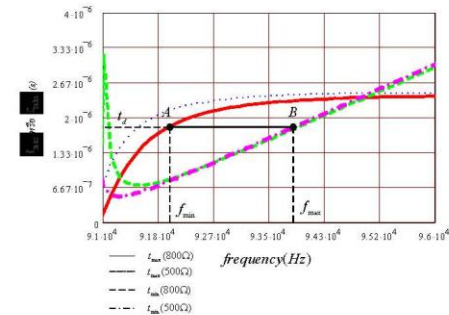
นำหนึ่งคาบเวลา (T_s) เท่ากับ 360° แล้วคาบเวลา t_{max} เท่ากับมุมของกระแส i_L ตามรูปที่

$$t_{max} = \frac{T_s \theta}{360^\circ} \quad (18)$$

$$\text{โดยที่} \quad T_s = \frac{1}{f_s} \quad (19)$$

$$t_{max} = \frac{\theta}{f_s 360^\circ} \quad (20)$$

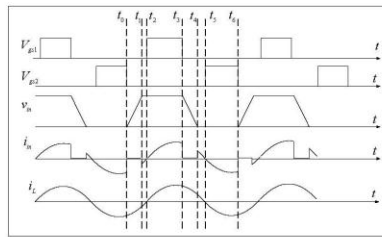
การวิเคราะห์ Dead-time (t_d) ที่เหมาะสมสามารถวิเคราะห์ได้โดยเริ่มต้นพิจารณาจากโหลดที่เหมาะสมซึ่งทำให้เบี่ยงโวลต์เอ็กทริกทรานส์ฟอร์เมอร์ทำงานได้ประสิทธิภาพสูงสุด ($500 \Omega < R_{load} < 800 \Omega$) รูปที่ 5 แสดงกราฟของ t_{min} และ t_{max} ที่โหลด 500 Ω และ 800 Ω ตามลำดับ การพิจารณา t_d ที่ทำให้สวิตช์ในเบี่ยงโวลต์เอ็กทริกทรานส์ฟอร์เมอร์คอนเวอร์เตอร์ทำงานแบบ ZVS, t_d ส่อน้อยกว่า t_{max} ที่โหลด 500 Ω และ 800 Ω และ t_d ส่อนมากกว่า t_{min} ที่โหลด 500 Ω และ 800 Ω รูปที่ 5 แสดงการเลือก t_d ซึ่งที่จุด A, $t_d < (t_{max,800\Omega})$ และ $t_{max,800\Omega}$ ที่จุด B, $t_d > (t_{min,800\Omega})$ และ $t_{min,800\Omega}$ จุด A,B เป็นตำแหน่งกำหนด f_{min} และ f_{max} ของ IC MC34067P (IC ใช้ควบคุมการทำงาน) ตามลำดับ



รูปที่ 5 ช่วงเวลา Dead-time ที่ทำให้เกิดเงื่อนไข ZVS

4. การทำงานของเบี่ยงโวลต์เอ็กทริกทรานส์ฟอร์เมอร์คอนเวอร์เตอร์ ภายใต้เงื่อนไข ZVS

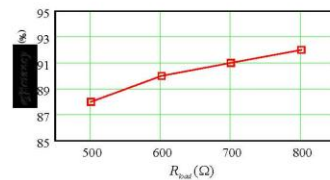
การทำงานของ S_1 และ S_2 ตามรูปที่ 3 ภายใต้การทำงานที่สวิตช์ทำงานที่แรงดันคล่อมสวิตช์เป็นศูนย์ (ZVS) สามารถจำลองการทำงานโดยกราฟในรูปที่ 6



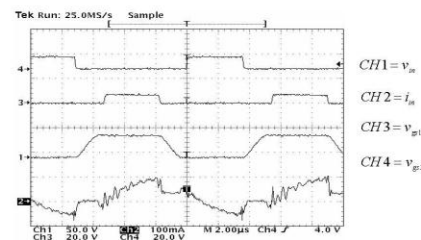
รูปที่ 6 การทำงานของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์

5. ผลการทดลอง

กำหนดเพียโซโพลต์ที่เหมาะสมได้ $R_{min}=500$ และ $R_{max}=800$ กำหนดค่าเวลา t_d ที่จะทำให้เกิดการทำงานที่สวิตช์แบบ ZVS ได้ค่า $t_d = 1.34\mu s$ คำนวณค่าความถี่ต่ำสุด $f_{min} = 9200Hz$ และ ค่าความถี่สูงสุด $f_{max} = 9300Hz$ กำหนดแรงดันไฟฟ้าที่ด้านทางเข้า 50V และแรงดันไฟฟ้าที่ด้านทางออก 20V ให้กับวงจรภาคกำลัง



รูปที่ 7 ประสิทธิภาพของวงจรเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ต้นแบบ



รูปที่ 8 รูปสัญญาณของวงจรเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ต้นแบบ

ผลการทดลองวงจรเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์แสดงประสิทธิภาพรูปที่ 7 และรูปที่ 8 แสดงรูปสัญญาณของการทำงานวงจร

5. สรุป

ผลการออกแบบด้วยวิธีการหาโพลต์ที่เหมาะสมและวิเคราะห์ช่วงการทำงานที่ทำให้สวิตช์ทำงานแบบที่สวิตช์ทำงานที่แรงดันไฟฟ้าตกคร่อมสวิตช์เป็นศูนย์โดยใช้ L และ C_d ภายในเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ประกอบวงจร ผลการทดลองปรากฏว่าวงจรเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์มีการทำงาน ตามที่ออกแบบ, ได้ประสิทธิภาพสูง และขนาดของวงจรลดลง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงไปได้ด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลือด้านเครื่องมือวัดจากห้องปฏิบัติการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ จึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] มนชล นาวงษ์ นนทวัฒน์ จุลเดช, "การประยุกต์ใช้งานของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ในวงจรจ่ายกำลังแบบสวิตช์ซิง", EECON-25, หน้า 106-110, 2545.
- [2] SANZ M., ALOU A., SOTO A., PRIETO R., COBOS J. A., UCEDA J., "Magnatic-less Converter based on Piezoelectric Transformer for Step-down DC/DC and Low Power Application", Proceeding of IEEE INTELE.92, pp. 615-621.
- [3] LIN R.L., LEE F. C., BAKE E. M., CHEN D. Y., "Inductor-less Piezoelectric Transformer Electronic Ballast for Linear Fluorescent Lamp", Proceeding of IEEE INTELE.92, pp. 664-669.
- [3] ประสิทธิ์ พลหาญ นนทวัฒน์ จุลเดช, "การวัดและวิเคราะห์หาพารามิเตอร์ของวงจรสมมูลของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์", EECON-27, หน้า 329-332, 2547.
- [4] ประสิทธิ์ พลหาญ นนทวัฒน์ จุลเดช, "การวิเคราะห์โพลต์ที่เหมาะสมของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์", EECON-28, หน้า 245-248, 2548.



นายประสิทธิ์ พลหาญ การศึกษาระดับปริญญาตรีสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยราชธานี ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาโทที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



ดร. นนทวัฒน์ จุลเดช การศึกษาระดับปริญญาเอกจาก INSA de Lyon, France ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

การออกแบบวงจรควบคุมของ DC/DC เปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์

Controller Design of Piezoelectric Transformer based DC/DC Converter

นนทวัฒน์ จูณะ ประสิทธิ์ พลหาญ**

ห้องวิจัยการควบคุมการแปลงรูปพลังงาน ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ และ สำนักวิจัยสื่อสารและเทคโนโลยีสารสนเทศ

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ถนนฉลองกรุง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

โทร.(02) 3264221 Email : knontaw@kmitl.ac.th*, s6067008@kmitl.ac.th**

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบวงจรควบคุมของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์ที่ใช้เปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์ทดแทนเมกนิติกทรานส์ฟอร์มเมอร์ (เปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์) โดยการหาฟังก์ชันถ่ายโอนของระบบโดยรวมด้วยวิธีการจำลองแบบการทำงานอย่างง่ายด้วยโปรแกรม PSpice แล้วออกแบบวงจรควบคุมแบบสามโพลสองซีโร่ ผลการทดลองการตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกพบว่าวงจรต้นแบบ มีผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกทั้งที่สภาวะ Static และสภาวะ Dynamic ได้ใกล้เคียงกับผลงานวิจัยที่ได้ทำมาแล้ว[1]

คำสำคัญ: เปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์, DC/DC คอนเวอร์เตอร์, ระบบควบคุมแบบวีซีแอล

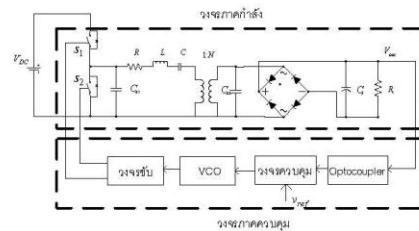
Abstract

This paper presents the controller designing of piezoelectric Transformer based DC/DC converter for switched-mode power supplies, where the magnetic transformer is replaced by piezoelectric transformer. The transfer function of power stage is defined by PSpice the controller circuit has 3 Poles, 2 Zeros. The experimental result is used to verify the proposed model.

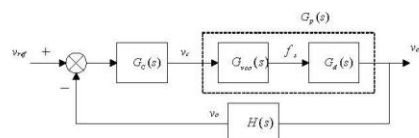
1. บทนำ

แหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิตช์ที่ดีจะต้องมีเสถียรภาพตลอดขั้นตอนการทำงาน มีการรักษาระดับแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกได้ตามต้องการ และมีผลตอบสนองที่รวดเร็วเมื่อเกิดการรบกวนการทำงาน (Disturbances) การทำให้บรรลุวัตถุประสงค์ดังกล่าว สามารถพิจารณาจากฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ในรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วย วงจร VCO (Voltage Conversion Oscillator) วงจรขับ วงจรคอนเวอร์เตอร์ วงจร optocoupler แล้วใช้เทคนิคของ Bode เพื่อออกแบบวงจรควบคุม

เปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์เป็นคอนเวอร์เตอร์ชนิดรีโซแนนท์ กล่าวคือแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกสามารถควบคุมได้โดยการปรับความถี่ของการสวิตช์[1] ซึ่งในการควบคุมจำเป็นต้องทราบฟังก์ชันถ่ายโอนของคอนเวอร์เตอร์ ซึ่งได้มีผู้ทำงานวิจัยในการวิเคราะห์ฟังก์ชันถ่ายโอนของคอนเวอร์เตอร์ชนิดรีโซแนนท์บ้างแล้ว [2][3] การวิเคราะห์ในงานวิจัยเหล่านั้นมีความซับซ้อนมาก และใช้เวลาในการวิเคราะห์ ในงานวิจัยนี้ได้นำเสนอการวิเคราะห์ฟังก์ชันถ่ายโอน โดยการจำลองการรบกวนการทำงานของคอนเวอร์เตอร์ ด้วยสัญญาณรบกวนขนาดเล็ก (Small Signal) ด้วยโปรแกรม PSpice แล้วผลลัพธ์ได้มาแสดงด้วยกราฟการตอบสนองทางความถี่ หลังจากนั้นก็ประมาณฟังก์ชันถ่ายโอนด้วยการพิจารณาด้วยการทำ Curve Fitting ฟังก์ชันถ่ายโอนที่ได้ก็จะถูกนำไปออกแบบวงจรควบคุมต่อไป รูปที่ 2 แสดงบล็อกไดอะแกรมแบบสัญญาณขนาดเล็กของการควบคุม เปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 1 โครงสร้างเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 2 บล็อกไดอะแกรมแบบสัญญาณขนาดเล็กของการควบคุม เปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์

2. การวิเคราะห์ฟังก์ชันถ่ายโอนสัญญาณของขนาดเล็กของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์

การวิเคราะห์ฟังก์ชันถ่ายโอนของสัญญาณขนาดเล็ก ของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ โดยไม่รวมวงจรควบคุม ในงานวิจัยนี้ใช้วิธีการจำลองแบบด้วยโปรแกรม PSpice ตามรูปที่ 3 โดยการรบกวนด้วยสัญญาณขนาดเล็กที่จุดทำงานจุดหนึ่งทางเข้าของ VCO ตามสมการที่ (1)(2) แล้ววัดสัญญาณที่ทางออกตามสมการที่ (3)(4) แล้วทำการเปรียบเทียบขนาดของสัญญาณระหว่าง $|v_c| > A_c$ กับ $|v_c| > A_{out}$ ดังแสดงตามรูปที่ 4 การเปรียบเทียบกระทำโดยมีการเปลี่ยนความถี่ของ v_c ทำให้ได้ขนาดของฟังก์ชันถ่ายโอนจากการจำลองดังกราฟตามรูปที่ 5 หลังจากนั้นนำกราฟที่ได้ไปหาฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจร โดยการทำ Curve Fitting

สมการการรบกวนด้วยสัญญาณขนาดเล็ก

$$V_c = V_c + v_c \quad (1)$$

โดยที่

$$v_c = A_c \sin(2\pi f_c) \quad (2)$$

สมการของสัญญาณขนาดเล็กที่ทางออก

$$V_{out} = V_{out} + v_{out} \quad (3)$$

โดยที่

$$v_{out} = A_{out} \sin(2\pi f_c - \phi) \quad (4)$$

ขนาดของอัตราขยายของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ โดยไม่รวมวงจรควบคุม

$$|G_p(s)| = \frac{A_{out}}{A_c} \quad (5)$$

$$\angle G_p(s) = \phi \quad (6)$$

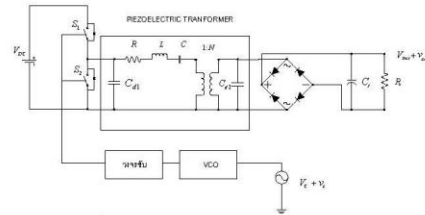
โดยที่

A_c คือขนาดของสัญญาณขนาดเล็กที่รับรบกวน

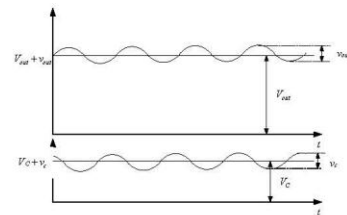
f_c คือความถี่ของสัญญาณขนาดเล็กที่รับรบกวน

A_{out} คือขนาดของสัญญาณขนาดเล็กที่ด้านทางออกของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์โดยไม่รวมวงจรควบคุม

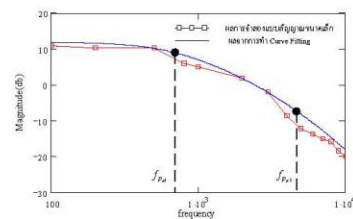
ϕ คือมุมของสัญญาณขนาดเล็กที่ด้านทางออกของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์โดยไม่รวมวงจรควบคุม



รูปที่ 3 วงจรจำลองสัญญาณขนาดเล็กของฟังก์ชันถ่ายโอนของเปียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์



รูปที่ 4 การเปรียบเทียบขนาดของ v_c กับ v_{out}



รูปที่ 5 แสดงกราฟของฟังก์ชันถ่ายโอนวงจรและผลของการทำ Curve Fitting

ผลจากการทำ Curve Fitting ทำให้ได้สมการและค่าพารามิเตอร์

โพลตามสมการที่ (7)

$$G_p(s) = \frac{K_p}{\left(1 + \frac{s}{2\pi f_{p1}}\right) \left(1 + \frac{s}{2\pi f_{p2}}\right)} \quad (7)$$

โดยที่

K_p คืออัตราขยายของฟังก์ชันถ่ายโอน

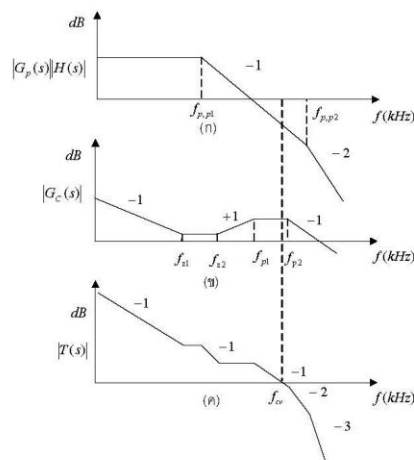
f_{p1} คือความถี่ที่โพลตำแหน่งที่หนึ่ง

f_{p2} คือความถี่ที่โพลตำแหน่งที่สอง

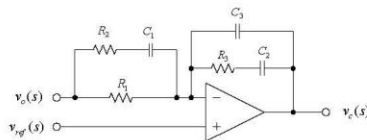
3. การออกแบบวงจรถวล

ฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์โดยไม่รวมวงจรถวลได้จากผลคูณระหว่างฟังก์ชันถ่ายโอนของวงจรจากกำลัง และฟังก์ชันถ่ายโอนของ Optocoupler ($G_p(s)H(s)$) ในรูปที่ 2 ซึ่งแสดงด้วยกราฟการตอบสนองต่อความถี่ตามรูปที่ 6 (ก) เทคนิคการออกแบบระบบควบคุมแบบ Bode [4] ทำให้ได้กราฟของการตอบสนองต่อความถี่ของวงจรถวลตามรูปที่ 6 (ข) และผลลัพธ์ของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ทั้งหมด ($T(s)$) แสดงตามรูปที่ 6 (ค)

วงจรถวลแบบสามโพลสองซีโร (Three-pole Two-zero Controller Circuit) แสดงดังรูปที่ 7 และแสดงฟังก์ชันถ่ายโอนได้ดังสมการที่ (8)



รูปที่ 6 กราฟการตอบสนองต่อความถี่ของ (ก) ขนาดของ $G_p(s)H(s)$, (ข) วงจรถวล และ (ค) ผลลัพธ์ของฟังก์ชันถ่ายโอนวงเปิดของเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ทั้งหมด



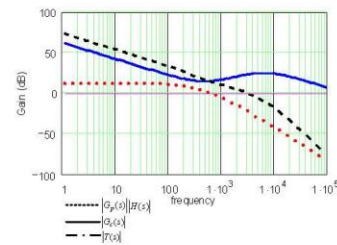
รูปที่ 7 วงจรถวลแบบสามโพลสองซีโร

$$G_c(s) = \frac{v_o(s)}{v_c(s)} = K_c \frac{\left(1 + \frac{s}{\omega_{z1}}\right)\left(1 + \frac{s}{\omega_{z2}}\right)}{s \left(1 + \frac{s}{\omega_{p1}}\right)\left(1 + \frac{s}{\omega_{p2}}\right)} \quad (8)$$

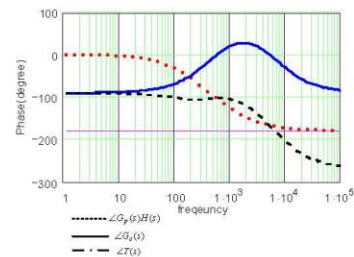
4. ผลการทดลอง

กำหนดแรงดันไฟฟ้าทางเข้า 50 V และแรงดันไฟฟ้าที่ทางออก 20 V พิสัยของโหลดที่ทดลอง $R_{min} = 500 \Omega > R_{max} = 800 \Omega$ กำหนดเงื่อนไขการทำงานของ IC MC34067P (IC สำหรับควบคุมการทำงาน) ดังต่อไปนี้ ค่าเวลา Dead-time = 1.347 μs ค่าความถี่ต่ำสุด $f_{min} = 9200$ Hz และ ค่าความถี่สูงสุด $f_{max} = 9300$ Hz [5] ค่าความถี่การนำของวงจรถวลด้วยเทคนิคการออกแบบระบบควบคุมแบบ Bode [4] ได้ค่าต่างๆตามรูปที่ 7 คือ $R_1 = 1.2$ k Ω , $R_2 = 130$ k Ω , $R_3 = 30$ k Ω , $C_1 = 220$ nF, $C_2 = 15$ nF, และ $C_3 = 820$ pF

รูปที่ 8 และ 9 แสดงกราฟของ Bode ของขนาดและมุมของ $G_p(s)H(s)$, $G_c(s)$ และ $(G_p(s)H(s)G_c(s))$ ซึ่งสังเกตได้ว่าวงจรถวลทำให้ได้ความถี่ Crossover = 3 kHz, ความชันของขนาดที่ความถี่ Crossover = -20dB/Dec, Phase Margin = 48°



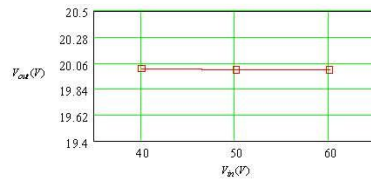
รูปที่ 8 กราฟของ Bode ของขนาดของ $G_p(s)H(s)$, $G_c(s)$ และ $(G_p(s)H(s)G_c(s))$



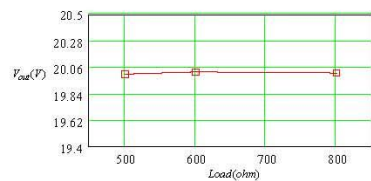
รูปที่ 9 แสดงกราฟของ Bode ของมุมของ $G_p(s)H(s)$, $G_c(s)$ และ $(G_p(s)H(s)G_c(s))$

ผลการทดลองได้ทดลองเพียโซอิเล็กทริกทรานส์ฟอร์มเมอร์คอนเวอร์เตอร์ทั้งแบบ Static และแบบ Dynamic รูปที่ 10 และ 11 แสดงผลการทดลองแบบ Static ที่แสดงถึงความสามารถของการควบคุมเมื่อมีการ

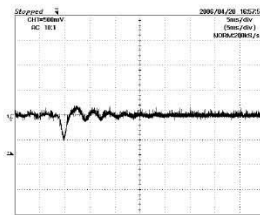
เปลี่ยนแปลงที่แรงดันไฟฟ้าที่ทางเข้าที่โหลด 500 Ω และเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดตามลำดับ ส่วนรูปที่ 12 และ 13 แสดงผลการทดลองแบบ Dynamic ขณะมีการเปลี่ยนแปลงของโหลดอย่างทันทีทันใดจาก 800 Ω -> 500 Ω และ 500 Ω -> 800 Ω ตามลำดับ



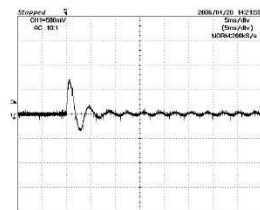
รูปที่ 10 แรงดันไฟฟ้าที่ทางออกเมื่อแรงดันไฟฟ้าที่ทางเข้าเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 11 แรงดันไฟฟ้าที่ทางออกเมื่อ โหลดที่ทางออกเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 12 ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกของวงจรเบี่ยงโซ่เล็ก ทรานส์ฟอร์เมอร์คอนเวอร์เตอร์แบบเมื่อ โหลดเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดจาก 800 Ω -> 500 Ω



รูปที่ 13 ผลตอบสนองของแรงดันไฟฟ้าที่ทางออกของวงจรเบี่ยงโซ่เล็ก ทรานส์ฟอร์เมอร์คอนเวอร์เตอร์แบบเมื่อ โหลดเปลี่ยนแปลงอย่างทันทีทันใดจาก 500 Ω -> 800 Ω

5. สรุป

ผลจากการวิเคราะห์ฟังก์ชันถ่ายโอนชนิดสัญญาณขนาดเล็กของเบี่ยงโซ่เล็กทรานส์ฟอร์เมอร์คอนเวอร์เตอร์ด้วยโปรแกรม PSpice ทำให้สามารถออกแบบวงจรควบคุมแบบสามโพลสองซีโรได้ และผลการทดลองได้แสดงว่าการควบคุมการทำงานของเบี่ยงโซ่เล็กทรานส์ฟอร์เมอร์คอนเวอร์เตอร์ได้ผลการควบคุมตามต้องการทั้ง Static (Line Regulation และ Load Regulation) และ Dynamic เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงโหลดอย่างทันทีทันใด

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จล่วงไปด้วยดีเนื่องจากได้รับความช่วยเหลือด้านเครื่องมือวัดจากห้องปฏิบัติการทดสอบสมบัติทางไฟฟ้าของวัสดุ ศูนย์เทคโนโลยีโลหะและวัสดุแห่งชาติ จึงขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] มนชาล นาวงษ์, "การประยุกต์ใช้งานของเบี่ยงโซ่เล็กทรานส์ฟอร์เมอร์ในวงจรจ่ายกำลังแบบสวิทซ์ชิ่ง", EECON-25, p.106-110, 2545.
- [2] VORPERIAN V., "Approximate Small-Signal Analysis of the Series and the Parallel Resonant Converters", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 4, No.1, Jan. 1989.
- [3] FORSYTH A. J., HO Y. K. E., ONG H. M., "Comparison of Small-Signal Modelling Techniques for the Series-Parallel Resonant Converter", IEE Conference Pub. No. 399, Power Electronics and Variable-Speed Drives, 26-28 Oct. 1994.
- [4] กันติชา กิตติพิริชล, "การออกแบบวงจรควบคุมของแหล่งจ่ายกำลังไฟฟ้าแบบสวิทซ์.", วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547.
- [5] นนทวัฒน์ จุลละชะ ประสิทธิ์ พลหาญ, "การออกแบบวงจรเบี่ยงโซ่เล็กทรานส์ฟอร์เมอร์คอนเวอร์เตอร์แบบสวิทซ์ที่แรงดันไฟฟ้ามีค่าเป็นศูนย์", EECON-29, 2549.



นายประสิทธิ์ พลหาญ การศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากมหาวิทยาลัยราชธานี ปัจจุบันกำลังศึกษาในระดับปริญญาโทที่สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



ดร. นนทวัฒน์ จุลละชะ การศึกษาระดับปริญญาเอก จาก INSA de Lyon, France ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ประวัติผู้เขียน

นายประสิทธิ์ พลหาญ เกิดเมื่อวันที่ 10 พฤษภาคม พ.ศ.2523 ที่จังหวัดศรีสะเกษ สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชธานี ในปีการศึกษา 2546 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมระบบควบคุม ภาควิชาวิศวกรรมระบบควบคุม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ในปีการศึกษา 2546