

用功率流方法研究压电陶瓷变压器的电气特性

张东彦¹, 张卫平¹, D Y Chen², Fred C Lee²

(1. 北方工业大学, 北京 100041; 2. Center For Power Electronics Systems, USA)

摘 要: 基于功率流方法, 本文提出了一种分析压电陶瓷变压器电气特性的方法. 其主要贡献是: (1) 给出了计算最佳负载、电压增益、效率和输出功率等电气特性的公式; (2) 利用这些公式, 给出了分析压电陶瓷变压器电气特性的计算程序, 并提出了最佳电阻和最佳匹配网络的概念; (3) 为了证明其理论结果, 文中给出了仿真结果. 本文所得到的结果为分析压电陶瓷变压器电气特性提供了一个有用的工具.

关键词: 压电陶瓷变压器; 电气特性; 匹配网络; 最佳负载

中图分类号: TM4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2003) 11-1648-03

Study on Electrical Characteristic of Piezoelectric Transformer by Power Flow Method

ZHANG Dong-yan¹, ZHANG Wei-ping¹, D Y Chen², Fred C Lee²

(1. North China Univ. of Tech, Beijing 100041, China; 2. Center For Power Electronics Systems, USA)

Abstract: Based on power-flow-method, an effective approach for analyzing the electric property of PT (Piezoelectric Transformer) has been proposed in this paper. The main contributions are as the follows: (1). The formulas for calculating the optimal load, voltage's gain, efficiency, the output power of PT and so on have been derived; (2). According to these formulas, the procedure of finding out the electrical properties of PT has been put forward and the two new concepts, optimal load resistance and output matching network, have been introduced; (3). A few of simulated and experimental results have been given out to verify the conclusion. This approach is a very useful tool for analyzing the electric property of PT.

Key words: piezoelectric transformer; electric property; matching network; optimal load

1 引言

压电陶瓷变压器 (Piezoelectric Transformer, 以后简称为 PT) 的研究和应用已有 50 年的历史^[1~5]. 当研究 PT 的电气特性和应用时, 需要三方面的基础知识: 等效电路、有效的分析方法和匹配技术. 本文的目的是分析 PT 的电气特性和求得其最佳负载电阻和输出匹配网络, 为分析压电陶瓷变压器提供了一个有用的分析方法. 功率流方法 (Power-flow-method) 为求解线性二端口网络的最佳负载电阻和输出匹配网络提供了一个有用的工具^[2,3].

在内部谐振频率附近, PT 的电路模型是一个谐振-带通电路, 如图 1 所示. 内部谐振频率仅由 L 和 C 确定. $Cd1$ 和

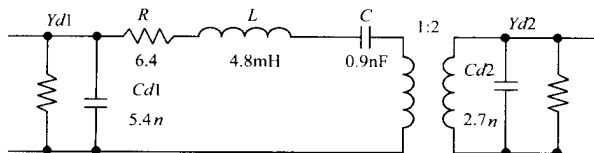


图 1 PT 的电路模型及一个样品的电路参数

$Cd2$ 是输入电容和输出电容; R 、 L 、 C 组成了串联谐振支路, 理想变压器的变比为 $1:n(1:2)$; $Yd1$ 、 $Yd2$ 分别表示了 $Cd1$ 和 $Cd2$ 的损耗. 本文用这个模型来说明如何使用功率流的方法分析 PT 的电气特性.

2 功率流方法 (Power-flow method)^[2]

线性无源二端口网络和其 Y 参数方程如图 2 所示, 其中, Y_{22} 是线性无源二端口网络的等效输出导纳; 负载的导纳 Y_L 公式:

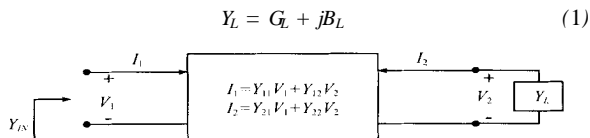


图 2 Y 参数表示的线性无源二端口网络

如果负载的导纳等于线性无源二端口网络的等效输出导纳的共轭复数, 则负载上可以得到最大输出功率.

对于图 1 所示的 PT 等效电路, 式 (1) 和 Y 参数方程中有

五个复数,求解输入功率、输出功率以及效率的解析表达式是很困难的.更为重要的是,上述方程隶属于复数域.在复数域,是无法求极值.因此,直接使用式(1)和 Y 参数方程无法得出线性无源二端口网络的最佳负载和最大效率.下面将引入 $L-M$ 变换.经过 $L-M$ 变换后,输入功率、输出功率、效率等主要计算将由复数域变到实数域进行.

$$L-M \text{ 变换: } L+jM=2g_{22}/(Y_L+Y_{22}) \quad (2)$$

$$Y \text{ 参数: } Y_{ij}=g_{ij}+jb_{ij}, \quad i, j=1, 2, 3, 4 \quad (3)$$

从式(1)~(3),可以得到如下结论:(1)如果 $(L, M)=(1, 0)$, $Y_L+Y_{22}=2g_{22}$,二端口网络的输出功率最大;(2)如果考虑到等效电压源电路的负载效应, Y_L+Y_{22} 是诺顿等效二端网络的全负载.事实上,如果以 $2g_{22}$ 为标准, $(L+jM)$ 是全负载的归一化阻抗.

电压增益的公式为:

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{Y_{21}}{I_2/V_2 - Y_{22}} = \frac{-Y_{21}}{2g_{22}}(L+jM) \quad (4)$$

输入导纳的公式为:

$$Y_{in}=I_1/V_1=Y_{11}+Y_{12} \cdot V_2/V_1=Y_{11}+Y_{12} \frac{-Y_{21}}{2g_{22}}(L+jM) \quad (5)$$

令 $Y_{12}Y_{21}=a+jb$ 和 $V_1=1$ 伏,归一化输入功率为:

$$P_{in}(L, M)=|V_1|^2 \operatorname{Re}[Y_{in}]=g_{11}-(aL-bM)/2g_{22} \quad (6)$$

归一化输出功率为:

$$P_{out}=|V_2|^2 \operatorname{Re}[Y_L]=P_{MAX}[1-(L-1)^2-M^2] \quad (7)$$

$$\text{其中, } P_{MAX}=P_{out}(1, 0)=\frac{|Y_{21}|^2}{4g_{22}} \quad (8)$$

如果 $(L, M)=(1, 0)$, $Y_L=Y_{22}^*$,二端口网络的输出功率最大.在本文中最佳负载的定义是,在输出功率不等于零的条件下,二端口网络的效率最大时所对应的负载为最佳负载.下面引入极坐标变换,以便于求得最佳负载.经过极坐标变换后,输入功率和输出功率表达式中两个变量 $(L$ 和 $M)$ 将变为一个变量 (x) ,使得分析更为简化.

极坐标变换:

$$L=1-x\cos, \quad M=x\sin \quad (9)$$

其中,

$$\tan = \frac{b}{a} = \frac{\operatorname{Im}[Y_{12}Y_{21}]}{\operatorname{Re}[Y_{12}Y_{21}]}, \quad \cos = \frac{a}{\sqrt{a^2+b^2}}, \quad \sin = \frac{b}{\sqrt{a^2+b^2}} \quad (10)$$

在上面极坐标变换中,对于给定的PT,其 Y 参数给定,是一个常数, x 是变量.

把式(9)、(10)代入式(7),得到极坐标形式下的归一化输出功率,

$$P_{out}(x,)=P_{out}(L, M)=P_{MAX}[1-(L-1)^2-M^2] \\ =P_{MAX}(1-x^2), \quad -1 \leq x \leq 0 \quad (11)$$

令 $P_{in}^0=P_{in}(L, M)|_{\substack{L=1 \\ M=0}}=g_{11}-\frac{a}{2g_{22}}$,极坐标形式下的归一化输入功率为,

$$P_{in}(x,)=P_{in}(L, M)=g_{11}-\frac{aL-bM}{2g_{22}}=P_{in}^0(1+Cx), \\ C=\frac{\sqrt{a^2+b^2}}{2g_{11}g_{22}-a}>0 \quad (12)$$

定义 C 为Linville常数.对于给定的PT等效电路, C 是一个大于零常数.

二端口网络的效率公式为:

$$\eta = \frac{P_{out}(x)}{P_{in}(x)} = \frac{P_{MAX}(1-x^2)}{P_{in}^0(1+Cx)} \quad (13)$$

从式(11)~(13)中可知:(1) $x=0$,输出功率达到了最大值,而效率仅为50%;(2) $x=-1$, $C=1$,效率最大, $\eta=1$,但是,输出功率等于零.所以,不可能使二端口网络的输出功率和效率同时处于最佳.故需要某种折衷方案.

对式(13)求一阶导数,并令一阶导数等于零,得到:

$$x_0 = \frac{-1 + \sqrt{1-C^2}}{C} \quad (14)$$

当 $x=x_0$,二端口网络的效率最大.把 $x=x_0$ 代入式(9),得到二端口网络的效率最大时所对应的 L_o 和 M_o .把 L_o 和 M_o 的表达式代入式(1)和式(2),并整理后,得到最佳负载的计算公式:

$$G_{Lopt} = -g_{22} \left[1 - \frac{2L_o}{L_o^2 + M_o^2} \right], \quad B_{Lopt} = - \left[b_{22} + \frac{2g_{22}}{L_o^2 + M_o^2} M_o \right] \quad (15)$$

G_{Lopt} 和 B_{Lopt} 分别是最佳负载的实部和虚部.因此,最佳负载是一个复数.

3 用功率流的方法分析 PT

对于图1所示的PT等效电路模型, Y 参数的方程如下:

$$Y_{11}=Y_{d1}+jC_{d1}+1/Z_M, \quad Y_{12}=Y_{21}=-1/(n \times Z_M), \\ Y_{22}=Y_{d2}+jC_{d2}+1/n^2 Z_M \quad (16)$$

其中, Z_M 是R-L-C支路的阻抗.

$$\left. \begin{aligned} \frac{1}{Z_M} &= M+jM = \frac{1}{R[1+jA]} = \frac{1}{R} \frac{1-jA}{1+A^2} \\ M &= \frac{1}{R} \frac{1}{1+A^2}, \quad M = \frac{1}{R} \frac{-A}{1+A^2} \\ A &= Q \left(\frac{f}{f_o} - \frac{f_o}{f} \right), \quad Q = \frac{L}{R}, \quad f_o = \frac{1}{\sqrt{LC}} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

应用功率流法分析PT等效电路电气特性的计算程序如下:

第一步,应用式(12),求出Linville常数,

$$C = \frac{1}{1+2n^2R(n^2Y_{d2}+Y_{d1})+2Y_{d1}Y_{d2}n^2R^2(1+A^2)} < 1 \quad (18)$$

第二步,计算 L_o 和 M_o :应用式(14)计算 x_o .应用式(9)计算 L_o 和 M_o .

$$L_o = 1 - x_o \cos = 1 + x_o \left(\frac{1-A^2}{1+A^2} \right) \\ M_o = x_o \sin = \left(\frac{-2x_o A}{1+A^2} \right)$$

第三步,应用式(15)计算最佳负载的实部和虚部 G_{Lopt} , B_{Lopt} .

如果把图1所给出的电路参数代入上式,得 $x_o=-0.975$.

用下面公式计算最佳负载,

$$G_{Lopt} = -g_{22} \left[1 - \frac{2L_o}{L_o^2 + M_o^2} \right] = - \left[Y_{d2} + \frac{1}{n^2 R(1+A^2)} \right] \left[1 - \frac{2L_o}{L_o^2 + M_o^2} \right] \quad (19)$$

$$B_{Lopt} = - \left[C_{d2} - \frac{A}{n^2 R(1+A^2)} + \frac{2}{L_o^2 + M_o^2} \left(Y_{d2} + \frac{1}{n^2 R(1+A^2)} \right) M_o \right] \quad (20)$$

这一结果表明,为使 PT 的效率最高,PT 的最佳负载是一个复变量.实部不为零,保证了 PT 的输出功率不为零;虚部不为零,PT 的负载中需要一个匹配网络.在这里,我们定义由实部确定的负载电阻为最佳负载电阻, $R_{opt} = 1/G_{opt}$;定义由虚部确定的匹配网络为输出匹配网络.

计算 PT 的输出功率、效率和电压增益的公式如下:

$$P_{out} = \frac{1}{4[R + n^2 R^2 Y_{d2}(1+A^2)]} [1 - x_o^2] \quad (21)$$

$$= C(1 - x_o^2)/2(1 + Cx) \quad (22)$$

$$V_{gain} = \left| \frac{V_2}{V_1} \right| = \frac{n}{2} \frac{\sqrt{L_o^2 + M_o^2} \sqrt{1+A^2}}{[1 + n^2 R Y_{d2}(1+A^2)]} \quad (23)$$

4 仿真结果

基于第三节给出的计算公式,用 Mathcad 软件可以很容易地计算出 PT 的输出功率、效率、电压增益、最佳负载电阻和输出匹配网络等电气特性.图 1 所示电路模型电气特性的仿真结果如图 3 所示.在图 3 中, f, f_o 分别表示 PT 的工作频率和内部谐振频率.图 3(b) 和 (c) 给出了归一化输出功率 P_{opt} 、效率 η_{opt} 和电压增益 V_{gain} 的频率特性.图 3(a) 是最佳负载电阻 $R_{opt} = 1/G_{opt}$ 的频率特性.当 PT 的工作频率等于内部谐振频率时,最佳负载电阻最小, $R_{opt} = 1.627k$.图 3(d) 给出输出匹配网络的频率特性 B_{opt} .由于 $B_{opt} < 0$,所以输出匹配网络总是感性的.

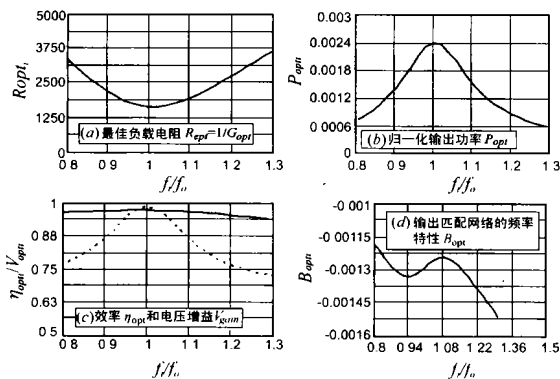


图 3 图 1 所示电路模型电气特性的仿真结果

5 结论

本文应用功率流方法推导出计算 PT 电气特性的方法和程序.基于该方法和程序,应用 Mathcad 或 Matlab 通用计算软件,很容易计算 PT 的电气特性.通过本文对 PT 电气特性的分析,得到如下结论:(1) PT 的工作状况依赖于工作频率和负载.不可能找到一个合适的负载使得 PT 的输出功率和效率同时达到最大;(2) 应用功率流方法分析 PT 电气特性,能够找到一个最佳负载,使得 PT 的输出功率不为零且其效率处于最佳.这个方法为合理使用 PT 找到理论根据;(3) 为了使 PT 获得最佳效率,输出匹配网络是必不可少的.

参考文献:

- [1] Lin C Y, Lee F C. Design of a piezoelectric transformer converter and its matching network [A]. PESC '94 Record, 25th annual IEEE [C]. IEEE, 1994, 1: 607 - 612.
- [2] J G Linvill, J F Gibbons. Transistor and Active Circuit [M]. NY: McGraw, Chap. 11, 14.
- [3] J Choma Jr. Electrical Networks Theory and Application [M]. NY: John Wiley & Sons, 1985. 178 - 197.
- [4] C A Rosen. Ceramic transformers and filter [A]. Proc. Electronic Comp. Symp [C]. IEEE, 1956. 205 - 211.

作者简介:



张东彦 男, 1960 年出生于吉林, 主要研究领域为电子测量技术, 功率电子学和压电陶瓷变压器型功率变换器.



张卫平 男, 1957 年出生于陕西, 主要研究领域为功率电子学, 气体放电灯用电子镇流器和压电陶瓷变压器型功率变换器.