

# 压电变压器的研究与应用前景展望

彭军 谢运祥 徐九玲

(华南理工大学电力学院 510640)

**摘要** 介绍了压电变压器的工作原理、结构、种类及其特点,并叙述了压电变压器的最新研究进展及其应用现状,指出了目前存在的问题及今后的发展方向。

**关键词** 压电变压器 谐振频率 压电效应 等效电路模型

## 1 引言

各种便携式电子设备小型化、轻型化的要求使得电磁变压器趋于落后。压电变压器(PT)作为一种新型的变压器,因其体积小、效率高等特点,在某些应用领域成为电磁变压器的理想替代元件。然而,由于受材料制造技术的限制,自1956年首次提出压电变压器概念以来,其研究和发展一直比较缓慢。直到近几年新的压电材料在耐压强度和压电系数方面取得巨大的进展,有力地推动了压电变压器的制造和应用,因此受到越来越多的重视。

## 2 工作原理

一些晶体(如石英、锂、铌酸盐和锆钛酸盐等)在机械力的作用下会激起晶体材料表面荷电,这种现象被称为晶体的正压电效应,此类晶体被称为压电体。实验证明凡是具有正压电效应的压电体,也一定具有逆压电效应,即当压电体受到外电场作用时压电体将产生形变。正压电效应和逆压电效应统称为压电效应。压电效应是外力或者外电场引起压电晶体内部电偶极矩发生变化而形成的。由于晶体内各晶胞的自发极化取向可能彼此不相同,因此在压电元件的制造过程中需要根据材料的要求对压电晶体加相应的高压直流电场进行极化,使晶体内部的自发极化做定向排列,极化后的压电体将更容易产生压电效应。

压电变压器正是利用极化后的压电体的压电效应来实现电压输出的。在压电变压器的输入部分用一个正弦波电压信号驱动,通过逆压电效应使输入部分产生振动,振动波通过输入和输出部分的机械结构耦合到输出部分,输出部分再通过正压电效应产生电荷,实现压电体的电能-机械能-电能的机电

能量的二次变换,在压电变压器的谐振频率下获得最高输出电压。

## 3 种类及其特点

现有的压电变压器根据输入和输出部分压电陶瓷的工作方式大致可以分成三种类型:长条形结构的Rosen型、厚度振动模式型、辐射振动模式型。其基本结构如图1所示。图中,P为极化方向,T为应力方向。

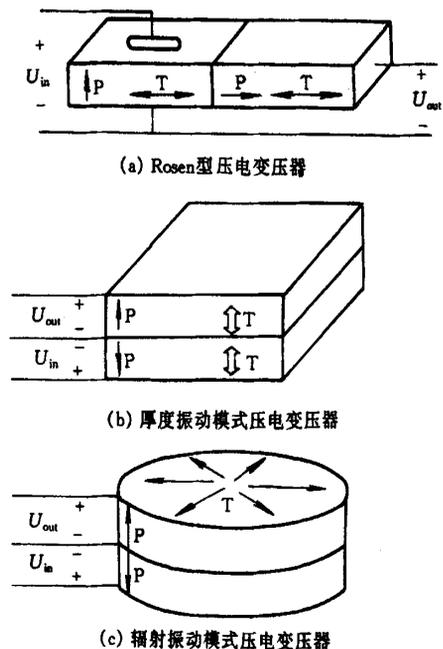


图1 三种压电变压器的基本结构图

Rosen型PT最为常用,它结构简单,制造容易,并且具有较高的升压比。整个压电变压器可以分成两部分:左半部分的上下两面有烧渗的银电极,沿厚度方向极化,作为输入端;右半部分的右端有烧渗的银电极,沿长度方向极化,作为输出

端,如图 1a 所示。由于其长度大于厚度,故输入端为低阻抗,输出端为高阻抗,用来达到升压的目的。一般输入几伏到几十伏的交流电压,就可以获得几千伏以上的高压输出。因而 Rosen 型压电变压器最适合的应用之一就是驱动高电压高阻抗的冷阴极荧光灯(广泛应用于笔记本电脑 LCD 显示)。

厚度振动模式压电变压器的输入部分和输出部分都是由纵向式压电陶瓷组成的。厚度振动模式压电变压器是低压变压器,由于其内部电压增益很低,其工作效率最优时最佳匹配负载阻抗大约为 10 左右,主要应用于低功率的变换器和适配器中。

辐射振动模式压电变压器的输入部分和输出部分都是由工作于横向模式压电陶瓷组成的。效率最高时的最佳匹配输出负载阻抗大约为 1k 左右,介于 Rosen 型和厚度振动型的最佳负载阻抗值之间,主要应用于镇流器、适配器和变换器中。

这三种压电变压器的振动模式和机械结构不同,因而具有不同的力学和电子特性。对于 Rosen 型 PT 的研究已经比较充分,例如文献 [1] 详细讨论了 Rosen 型压电变压器的最大能量密度和最大功率与压电材料、工作周期的关系;文献 [2] 分析了压电变压器的噪声特性,提出了一种针对压电变压器中寄生阻抗的分析模型,以及一种减少噪声的改进型 DC/DC 变换器。其他两种类型的压电变压器有待进一步深入研究。

#### 4 等效电路模型研究

尽管压电变压器具有不同的振动模式和机械结构,但其特性都可以用图 2 所示的等效电路模型来描述。图中  $C_{d1}$  和  $C_{d2}$  是压电变压器金属极板间的寄生电容, $L$  与压电变压器的质量有关, $C$  与材料的弹性劲度张量有关,它是由压电体的运动方程导出的, $R$  由压电变压器的介质损耗和机械品质因数  $Q$  决定,模型中升压比为  $n$  的“理想变压器”代表三个单独变换过程,即电能到机械能的转换、输入部分到输出部分的机械能转换以及机械能到电能的转换。

图 2 所示的压电变压器等效电路模型是根据基本的压电方程和运动方程得出的,它并没有考虑压电变压器的多谐振或反谐振。文献 [3] 针对该问题发展了压电变压器的等效电路模型,以便于分析

多个组成部分的压电变压器的多谐振和反谐振。

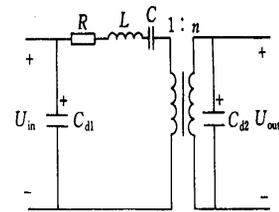


图 2 压电变压器等效电路模型

#### 5 使用中应注意的问题

压电变压器的应用与设计很大程度上取决于其几何结构参数,例如面积、长度、宽度、厚度、材料等,因而使其工作在最佳状态并非易事。许多研究人员已经总结出设计准则,其中需要注意以下几个最基本的问题:

(1) 所选的电路拓扑应该能够有效地处理压电变压器 (PT) 等效电路中的寄生参数,最好能包含这些参数。由于 PT 的应用设计比较复杂,一般选用比较简单的电路拓扑。图 3 所示的电路拓扑结构和压电变压器的等效电路有很大的相似性,在设计的时候可以更好地处理 PT 中的一些寄生参数,因而获得了广泛应用。

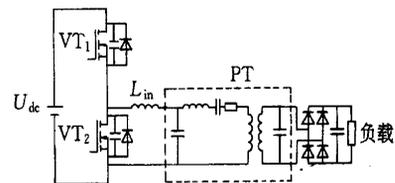


图 3 最常用的 PT-DC-DC 变换器电路拓扑

(2) 压电变压器作为一个谐振元件,其增益随频率变化而变化,其最佳工作频率范围很窄(必须工作在谐振频率和反谐振频率之间),因而 PT 不能像传统谐振变换器那样通过调节频率来控制变换器的输出电压,而必须以固定的频率(最优频率)驱动压电变压器。文献 [4] 提出了一种以量子谐振模式控制 DC-DC 变换器的自保护控制方法。

(3) 由于压电变压器的工作频率很高,为了开关转换时损耗最小,必须使开关工作在软开关状态,因此选择合适的输入电感  $L_{in}$  值非常重要。

(4) 使用压电变压器时必须小心避免空载和短路状态的出现,因为这些状态可能在压电变压器的输入端引起过电压的危险。

在设计过程中综合考虑以上因素,可以使 PT 工作在较佳的状态。此外,采用合适的输出整流电路或在输出中采用同步整流技术,可以进一步提高整个电路的效率。如在图 3 电路中采用二极管桥式整流,负载电流流过两个二极管,在低电压输出条件下,二极管损耗所占比例较大,因而效率受到限制。文献 [5] 提出用倍流方式的全波整流电路替代二极管整流桥,负载电流只流过一个二极管,使低压输出时的效率得以提高。

## 6 实际应用

### 6.1 PT 在充电器中的应用

PT 的高功率密度、高电压隔离等特性使得其非常适合应用于小功率的手机充电器,它可以使手机充电器微型化。利用 PT 制造的充电器可以做到火柴盒大小,方便携带。文献 [6] 设计的便携式充电器,采用非常简单的拓扑结构,如图 3 所示,使充电器大小只有  $3.3\text{cm} \times 4.4\text{cm} \times 1.4\text{cm} = 20\text{cm}^3$ ,重量不到 20g。由于 PT 的能量转换是通过机械振动,而不是电磁耦合,所以采用 PT 的充电器没有电磁辐射噪声。

### 6.2 线性荧光灯无感式 PT 电子镇流器

为了有效地减少传统电子镇流器的元件数和成本,文献 [7] 利用 PT 替代镇流器中的振荡回路,提出了充分利用 PT 特性设计驱动线性荧光灯的电子镇流器新技术。该镇流器不采用任何传统的磁元件,仍然实现了开关的 ZVS,将开关损耗减少到非常小,其采用的半桥式电路拓扑与图 3 相似,唯一差别是没有磁元件  $L_{in}$ 。它充分利用了压电变压器的电压负载特性曲线,即压电变压器在负载阻抗大的时候其升压比也高的特性。当荧光灯关断时其负载阻抗大,因而 PT 启动时将产生一个很高的电压,很容易启动荧光灯;当荧光灯点亮时其等效阻值很小,这时 PT 的升压比也随之减小,电压降至最低,节省电能。

### 6.3 驱动 MOSFET 和 IGBT

由于可靠性以及限制寄生耦合等原因,在驱动大功率管 (MOSFET、IGBT) 时要求强电流隔离,传统的方法是用光电耦合或脉冲变压器来实现。利用压电变压器同样可以实现 MOSFET 和 IGBT 的隔离驱动,而且由于 PT 的特性决定了其受电磁干

扰的影响很小,自身也不产生电磁干扰,其材料的静态刚度可以达到  $\text{kV/mm}$  的等级,适合于高压应用。其驱动结构如图 4 所示,驱动信号经脉冲波调制后传送到压电变压器,并在压电变压器的二次侧解调后直接驱动场效应管的栅极。由于压电变压器的功率限制在十几瓦左右,因而用 PT 驱动时必须精确计算场效应管栅极在开关期间所需的能量,以便设计恰好匹配的压电变压器。

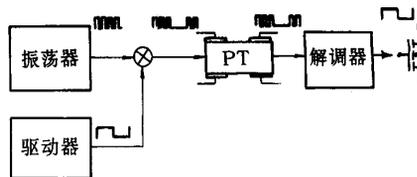


图 4 使用 PT 驱动 MOSFET 和 IGBT 结构图

扰的影响很小,自身也不产生电磁干扰,其材料的静态刚度可以达到  $\text{kV/mm}$  的等级,适合于高压应用。其驱动结构如图 4 所示,驱动信号经脉冲波调制后传送到压电变压器,并在压电变压器的二次侧解调后直接驱动场效应管的栅极。由于压电变压器的功率限制在十几瓦左右,因而用 PT 驱动时必须精确计算场效应管栅极在开关期间所需的能量,以便设计恰好匹配的压电变压器。

压电变压器的应用已经相当广泛,除了在此提到的几点外,还可以应用在笔记本电脑电源、液晶显示背景光源、静电复印高压电源、负离子发生器、小功率激光管电源、警用电击器高压电源等方面。工频压电变压器的研究取得了重大发展,国内外均已研制出功率十几瓦、电压十几伏的接近实用化的样品。

## 7 结论

压电变压器具有高功率密度、高电流隔离、低电磁干扰等优点,在某些应用领域可以替代电磁变压器。充分利用其优点,不仅可以实现变换器的微型化,还可以解决功率电子学中存在的电磁干扰 (EMD) 问题。此外,由于压电变压器的生产比电磁变压器简单,并可以对 PT 元件进行标准化和微型化,这样就更容易实现低成本的大批量生产。尽管目前压电变压器也存在着一些缺点,但随着理论模型及其应用设计与研究的日趋成熟,这些缺点迟早会被克服,压电变压器的应用会越来越广泛。

### 参考文献

- 1 Flynn A M, Sanders S R. Fundamental limits on energy transfer and circuit considerations for piezoelectric transformers. IEEE PESC, 1998: 1463 ~ 1471
- 2 Hamamura S et al. Noise characteristic of piezoelectric transformer DC/DC converter. IEEE PESC, 1998: 1262 ~ 1267

(下转第 23 页)

关频率, 图 5 中将每个开关周期的有关计算分别安排在前后两个  $T_z$  周期中进行。当晶振频率为 12MHz 时, 中断服务程序的执行时间不超过 80 $\mu$ s。

#### 4 实验

本控制方法在研制的变风量空调系统风机专用温控型变频器中得到实际应用, 图 6 给出了带 1.1kW 风机负载、输出频率为 30Hz 时的实测电流波形。

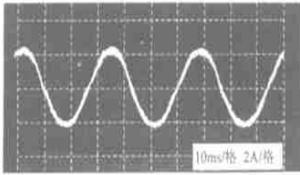


图 6 实测电流波形 ( $f = 30\text{Hz}$ )

#### 5 结论

本文提出了一种基于电压空间矢量调制的随机脉冲位置 PWM 方法, 文章详细分析了本方法的工作原理及其基于 80C196 KC 单片机的实现。本方法通过随机地改变零矢量的位置, 实现了两种低开关损耗 PWM 模式之间的随机切换。与传统的电压空间矢量调制相比, 本方法不需额外的软、硬件资源, 可在减小噪声的同时减小开关损耗, 因此在低成本的嵌入式变频器中有着较好的应用前景。

#### 参考文献

- 1 Trzynadlowski A M et al. Random pulse width modulation techniques for converter-fed drive systems—a review. IEEE Trans. on IA, 1994, 30 (5): 1166~1175
- 2 Pedersen J K, Frede Blaabjerg. Digital quasi-random modulated SFAVM PWM in an AC-drive system. IEEE Trans. on IE, 1994, 41 (5): 518~525
- 3 Kirlin R L et al. Power spectra of a PWM inverter with randomized pulse position. IEEE Trans. on PE, 1994, 9 (5): 463~472
- 4 李永东. 脉宽调制 (PWM) 技术——回顾、现状及展望. 电气传动, 1996 (3)
- 5 陈国呈, 周勤利. 再析关于 PWM 交流变频器电流波形的失真. 电气传动, 1995 (6)

### Realization Scheme of Randomized Pulse Position PWM Based on Microcontroller 80C196 KC

Wang Jianmin

(Shandong University)

**Abstract** A novel randomized pulse position PWM scheme based on voltage space vectors is proposed. Its realization by the microcontroller 80C196 KC is presented. The software design is discussed.

**Keywords** voltage space vector modulation random PWM microcontroller

收稿日期: 2002-05-14

### An Overview of the Application and the Research of Piezoelectric Transformers

Peng Jun

(South China University of Technology)

**Abstract** Piezoelectric transformers have the advantages of small volume, light weight and high efficiency, and have more applications in industry. This paper gives a general discussion on the principle, structure and category of the piezoelectric transformers, and introduces the research interests and application areas. The problems and application prospects of piezoelectric transformers have also been presented.

**Keywords** piezoelectric transformer resonant frequency piezoelectric effect equivalent circuit model

收稿日期: 2002-04-15

(上接第 15 页)

- 3 Syed E M, Dawson F P. Analysis and modeling of a Rosen type piezoelectric transformer. IEEE PESC, 2001: 1649~1654
- 4 Martin J A et al. A new full-protected control mode to drive piezoelectric transformers in DC/DC converters. IEEE PESC, 2001: 348~353
- 5 Yamane T, Hamamura S. Efficiency improvement of piezoelectric-transformer DC/DC converter. IEEE PESC, 1998: 1255~1261
- 6 Navas J et al. Miniaturized battery charger using piezoelectric transformers. IEEE APEC, 2001: 480~484
- 7 Lin R L et al. Inductor-less piezoelectric transformer electronic ballast for linear fluorescent lamp. IEEE APEC, 2001: 635~640