

微环音振荡压电发电机同步电荷能量采集方法

曲威¹,陈荷娟¹,孙加存^{1,2},李文鹏¹

(1. 南京理工大学机械工程学院,江苏南京 210094;2. 苏州市职业大学电子学院,江苏苏州 215011)

摘要:能量采集效率是引信微环音振荡压电发电机能否得到应用的关键之一。在经典能量采集电路和填谷能量采集电路的基础上,采用同步电荷能量采集法,基于脉冲宽度调制技术,设计了一种较高能量采集效率的同步电荷能量采集电路,由微动开关精确控制转移电能时间。理论分析和实验模拟的结果表明,开关精确控制转移电能时间的同步电荷能量采集电路,其输出功率最大且与负载无关,这将有利于微环音振荡压电发电机在不同型号引信中的应用。

关键词:微环音振荡压电发电机;能量采集效率;脉冲宽度调制技术;同步电荷能量采集方法

中图分类号: TP271+.4 **文献标识码:** A

Synchronous Charge Energy Harvesting Method for Micro Ring Tone Oscillations Piezoelectric Generator

QU Wei¹, CHEN Hejuan¹, SUN Jiacun^{1,2}, LI Wenzheng¹

(1. School of Mechanical Engineering, NUST, Nanjing 210094, China;

2. Institute of Electronics, Suzhou Vocational University, Suzhou 215011, China)

Abstract: The energy harvesting efficiency is a key issue for the application of the micro ring tone oscillations piezoelectric generator on fuze. The traditional energy harvesting circuit and valley fill energy harvesting circuit was described, on which a higher energy harvesting efficiency synchronous charge energy harvesting (SCEH) circuit was designed based on PWM technique and SCEH methods. Electric energy transferring time was precisely controlled by the micro switch. Theoretic analysis and experimental simulation revealed that the micro switch could precisely controlled SCEH circuit, and the output power was maximum with nothing to do with variable load resistors, which would be helpful for application of micro ring tone oscillations of piezoelectric generator on various fuzes.

Key words: micro ring tone oscillations piezoelectric generator; energy harvesting efficiency; pulse width modulation technique; synchronous charge energy harvesting method

0 引言

随着引信技术的不断发展,现代引信要求物理电源具有大体积比功率、快速激活、耐高过载、耐高、低温并适应长期存储等特性。微环音振荡压电发电机就是为满足这种需求的一种新型流体动力激励发电装置,它具有结构简单,不发热,无电磁干扰,易于小型化等特点。输出功率校正是微环音振荡压电发电机应用的关键问题之一。

在发电机的正常使用中,输出端和负载间常需连接各种接口电路、信号调理电路等。其中,接口电路最重要,它关系到发电机或电源的电能是否能有效、最大化地被负载所利用。引信电源的接口电路都是由用户自己设计,一般由整流桥、存储电容和负

载串联连接组成,这种电路只考虑结构的单一振动模态,忽略了负载电压波动、压电片短路和开路时时间常数的差异以及二极管正向导通角的影响,实际能量采集效率很低。对于压电陶瓷片,因其输出能量有限,其体积和能量的矛盾突出。这种情况下,提高发电机接口电路能量采集效率是提高电源电能利用率的有效措施。

为提高负载的有功功率,采用电流校正式无源功率因数校正方法,减小整流后的电流波形畸变,提高电路的功率因数^[1]。本文在此基础上作改进设计,采用同步电荷提取法^[2-3],进一步解决发电机与负载的匹配问题,提高电能的采集效率。通过对比模拟实验分析,观察能量采集效果,在保证负载电压

收稿日期:2012-11-13

作者简介:曲威(1989-),男,湖南常德人,硕士生,主要从事压电能量采集及压电发电机输出电能特性分析的研究。

与电源之间良好的线性关系下,确定同步电荷采集电路控制策略,为将来发电机接口电路的集成和模块化设计奠定基础。

1 功率校正能量采集方法

图 1 为基于无功功率补偿的压电发电装置功率调理电路^[1,4]。在传统整流桥和负载串联中串接一个二阶串、并联电容组合结构电路(SP)(见图 1 中全波整流电路后的填谷电路),由 2 个电容值相等的电容实现电能的采集。通过增大一个周期内电路的导通状态,达到增大整流桥二极管导通角的目的,填平畸变波形缺失的谷底部分,使输入电流从尖状脉冲纠正为近似于正弦波的波形,从而将功率因数提高到 0.9 以上。

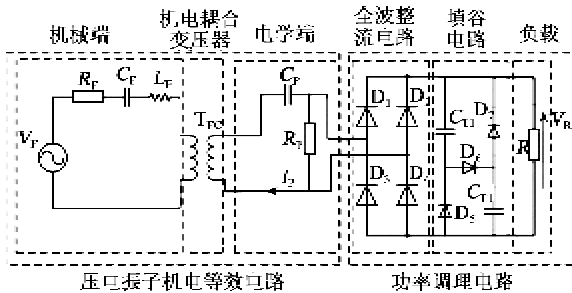


图 1 压电发电装置功率调理电路

由于串并联特性导致两电容放电时负载端电压的差异将导致充电时间的变化,从而影响整流二极管导通角的大小和电流波形。图 2 为人为对导通时间实施控制。图中, S_1 为导通时间控制开关, S_2 是起爆电路供电控制开关。充电时, S_1 导通, S_2 断开, 2 个电容为串联;放电时, S_1 断开, S_2 导通, 2 个电容为并联。假设 SP 电路的充、放电时间大于时间常数,则该填谷电路可看作是一个 2:1 的降压器。那么,负载上电压会迅速下降,充电时间相应增加,也就增加了整流二极管的导通角,使整流后的电流波形更接近于输入正弦波。因此,图 2 中的开关 S_1 实际是一个电能采集控制开关,它的通断实现了负载电路同步电荷的采集。

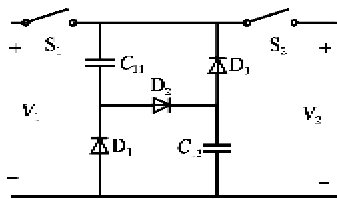


图 2 控制导通时间的二阶 SP 电路结构图

当压电发电机结构很庞大时,负载与压电发电机结构振动的耦合较弱,可忽略负载电路对压电发电机结构振动位移幅度的影响^[5]。但微环音振荡压

电发电机结构很小(直径不大于 $\varnothing 10$ mm),所以,负载电路的影响不能忽视。图 3 为相同负载(电点火头 DD-17)下采用不同可控硅电子开关测试负载两端的电压和电流曲线。由图可知,贴片式可控硅的曲线尖峰明显,说明其开关特性优于直列式可控硅;在 0.2 ms 时段内,贴片式可控硅的最大电压和最大电流均高于直列式。负载功率随着电火工品上电压、电流的变化而变化。因此,发电机输出阻抗与负载电路中电火工品阻抗、电子开关通断时间与接口电路储能电容的充放电时间常数要精密匹配。

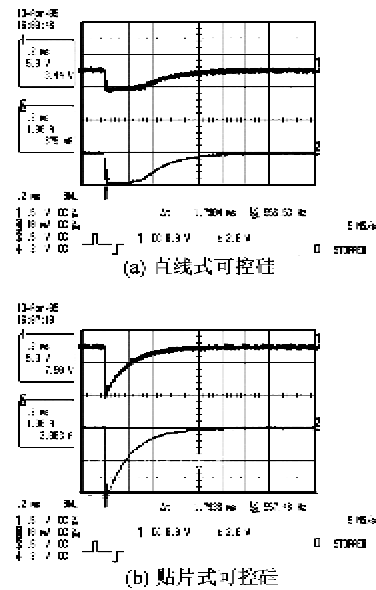


图 3 不同电子开关负载电压和电流曲线

由于压电发电机的电能是周期性转移到储能元件和负载上,所以,其设计的关键问题有:

- 1) 电荷提取的时刻必须与发电机的振动同步。
- 2) 保证压电发电装置在绝大多数时间内都处于开路状态。

为此,本文提出将 S_1 设计为一个直接由压电体变形控制电能转移时间的微动开关。电能转移时间就是微动开关精确动作(通断)的控制信号。理想的微动开关控制信号应该是一个电压方波信号,本文通过机电模拟的方法,用一个电路来模拟产生一个周期性的电压方波,设计了基于脉宽调制(PWM)技术的开关控制电路,通过电路仿真观察负载对接口电路的影响。这为新型的微环音振荡压电发电机方案设计提供了一种有效的设计手段。

2 同步电荷能量采集方法

2.1 同步电荷能量采集方法

图 4 为同步电荷能量采集电路。同步电荷能量

采集方法的原理是:当压电振子开始振动时,压电发电装置开始储存电能,此时,开关 S_1 是打开的。当压电振子的变形量达到最大时,SCEH PWM 电路会产生一个宽度很窄的方波使开关闭合,压电发电装置存储的能量就会转移到隔离式变压器主边的电感中。此时,反激式(flyback)电路中的二极管 D 是不导通的,避免电流流到隔离式变压器的副边电路。当能量转移完毕时,开关 S_1 断开,二极管 D 导通,隔离式变压器主边电感中的能量会转移到副边电路中的存储电容 C_1 中给负载供电。然后重复上面的过程。

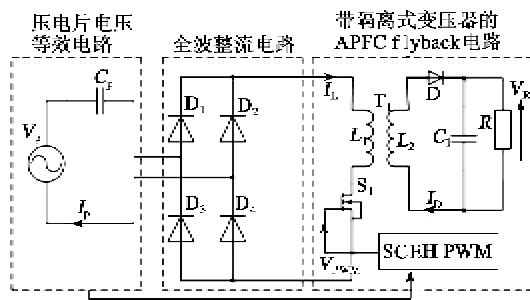


图4 同步电荷能量采集电路

图5为采用同步电荷能量采集方法后电路中的理想波形。图中, D 为压电振子的振幅, A 、 B 为压电振子振幅最大时的两点, V_p 为压电发电装置产生的电压, I_p 为压电发电装置产生的电流。

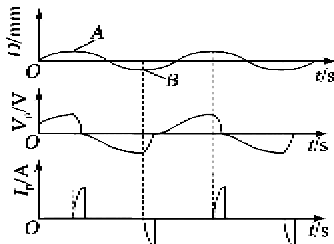


图5 同步电荷能量采集电路中的理想波形

压电振子的等效电容会与隔离式变压器主边的电感组成 LC 振荡电路,为保证能量转移充分,要求能量转移必须在一个振荡周期内完成,即开关 S_1 闭合的时间要小于一个振荡周期,一般要求开关 S_1 闭合时间 $T_{S_1} = 0.25 T_{L_1 C_p}$ (其中 $T_{L_1 C_p}$ 为振荡周期),而一个振荡周期是远小于压电振子的谐振周期,这就保证了压电振子中的能量能得到完全转移。

$$T_{L_1 C_p} = 2\pi \sqrt{L_1 C_p} \quad (1)$$

式中: L_1 为隔离式变压器主边电感值; C_p 为压电振子等效电容。

同步电荷能量采集电路中含有有源功率因数校正反激式 (APFC flyback) 电路,该电路能减少电路

中信号谐波的含量和减小信号间的相位差,从而能提高电路中的功率因数,根据视在功率与有功功率的关系,可得到增大功率因数能提高输出功率。

压电发电装置产生电压的最大值 V_M 为

$$V_M = \frac{Q_{SCEH}}{C_p} = \frac{2Q_{OC}}{C_p} = 2V_{pm} \quad (2)$$

式中: Q_{SCEH} 为采用同步电荷能量采集方法后压电振子表面积累的电荷量; Q_{OC} 为压电振子开路时压电振子表面积累的电荷量; V_{pm} 为压电振子开路时产生的电压峰值。因此, V_M 是压电振子开路时最大电压的 2 倍。压电发电装置的输出功率为

$$P_{SCEH} = 0.5 C_p V_M^2 (2f) \quad (3)$$

式中: f 为压电振子谐振频率。线性电路中可将 C_p 、 V_M 、 f 看作常量,由式(3)可知输出功率是一个与负载值无关的常数。

2.2 同步电荷能量采集电路

利用同步电荷能量采集方法改进引信填谷能量采集电路和经典能量采集电路,基于 PWM 技术,设计了同步电荷能量采集电路如图6所示。

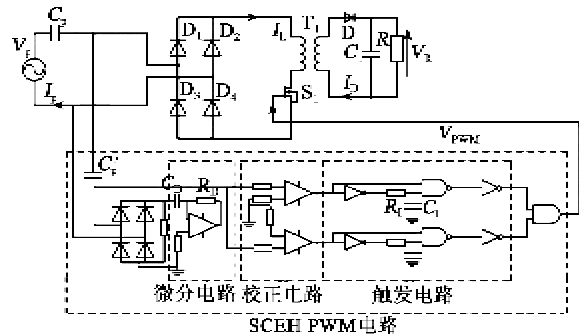


图6 同步电荷能量采集实验仿真电路

压电发电装置产生的电压经整流电路整流后,经过运算放大器的微分电路,根据输入正弦电压峰值和谷值,微分电路产生一路正负相连的方波信号。产生的方波信号流经波形校正电路,将产生两路方波信号。两路方波信号流经 2 个积分型单稳态触发电路,将会形成两路窄方波信号。积分型单稳态触发电路有一个稳态和一个暂稳态,当满足输入条件后电信号会从稳态变为暂稳态,暂稳态持续一段时间后自动变为稳态,暂稳态持续的时间是由电路中 R_1 和 C_1 构成的时间参数确定的。根据主电路中开关的导通时间可确定 R_1 和 C_1 的值。最后通过一个加法器将两路窄方波信号合成一路,合成的窄方波信号用于控制主电路中开关的关断,从而实现同步电荷提取的功能。

3 实验仿真与结果分析

实验压电振子模型采用“三明治”式,即铜圆片上、下表面粘结圆形陶瓷压电片,压电片材料为 PZT-5H。经实验测得当压电振子工作在谐振频率时压电发电装置产生的电压有效值为 15 V,频率为 250 Hz。仿真时用一个交流电压源和压电振子等效电容(10 nF)串联来等效压电发电装置。

利用 Multisim 仿真软件对经典能量采集电路、填谷能量采集电路和同步电荷能量采集电路进行仿真,仿真的结果如图 7、8 所示。由图 7 可看出,仿真波形与理想波形基本相符。经典能量采集电路、填谷能量采集电路和同步电荷能量采集电路的输出功率与负载的关系如图 8 所示。

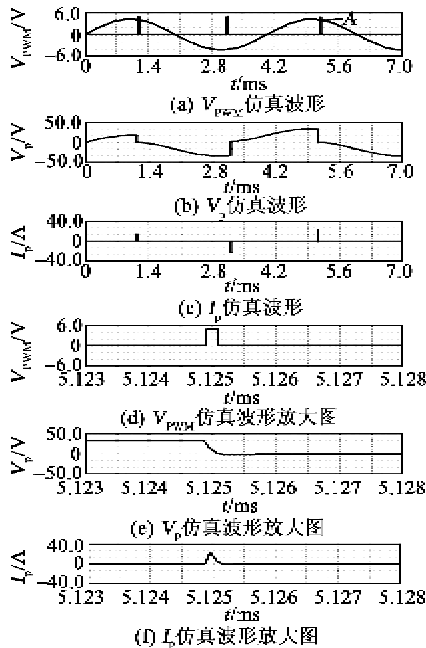


图 7 同步电荷能量采集电路的仿真波形

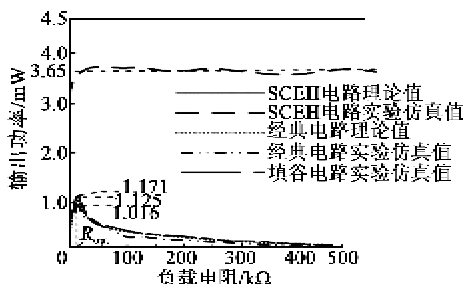


图 8 输出功率与负载的关系

由图 8 可看出,填谷能量采集电路的输出功率略大于经典能量采集电路的输出功率,同步电荷能量采集电路的输出功率大于上面 2 个电路,且同步电荷能量采集电路的输出功率基本与负载值的大小

无关。

在实验条件下,采用同步电荷能量采集法后压电发电装置理想输出功率应为 4.5 mW,同步电荷能量采集电路的实际输出功率为 3.65 mW。说明同步电荷能量采集电路的输出功率的采集效率为 81.11%。造成此原因是因为在实验仿真中存在开关损耗和变压器损耗等,这是在理论计算中没有考虑的。

同步电荷能量采集电路实验仿真的输出功率为 3.65 mW,填谷能量采集电路实验仿真的最大输出功率为 1.171 mW,经典能量采集电路实验仿真的最大输出功率为 1.016 mW。说明同步电荷能量采集电路的输出功率是经典能量采集电路最大输出功率的 3.593 倍,是填谷能量采集电路最大输出功率的 3.11 倍。

4 结束语

本文提出了利用同步电荷能量采集技术对压电发电装置能量进行采集的方案,并对接口电路进行了改进设计。利用 SCEH PWM 电路产生的方波信号来模拟控制微动开关的通断,通过理论和实验仿真验证了其输出功率比经典能量采集电路和填谷能量采集电路最大输出功率高 3 倍以上。输出功率的大小基本与负载值无关。改变电模拟电路的电参数,就是改变微动开关通断时间。同步电荷能量采集电路为以后设计直接利用压电体变形控制转移电能时间的微动开关及开关控制策略提供了技术支持。

参考文献:

- [1] 温都苏. 引信气流振动压电发电机功率校正增能技术[D]. 南京:南京理工大学,2012.
- [2] LEFEUVRE E,BADEL A,RICHARD C,et al. Piezoelectric energy harvesting device optimization by synchronous electric charge extraction[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures,2005,16(10): 865-876.
- [3] LEFEUVRE E,BADEL A, RICHARD C, et al. A comparison between several vibration-powered piezoelectric generators for standalone systems[J]. Sensors and Actuators A,2006,126(2):405-416.
- [4] 栾桂冬,张金铎,王仁乾. 压电换能器和换能器阵(修订版)[M]. 北京:北京大学出版社,2005.
- [5] 丰立东. 基于同步电荷提取方法的能量回收技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2010.