

用于电站变压器振动能量收集器的能量管理系统设计

为了克服压电型能量收集器的接口电路中负载匹配及电路损耗问题,基于前期研究的基础上,针对压电能量收集器在电站变压器中的应用环境,提出了一种新型电荷提取并储能的电路,通过无源峰值检测开关电路的应用,计算并分析了压电模块和后端电路模块的耦合效应,并且通过实验获得了一系列结论,这些方案优化了压电能量收集器的电路设计,充分收集了能量转换器输出的能量,提高了储能效率。经实验证明,基于能量收集器的电源管理电路给2节锂电池充电70天,可驱动3个60 mW的LED白光灯照明约3.88 h,也可用于带动紧急照明和应急操作系统的工作。

王凯令 胡海涛 陶亦农/国网上海市电力公司市北供电公司
狄文宁 方超/中国科学院上海硅酸盐研究所



王凯令/工程师

在各种环境能量中,振动能量因其存在广泛,已成为近年来物联网节点自供能研究领域的热点,广泛应用于工业、农业、通信、国防、航空航天和医学等领域。根据能量转换原理的不同,振动发电技术可分为静电式、电磁式及压电式三类。其中,压电发电装置发展最快,具有机电能量转换效率较高、易于与微机电系统集成、成本较低、无电磁干扰且结构简单的优势^[1]。

目前变电站中的局部电子系统主要采用电力线供电或定期更换电池等传统供电方式。采用电力线供电方式成本较高、体积与质量较大且维护困难;而采用电池供电寿命有限,且在特定应用场合更换困难。因此,利用电站变压器的振动能量为电子系统节点供电,已成为解决电站变压器电子网络节点能量自

给问题的有效方法之一。本文针对变电站的电子系统网络节点特点,设计了一套用于振动能量收集系统的电源管理系统,利用该电源管理系统对所制作的压电型振动能量收集器进行实验,得到了较满意的结果。

设计原理简介

在没有外力的作用下,晶体内部的电偶极矩是平衡的,此时压电晶体处于不带电状态。当在压电晶体表面施加某一方向外力时,晶体的电偶极矩会遭到破坏,此时在压电晶体表面会产生电荷,同时电荷极性随着晶体受力方向的不同而不同,晶体受力所产生的电荷量与外力的大小成正比。

压电能量收集器是利用正压电效应制成的,当压电片受到外界力的作用时,会破坏由正负电荷构成的电偶极矩平衡,从而在极化方向上的压电片表面产生电性相异的电荷,进而输出电能^[2]。但是由于正压电效应,在无外力作用的情况下,压电晶体不会有电荷输出,即压电式发电机的压电换能器本身在变化的外力作用下,存在不能稳定供电或连续供电的问题。

因为压电型能量收集器与民用电源或电池不同,其通用性差,这就涉及到一个压电型能量收集器的电能是否能够有效、最大化地被负载所利用的问题。为了解决通用性和负载匹配的问题,最有效的措施是在研制电源管理电路时将其接口电路、功率调理电路进行一体化

关键词/Keywords

压电能量收集器·
变压器·
能量管理系统·

国网上海市电力公司科技资助项目(52091413502W)。

设计,即将电路集成并固化于电源本体结构,保证输出功率、电性能的一致性。

针对100 Hz频率的振动应用环境,制备了如图1所示的桥式整流电路以及如图2所示的优化后的倍压整流电路,利用二极管的单向导通和电容的充放电特性来实现电荷的累积和高压输出。

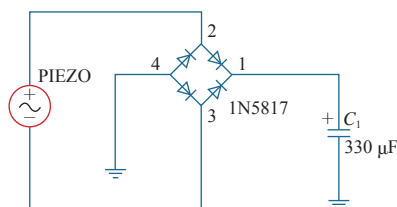


图1 桥式整流电路

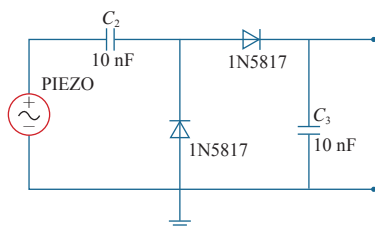


图2 倍压整流电路

倍压整流电路的优点有：①即使交流电压较低,利用耐压较低的整流二极管和电容器也能得到一个较高的直流电压,便于电能的输出；②倍压整流的输出电压是输入电压的几倍,相比桥式整流电路要高,使压电材料的输出效率大幅提高^[3]。

振动型能量收集器的发电能力检测

压电能量收集器的应用离不开后端的电源管理电路,其特殊的发电机理要求电源管理电路必须提供一定的发电处理能力,电源管理电路通常为DC-DC型,其性能的优劣不仅关系到压电型能量收集器的输出性能,也会影响到其后端在电子系统中的应用。对电源管理电路而言,压电型能量收集器是一个容性负载,因此能量收集电路的设计不同于呈纯阻性的传统电路设计^[4]。

首先对压电型振动能量收集器设计了发电能力测试实验^[5],用以检测实际发电能力和元器件在应用环境中的工作特性(如谐振频率、最大发电

功率和振幅等参数)。根据这些发电能力实验数据进行后期电量储存元器件的设计和制备。在接入227 Ω的负载后,各组发电模块的发电情况如图3~图6所示,输出功率的计算结果如表1所示。

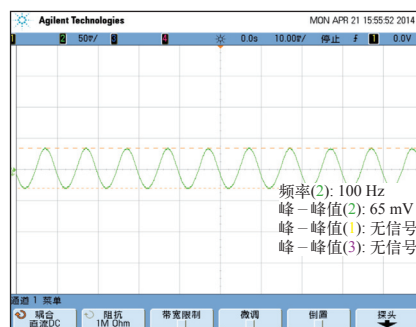


图3 发电模块1电能输出

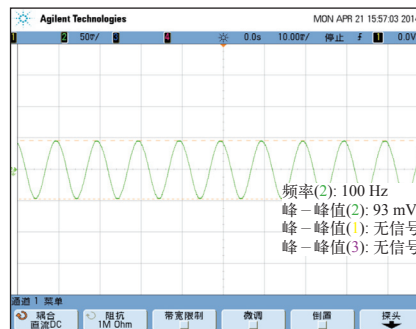


图4 发电模块2电能输出

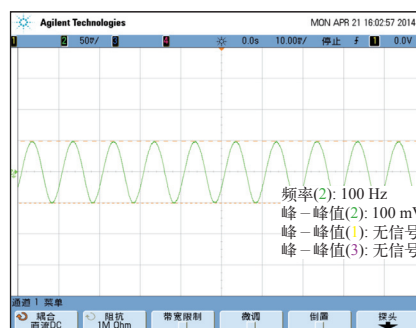


图5 发电模块3电能输出

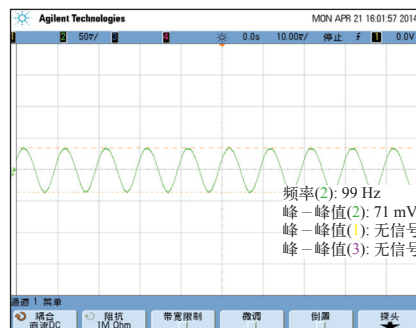


图6 发电模块4电能输出

表1 各发电模块的输出功率

	发电模块1	发电模块2	发电模块3	发电模块4
峰值电流/mA	0.14	0.21	0.22	0.16
电流有效值/mA	0.10	0.15	0.16	0.11
输出功率/mW	2.27	5.10	5.80	2.75

根据发电情况进行储能实验,利用发电模块1输出为10 F的超级电容器充电,并用Agilent示波器记录充电数据,充电效果如图7所示。经计算,充电电流约为0.08 mA,据此以及表2中各发电模块的数据进行计算,四组发电模块总的充电电流约为0.416 mA。由此可得,该电容器容量约7.5 mA·h,充满电约需18 h。



图7 发电模块1对10 F超级电容器的充电效果

表2 不同容量储能电容器在发电部分供电下的充放电时间 (不考虑效率)

储能容量 /mA·h	充满电时间 /h	理想供电时间/h (LED灯5.6 mW)	理想供电时间/h (LED灯60 mW)
7.5	18	3.75	0.375
100	240 (10天)	50	5
500	1 202 (50天)	250	25

考虑到不同电容器的实际放电效率差异很大,即放电深度(放电容量与标准容量的比值)不同,一般情况下,常规放电深度约为50%~70%,若按照放电深度50%以及电路转换效率67%计算,可得不同容量的电容器,其充电时间和供电时间如表3所示。

表3 不同容量储能电容器在发电部分供电下的充放电时间 (考虑效率)

储能容量 /mA·h	充满电时间 /h	预计供电时间/h (LED灯5.6 mW)	预计供电时间/h (LED灯60 mW)
7.5	18	1.26	0.12
100	240 (10天)	16.75	1.67
500	1 202 (50天)	83.75 (约3.5天)	8.37

振动型能量收集器的电源管理电路设计

本次储能电路是根据20世纪美国科学家Mas提出的电池快充三定律,并结合压电材料的高阻抗特性进行改进的充电电路,该充电电路以DC-DC变换器为核心,克服了发电材料输出电能不稳定、不可人为控制的缺点,将振动能量收集器上收集到的电能转换为稳定、可控制的电能,供蓄电池充电。

根据蓄电池在振动能量收集系统中的充电特性,设计和采用了储能、即时放电和照明的充电策略,并对有限的电能进行管理,该控制原理如图8所示。

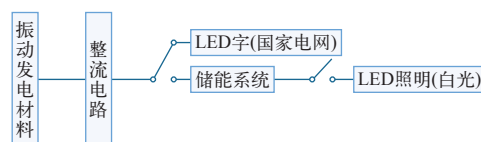


图8 储能发电系统示意图

对于压电型发电材料,基于Mas的电池快充三定律设计了限流-恒压快充模式的充电电路,电池在充电过程中的电压和电流可表示为

$$V_b(s) = V_\infty + (V_0 - V_\infty)e^{-\alpha s}$$

$$i_b(s) = \begin{cases} I_0 & s \leq s_c \\ I_0 e^{-\alpha(s-s_c)} & s > s_c \end{cases} \quad (1)$$

式中, s 为充电时间; s_c 为电池由恒流充电到电流指数衰减充电的时间转折点,当 $s = s_c$ 时,电池中存储的电荷通常为电池最大电荷存储量 Q_m 的80%; V_0 为电池的初始电压; V_∞ 为电池的充电限制电压; α 为常数; I_0 为初始充电阶段的充电电流。

由上式分析可知:在整个充电过程中,电池电压将随时间呈指数形式增加,但电池电流在充电初始阶段为恒流充电阶段,然后随时间呈指数形式减小。因此可以预测:在充电之初电池电压较低时,用一较大电流对电池充电,后充电电流逐渐减小,直至充满为止。

因此,采用DC-DC升压电路将发电体所发的电能升压到3 V并给锂电池(每节350 mA·h)充电,DC-DC储能电路原理如图9所示。如按照实测的发电体充电电流0.416 mA来计算,给2节锂电

池充电70天,可驱动3个60 mW的LED白光灯照明约3.88 h;给10节锂电池充电350天,可驱动3个60 mW的LED白光灯照明约19.4 h,同时电能可用于带动紧急照明和应急操作系统的工作。

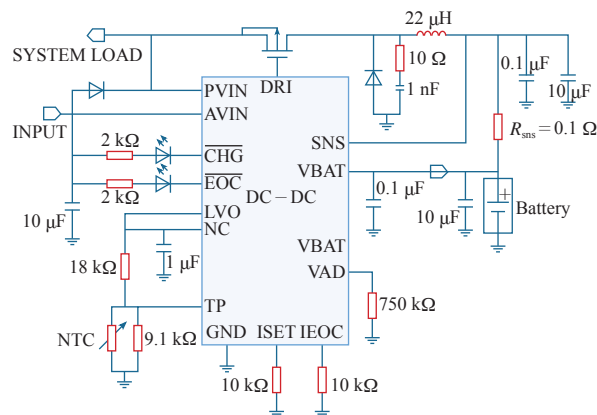


图9 DC-DC储能电路原理

振动能收集器功能控制板如图10所示。它是储能发电系统的控制中心，振动发电材料、储能电路、发电演示字（国家电网）以及LED照明灯（白光）均通过控制板互相连接，并通过两个控制开关进行各种功能的切换。当开关切换到LED字（国家电网）时，振动发电材料将电能直接用于点亮LED字（国家电网）；当开关切换到LED照明（白光）时，储备在锂电池中的电能将用于点亮白色的照明用电。自助供电系统安装在变电站变压器上的整体照片如图11所示，包括发电、整流、储能、LED灯字、照明灯和功能控制板等部分。

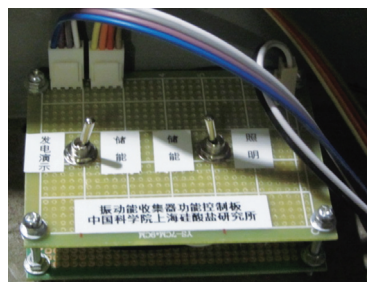


图10 振动能收集器功能控制板实物

基于目前的振动发电模块阵列规模,能够提供工作稳定、安全可靠以及功能切换方便的储能电源(1 W左右),为变电站应急照明供电。照现有发电规模计算,日发电量约10 mA·h,若储能一年时间,则用于紧急照明约20 h,如能扩大发电规

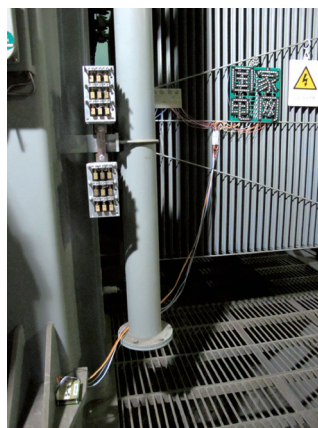


图11 自助供电系统安装在变电站变压器上的整体照片

模，将多套发电模块并网组合起来，则能够提供数百甚至上千瓦的储备电能，在紧急情况下为变电站更多的设备提供充足的电力。

结束语

本文以用于电站变压器中的压电型能量收集器为研究对象,对压电型能量收集器进行了测试,包括其在电站变压器中工作时的谐振频率、最大发电功率和振幅等参数,设计和制备了压电能量收集器的电源管理电路,将输出的电能最大化地采集和储能,从而使负载获得更多的能量。用自主设计的电源管理电路系统成功地收集了变电站中的能量收集器,运行性能良好,实现了初期的目标。

参考文献

- [1] 陈仁文. 新型环境能量采集技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [2] 栾桂冬, 张金铎, 王仁乾. 压电换能器和换能器阵 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2005.
- [3] Priya S, Inman D J. 能量收集技术 [M]. 黄见秋, 译. 南京: 东南大学出版社, 2011.
- [4] Islam R A, Priya S. Realization of high-energy density polycrystalline piezoelectric ceramics [J]. Applied Physics Letters, 2006.88.
- [5] 李映平, 赖百坛, 陈荷娟, 等. 一种新型的可蓄能压电电源原理研究 [J]. 兵工学报, 2004, 25 (4): 421-423.

(收稿日期: 2015-02-10) **EA**