环境振动特性和压电型集能器的研制

基于变电站变压器的工作环境特征，测试分析变压器的振动特性，获得其振动频率为100 Hz，加速度峰值为0.416 m/s^2，据此设计和制备压电型集能器，确定其尺寸参数，并对其输出性能进行系统研究。器件在0.416 m/s^{2}加速度激励下输出电压随振动频率的变化关系显示，在100 Hz时电压峰值达到9.4 V。设计的集能器谐振频率与变电站变压器振动频率一致，非常适于变电站变压器振动能量收集和应用，对于支持变电站故障抢修具有十分重要的意义。

陈震[1] 苏君[1] 韩浩江[1] 任博[2] 梁柱[2] 王升[2] 狄文宁[2] 方超[2] 罗豪甦[2]
/1.国网上海市电力公司市北供电公司 2.中国科学院上海硅酸盐研究所

陈震/工程师

关键词/Keywords
压电型集能器·
变压器·
变电站·

0 引言

变电站是将发电厂发出的电输送之前改变电压的场所。在电力系统中，变电站是输电和配电的集结点，其重要性不言而喻。变电站一旦出现故障，对居民、工厂等的用电将造成重大影响和损失，因此变电站故障一定要及时抢修，以最大限度地降低其造成的社会和经济损失。利用压电型集能器设计自助供电系统，将变压器的振动能收集储存起来，在变电站出现故障时，及时为应急照明设备供电，以提高故障抢修效率，具有十分重要的意义。

变压器存在着各种振动噪声，这是本体结构设计、选型布局、安装和使用过程中，变压器本体及冷却系统产生不规则、间歇、连续或随机引起的机械噪声及空气噪声的总体作用。具体来说，变压器本体振动产生的噪声根源在于：硅钢片的磁致伸缩引起的铁心振动；硅钢片接缝处和叠片之间存在着因漏磁而产生的电磁吸引力而引起铁心的振动；当绕组中有负载电流通过时，负载电流产生的漏磁引起线圈、油箱壁的振动。以上3种噪声中，以第1种噪声起主导作用，也就是构成铁心的硅钢片在交变磁场作用下发生微小变化即磁致伸缩，磁致伸缩使铁心随励磁频率变化做周期性振动而引起。

近年来，将环境中的振动能收集转换为电能为电子器件供电的集能技术发展迅速，基于压电材料的压电集能技术成为了研究的热点[1-5]，该技术的诸多优点使其越来越受到人们的关注[6]。压电型集能器是利用压电材料的压电效应，将周围环境中可以回收利用的振动能收集转换为电能存储起来，供电子器件直接利用的新型绿色环境友好器件。

在压电能量收集器中起着核心作用的压电材料是一类重要的功能材料，它广泛应用于信息技术、先进制造、资源与环境、生物与健康、能源、航空航天、核设施和武器装备等国民经济和国防建设的各个领域。压电型集能器的性能首先决定于起到机电转换作用的压电材料性能的优劣，研究出高性能压电材料是实现高性能集能器的先决条件。弛豫铁电单晶铌镁酸铅－钛酸铅$((1-x)Pb(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3-xPbTiO_3$，简称为PMN－xPT或PMN－PT）是目前性能最好的压电材料之一[7]，其压电应变常数（d_{33}, $-d_{31}$）可以达到2 500 pC/N，机电耦合系数（k_{33}, k_{31}）可以达到94%[8-10]。

本文将首先通过实验对变电站变压

国网上海市电力公司科技资助项目（批准号：52091413502W）支持。

中国知网 https://www.cnki.net

器的振动特性进行测试分析，并基于此设计合理的压电型集能器结构，对振动能量进行收集，为变电站故障抢修中的应急供电服务。

1　试验过程

1.1 变电站变压器振动特性测试

将压电加速度计（Brüel & Kjær Ltd., Type 4393）粘在被测位置，通过电荷放大器（Brüel & Kjær Ltd., Type 2692）将加速度计产生的电荷信号转换成电压信号，并通过示波器（Agilent DSO7054B）进行观测，得到被测位置的振动特性曲线。

1.2 压电型集能器制作与测试

采用改进的Bridgman法生长PMN－PT单晶，并用切割机和划片机将其切成所需尺寸的晶片，在主面上被覆银电极并进行极化，而后将晶片与金属片粘结构成悬臂梁结构。将质量块固定在悬臂梁的末端作为质量负载，用以调节悬臂梁的谐振频率和输出。

集能器性能测试装置如下。用振动发生器（Brüel & Kjær Ltd., Type 4809）产生机械振动，集能器固定在振动发生器上，由信号发生器（Agilent 33220A）和功率放大器（Brüel & Kjær Ltd., Type 2706）激励振动发生器产生一定大小和频率的正弦振动。器件的输出电压由示波器（Agilent 54622A）进行监测。整个试验装置置于海绵垫上，以阻止外界环境的干扰。

2　结果与讨论

2.1 变电站变压器振动特性分析

变压器的振动，主要是构成铁心的硅钢片在交变磁场作用下发生微小变化即磁致伸缩，磁致伸缩使铁心随励磁频率变化做周期性振动而引起。变压器线圈中的电流为正弦变化，铁心心中产生的磁场也是正弦变化，设该磁场的磁感应强度为$B=B_0\sin\omega t$，磁致伸缩的形变x与磁场B的平方成正比，即

$$\begin{aligned} x &= AB^2 \\ &= AB_0^2\sin^2\omega t \\ &= \frac{1}{2}AB_0^2 - \frac{1}{2}AB_0^2\cos 2\omega t \end{aligned}$$

由上式可知，磁致伸缩的形变频率（即振动频率）为磁场频率的2倍。我国民用电基频为50 Hz，产生的交变磁场基频也为50 Hz，因此由磁致伸缩导致的变压器振动基频应为100 Hz。

对变电站变压器壁的加速度进行测试，得到加速度随时间变化的曲线如图1所示，加速度峰值在0.4~0.5 m/s^{2}之间。对该曲线进行傅里叶变换，得到加速度在频域上的分布图（如图2所示）。从图中可以看出，振动频率以100 Hz为主，这与我们之前做出的变压器振动基频应为100 Hz的论断是一致的。变压器100 Hz频率振动的加速度为0.416 m/s^2。为了使集能器在谐振频率条件下工作，以获得较大的电能输出，我们需要对集能器进行设计，使其谐振频率恰好为100 Hz。

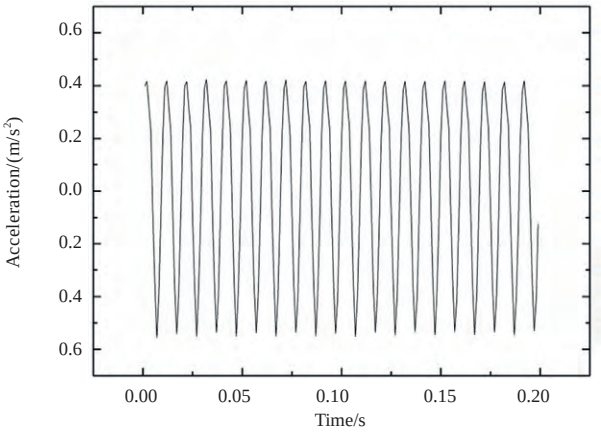

图1　变电站变压器壁的加速度时域图

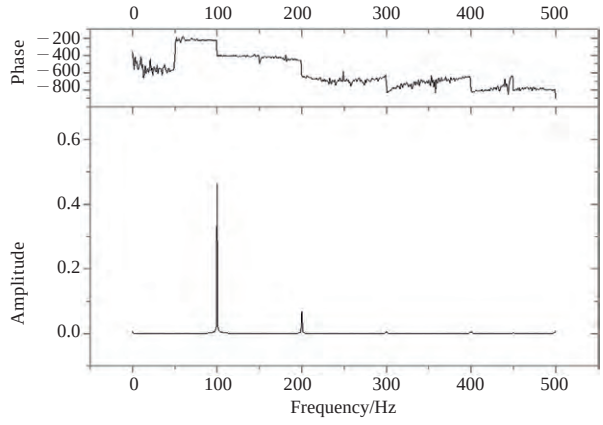

图2　变电站变压器壁在频域上的振动特性分布

2.2 压电型集能器设计研究

根据变电站变压器的振动特性和环境特征，为了与其较低的振动频率匹配，设计了如图3所示的基于悬臂梁的压电型集能器结构。由2片长条

中国知网　https://www.cnki.net

形压电片粘结在长条形金属片（选择铍铜片作为金属片）上下两个面上构成双晶片结构，双晶片的一端固定在振动源上，另一端自由悬空，即构成悬臂梁。自由端粘结一定的质量负载以调节谐振频率和输出。通过对结构中压电片、金属片的尺寸（长、宽、厚）以及质量负载大小的设计计算，最终确定出了适合于变压器振动能量收集的最优配置的集能器参数（如表所示）。

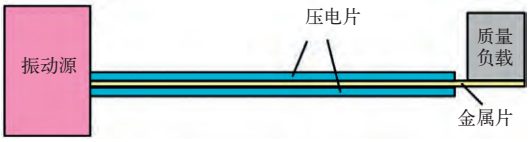

图3　适用于变压器振动能量收集的双晶片悬臂梁结构

表　用于变电站变压器振动能量收集的压电型集能器参数

参数	数值
悬臂梁长度/mm	20.0
悬臂梁宽度/mm	15.0
金属片厚度/mm	1.0
压电片厚度/mm	0.5
质量负载大小/g	22.0

对集能器输出性能进行了系统地测试研究，在与变压器壁加速度（0.416 m/s^2）相同的振动激励下，获得了器件输出电压与频率的关系（如图4所示），在100 Hz频率下集能器获得最大输出，峰值可以达到9.4 V。图5给出了集能器在100 Hz、0.416 m/s^{2}正弦激励下的输出电压曲线。

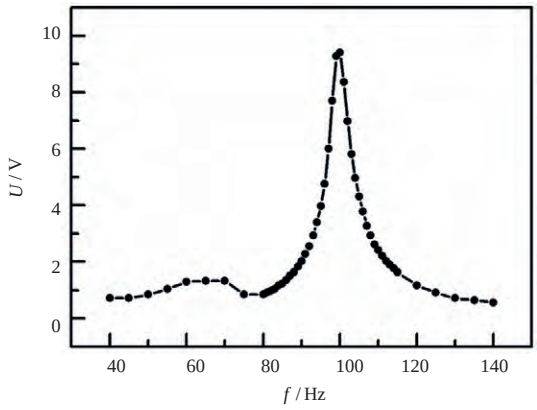

图4　压电型集能器的输出电压峰值随频率变化的曲线（0.416 m/s^{2}正弦激励）

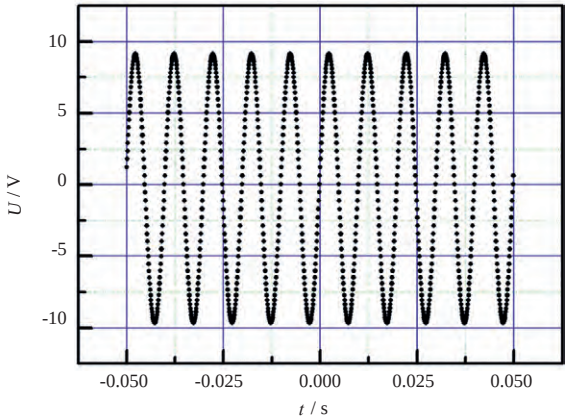

图5　压电型集能器的输出电压曲线（100 Hz、0.416 m/s^{2}正弦激励）

3　结束语

首先对变压器工作环境振动情况进行了测试，并分析得到变压器壁振动的频率为100 Hz，加速度为0.416 m/s^2。根据此数据，设计了基于压电单晶的悬臂梁集能器结构，并通过计算确定了悬臂梁结构的尺寸参数。对器件的性能进行了系统地测试研究，获得了器件在0.416 m/s^{2}加速度激励下输出电压随振动频率的变化关系，器件在100 Hz时输出电压最大，峰值达到9.4 V。该结构的集能器谐振频率与变电站变压器振动频率一致，在变压器振动条件下能够获得很高的电压输出，非常适用于收集变压器振动能。

由150个该结构组成的悬臂梁阵列，输出电能为储能电池充电70天，可驱动180 mW的LED白光灯照明3 h以上；充电350天，可驱动180 mW的LED白光灯照明19 h以上。如扩大规模，由10套以上的阵列同时工作，在变电站变压器一年不发生故障的情况下，储存的电能可用于连续照明10天以上；该系统还可以为变电站应急操作系统提供充足的电能，在设备出现故障时提高故障抢修效率，具有十分重要的意义。

参考文献

[1] J. Kymissis, C. Kendall, J. Paradiso, and N. Gershenfeld, Parasitic power harvesting in shoes, Second International Symposium on Wearable Computers - Digest of Papers 174, 132 (1998).

[2] G. K. Ottman, H. F. Hofmann, A. C. Bhatt, and G. A.

中国知网 https://www.cnki.net

Lesieutre, Adaptive piezoelectric energy harvesting circuit for wireless remote power supply, IEEE Trans. Power Electron. 17, 669 (2002).

[3] R. A. Islam and S. Priya, Realization of high-energy density polycrystalline piezoelectric ceramics, Appl. Phys. Lett. 88, 032903 (2006).

[4] K. L. Ren, Y. M. Liu, X. C. Geng, H. F. Hofmann, and Q. M. Zhang, Single crystal PMN-PT/epoxy 1-3 composite for energy-harvesting application, IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control 53, 631 (2006).

[5] A. Erturk, O. Bilgen, and D. J. Inman, Power generation and shunt damping performance of a single crystal lead magnesium niobate-lead zirconate titanate unimorph: analysis and experiment, Appl. Phys. Lett. 93, 224102 (2008).

[6] K. A. Cook-Chennault, N. Thambi, and A. M. Sastry, Powering MEMS portable devices—a review of non-regenerative and regenerative power supply systems with special emphasis on piezoelectric energy harvesting systems, Smart Mater. Struct. 17, 043001 (2008).

[7] R. E. Service, Shape-changing crystal get shifter [J]. Science 275, 187 (1997).

[8] 罗豪甦，沈关顺，王评初，乐秀宏，殷之文．新型压电材料—弛豫铁电体单晶的研究[J]．无机材料学报，1997，12:768。

[9] H. S. Luo, G. S. Xu, P. C. Wang, and Z. W. Yin, Growth and characterization of relaxor ferroelectric PMNT single crystals, Ferroelectrics 231, 97 (1999).

[10] H. S. Luo, G. S. Xu, H. Q. Xu, P. C. Wang, and Z. W. Yin, Compositional homogeneity and electrical properties of lead magnesium niobate titanate single crystals grown by a modified Bridgman technique, Jpn. J. Appl. Phys. 39, 5581 (2000).

（收稿日期：2015-05-15）EA

中国知网 https://www.cnki.net