

# 智能电网中能量收集技术及应用综述

李德建<sup>1,2</sup>

(1.北京智芯微电子科技有限公司,北京 102200;2.清华大学 集成电路学院,北京 100084)

**摘要:** 电力传感器需求快速增长,其能源补给需求愈加明显,传统的单蓄电池供电方案的弊端愈加明显。同时,动能、温差、光伏、电磁等能量收集技术及集成电路技术的发展,给电力传感器能源供给问题提供新思路。促进智能电网中能量收集技术及电力传感器耦合能够提高社会效益,形成多方共赢的局面。首先对智能电网对能量收集技术的迫切需求进行分析;其次,分析能量收集技术及相关集成电路的发展现状;最后,根据能量收集技术在智能电网中应用的不足,提出适用于智能电网的能量收集技术研究方向。

**关键词:** 能量收集技术;智能电网;集成电路;电力传感器

**中图分类号:** TN4

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.16157/j.issn.0258-7998.223134

**中文引用格式:** 李德建. 智能电网中能量收集技术及应用综述[J]. 电子技术应用, 2023, 49(2): 1-8.

**英文引用格式:** Li Dejian. Review of energy harvesting technologies and applications in smart grid[J]. Application of Electronic Technique, 2023, 49(2): 1-8.

## Review of energy harvesting technologies and applications in smart grid

Li Dejian<sup>1,2</sup>

(1.Beijing Smartchip Microelectronics Technology Co., Ltd., Beijing 102200, China;

2.School of Integrated Circuits, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The demand for power sensors is growing rapidly, and the demand for energy supply is becoming more and more obvious. The disadvantages of the traditional single-battery power supply scheme are becoming more and more obvious. At the same time, with the development of kinetic energy, temperature difference, photovoltaic, electromagnetic and other energy collection technologies and integrated circuit technologies, new ideas are put forward for the energy supply of power sensors. Promoting energy harvesting technology and power sensor coupling in smart grids can improve social benefits and form a win-win situation for all parties. This paper firstly analyzes the urgent demand of smart grid for energy harvesting technology. Secondly, the development status of energy harvesting technology and related integrated circuits is analyzed. Finally, according to the shortcomings of energy harvesting technology in smart grid, the research direction of energy harvesting technology suitable for smart grid is proposed.

**Key words:** energy harvesting technology; smart grid; integrated circuit; power sensor

### 0 引言

在过去的十多年里,计算、存储和通信等技术领域得到飞速发展,但是电池技术进步的速度要慢得多<sup>[1-2]</sup>。具体而言,无线通信和集成电路领域的丰硕成果,使得传感器节点在尺寸上越来越小。传统电池在体积和能量密度上的劣势越来越明显。此外,电池可用寿命一般为3~5年时间,同时还会发生漏液等安全问题。因此,无源无线网络的能源供给需求迫切。目前,国际上对能量收集技术的研究已经持续多年<sup>[3-4]</sup>,国内也开展了许多能量收集相关技术研究<sup>[5-7]</sup>。

以智能电网为例,为实现信息的快速、广泛、准确采集,需要研究低成本、低冗余、高可靠、可扩展、可定制的新型海量信息采集技术体系架构与高效传输处理核心技术<sup>[8]</sup>。电力传感器作为新型海量信息采集技术体系的“神经末梢”,是感知电网运行状态的基础单元。其长时间稳定运行,需要持续可靠的电源保障。通过能量收集技术,将电力应用场景中的振动、温差、光伏、电磁等能量收集、累积下来提供给电力传感器,是有效解决电力应用中传感器供电问题的重要途径之一。

随着智能电网中电力传感器的广泛应用,对能量收

集技术的需求也愈显迫切,有必要对两者间的耦合进行更加深入的研究。本文首先对智能电网对能量收集技术的迫切需求进行分析;其次,分析能量收集技术及相关集成电路的发展现状;最后,根据能量收集技术在智能电网中应用的不足,提出适用于智能电网的能量收集技术研究方向。

## 1 智能电网对能量收集技术的迫切需求

### 1.1 电力传感器在智能电网中的广泛应用

发电厂、变电站是智能电网的重要节点,其中部署有高压开关柜、母线接头、室外刀闸开关等重要设备。温度在线监测是保证高压设备安全运行的重要手段。以高压开关柜为例,该设备通常要能承受最高达到 10 000 A 的工作电流,在长期运行过程中,开关的触点和母线、电缆连接点等因老化或接触电阻过大而发热,温升超过规定值,会加速动、静触头等接触点氧化,氧化结果又导致接触电阻值增加,促使发热更加严重,形成恶性循环。开关柜内有裸露高压,空间封闭狭小,无法进行人工巡查测温,所以对传感器有刚性需求。

大型电力变压器是智能电网中的枢纽设备。变压器油温关系到变压器绝缘材料的寿命,过高的温度会加速绝缘材料老化。当系统绝缘性无法满足变压器需求时,绕组就会发生故障,甚至造成变压器损坏。根据文献[9]研究,变压器绕组正常工作温度为 60 °C~70 °C 之间。对于按照 GB1094 设计的变压器,98 °C 条件下相对热老化率为 1,温度每增加 6 °C,相对老化率增加一倍。在线监测绕组温升,对变压器寿命预测和故障分析有重要意义。

电线杆塔是输电环节的重要基础设施,广泛部署在野外、乡村和城镇。为提高巡检的准确性和时效性,输电线路的在线监测技术得到广泛应用,且监测的对象和范围越来越广,如电力线的温度、覆冰状态及舞动、电晕、杆塔的倾斜度等。传感器的部署能够及时发现输配电环节的问题并触发人工或自动的调节乃至修复。根据国家电网官网显示,截止到 2020 年底,国家电网配网架空线路已超过 300 万公里,按电力线杆塔间隔 300~500 m 来估算,杆塔数量达 600 万以上,对传感器需求巨大。

电力电缆线路是输配电的另一重要组成部分。随着电网建设发展,电缆接头数量剧增,经常出现引流线夹、耐张线夹过热问题,由此引发的故障和事故也日益严重。当线路处于重负荷条件下,经常需要采用人工对输电线路逐个巡检,使用红外测温仪对引流线夹、耐张线夹进行温度测试,不仅局限性大而且检测效率非常低。

综上,智能电网对实时状态监测有强烈需求,传感器的稳定工作对于电网安全运行有着直接影响。通常监测传感器采用低压直流供电,且要求电源具有较高的

稳定性。实际的应用场景往往不能满足这些要求。例如,部署在高压线路的在线监测传感器,受环境条件、绝缘以及电气隔离等安全因素的限制,很难通过线缆直接获取低压直流电源。多方面研究表明,虽然电网中广泛存在电能资源,但是在面向电力传感器的供电应用方面仍然存在一定的局限性,供电问题已成为制约电力传感器应用发展的瓶颈问题<sup>[10]</sup>。

电池供能是目前最常用的供电解决方案。但是电池有着寿命比较短、受环境影响大、不易固定在高压侧等问题。寿命到期后更换电池需要耗费大量的资源,有些条件下甚至无法更换。要维持监测传感器的长期运行,从环境中获取能量无疑成为最具优势的解决方案。典型的电力传感器应用场景是电力线缆和变压器。目前,国内外的研究焦点主要集中在如何对电力电缆运行状态参数进行故障监测与诊断。然而,针对在线监测系统的供电问题研究却不够充分,并且由于其特殊的工作环境,高压侧监控的供电问题已经成为这一领域发展的瓶颈<sup>[11]</sup>。

### 1.2 电力传感器在智能电网中的广泛应用

智能电网中电力传感器的广泛应用,需要解决目前电力传感器供能存在的问题。电池供能存在的问题也愈加清晰地展现在管理者面前,所以智能电网中能量收集技术及电力传感器技术的耦合也愈加迫切。

能量收集技术的发展为智能电网中电力传感器的能源供给提供技术支撑。能量收集方式有太阳能、风能、热能、动能、电磁能等,其在智能电网中的应用现在还比较少,发展空间巨大,能带来巨大的社会效益。面对以上问题智能电网对能量收集技术的应用需求也愈显迫切。

## 2 能量收集技术及相关集成电路的发展

能量收集技术是一种将环境周围分布式能量进行收集并转换成可使用电能的技术,其中可收集的分布式能量有动能、热能、太阳能和电磁能等多种形式,这些能源的能量生成、环境和特点如表 1 所示。

表 1 不同分布式能源的能量生成、环境和特点

类型	能量收集	能量生成典型值	环境
动能	压电元件等	500 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	机械振动
热能	半导体温差发电片	0.5 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$	热分化
光伏	太阳能电池	10 $\text{mW}/\text{cm}^2$	室外
电磁	电流互感器	50 $\text{mW}/5\text{A}$	交流电流传输

各种能量收集方式所能获取的能量不同,振动发电是利用压电元件等将机械能量转换为电能;热电采用温差发电片作为能量收集媒介,将环境温度差转换为电能;采用太阳能电池板的能量收集方式在单位面积上收集的能量最多,但不同光照条件所能收集到的电能差别很

大;电流互感器利用交流电流传输线上的电磁变化而通过电磁感应的方式产生感应电流,从而产生电能。

以上四种能量收集方式分别利用了力、热、光、电四种基本物理现象进行能量收集,将其他能量转换成直流电是智能电网应用中比较主流的能量收集技术,经过多年发展已具有特定的模式。

### 2.1 动能能量收集技术

动能能量收集的原理是利用运动部件的位移或能量收集装置内部某些结构的机械形变来产生能量。能量来源的动能包括了振动、位移、摩擦等多种形式<sup>[12-15]</sup>,根据动能转换为电能机理的不同,可分为静电式、压电式、电磁式和摩擦式4类<sup>[10]</sup>。

静电式动能收集原理是带电运动部件逆电场运动,从而将动能转换为电能。MIT的Meninger教授等人研究了库仑阻尼谐振发电机和电压阻尼谐振发电机这两种静电式动能收集器的原型机<sup>[16]</sup>。利用外部振动导致的电容器极板位移,从而引起的电容器变化,将机械能转换成电能。文献[17]测试结果显示0.014 g的低重力加速度,75 Hz的低振动速率,可得到1.17  $\mu$ W的能量输出。

压电式动能收集利用了压电效应,压电效应是指在机械应力作用下,材料产生电极化强度发生改变的现象。材料在沿一定方向受外力而变形时,同时在两个相对表面上出现正负相反的电荷,电荷积累形成电势差,从而转化为电能<sup>[18]</sup>。由宾夕法尼亚州立大学研究制作的钹式换能器是一种典型的夹心式压电能量收集装置,压电振动能量收集装置的钢帽都与两端粘结,通过钢帽振动使压电片受到循环力作用。实验结果表明,在外力达到100 N、频率为150 Hz左右的环境下,对其施加70 N的循环力,可以得到的功率为52 mW<sup>[14]</sup>。

电磁式动能收集基于电磁感应原理,将永磁体和闭合线圈两者其一固定,另一方在振动的作用下发生位移变化,在闭合线圈内产生电流。实用中通常利用磁电复合材料替代闭合线圈,依靠铁磁相的磁致伸缩效应与铁电相的压电效应实现磁电耦合。2001年,Ryu等<sup>[19]</sup>用两层Terfenol-D夹持一层PZT,用导电银胶进行粘接得到典型的层状结构磁电复合材料,依据上述原理将振动能量转换为电能<sup>[20]</sup>。

摩擦式动能收集基于摩擦起电与静电感应的耦合效应进行能量收集。摩擦纳米发电机理最早由中国科学院王中林团队于2012年提出<sup>[21-22]</sup>,随后国内其他团队对能量转换效率进行了大幅提升<sup>[23-24]</sup>。目前应用于振动能量收集的主要有接触-分离式和平面滑动式,尚处于技术积累阶段。

### 2.2 温差能量收集技术

温差能量收集利用热电效应中的塞贝克效应将物

体的温度差转换为电压。当金属或者半导体中出现热梯度时,原本自由运动的带电载流子(如电子)在热端运动快,在冷端运动慢,统计上会出现载流子由热端向冷端扩散现象,形成内建电场。当内建电场和载流子的扩散达到平衡的时候,就会在冷热两端出现稳定的电势差。使用两根不同的金属,由于电势差不同,可以在回路中产生电动势,并有电流通过。

在热梯度作用下,P型半导体中的空穴和N型半导体中的电子发生扩散,在P型半导体中形成的内建电场指向上方,而N型半导体中的内建电场指向下方。当半导体形成热学并联、电学串联的结构时,可以实现更高的热电转换效率。

现代温差发电机,使用N型和P型半导体构成回路,如图1所示。

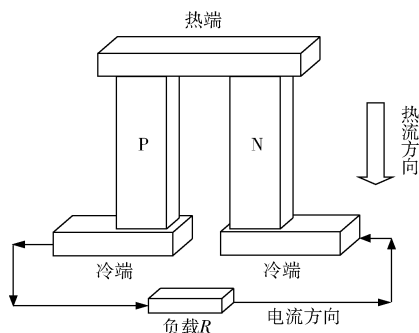


图1 温差发电机结构示意图

### 2.3 光伏能量收集技术

光电池的工作原理是基于贝克勒尔发现的“光生伏特效应”。当光照射到PN结的一个面,例如P型面时,若光子能量大于半导体材料的禁带宽度,那么P型区每吸收一个光子就产生一对自由电子和空穴,电子-空穴对从表面向内迅速扩散,在结电场的作用下,将通过空间电荷的电场作用被相互分离。电子向带正电的N区运动,空穴向带负电的P区运动,最后建立一个与光照强度有关的电动势。

目前电网对光伏的研究主要集中在利用光伏大规模发电<sup>[25-27]</sup>,量产光电池的转换效率可达18%。也可以依赖于传统的太阳能技术作为能量收集并且给传感器供电,但这些设备体积大、价格昂贵、灵活性差。因此,当前光伏能量收集技术在传感器供电方案上的应用受到很大限制。目前麻省理工学院(MIT)正在基于钙钛矿薄膜电池开发一种价格低廉的传感器光伏供能方案。这种方案将钙钛矿夹在电极、阴极和特殊的电子传输层材料之间,无需电池或其他外部电源即可运行数月甚至数年。

### 2.4 电磁能量收集技术

电磁能量收集是将空间中的电磁场能量转换为电能,通常可以分为磁场近场取能、电场近场取能、电磁场



远场取能。

磁场近场取能技术主要依靠闭合的线圈,感应变化的磁场产生感应电流,从而实现磁能到电能的转换。按照部署方式,可分为侵入式和非侵入式。侵入式即常规电流互感器,可实现5 A及以上线路负荷下的磁场取能,技术较为成熟,输出功率可达瓦级,但可操作性差,且后期维护成本较高。非侵入式不破坏原有系统的结构,通过外部耦合作用取能,如图2所示。非侵入式取能装置的安装、可操作性好,维护成本低<sup>[10]</sup>。但是非侵入式取能耦合系数、功率较低,并且重量、体积大,成本较高。

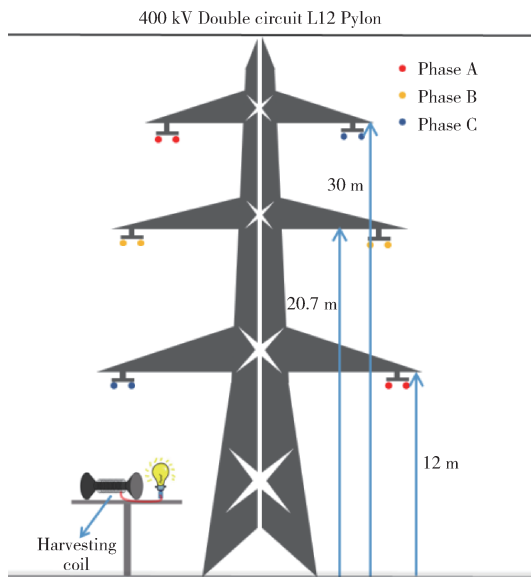


图2 高压线路磁场非侵入取能示意图<sup>[28]</sup>

电场近场取能主要基于高压导线与大地或低压侧之间产生的恒定电场,利用电容分压法进行取能。根据分压电容所处位置不同,可分为直接取能、低压侧电场取能和高压侧电场取能,如图3所示。

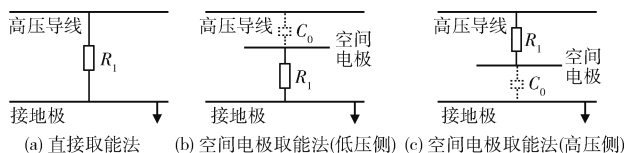


图3 根据电容位置不同电场取能分类<sup>[29]</sup>

直接取能法的问题是 $R_1$ 承受线路相电压。通常不能使用在电压过高的导线上,因为电压等级较高时,分压器需要比较复杂的绝缘结构,会对电网安全运行造成不利影响。低压侧取能法中 $C_0$ 阻抗比 $R_1$ 大很多, $C_0$ 分担绝大部分电压,所以电压分压器 $R_1$ 阻抗较小,可以无需复杂的绝缘结构。但这种方法 $R_1$ 不能过大,取能功率也较小。高压侧取能法和低压侧类似,但是高压侧的 $R_1$ 直接连接在高压导线上,与侵入式磁场取能存在共同点,通常会被磁场取能替代。

电磁场远场取能依靠辐射进行能量传递,传输距离可达十米甚至百米,微波无线传能(Microwave Power Transmission, MPT)<sup>[30]</sup>是实现电磁场远场取能的一种主流技术方案。

## 2.5 能量收集技术中的芯片技术

一套典型的能量收集系统框图如图4所示,主要包括换能器和电源管理电路两大部分。

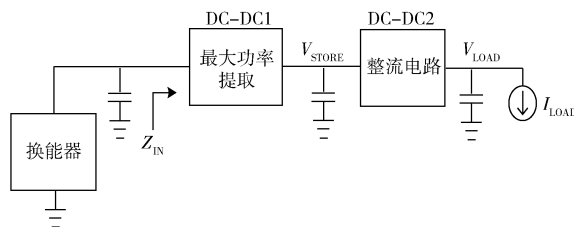


图4 能量收集系统框图

随着能量获取方式的不同,换能器的功能实现差别很大。动能能量收集主要依托了微机电系统(MEMS)芯片来实现从环境能量到电荷积累或电场变化的转换,再利用专用集成电路(ASIC)芯片控制转换时序和实现弱信号处理<sup>[31-32]</sup>。温差能量收集技术需要在多晶硅片上设计出符合要求的N型和P型半导体器件版图。温差能量收集硅片产生电压一般为200 mV以内的直流电压信号,需要使用ASIC芯片进行信号处理,将较小的电压通过电荷泵转换成更高的直流电压,再通过电源管理电路处理成可用能量信号,进行存储和使用。光伏能量收集由于光伏电池的输出电压和输出电流随着光照强度和温度的变化具有强烈的非线性,因此在不同条件下存在着唯一的最大功率点(MPP)。如何动态获取最大功率点成为了研究的热点<sup>[33]</sup>。MPPT(Maximum Power Point Tracking)算法用于寻找功率最大点,例如分数阶极值搜索控制等算法被集成在芯片中。另外,传统的光伏能量收集系统比较笨重,造价较高,因此研究成本低廉、易于集成的光伏能量收集技术也是未来的方向之一。值得注意的是,热能、机械能转换为电能的过程也存在类似的极值点,可使用芯片处理技术提升能量转换效率。电磁能量收集过程需要天线和线圈等电磁能收集结构,收集到的射频信号经过整流电路实现交流到直流的转换,如图5所示,转换后的直流电压通过电源管理电路处理成为后级电路适用的各种电源信号。

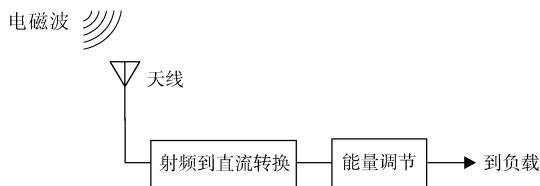


图5 射频能量收集系统框图

电源管理电路一般包括两个DC-DC转换级。这是假设换能器是直流电源(例如热电或光伏采集器)。对于交流源(例如压电采集器),在连接之前还需要加入AC-DC转换级。第一个DC-DC的作用是实现最大功率提取,这个阶段需要将电路调节至最大功率所需的最佳输入阻抗,从而实现换能器转移到电源管理电路的高效能量传输。从换能器中提取的能量大多数都需要存储起来使用,因为从环境提取的能量往往不足以直接支持负载电路的实时运行功耗。电池或超级电容器都是可以选择放置在节点的储能元件。第二个DC-DC的整流电路为后续的功能电路提供稳定持续的电源输出,因此整个能量收集系统的输入和输出参数都是由系统需求决定的,要达到理想的转换效率需要在阻抗匹配和负载适应性上投入研究。

由于环境能量收集所获得的电能相对较小,而分立器件的电路板方式自身工作需要额外消耗较大的功耗,芯片已经成为能量收集技术中的首选方案。

### 3 适用于智能电网的能量收集技术研究方向

#### 3.1 能量收集技术在智能电网中已有应用及现状

##### 3.1.1 变压器温差取能

油浸式变压器运行时,利用油的循环和对流把铁芯和绕组损耗产生的热传递到散热片,再传递到外部的环境中。根据文献[34],利用油浸式变压器箱体产生的热量,当其上附着的热电模块冷热端温差达55 K时,热电能量收集能获得475 mW的最大输出功率。文献[35]中提及一种无源无线传感器已在河南某变电站稳定试运行,该传感器中的热电发生器对温差进行判定,当冷端与热端温差大于5℃时,即可工作并采集变压器套管当前状态,验证了测温装置的实际应用价值,如图6所示。该套测温装置体积小,维护成本低,可大力推广使用,对维护变压器等电力设备的安全运行具有重要意义。当然,5℃的启动温差限制了该设备的应用范围,也为后续研究提出了要求。

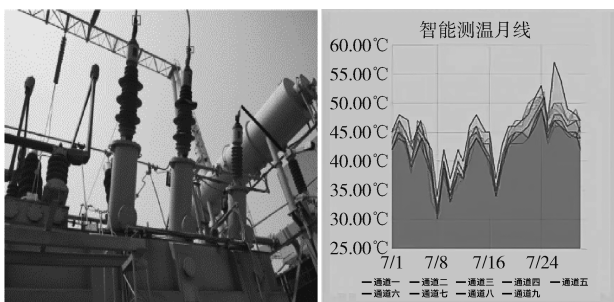


图6 变压器测温结果<sup>[35]</sup>

文献[36]中介绍了一种变电站的自取能无线测温传感器节点,并提供在变压器各部位的测试结果,如表2所示。

表2 变压器各处温度<sup>[36]</sup>

温度节点名称	温度/℃
环境温度	36
1号主变压器阳面(下方)	54.9
1号主变压器阳面(上方)	59
1号主变压器阴面(下方)	44.9
1号主变压器阴面(上方)	58.1
10 kV 电压互感器 刀闸处	36.5
电流互感器	37.8

通过测试发现,变压器外壳和环境温差在10℃左右,但是刀闸处温度基本和环境没有差别。虽然变压器存在使用温差取能的可能性,但是对于刀闸或者开关柜这些设备,温差取能并不适用。针对实际应用场景,文章总结了限制温差取能传感器应用的原因主要是由于换能器效率低,温差为10℃时,只能产生30 mV的电压;分立器件搭建传感器节点功耗过高;升压电路功耗大,转换效率低。

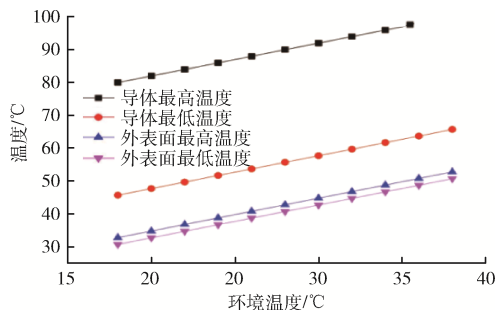
##### 3.1.2 变压器振动取能

由于变压器内部交变磁场会引起硅钢片振动,变压器也伴随着振动,这种变压器振动可以作为动能能量收集传感器的能量源。文献[37]介绍一种利用变压器振动能收集器的能量管理系统,该系统放置于变压器表面,输出功率在2.27 mW~5.8 mW之间。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。

##### 3.1.3 能量收集技术在电力线实时监测中的应用

电力线中的交变电流是最直接的能量来源,可以通过电磁能量收集技术将电力线的电磁能转化为电能,例如通过电流互感器或者非侵入式取能模块获取能量以供电力线实时监测传感器使用。另外,电力线还具备温差取能的条件。根据文献[38]介绍,电力线接头流过电流会持续发热,电缆接头表面温度与环境温度相差10~20℃,如图7所示。根据文献[39]的研究结果表明:环境温度23℃时,悬垂线夹的最高温度为47℃,而导线的温度仅为37℃。耐张线夹温度比环境温度高20℃,具备温差取能的条件。文献[40]计算了三相环氧电缆终端的线芯温度、表面温度以及载流量之间的关系,为电力电缆及其附件的热电能量收集提供了数值依据。

电流互感器属于电磁能量收集技术中的磁场近场取能。电流互感器取能一般采用取能线圈获取,取能线圈通常设计为穿心式,卡装于导线上。但这种形式的取能线圈安装复杂,且包含铁芯,自身重量较大,长期挂网将影响线路机械性能,在母排尺寸较大时,维护操作复杂且需要对母排断电。其次,相间距离将因等电位套装的线圈而减小,从而可能影响相间绝缘安全。此外,电

图7 不同环境温度下电缆接头温度分布图<sup>[38]</sup>

流互感器取电,如果为了追求效率要求在低电流时即开始工作,很容易被大电流冲击而损坏;如果为了可靠性在高电流时才开始工作,会导致效率低,这也是电流互感器取电装置难以大规模推广的另一原因。

非侵入式取能是将取能模块放置于被取能装置外部,通过外部耦合作用进行取能。由于其安装不破坏原有系统的结构,可操作性好,维护成本低。但是这种方式的取能耦合系数和功率都较低。根据文献[26]介绍,在离地2 m处磁场密度为7  $\mu\text{T}$ 时,利用体积为195.65  $\text{cm}^3$ 的蝶形线圈,线圈匝数为40 000匝,可以采集到的功率为360  $\mu\text{W}$ ,可以看出这种方式所取出的能量比较低。

如果通过对电缆中间接头温度进行实时监测,则能够在故障发生之前发出预警,并及时开展故障源清除或者更换新的电缆中间接头,从而避免更大损失的发生。对电力线缆接头温度进行实时检测会遇到传感器如何取电问题。目前电力系统内存在数百万个线缆接头,若采用电池供电,当电量耗尽需要逐个更换,使用维护成本过高。综上,采用能量收集技术为传感器提供电源是最合适的方案。根据文献[34],利用油浸式变压器箱体产生的热量,当其上附着的热电模块冷热端温差达55 K时,热电能量收集能获得475 mW的最大输出功率。

### 3.2 能量收集技术在智能电网应用中存在的问题

能量收集技术在电网中已经取得了一定规模的应用,同时也暴露出一些问题。主要表现在以下几个方面:

(1)电网中的温度传感器的需求场景较多,但是目前对相关技术研究不够深入,取能环节要求所测温度与环境温差较大,无法满足小温差取能的强烈需求。一方面,温差取能需要更低启动温差和更高的转换效率;另一方面,后续处理需要超低功耗的温度传感器、计算电路及射频收发电路。如果可以实现1  $^{\circ}\text{C}$ ~2  $^{\circ}\text{C}$ 温差即可启动工作,将大大拓宽温差取能在智能电网中使用的范围。

(2)对振动取能的应用场景关注不够,实际落地的振动能量收集应用很少。

(3)在电力线相关的应用场景中,主要还是采用传统的侵入式取能,对微型化侵入式取能以及更先进的非侵入式取能技术研究较少。

(4)在光伏取能方面,传统大型光伏板仍是应用中的主要方案,针对传感器的光伏取能研究不足。同时目前传统光伏产品的MPPT算法效率依旧有限,需要在实现最大效率的能量转换上进一步探索。

(5)对于集成能量收集技术、传感器、计算传输的一体化芯片研发起步较晚,可投入应用的成熟产品缺失。

(6)现有的单一形式的环境取能难以覆盖复杂多变的电力应用场景,需结合应用场景环境能量特点,开展多样化的取能方式研究及应用,有针对性地解决特定场景、特定传感器的能量供给问题。

### 3.3 智能电网的能量收集技术研究方向

如前文分析,目前智能电网中许多设备在工作状态下存在稳定的振动,这种稳态振动能够为振动能量收集提供稳定的能量供给。目前,振动能量收集相关研究还处于探索阶段,相关产品既不够成熟又无法满足电力系统应用场景的需求。基于MEMS技术的振动换能器需要解决器件体积较大、成本较高、难于硅基集成等技术障碍,需要在集成电路制造工艺方面投入研发力量。后续,通过对振动能量收集系统设计技术的深入研究,并结合现代MEMS技术发展成果,设计广泛适用于电力系统各型设备的振动能量收集产品前景广阔。

温差能量收集技术在智能电网中有广泛应用场景,但是目前成熟的温差能量收集技术方案还无法全面适应电力系统复杂多变的应用环境,尤其是需要解决不同环境和时间段温差变化范围较大的问题,研究对温差适应范围广的温差能量收集技术方案。此外,现阶段电压转换效率还有待提高,温差换能器需要解决集成电路设计中面临的高能量转换效率和低开启阈值之间的固有矛盾,以满足在温差较小的情况下稳定输出足够电能的需要。

光伏能量收集技术已在电力系统中广泛应用,但是主要是应用传统的太阳能电池或其缩小版本。更多地是为能量需求较大的设备服务而非随处可见的电力传感器。除了成本较高,这种方案的体积仍不能令人满意。而且,光伏能量收集系统中的专用信号调理电路的设计技术仍未在国内形成突破。

此外,先进集成电路封装技术的研究有利于进一步缩小电力传感器的物理尺寸,降低传感器自身的能量损耗。如果能单芯片集成能量收集、转换电路以及传感器和信号处理、传输电路,不仅能大大降低能量收集技术应用门槛,还能有效扩展应用场景。

## 4 结论

智能电网建设给电力传感器的应用提供了广阔的



空间,但是单纯依靠电池作为能量来源的传感器装置无法满足大多数电力应用场景的要求,供电问题已成为制约电力传感器应用发展的瓶颈问题。从环境中获取能量无疑是解决电力传感器的供电问题的有效手段。目前,国内外已针对能量收集技术开展深入研究,并且取得一系列的成果,部分能量收集技术已经在智能电网中得到应用。随着电力传感器微型化及传感器本身对计算、传输能力的要求不断增强,融合集成电路技术的能量收集方案成为解决电力传感器能量来源的必然路径,相关研究领域形成技术突破,必将极大推动能量收集技术在智能电网内的应用并对智能电网的转型升级产生深远影响。

### 参考文献

- [1] 孙宏达,周森,张翊翔,等. 锂离子电池正极材料改性研究进展[J]. 辽宁化工, 2021, 50(5): 654-657.
- [2] 刘兰胜. 磷酸铁锂电池应用现状及发展趋势[J]. 电池工业, 2021, 25(5): 263-265.
- [3] MATEU L, ECHETO F M. Review of energy harvesting techniques and applications for microelectronics[C]// Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2005, 5837: 359-373.
- [4] THAKUR S, PRASAD D, VERMA A. Energy harvesting methods in wireless sensor network: a review[J]. International Journal of Computer Applications, 2017, 165(9): 19-22.
- [5] 荣训,陈志敏,曹广忠. 微弱能量收集电路技术的研究现状与发展趋势[J]. 传感器与微系统, 2015, 34(9): 6-10.
- [6] 陈怡,葛羽嘉,南余荣. 面向能量收集的电源技术综述[J]. 电子技术应用, 2016, 42(10): 33-36, 39.
- [7] 张小涵,赵俊青,张弛. 基于微纳环境能量收集技术的自驱动无线传感系统[J]. 微纳电子与智能制造, 2020, 2(4): 118-128.
- [8] 周孝信,曾嵘,高峰,等. 能源互联网的发展现状与展望[J]. 中国科学:信息科学, 2017, 47(2): 22.
- [9] 时凯强. 油浸式变压器绕组热点温度测量误差研究[D]. 昆明:昆明理工大学. 2019.
- [10] 李春龙,黄辉,梁云,等. 面向电力传感器的环境能量收集技术发展趋势及面临的挑战[J]. 中国电力, 2021, 54(2): 27-35.
- [11] 郭岫,王鹏,张冀川,等. 高压输电系统电磁能量收集与存储技术综述[J]. 储能科学与技术, 2019, 8(1): 32-46.
- [12] 刘成龙,孟爱华,陈文艺,等. 振动能量收集技术的研究现状与发展趋势[J]. 装备制造技术, 2013(12): 43-47.
- [13] 张允,王战江,蒋淑兰,等. 振动能量收集技术的研究现状与展望[J]. 机械科学与技术, 2019(7): 985-1018.
- [14] 费立凯. 压电悬臂梁式振动能量收集技术研究[D]. 北京:华北电力大学, 2013.
- [15] 张广明,徐飞,董智利. 基于无线传感器网络的压电能量收集技术[J]. 传感器与微系统, 2014, 33(4): 44-47.
- [16] MENINGER S, MUR-MIRANDA J, AMIRTHARAJAH R. Vibration-to-electric energy conversion[J]. IEEE Trans. on VLSI, 2001, 9: 64-77.
- [17] TRICHES M, FEI W, CROVETTO A, et al. A MEMS energy harvesting device for vibration with low acceleration[C]// 26th European Conference on Solid-State Transducers, EUROSENSOR 2012, 2012.
- [18] YANG Z, ZHOU S, ZU J, et al. High-performance piezoelectric energy harvesters and their applications[J]. Joule, 2018, 2(4): 642-697.
- [19] JUNGHO R, VAZQUEZ C A, KENJI U, et al. Magneto-electric properties in piezoelectric and magnetostrictive laminate composites: electrical properties of condensed matter[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2001, 40(8): 4948-4951.
- [20] DAI X Z, WEN Y M, LI P, et al. Modeling, characterization and fabrication of vibration energy harvester using Terfenol-D/PZT/Terfenol-D composite transducer[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2009, 156(2): 350-358.
- [21] FAN, F R, TIAN Z Q, LIN W. Flexible triboelectric generator[J]. Nano Energy, 2012, 1(2): 328-334.
- [22] FAN F R, LIN L, ZHU G, et al. Transparent triboelectric nanogenerators and self-powered pressure sensors based on micropatterned plastic films[J]. Nano Letters, 2012, 12(6): 3109-3114.
- [23] ZHANG X S, HAN M D, WANG R X, et al. High-performance triboelectric nanogenerator with enhanced energy density based on single-step fluorocarbon plasma treatment[J]. Nano Energy, 2014, 4: 123-131.
- [24] DIAZ A F, FELIX-NAVARRO R M. A semi-quantitative tribo-electric series for polymeric materials: the influence of chemical structure and properties[J]. Journal of Electrostatics, 2004, 62(4): 277-290.
- [25] 丁明,王伟胜,王秀丽,等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 1-14.
- [26] 刘东冉,陈树勇,马敏,等. 光伏发电系统模型综述[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 47-52.
- [27] 刘伟,彭冬,卜广全,等. 光伏发电接入智能配电网后的系统问题综述[J]. 电网技术, 2009, 33(19): 1-6.
- [28] YUAN S, HUANG Y, ZHOU J, et al. Magnetic field energy harvesting under overhead power lines[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(11): 6191-6202.
- [29] 谢彦斌. 高压架空输电线路在线取能方法研究[D]. 重

庆:重庆大学,2017.

- [30] BROWN W C. The history of power transmission by radio waves[J]. IEEE Transactions on Microwave Theory & Techniques, 1984,32(9): 1230-1242.
- [31] 范世全,陈云翔,谢鹰,等. 应用于压电能量源的高效同步电容开关能量收集芯片设计[J]. 中国电力, 2021, 54(10): 125-133.
- [32] 蔡兴龙. 适用于能量采集系统的开关电容DC-DC变换器设计与研究[D]. 湘潭:湘潭大学, 2018.
- [33] 吴伯彪,郭禧斌. 基于功率预测的自适应变步长MPPT算法研究[J]. 电测与仪表, 2021.
- [34] 杨峰,杜林,王云承,等. 智能传感器热电及磁场能量收集方法[J]. 高电压技术, 2015, 41(12): 3909-3915.
- [35] 朱建华,梁栋,李芳,等. 无源无线测温装置在变压器中的应用[J]. 电气技术, 2020, 21(1): 72-77.
- [36] 刘帅. 应用于变电站的自取能无线测温传感器节点的研究[D]. 上海:上海交通大学, 2016.
- [37] 王凯令,胡海涛,陶亦农,等. 用于电站变压器振动能收集器的能量管理系统设计[J]. 电气应用, 2015(16): 145-148.
- [38] 赵阿琴. 电力电缆接头温度分布规律及其在线监测系统的研究[D]. 重庆:重庆理工大学, 2019.
- [39] 梁少梅,张健能,朱弘祺. 110kV母线悬垂线夹发热原因分析[J]. 电线电缆, 2019(6): 34-36.
- [40] 成永红,谢恒,衣立东. 基于热效应的电力电缆及其终端在线检测技术[J]. 高电压技术, 1999(3):4-6.

(收稿日期:2022-06-30)

#### 作者简介:

李德建(1977-),男,硕士,工程师,  
主要研究方向:大规模集成电路设计。



扫码下载电子文档



## 版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所