

面向电力设备的温度检测节点功耗研究及自供电电源设计

郭宝宁

(江苏海事职业技术学院电气与自动化工程学院, 南京, 211170)

摘要: 对电网中电力设备进行实时的温度检测是避免电网设备故障与安全事故的重要手段, 采用非接触式的无线测温技术是近年来电力系统向智能化发展的重要体现。针对智能电网的发展需求, 设计了一种基于无线射频通信技术的温度检测节点, 该节点由温度传感器 DS18B20、超低功耗单片机 PIC18LF14K50 与无线射频收发芯片 MRF49XA 组成, 可实现休眠等待、数据采样处理与无线通信 3 种工作状态。通过设置不同工作状态下的关键参数, 对温度检测节点的平均功耗进行测试比较, 总结归纳了节点功耗规律。在此基础上, 为温度检测节点设计了一种基于 LTC3588-1 芯片的自供电电源管理单元, 采用成熟可靠的感应电流取能技术满足温度检测节点的自供电需求。研究表明, 当节点处于充满电状态时, 一旦切断能量源, 节点仍能持续稳定工作 47 h, 足以维持温度检测节点的正常工作直至电网恢复正常运行。

关键词: 电力设备; 温度检测; 无线方式; 功耗研究; 感应取能; 自供电

中图分类号: TM62 **文献标志码:** A

Power Consumption and Design of Self-powered Energy Management for Temperature Detecting Node Used in Power Systems

Guo Baoning

(College of Electrical and Automation Engineering, Jiangsu Maritime Institute, Nanjing, 211170, China)

Abstract: The temperature detection in the electrical power system is a principal method to avoid the equipment failure or accidents. In recent years, the use of the wireless temperature monitoring technique is an important manifestation of the smart electrical power system. In view of the development demand of smart grid, this paper designs a temperature detection node which is based on radio frequency communication technology. The node is composed of temperature sensor DS18B20, ultra-low power SCM PIC18LF14K50 and radio frequency transceiver chip MRF49XA, which can realize three working conditions of dormant wait, data sampling and wireless communication. By setting up the key parameters under different working conditions, the average power consumption of the temperature detection nodes is tested and compared, and the power consumption rules of the nodes are summarized. On this basis, a self-powered supply management unit based on LTC3588-1 chip is designed for the temperature detection node, which adopts the mature and reliable inductive current energy take-up technology to meet the self-powered supply requirements of the temperature detection nodes. The research shows that, when the

node is in full electric state, once the energy source is cut off, the node can continue to work steadily for 47 h, which can maintain the normal work of the temperature detection node until the power grid is restored to normal operation.

Key words: power system; temperature detection; wireless mode; power consuming; inductive energy take-up; self-powered supply

引 言

近年来,现代电力系统不断向大机组、大容量与高电压方向发展。电力系统中的电缆接头、开关触点、消弧线圈等关键设备均有可能因过载、紧固松动及散热不良等原因导致发热严重,进而引起设备故障或安全事故,造成国民经济损失。因此,对电力系统中的重要电力设备进行在线温度检测和预警十分重要。目前的在线温度检测方式可分为红外测温、分布式光纤测温与无线测温^[1]。基于非接触方式的红外测温技术应用较为广泛^[2],其主要依靠工作人员手持红外测温仪完成,但其无法准确检测电力设备内部的实际温度,且易出现漏测、误报现象,并且在极端天气下难以及时测报。分布式光纤测温是一种可以实时测量温度场分布的传感系统^[3],它体积小、抗电磁干扰能力强且安全可靠,但系统布线复杂、操作繁琐、运维周期长以及成本较高。

无线测温技术是近年在微电子技术、计算机技术与无线通信技术等基础上发展起来的热点技术。该方法直接将温度传感模块以密贴方式布置于待测温点,采集温度后通过无线通信方式将温度数据发送至监测系统终端^[4]。无线测温方式具有监测设备体积小、安装维护方便、成本低及绝缘性好等优势。但目前绝大多数无线传感器节点仍采用电池供电,对于无线通信频繁的设备,经常因为存储电量耗尽而需要更换电池,导致使用不便,因而限制其大面积推广应用。

为解决无线传感器节点的供电问题,收集环境能量为传感节点供能,实现传感节点的自供电成为重要研究方向^[5]。依据所收集能量的来源,自供电电源主要通过感应电流取能^[6]、压电效应转换^[7]、同步电荷提取^[8]、频率变换匹配^[9]等方式实现。综合比较各种自供电电源的取点方式,感应电流取能方式最为成熟可靠,且成本最低。

本文主要研究了基于无线射频通信技术的温度智能检测节点,并对检测节点的功耗进行了实验测试;设计了一种能实现无线测温节点的自供电电源,该设计借助 LTC3588-1 芯片实现了基于感应电流取能的自供电电源的稳压输出,从而向温度检测节点提供可靠的直流供电。值得指出,所用温度检测装置还可与现代智能高压电能表进行有效集成,用于检测电能表的周围环境参数,修正电能表因温度等参量变化导致的计量误差,进一步提高电能计量的精度。

1 温度检测节点功耗

1.1 温度检测节点的原理设计

本文所提的温度检测节点主要由超低功耗单片机 PIC18LF14K50、温度传感器 DS18B20、无线射频收发芯片 MRF49XA 与电源管理单元 LTC3588 以及取能线圈等组成。图 1 给出所提节点的功能模块结构图。

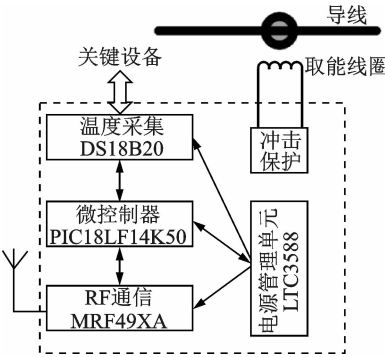


图 1 温度检测节点的功能模块结构图

Fig. 1 Structure chart of function module of temperature detection node

微控制器芯片 PIC18LF14K50 是 Microchip 公司 PIC18 系列中的一款超低功耗单片机,其内部集成有 10 位模数转换接口,可用于接收温度采集单元提供的实时测温数据、监测估算电源管理单元储能电容两端的存储电压;其看门狗定时器的可编程周期范围为 4 ms~131 s,可满足温度检测节点的定时休眠唤醒,从而最大限度降低节点平均功耗。

用于温度采集单元的 DS18B20 测温范围为 -55~+125 ℃,测量精度为 ±0.5 ℃,可满足电力系统中绝大多数电力设备的测温需求。

无线射频收发芯片 MRF49XA 来自 Microchip 公司,可与 PIC 单片机的控制相结合从而实现无线数据的收发功能。该芯片在接收/发送数据模式下的额定电流分别为 11 mA 和 15 mA,休眠模式下的额定电流为 0.3 mA。在实际硬件设计时,可通过软件设置单片机 I/O 口的高、低电平控制 MRF49XA 芯片的工作状态。例如,当温度检测节点处于休眠状态时,可设定无线射频芯片处于断电状态不工作,因此无线射频芯片的消耗电流接近 0 mA。

电源管理单元与感性取能线圈相配合,从而构成温度检测节点的自供电电源系统(后文将给出详细参数设计)。电源管理单元中核心的开关电源选用 Linear Technology 公司的 LTC3588-1 芯片,该芯片内部集成有全桥整流电路、低电压/欠压保护模块等,通过搭建简单外围电路即可在不稳定供电电源情况下实现稳定输出,从而确保节点的正常工作。

表 1 给出上述各子模块的理论工作电压范围。分析可知,为保证温度检测节点正常工作,电源管理单元的输出供电电压 V_{cc} 应稳定在 3.0~3.6 V 之间;换言之,一旦电源管理单元的输出超出该电压范围,温度检测节点将无法正常工作。

1.2 温度检测节点的功耗状态

所提温度检测节点共有 3 种功耗状态:休眠等待阶段的功耗 P_1 ,数据采样/处理阶段的功耗 P_2 ,无线通信阶段的功耗 P_3 。

在休眠等待阶段,由于 PIC 单片机处于超低功耗状态(仅看门狗定时器周期工作)、无线射频芯片断路且无功耗,此时温度传感节点不工作,因此可认为休眠阶段的功耗 $P_1 \approx 0$ 。结合看门狗定时器的可编程周期范围可知,休眠等待时间的范围可设定为 4 ms~131 s。

在数据采样/处理阶段,PIC 单片机首先采样储能电容两端电压 V_{DC} ,当计算得到的 V_{DC} 平均值低于所设定最低值时,温度检测节点将立即进入休眠等待阶段(此时功耗 $P_1 \approx 0$),并寄希望于自供电电源从电网线路上取能一段时间后可为温度检测节点的正常运行存储足够的电能;当计算得到的 V_{DC} 平均值高于所设定的最低值时,PIC 单片机将多次重复采样温度传感器 DS18B20 输出的电力系统中被测设备的温度,并计算出多次重复采样结果的平均值。值得指出,温度采样节点在数据采样/处理阶段的功耗 P_2 主要来源于温度数据的多次重复采样与处理。

在无线通信阶段,PIC 单片机首先初始化无线射频芯片,并将温度采样的平均数据通过无线射频方式传送给中央监控系统,并接受中央监控系统传达过来的命令数据,为下次采样配置相关信息。因此,无线通信阶段包括无线射频芯片的初始化、温度检测数据的发送与配置信息的接收 3 个步骤,其工作周期与能量消耗(即下文的 E_3)在温度检测节点正常工作时保持不变,与采样数据以及接收的配置信息无关。一般地,在温度采样节点的 3 种功耗中,无线通信阶段的功耗 P_3 最大,数据采样/处理阶段的功耗次之。

1.3 温度检测节点的功耗建模

正常情况下,温度检测节点的单个工作周期 T 依次包含休眠等待、数据采样/处理与无线通信 3 个

表 1 节点各模块的工作电压范围

Tab. 1 Operating voltage range for each module of the node

功能模块	最小工作电压/V	最大工作电压/V
微控制器模块	1.8	3.6
温度采集模块	3.0	5.5
无线射频模块	2.2	3.8

阶段,图 2 进一步给出温度检测节点的周期工作状态与对应的功耗分布。图中: t_{wd} 、 t_{dp} 、 t_{RF} 分别为节点休眠等待阶段、数据采样/处理阶段与无线通信阶段的时间; E_2 、 E_3 分别为单次数据采样与单次无线通信时消耗的能量; f_2 、 N_2 分别为数据采样频率与采样点数; \bar{P} 为温度检测节点稳定工作时的平均功耗。

数据采样/处理阶段的时间 t_{dp} 可由 $f_2 \cdot N_2$ 表示

$$t_{\text{dp}} = \frac{N_2}{f_2}$$

(1)

考虑休眠等待阶段的节点功耗近似为 0,则 \bar{P} 可表示为

$$\bar{P} = \frac{\sum E}{\sum t} = \frac{E_2 N_2 + E_3}{\frac{N_2}{f_2} + t_{\text{wd}} + t_{\text{RF}}}$$

(2)

式中 E_2 、 E_3 、 t_{RF} 均由温度检测节点的硬件电路决定(而与采样或传输的数据本身无关),当温度检测节点稳定工作时,它们的数值均不变,其实验测定结果为: $E_2=1.57\text{ }\mu\text{J}$ 、 $E_3=2.37\text{ mJ}$ 、 $t_{\text{RF}}=392\text{ ms}$ 。因此,式(2)中只有 N_2 、 f_2 、 t_{wd} 成为可调的设计变量,也成为决定温度检测节点平均功耗的关键参数。分别固定 N_2 、 f_2 、 t_{wd} 中的两个参数,改变第 3 个参数,即可观察温度检测节点平均功耗与第 3 个参数之间的关系,图 3 给出了建立的功耗曲线。

从图 3 可以看出, t_{wd} 大小对节点的平均功耗影响最大,这与节点无线通信的耗能有关: t_{wd} 越小,意味着无线通信越频繁,且无线通信的单次耗能 E_3 远大于其他操作耗能(如 E_2)。由图 3(a)可知,当休眠等待时间 t_{wd} 大于 10 s 时,温度检测节点的绝大部分工作时间将处于休眠等待阶段,这将使得无线通信与数据采样/处理阶段的耗能功率对平均功率的影响趋于稳定。由图 3(b)可知,平均功耗随采样点数的增加而增加。由式(2)可知,随采样点数的增加,式(2)的分子项增大,但分母项也同时增大,因此采样点数的变化对平均功率的影响不大。由图 3(c)可知,平均功耗随采样频率的增加基本不变,而根据式(2)分析可知平均功耗总体应呈上升趋势。该差异是因为实际功耗测试时仅重复采样了 20 次,如此少的采样点数使得采样频率对数据采样/处理的时间影响明显下降。综上,本文所提的温度检测节点平均功耗受节点休眠等待时间影响最大。

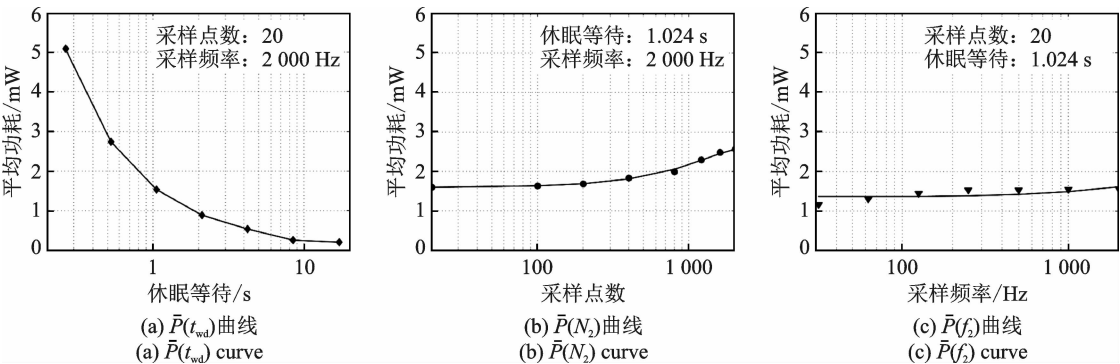


图 3 节点平均功耗随各参数变化的关系曲线

Fig. 3 Relationship curve of average power consumption of node with various parameters

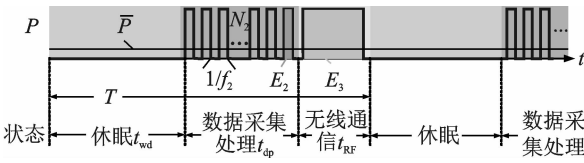


图 2 温度检测节点工作的状态周期与功耗
Fig. 2 State cycle and power consumption of temperature detection node

2 温度检测节点的自供电电源设计

2.1 自供电电源的感应电流取能

感应电流取能方式是利用高压输电线路周围存在的交变磁场实现安全隔离取电,并经整流滤波等电能变换环节向温度检测节点的各功能模块提供稳定可靠的直流电压。该方式合理利用外界资源,节能环保,且取能装置体积小、成本低、安全可靠,成为电力系统中广泛使用的自供电方式。

然而在实际高压输电线路中,线路电流往往存在较大范围的波动,导致感应线圈的输出电压与功率很不稳定。现有基于感应取能方式的商业产品,如武汉兴弘毅公司的 TLPS 系列输电线路取能装置等,其输出功率较大,可满足大多数功率应用场合的供能需求,然而在线路电流发生波动时,现有商业产品不可避免地出现输出电压不稳、发热严重等问题。因此,对感应线圈的不稳定输出电压进行有效管理、从而提供稳定可靠的直流供电电压,成为近些年来众多技术人员的研究方向^[10]。

本文选择感应电流取能方式作为自供电电源的能量来源。感应电流线圈的磁芯材料选用环形硅钢片,其磁导率大,在低频条件下的损耗小,受机械应力影响小,且具有较好的磁电性能。所设计的感应电流线圈匝数为 150 匝,当输电线路电流峰峰值为 30 A 时,空载感应电压峰峰值可达 6.2 V;当输电线路电流峰峰值为 100 A 时,感应电压峰峰值受冲击保护电路作用被钳制在 20 V,从而实现有效的保护。

2.2 自供电电源的稳压设计

温度检测节点需要稳定可靠的直流供电,为此本文设计了可在输电线路电流发生波动的工况下稳定输出电压的电源管理电路。考虑输电线路电流的不稳定性,例如因故障停电或雷击时承受极大瞬间电流等,所设计的电源管理电路须具有可靠的抗冲击保护功能。另外,电源管理电路在收集功率大于消耗功率的情况下,尽可能多地将感应电能进行存储^[11]。

LTC3588-1 是一款专门针对不稳定能量来源设计的电源管理芯片,其内部集成了降压型 DC/DC 稳压器、低电压损失的全桥整流电路与宽迟滞窗口比较的欠电压保护模块等。该芯片有 4 个标准输出电压:1.8、2.5、3.3 和 3.6 V。输出电压值 V_{cc} 可通过芯片 D_0 、 D_1 的引脚电平进行设置控制,如表 2 所示^[12]。

图 4 给出电源管理单元电路的原理图,可以看出选用 LTC3588-1 集成芯片可大大降低设计难度,仅通过少量外围被动元件即可实现电路功能。图 4 的 D_0 、 D_1 引脚直接连接 VIN2 端口以获得高电平信号,因此电源管理单元的输出电压 V_{cc} 被设定为 3.6 V。值得指出,LTC3588-1 芯片的最大输出电流为 100 mA,最大输出功率高达 360 mW,可远远满足本文所提温度检测节点的功率需求。

表 2 标准输出电压选择表		
Tab. 2 Standard output voltage selection table		
D_1	D_0	V_{cc}/V
0	0	1.8
0	1	2.5
1	0	3.3
1	1	3.6

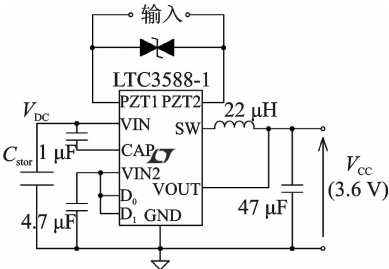


图 4 电源管理单元电路的原理图

Fig. 4 Diagram of power management unit circuit

为了在收集功率大于消耗功率时尽可能多地存储感应电能,芯片 VIN 端接有一个 25 V/1 F 的超级法拉电容作为储能电容 C_{stor} 。电源管理单元电路在初始状态时, C_{stor} 的存储电压 V_{DC} 为 0,因此温度检测节点不工作。一旦感应取能装置开始工作,感应线圈的输出能量将存储于 C_{stor} 中,直至 V_{DC} 上升至欠

电压保护的上升沿触发电压 V_{UV2} (5.05 V),电源管理单元电路将开始工作并向温度检测节点提供稳定可靠的直流供电 3.6 V,温度检测节点也开始正常工作。此后当输电线路断电导致感应取能装置无法工作时,存储在 C_{stor} 上的电能会作为电源管理电源电路的能量来源并维持其正常工作,从而保证向温度检测节点的稳定可靠供电,直至 V_{DC} 下降至欠电压保护的下降沿触发电压 V_{UV1} (4.02 V),根据式(3)可预估温度检测节点的稳定工作时长 t , η 为 LTC3588-1 芯片的转换效率^[12],可由其数据手册中的效率曲线数据获得。

$$\bar{P}t = \frac{1}{2} \eta C_{stor} (V_{UV2}^2 - V_{UV1}^2) \tag{3}$$

2.3 自供电电源的实验测试

为验证上述自供电电源设计,本文采用 220 V 交流电源外接滑动变阻器(0~100 Ω)模拟输电线路电流。设置所提温度检测节点休眠时间为 2.048 s,采样点数为 20,采样频率为 2 000 Hz,经计算得到温度检测节点的平均功耗约为 1 mW。设定温度检测节点采样实际 V_{DC} 一旦低于 4.28 V 时,不再进入无线通信阶段,而直接进入等待休眠阶段,等待休眠阶段结束后再采样实际 V_{DC} 是否有所回升,该操作可确保温度检测节点不会因电源管理单元的供能不足而被迫强制断电。

设定输电线路的电流峰峰值为 30 A,电源管理单元电路的 V_{DC} 及输出电压 V_{cc} 随时间的变化曲线如图 5 所示。

由图 5 可知,温度检测节点从初始零状态到上电启动需要大概 3 min。此后取能线圈与温度检测节点将继续正常工作。测量可得空载感应电压的峰峰值为 6.2 V,因此经过全桥整流滤波的存储电压 V_{DC} 最高值不会超过 6.2 V,在 12 min 之后,存储电压 V_{DC} 将趋于稳定。当温度检测节点稳定工作后,若假设某时刻取能线圈因输电线路断电而不工作时,根据式(3)可估算得到温度检测节点仍可稳定工作 53 min(电源管理芯片的转换效率取 90%),从而充分确保温度检测节点在输电线路遇故障或停电检修阶段正常工作,并有充足时间发出预警。

设定输电线路的电流峰值为 100 A,电源管理单元电路的 V_{DC} 及输出电压 V_{cc} 随时间的变化曲线如图 6 所示。由图 6 可知,温度检测节点从初始零状态到上电启动需要大约 26 s,由于冲击保护装置的作用,感应线圈的输出电压峰峰值被限制在 20 V,故存储电压 V_{DC} 最高值不会超过 20 V。若假设某时刻取能线圈因输电线路断电而不工作时,根据式(3)可估算得到温度检测节点仍可稳定工作 47 h(电源管理芯片的转换效率取 90%),足以保证温度检测节点在遇到电网故障或检修过程中仍能正常工作,直至电网恢复正常运行。

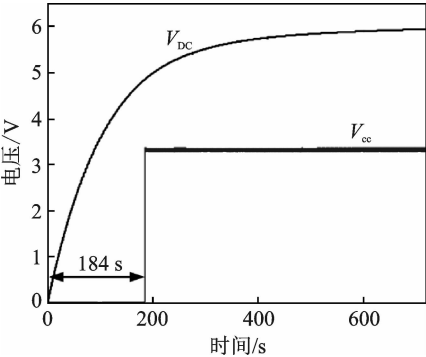


图 5 V_{DC} 与 V_{cc} 随时间的变化曲线(输电线路电流峰峰值为 30 A)
Fig. 5 V_{DC} and V_{cc} change curve over time(Peak current of transmission line is 30 A)

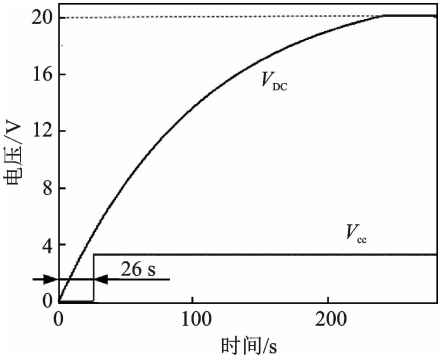


图 6 V_{DC} 与 V_{cc} 随时间的变化曲线(输电线路电流峰峰值为 100 A)
Fig. 6 V_{DC} and V_{cc} change curve over time (Peak current peak of transmission line 100 A)

3 结束语

本文首先开发了一种基于无线射频通信技术的温度智能检测节点,可用于电网中关键电力设备的温度在线监测。针对温度检测节点所用的低功耗芯片,讨论了节点实际工作的电压范围,并通过实验测试了温度检测节点的能耗参数。在此基础上进一步建立了温度检测节点的平均功耗模型,研究并揭示了温度检测节点的基本功耗规律。本文选择感应电流取能技术进行温度检测节点的自供电电源设计,利用 LTC3588-1 电源管理芯片实现自供电电源的稳定输出,并进行了实验验证。自供电电源的实验结果表明,当感应电流峰值为 100 A 时,电源管理单元可在一定时间内储满电能,并确保自供电无线测温节点在无任何外界能源供给的情况下稳定工作 47 h,从而保证温度检测的可靠进行。

参考文献:

- [1] 杨关键. 变电站一次设备触点温度监测系统设计与实现[D]. 成都:西南交通大学, 2011.
Yang Guanjian. The design and realize of substation primary electric equipment node temperature monitoring system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [2] 王方, 邱道尹, 岳艳杰, 等. 基于红外技术的变电站温差无线温度监控[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(8): 135-138.
Wang Fang, Qiu Daoyin, Yue Yanjie, et al. Wireless thermoelectric temperature monitoring of substation based on infrared technology[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(8): 135-138.
- [3] 于海鹰. 分布式光纤测温技术综述[J]. 光学仪器, 2013, 35(5): 90-94.
Yu Haiying. Performance analysis of distributed fiber sensing technology[J]. Optical Instruments, 2013, 35(5): 90-94.
- [4] 郑爽. 基于无线传感器网络的变压器运行状态监测系统[D]. 天津:河北工业大学, 2012.
Zheng Shuang. Monitoring system of transformer running status based on wireless sensor network[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2012.
- [5] 叶衍琳. GIS 局放在线报警系统自供电电源的研究[J]. 电源技术, 2016, 40(4): 869-872.
Ye Yanlin. Research on self-power supply for GIS partial discharge online alarm system[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2016, 40(4): 869-872.
- [6] 宋娇. 配电网智能设备取能电源设计[D]. 济南:济南大学, 2014.
Song Jiao. The design of energy-get power supply for intelligent equipment in distribution network[D]. Jinan: University of Jinan, 2014.
- [7] 陈志敏. 基于压电能量收集技术的自供电电源设计[J]. 电子设计工程, 2016, 24(10): 105-107.
Chen Zhimin. Design of a self-powered power based on piezoelectric energy harvesting technology[J]. Electronic Design Engineering, 2016, 24(10): 105-107.
- [8] 李衍川. 新型高压侧自供电电源设计与研究[J]. 电工电能新技术, 2014, 33(8): 77-80.
Li Yanchuan. New energy management circuit applied in electric self-power supply over high voltage side[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2014, 33(8): 77-80.
- [9] 文玉梅. 一种采用频率变换的自供电电源管理电路[J]. 电子学报, 2012, 40(11): 2325-2329.
Wen Yumei. A self-powered power supply management circuit using frequency conversion network[J]. Acta Electronica Sinica, 2012, 40(11): 2325-2329.
- [10] 秦欢. 高压测量系统感应取能电源设计[J]. 现代电力, 2009, 26(5): 32-36.
Qin Huan. Design of induced power apparatus for high voltage measuring system[J]. Modern Electric Power, 2009, 26(5): 32-36.
- [11] 何宏, 高艳园, 张志宏. 基于压电自供电的无线传感网络网关节点设计[J]. 中国测试, 2016, 42(9): 67-71.
He Hong, Gao Yannan, Zhang Zhihong. Design of wireless sensor network gateway node based on piezoelectric self-powered [J]. China Measurement & Test, 2016, 42(9): 67-71.
- [12] Analog Devices, Inc. LTC3588-1 piezoelectric energy harvesting power supply[M]. USA: Analog Devices, 2010.

作者简介:



郭宝宁(1964-), 女, 副教授, 研究方向: 电气自动化技术, E-mail: 962440937@qq.com.