

基于互感取能的导线监测传感器电源设计

黄新波, 石杰, 陈小雄, 张斌, 朱海涛

(西安工程大学电子信息学院, 西安 710048)

摘要: 笔者设计了基于互感取能的导线监测传感器电源, 该电源利用互感原理, 通过取能线圈将高压侧导线上的电能感应到二次低压侧, 然后经过整流滤波处理、稳压处理和DC-DC处理后, 供在线监测装置使用。基于以上原理做出了具体设计, 并且为了应对导线上电流瞬变、电流过大和电流不足等问题, 分别采取了加入瞬时过电压保护、过压过流保护和锂电池的措施, 其中过压过流保护分为两级, 一级针对导线电流正常波动时的保护, 另一级针对输电导线异常过流或短路故障时的保护。并搭建实验平台进行测试, 最后, 用笔者所研制的一种基于该电源的监测装置对其进行了验证。

关键词: 输电导线; 电源; 互感取能; 取能线圈; 保护

中图分类号: TM835

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2014)09-0016-07

Design of Mutual Inductance-based Power Supply for Conductor Monitoring Sensor

HUANG Xinbo, SHI Jie, CHEN Xiaoxiong, ZHANG Bin, ZHU Haitao

(College of Electronics and Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: A power supply based on mutual inductance for conductor monitoring sensor was designed by making use of the principle of mutual inductance, in which the electric power in the conductor at high-voltage side is inducted to secondary low-voltage side through induction coil, and is then rectified, filtered, voltage-stabilized, and DC-DC processed for online monitoring device. To deal with the problems of transient current, insufficient current, and excessive current in conductor, the transient over-voltage protection, the over-voltage/over-current protection, and the protection for lithium-ion batteries were adopted, respectively. The over-voltage/over-current protection is divided into two levels, one is for the protection in the case of normal fluctuation of current wave, the other is for the protection in the case of abnormal over-current or short-circuit fault of transmission conductor. An experimental platform was constructed for testing the designed power supply. The conductor monitoring device equipped with the designed power supply was validated.

Key words: transmission conductor; power supply; mutual inductance-based power supply; induction coil; protection

0 引言

随着国民经济的高速发展, 高压、特高压输电线路的分布越来越广, 庞大的输电网络给线路运行人员的工作带来诸多不便, 所以对线路工况进行观察巡视是必不可少的。传统方法采用定期人工巡检手段, 此方法费时费力, 而且有检修周期, 在周期

内的线路情况是无法获知的, 这就埋下了巨大的安全隐患。近年来输电线路在线监测技术发展迅速, 安装在输电线路上的在线监测装置越来越多, 有效提高了输电线路安全运行水平, 但这些在线监测装置的工作电压一般是 5、3.3 V 等小电压等级, 这些小电压无疑与输电线路的高压存在矛盾, 所以如何有效解决电源问题成为在线监测装置的一大难题。输电线路在线监测装置一部分安装于塔上, 一部分

收稿日期: 2014-04-28; 修回日期: 2014-05-16

基金项目: 国家自然科学基金(51177115); 陕西省科学技术研究发展计划项目(2014XT-07)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51177115); Science & Technology Research and Development Program of Shaanxi Province(2014XT-07).

安装于输电导线上, 对于杆塔上在线监测装置, 一般利用太阳能或风能进行供电; 对于输电导线上在线监测装置(如导线测温、导线微风振动、导线舞动等监测装置), 目前来说最佳方案为从导线上直接取能进行供电, 而如何实现较宽电流范围取能及线路电流不正常时如何供电等为目的导线上在线监测装置供电技术中亟待解决的问题^[1-4]。

针对以上问题, 笔者设计了基于互感取能的导线监测传感器电源, 通过取能线圈感应输电导线上的能量供监测装置使用, 其与文[5-6]中所述电源相比所具有的优势在于: 首先, 对电源变换电路电压进行监控, 实时调节电路中的能量, 防止大能量对电源变换电路造成损害; 其次, 加装锂电池, 大大增加了供电的可靠性。

经过实验测试和现场运行表明, 该电源完全可以满足监测装置的正常供电。采用该电源进行供电的在线监测系统结构图见图 1。

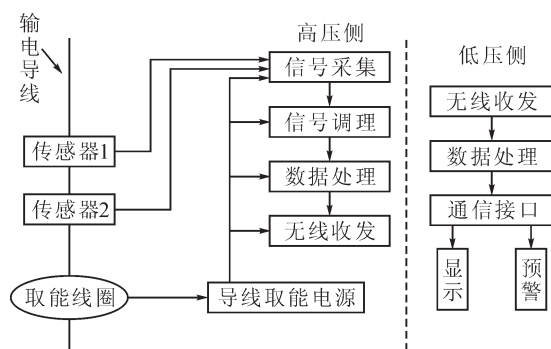


图 1 采用导线取能电源供电的在线监测系统

Fig. 1 On-line monitoring system using wire working power supply

1 设计原理

文中的设计理念是通过取能线圈感应得到输电导线上的电能, 经后续电路处理后得到监测装置所需电压, 所以取能线圈的选取为设计的首要任务^[7-11]。取能线圈实际上是一种电流互感器, 这种电流互感器的工作原理可等效为变压器负载模型, 取能线圈原理图见图 2。

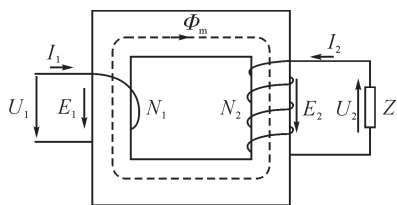


图 2 取能线圈原理图

Fig. 2 Induction coil schematic diagram

根据电机学理论^[12], 其磁势平衡方程式为

$$I_1 N_1 + I_2 N_2 = I_m N_1. \quad (1)$$

式(1)中: I_1 、 I_2 分别为一、二次侧电流; N_1 、 N_2 分别为一、二次侧绕组匝数; I_m 为励磁电流。由于是一根导线穿过取能线圈, 所以相当于一次侧只有一匝绕组。

实际上 I_m 只是 I_1 中的一个很小的分量, 所以在实际分析中可将其忽略, 这样在数值上则近似有

$$I_1 N_1 = I_2 N_2. \quad (2)$$

此关系说明, 当一次侧电流过大时二次侧电流会随之增大, 当一次侧电流过小时二次侧电流也会随之减小, 前者会给电路部分造成危害, 后者则带来供能不足。

根据电机学理论, 二次侧电势和磁通的表达式为:

$$E_2 = -j4.44fN_2\Phi_m; \quad (3)$$

$$\Phi_m = B_m S = \mu H_m S. \quad (4)$$

式(3)、(4)中: f 为电网频率; E_2 为二次侧感应电势; Φ_m 为主磁通; B_m 为磁感应强度; S 为铁心的横截面积; μ 为磁导率; H_m 为磁场强度。

由式(3)、(4)知, 二次侧感应电势与主磁通、绕组匝数有关, 而主磁通又与磁导率、磁场强度及铁心横截面积有关, 其中磁导率由铁心材料所决定。笔者所用取能线圈铁心为硅钢材料, 硅钢的特点是具有常用软磁材料中最高的饱和磁感应强度, 使文中所选铁心饱和的一次侧电流为 1 000 A 以上, 选取的硅钢是薄片状的, 这样可以减小取能线圈铁心的涡流损耗。文中所选用取能线圈结构图和实物图见图 3。

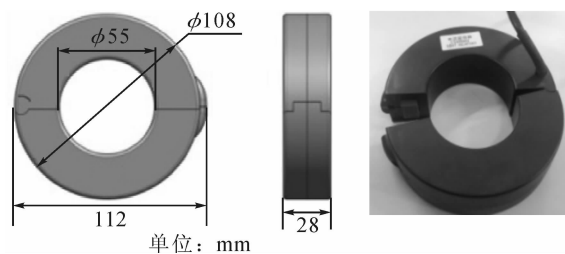


图 3 取能线圈结构图和实物图

Fig. 3 Induction coil structure and substance diagram

文中的原理为: 通过取能线圈感应输电导线上的电能, 电路前端接瞬时过电压抑制模块形成瞬时过电压保护, 经过整流桥将感应到的交流电变为直流电, 再经过滤波处理后得到比较平滑的直流电, 之后送入稳压模块进行稳压处理, 空载状态时, 通过过充保护模块对锂电池进行充电; 负载状态时, 一路可通过过充保护模块对锂电池进行充电, 另一路经 DC-DC 处理后, 得到负载所需要电压, 对负载进行供电, 当输电导线上电流不足时, 可由锂电池

通过过放保护模块对负载进行供电。此外,特别在整流输出端设置了过压过流保护模块,防止大电压大电流入侵而对整个电路造成损害。文中所设计电源硬件结构框图见图4。

2 电源变换电路设计

电源变换电路主要由整流、滤波、稳压、DC-DC模块和锂电池组成,电源变换电路原理图见图5,其中,TVS为前端瞬时过电压保护管,Bridge为整流桥,LM2576ADJ为输出可调的降压型开关稳压器^[13-15]。

1)整流滤波模块。通过取能线圈感应得到的是交流电,而最后需要得到的是直流电,所以感应取电后第1步就是整流,取能线圈后接至整流桥将交

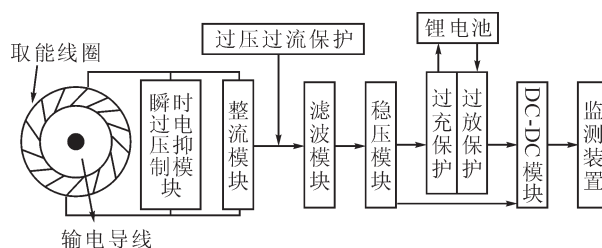


图4 硬件结构框图

Fig. 4 Hardware structure block diagram

流电变为直流电,整流桥的构成可选大电流低功耗的集成整流桥或采用4个二极管实现,文中选用集成整流桥,其型号为KBP307。整流后需滤波,笔者采用的是电容滤波,经滤波后,可以很大程度上减少杂波,可得到比较纯净的直流电^[16]。

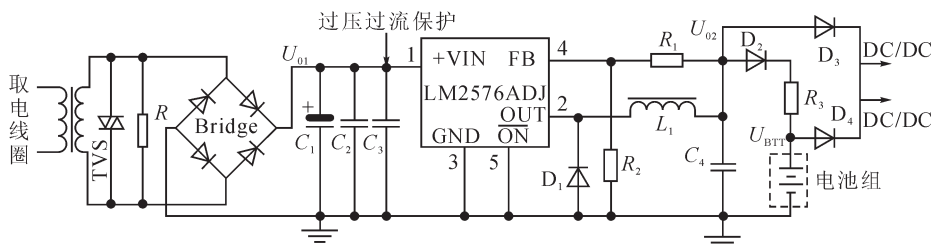


图5 电源变换电路原理图

Fig. 5 The power conversion circuit schematic diagram

2)稳压模块。输电导线上的电流不是恒定的,其一般从几十安到几百安不等,文中电能由取能线圈到滤波模块后会在几V到十几V之间不定,通过稳压模块后可使输出稳定,文中所选稳压芯片型号为LM2576ADJ,理论上可输出1.23~37V电压。其输出电压由 R_1 、 R_2 及典型的外围电路所控制,主要由 R_1 、 R_2 调节,如式(5)所示,其中 U_{OUT} 为稳压芯片输出电压,此电压为电池组提供稳定的浮充电压,同时为后级DC-DC模块提供电能^[17-18]。

$$U_{OUT}=1.23 \times (1+R_2/R_1) \quad (5)$$

笔者设计了两种输出电压:一是 R_2 为6k Ω , R_1 为1k Ω ,据式(5)得输出电压 U_{OUT} 为8.5V;二是 R_2 为3k Ω , R_1 为1.2k Ω ,据式(5)得输出电压 U_{OUT} 为4.3V。如此设计是为了配合后面的DC-DC方式。

3)锂电池及其过充过放保护。通过加装锂电池的方法,可保证当输电导线上电流不足或负载电流过大时,依然可对监测装置正常供电,确保监测装置正常工作。锂电池根据监测装置功率大小适当选取,如果监测装置中包括像GSM等大功率器件时,锂电池应选择较大容量的,才能保证能够提供足够的功率,笔者的做法是将多节锂电池串并连在一起;而当负载对功率要求不高时,可采用单节锂电池,这样可节约成本。文中选用的锂电池型号为18650三洋锂离子电池,其标准电压为3.6~3.7V,

充电截止电压为4.2V,放电截止电压为2.75V,电池容量为2627mA·h,过充保护电压为4.2V,放电保护电压为2.75V。图5中的 D_2 、 R_3 实现电池组充电、限流和反向保护,实际中可专门为锂电池组设计保护电路,并将其与电池集成到一块。在线路电流正常的条件下,输出 U_{02} 直接通过 D_3 向后级DC/DC稳压模块供电,同时将多余的能量为电池组充电,适当选取 R_3 大小,可将电池充电电流限定在500mA以下。当线路电流较小或负载电流较大时,电池通过 D_4 向后级DC/DC稳压块提供补充,并且可在 U_{01} 输出被短路保护而 U_{02} 无输出的条件下,提供独立供电。

笔者也对锂电池进行了专门过充过放保护电路设计,可有效延长锂电池的使用寿命,过充过放保护电路框图见图6。其原理为:充电时,当锂电池的电压高过4.2V,充电保护电路就停止对锂电池充电以防止其充爆;放电时,当锂电池电压低至2.75V,放电保护电路则停止锂电池放电,以防止其过度损耗^[19-21]。

4)DC-DC模块。文中的DC-DC模块分为升压和降压两种方式,如何选取升压或是降压方式是根据监测装置情况而定的,当其对功率要求不高时,应选取升压方式对其进行供电,以得到较大电压,此时锂电池选取为单节;当其对功率要求较高时(如

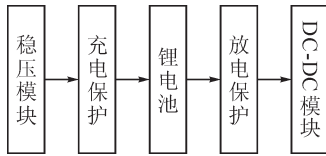


图6 过充过放保护电路框图

Fig. 6 Over-charge and over-discharge protection schematic circuit diagram

含有 GSM 等大功率器件), 应选取降压方式对其进行供电, 以得到较小电压, 此时锂电池选取为双节(或更多)串并接在一起^[22]。

在进行设计时, 针对监测装置功率大小不同, 可采取单节锂电池+升压和双节(或更多)锂电池+降压两种供电方式, 基于对这两种方式实际应用的情况, 发现其各有优劣: 对于前一种方式, 其可减少电池数量, 以达到节约成本的目的, 但升压方式本身稳定性不足, 易受扰动, 遇到大功率器件时, 会造成功率供给不足; 后一种方式则相反, 其使用较多的电池, 从而实现稳定供电。目前来说后者的实用性较前者好。

3 保护电路设计

输电线路除了正常工作之外, 还会存在以下 3 种异常情况: 一是输电线路遭受雷击时会有瞬时大电流, 取能线圈二次侧会感应到相应的瞬时大电流, 此时需要保护电路不受冲击而损坏; 二是输电线路遭遇短路运行或其他情况造成输电导线上电流过大时, 取能线圈二次侧会感应到相应大电流, 此时需要保证整个电路不过压过流而损坏; 三是输电导线上电流过小时, 会造成取能线圈取能不足, 此时需要保证监测装置的正常供电。针对第 3 种情况, 上文通过加装锂电池已解决, 而前两种情况无疑会对整个电路造成危害, 所以文中针对这两种情况分别进行了保护设计: 针对第 1 种情况, 设计了瞬时过电压保护; 针对第 2 种情况, 设计了过压过流保护^[23-24]。

3.1 瞬时过电压保护

为了防止输电线路遭受雷击时输电导线上产生的瞬时大电流通过取能线圈后入侵二次侧的后续电路, 笔者在整个电路前端采用双向 TVS 管形成瞬时过电压保护, 当取能线圈输出出现正向或是反向大脉冲时, TVS 管会瞬时导通, 将其引入地下, 从而将整个后续电路隔离开来, 有效保护后续电路。文中采用的 TVS 管保护电压的峰值选在 ± 30 V, 其反应速度快, 可抑制瞬态干扰, 但功率较小, 为了提高保护的功率, 可并接压敏电阻实现。

3.2 过压过流保护

文中过压过流保护分为两级, 第 1 级针对输电导线电流正常波动时的过流保护, 第 2 级针对输电导线异常过流或短路故障时的保护, 过压过流保护电路原理图见图 7。

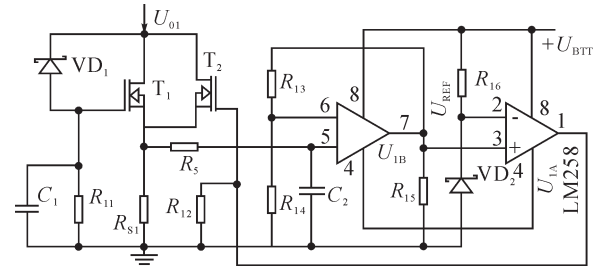


图7 过压过流保护电路原理图

Fig. 7 Over-voltage and over-current protection schematic circuit diagram

1) 第 1 级保护。第 1 级保护电路由 R_{11} 、 VD_1 及 T_1 等器件构成, 当导线电流处于正常电流以下或负载较大时, 整流出来的电压 U_{01} 小于限压保护门限电压值, T_1 、 T_2 及 VD_1 都不导通, 保护电路处于开路状态; 当 U_{01} 超过限压保护门限电压值 U_{th} 时, 稳压管 VD_1 就会导通, 经过电阻 R_{11} 后, 其就会在 MOSFET 管 T_1 的栅极处形成电压, 从而开启 T_1 , T_1 开启后导通, 此时大电压经过 R_{11} 与 T_1 共同泄放, T_1 的导通程度与沟道的宽度有关系, 随着栅极电压的不断增大后, 沟道越来越宽, 电流就会越来越多经 T_1 泄放, 伴随其一起的是经 R_{11} 的电流越来越小, T_1 的栅极电压就会越来越小, 从而又使得 T_1 沟道越来越窄, 这样又造成经 T_1 的电流减小, 从而经 R_{11} 的电流又增大, 这样循环下去, 可以将电压稳定在限压保护门限电压值附近。

其中限压保护门限电压值 U_{th} 的大小由式(6)确定

$$U_{th} = U_Z + U_{(T_1)on} \quad (6)$$

式(6)中: U_Z 为稳压管 VD_1 的稳定电压值; $U_{(T_1)on}$ 为场效应管 T_1 的开启电压值, 笔者在考虑了后级模块安全和可靠工作的条件下, 设计的 U_{th} 为 10 V。

2) 第 2 级保护。当输电导线上电流异常大时, 流过 T_1 管的电流将增大使其功耗上升, T_1 温度急剧升高, 但是受电路板尺寸和体积的限制, 增大散热片难以实现, 为防止 MOSFET 管 T_1 烧坏, 又加了一级保护, 即第 2 级保护, 第 2 级保护电路主要由 T_2 、 R_{S1} 、LM258 器件构成。其实现方式是: 检测功率电阻 R_{S1} 上的电压, 将其与设定比较值 U_{REF} 进行比较, 当流经 R_{S1} 上的电流达到限流保护门限电流值 I_{ZD} 时, R_{S1} 上的电压超过 U_{REF} , 比较器就输出一高电平, 这

个高电平将 MOSFET 管 T_2 打开后将饱和导通,此时相当于将 T_1 短路,从而电流就经过 T_2 泄放,从而实现对 T_1 的保护。当线路电流恢复正常,通过 R_{S1} 的电流 I_{ZD} 减小, T_2 管截止,退出第 2 级保护。功率电阻 R_{S1} 的选择由式(7)决定

$$R_{S1} = U_{REF} / [I_{ZD}(1 + R_{13}/R_{14})] \quad (7)$$

式(7)中: U_{REF} 为设定的比较值,其为稳压管 VD_2 稳压值,大小为 3.3 V; I_{ZD} 为限流保护门限电流值,该设计中 I_{ZD} 为 200 mA; R_{13} 选为 75 k Ω ; R_{14} 选为 1 k Ω ; R_{S1} 选为 0.2 $\Omega/2$ W。

4 实验分析与应用实例

4.1 实验分析

实验选择的是采用降压 DC-DC 方式所制取能板,此时稳压模块应输出 8.5 V。所用的实验设备为升流器和高精度数字式万用表,其中升流器作用是得到所需的大电流,其输出电流可在 0~2 kA 之间调节,所搭建的实验平台连接见图 8。

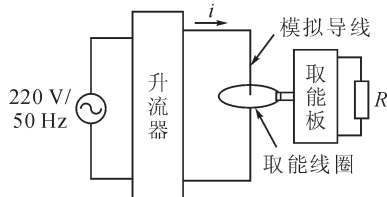


图 8 实验平台连接图

Fig. 8 Experimental platform connection diagram

采用 1 个 10 Ω 电阻作为负载连接在取能板输出端,升流器输入端接至交流 220 V/50 Hz,输出端接一模拟输电导线,使取能线圈穿过模拟输电导线^[25-27]。测试现场见图 9。



图 9 测试现场

Fig. 9 Test site

调节升流器使导线电流由小到大变换,负载上电压电流逐步增大,实验数据见表 1,当导线电流大于 100 A 时,稳压输出电压基本达到 8.5 V,继续增大导线电流,电压稳定基本不变,说明输电导线电流在 100 A 以上后,稳压模块可稳定提供 8.5 V 电压。但继续增大导线电流,整流输出电压 U_{O1} 升高,

当导线电流增大到 350 A 后,整流输出电压基本保持不变,稳定在 9.7 V 附近,这与设定的 10 V 限压保护门限电压值 U_{th} 基本吻合,当导线电流大于 500 A 时, T_2 的栅极电压(也就是 LM258 的 1 管脚电压)变为 8.5 V,说明第 2 级保护电路工作。

表 1 实验数据

Tab. 1 Experimental data

导线电流/A	输出电流/mA	整流输出电压/V	稳压输出电压/V
40	22.64	5.98	6.02
60	28.93	7.17	7.49
80	42.34	8.42	8.41
100	62.41	8.80	8.46
150	84.95	9.14	8.48
250	85.47	9.42	8.49
300	86.83	9.62	8.50
350	87.16	9.69	8.50
400	87.87	9.73	8.50
450	88.34	9.75	8.50
500	89.08	9.75	8.50
600	89.89	9.77	8.50

根据用户提供的数据,500 kV 输电线路采用四分裂导线,每条导线上正常运行电流为 100~200 A 之间,而一般单根导线上电流也不会超过 300 A,这样的电流范围,完全可以满足电源对于输入的要求。

4.2 应用实例

笔者所研制的输电线路雷击故障点远程定位装置正是利用该电源进行供电的,该装置的取能线圈、取能板和监测装置板集成于球体内,球体挂装在输电线路,现场安装见图 10。

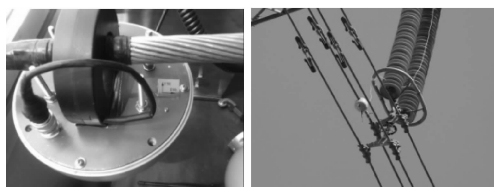


图 10 现场安装

Fig. 10 Field installation

监测装置已在内蒙古超高压供电局所辖线路成功运行,电源供电正常,监测装置工作正常。

5 结语

笔者结合输电导线电流的变化情况和负载对功率的要求设计出基于互感取能的导线监测传感器电源,其能够提供足够的能量,保证输出监测装置正常工作所需电压,并且设计了多种保护电路,确保电源能够安全、稳定和可靠工作,此外,还针对负载情况,设计了可灵活选取的供电方式。并且经

过实验验证和现场挂网运行, 该电源性能稳定可靠, 符合设计要求, 具有很强的实用性, 应用前景广泛。

参考文献:

- [1] 黄新波, 程荣贵. 输电线路在线监测与故障诊断[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
HUANG Xinbo, CHENG Ronggui. Substation-line monitoring and fault diagnosis[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008.
- [2] 赵汉表, 林辉, 谢利理, 等. 基于高压侧测量的输电线路绝缘子泄漏电流在线监测系统[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(22): 78-82.
ZHAO Hanbiao, LIN Hui, XIE Lili, et al. On-line monitoring system on measuring leakage current near HV side for electrical transmission line insulators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(22): 78-82.
- [3] 杜林, 李欣, 雷静, 等. 电力电缆分布式测温系统取能电源研究[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(2): 383-390.
DU Lin, LI Xin, LEI Jing, et al. Research on draw-out power supply for power cable distribution temperature monitoring system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(2): 383-390.
- [4] 李先志. 输电线路状态参数在线监测的取能电源及系统设计研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
LI Xianzhi. Research on a draw-out power supply for on-line monitoring of transmission-line state parameters and system design[D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.
- [5] 焦斌亮, 付伟, 赵德功. 高压输电线路CT取能电源的设计[J]. 电源技术, 2013, 37(1): 130-133.
JIAO Binliang, FU Wei, ZHAO Degong. Design for CT energy-getting power of high voltage transmission line[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2013, 37(1): 130-133.
- [6] 任晓东, 陈树勇, 姜涛. 电子式电流互感器高压侧取能装置的设计[J]. 电网技术, 2008, 32(18): 67-71.
REN Xiaodong, CHEN Shuyong, JIANG Tao. Design of a high side energy extracting device for active electronic current transformer[J]. Power System Technology, 2008, 32(18): 67-71.
- [7] 王红斌, 高雅, 耿大庆. 基于数据挖掘的预警技术在一体化输电设备监测中的应用研究[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(1): 55-58.
WANG Hongbin, GAO Ya, GENG Daqing. Application of early warning technology in power transmission equipment condition monitoring based on data mining[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(1): 55-58.
- [8] 叶鹏, 朱峰, 李建明, 等. 架空输电线路过电压在线监测系统[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(6): 33-38.
YE Peng, ZHU Feng, LI Jianming, et al. On-line monitoring system for the overvoltage of overhead transmission lines[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(6): 33-38.
- [9] 李先志, 杜林, 陈伟根, 等. 输电线路状态监测系统取能电源的设计新原理[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(1): 76-80.
LI Xianzhi, DU Lin, CHEN Weigen, et al. A novel scheme of draw-out power supply utilized in transmission line state monitoring[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(1): 76-80.
- [10] YANG Shujie, ZHANG Xianye. Design of power source for measuring at high-voltage side[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(12): 113-115.
- [11] BEN-KISH A, TUR M, SHAFIR E. Geometrical separation between the birefringence components in faraday-rotation fiber-optic current sensors[J]. Optics Letters, 1991, 16(9): 687-689.
- [12] 阎治安, 崔新艺, 苏少平. 电机学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2006.
YAN Zhi'an, CUI Xinyi, SU Shaoping. Electromechanics [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2006.
- [13] 肖波, 徐敏捷, 席朝辉, 等. 高压侧感应取能电源的研究[J]. 高压电器, 2013, 49(1): 1-5.
XIAO Bo, XU Minjie, XI Chaohui, et al. Research of induction power supply at high voltage side[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(1): 1-5.
- [14] 龚贤夫, 周浩, 戴攀, 等. 一种输电线路大功率取能电源的设计[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(3): 124-128.
GONG Xianfu, ZHOU Hao, DAI Pan, et al. A design of high-power supply installed on transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(3): 124-128.
- [15] 朱成喜, 刘亚东, 盛戈峰, 等. 导线监测装置取电研究[J]. 电力电子技术, 2011, 45(2): 78-80.
ZHU Chengxi, LIU Yadong, SHENG Gehao, et al. Study on power supply system in high-voltage transmission lines[J]. Power Electronics, 2011, 45(2): 78-80.
- [16] 刘忠战. 电子式电流互感器高压侧自励源供能方法研究[J]. 高压电器, 2006, 42(1): 55-57.
LIU Zhongzhan. Research on self-excitation power supply from high voltage side of electronic current transformers[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(1): 55-57.
- [17] 唐旭晖, 完保娟, 张景超, 等. 光电电流互感器高压端供能电源的设计[J]. 高压电器, 2009, 45(5): 123-125.
TANG Xuhui, WAN Baojuan, ZHANG Jingchao, et al. Design of power supply for optical current transformer in high voltage side[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(5): 123-125.
- [18] 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.
- [19] 冯晶晶,肖华锋,谢少军. 大功率锂电池的充放电管理器控制技术研究[J]. 信息化研究,2009,35(12):14-17.
FENG Jingjing,XIAO Huafeng,XIE Shaojun. A study on control strategy of charge and discharge manager of high power lithium-ion battery[J]. Electronic Engineer,2009,35(12):14-17.
- [20] 刘新天. 电源管理系统设计及参数估计策略研究[D]. 合肥:中国科学技术大学,2011.
LIU Xintian. Battery management system design and parameters estimation method research[D]. Hefei:University of Science and Technology of China,2011.
- [21] 陈小雄,黄新波,朱永灿,等. 输电线路雷击故障点远程定位装置的设计[J]. 高压电器,2013,49(7):53-59.
CHEN Xiaoxiong,HUANG Xinbo,ZHU Yongcan,et al. Design of the remote location device for lightning strike fault point on transmission line[J]. High Voltage Apparatus,2013,49(7):53-59.
- [22] 殷迪清,韩跃峻,胡 顺. 高压电缆线路不间断取能电源的研究[J]. 水电能源科学,2011,29(9):168-170.
YAN Diqing,HAN Yuejun,HU Shun. Research on uninterrupted power sources of high-voltage cable line[J]. Water Resources and Power,2011,29(9):168-170.
- [23] 程晓洁,冯全源. 一种低功耗高可靠性的 CMOS 过流保护电路[J]. 微电子学与计算机,2006,23(1):52-54.
CHENG Xiaojie,FENG Quanyuan. A low-power high reliability CMOS current limit circuit[J]. Microelectronics & Computer,2006,23(1):52-54.
- [24] 冯 鹄,罗海志,杨洁民,等. 高压直流输电系统接地极过压保护机理及改进措施研究[J]. 高压电器,2011,47(12):49-55.
FENG Dong,LUO Haizhi,YANG Jiemin,et al. Principle and improvement of the earth electrode overvoltage protection for an HVDC project[J]. High Voltage Apparatus,2011,47(12):49-55.
- [25] 郭琳云,尹项根,严新荣,等. 配电网智能设备自取能电源的效率提升研究[J]. 中国电机工程学报,2009,29(S1):217-221.
GUO Linyun,YIN Xianggen,YAN Xinrong,et al. Research of improving power efficiency for intelligent device self-power supply utilized in power distribution network[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(S1):217-221.
- [26] 牛 博,姚 林,曹小行,等. 基于 3G 物联网的高压输电线路多状态信息监测系统[J]. 陕西电力,2013,41(12):56-60.
NIU Bo,YAO Lin,CAO Xiaoxing,et al. Probe into multiple state information monitoring system of high voltage transmission lines based on 3G internet of things[J]. Shaanxi Electric Power,2013,41(12):56-60.
- [27] 王辰曦,卢江平,赵 芃,等. 光纤式电压电流组合测试系统的研制[J]. 陕西电力,2013,41(8):51-55.
WANG Chenxi,LU Jiangping,ZHAO Peng,et al. Development of optical fiber type voltage and current integrated test system[J]. Shaanxi Electric Power,2013,41(8):51-55.
- 黄新波(1975—),男,博士(后),教授,硕导,研究方向为电力系统在线监测理论与技术、无线网络传感器等。
- 石 杰(1990—),男,硕士研究生,研究方向为智能电网在线监测理论与关键技术研究。
- 陈小雄(1988—),男,硕士研究生,研究方向为智能电网在线监测理论与关键技术研究。
- 张 斌(1989—),男,硕士研究生,研究方向为智能电网在线监测理论与关键技术研究。
- 朱海涛(1986—),男,硕士研究生,研究方向为微机保护装置研究。

(上接第 15 页)

- 出版社,2008:190-191.
GUO Lei,LI Huihui,BAO Yongsheng. Image fusion[M]. Beijing:Publishing House of Electronics Industry,2008:190-191.
- [21] 曹 喆. 一种区域特性的小波图像融合新算法[J]. 计算机工程与应用,2011,47(26):213-215.
CAO Zhe.Novel image fusion algorithm based on regional feature with wavelet[J]. Computer Engineering and Applications,2011,47(26):213-215.
- [22] OTAZU X. Introduction of sensor spectral response into image fusion methods[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing,2005,43(10):2376-2385.
- 马立新(1960—),男,教授,主要研究方向为电力系统稳定性与优化运行、电气系统故障诊断与模式识别、群体智能与智能电网。
- 黄大海(1988—),男,硕士,主要研究方向为电气系统故障诊断与模式识别、图像处理。
- 王 伟(1990—),男,硕士,主要研究方向为电气系统故障诊断与模式识别(通讯作者)。