

输电线路感应取能的优化设计

程江洲, 孙 晶, 魏业文, 方 烜, 王灿霞, 朱 偲

(三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002)

摘 要:为解决输电线路感应取电装置安全性能差、不具有通用性以及取电功率低的问题,对感应取电装置进行优化设计研究。设计继电器和瞬态双向抑制二极管 TVS 的双重保护电路,实现对电网及装置的保护;继而分析取能线圈参数,以保证小电流时输出功率可达到 33 W,同时可以稳定输出 12 V 和 5 V 的电压。优化后的装置可适用于输电线路的监测设备,也可应用于雷击定位、故障测距、导线温度监测等设备,充分保证装置的广泛适用性;并设计锂电池电量显示功能,避免锂电池的过充过放。最后,通过 Saber 软件仿真和实验验证该优化设计的可行性。经测试,改进的感应取电装置是一种更加安全稳定、可靠通用的高效率取电装置。

关 键 词:感应取电;双路输出;取能线圈;保护电路

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.06.006 中图分类号:TM402 文章编号:1673-9140(2020)06-0046-07

Optimum design of induction power supply on transmission line

CHENG Jiangzhou, SUN Jing, WEI Yewen, FANG Xuan, WANG Canxia, ZHU Cai

(College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: In order to solve the problems of poor safety performance, non-universality and low power of inductive power on transmission line, this paper designs and studies the optimal design of induction power supply device on transmission line. A double protection circuit of relays and TVS diodes is proposed to protect the power grid and its equipment. Then, the parameters of induction coil are analyzed to ensure that the output power can reach 33 W at a low current, and the output voltages of 12 V and 5 V can be output stably. The optimized device can be applied in transmission line monitoring, thunderstroke orientation, fault locating and conductor temperature monitoring devices. The wide applicability of the induction power supply device is guaranteed. Meanwhile, a status display function of lithium battery is integrated in the device to avoid overcharge or over discharge. Finally, the feasibility of the optimized design is verified by the Saber software simulation and experiments. It is indicated that the improved induction device is a secure, stable, reliable, universal and high-efficiency power supply device.

Key words: induction power; dual output; induction coil; protection circuit

收稿日期:2018-03-12;修回日期:2018-05-09

基金项目:国家自然科学基金(51507091)

通信作者:程江洲(1979-),男,副教授,主要从事电气设备状态在线检测及故障诊断技术、智能配网等研究;E-mail:chengjiangzhou@ctgu.edu.cn

近年来,中国电力工业迅猛发展,输电线路的电压等级不断提高,保证供电的可靠性是发展的必然趋势^[1]。目前,输电线路常用的供能方式是太阳能板和蓄电池联合供电^[2],其缺点是受条件限制、成本较高、体积大;除此之外,还有激光供电^[3]、无线取能^[4-8],虽然取得了一定进展,但是在输电线路方面的应用仍然不够成熟。感应取电作为一种相对成熟的取能方式,体积小、安装方便,可实现连续不间断供电^[9-10],但是感应取能装置未能推广使用,主要原因:

1)取能线圈是直接卡在输电线路上的,若装置出现问题,可能影响输电线路的供电质量;

2)一些改进的取能装置电路结构复杂,且不具备通用性;

3)小电流时,取能效率低,无法满足设备的正常使用。

在感应取电装置的优化方面,文献[11]设计了储能保护电路,保护了后端电路,但并没有起到保护输电线路稳定运行的作用。文献[12]提及通过调整 CT 铁芯尺寸和电路中的相关参数,可以实现不同的功率输出,但根据负载大小来进行装置的设计,电源设计仍然不具备通用性。文献[13-15]采用双绕组切换取能,致力于提高取能效率,但是绕组的频繁切换,不利于装置的长期稳定使用。文献[16]利用超级电容快速充放电特性,给监控系统提供瞬时大功率,但超级电容储能密度小,当取能装置取能低时,不能满足装置的需求。文献[17]提出了基于桥式整流电路的能量提取方案,计算了最优参数,但过于依赖蓄电池供能。

该文提出输电线路感应取能的优化设计研究,设计继电器保护和瞬态双向抑制二极管 TVS 的双重保护,在低电流的情况下,实现输出功率达到 33 W,同时可以稳定输出 12、5 V 的电压,两路电压输出可以应用于输电线路上的不同额定电压的监测设备,也可应用于雷击定位、故障测距、导线温度监测等装置,充分保证了装置的广泛适用性,还设计了锂电池电量显示功能,避免锂电池的过充过放,是一种更加安全稳定、可靠通用的高效率感应取电装置。

1 取能线圈工作原理

取能线圈是直接卡在输电线路上的,原边一次侧

为大电流,匝数为 1,副边为小电流,输电线路上的交流电变化引起线路周围磁场的变化,磁通量的变化产生感应电动势,电能到磁能,再到电能的变化,即取能线圈的基本工作原理。感应取电装置结构如图 1 所示。

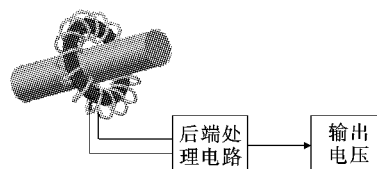


图 1 感应取电装置结构

Figure 1 Structure of energy induction device

取能线圈的设计主要考虑铁芯材料、铁芯尺寸、气隙大小、线圈匝数、绝缘问题等,其中,铁芯材料选择初始磁导率较高、不易饱和且损耗小的硅钢片,铁芯尺寸、气隙大小及线圈匝数的选择需要根据输电线路的尺寸和输出电压合理计算,特别地,取能线圈的绝缘问题是保证装置稳定运行的关键,这里,取能线圈绕线后需包上绝缘材料,同时外壳采用阻燃、耐高温的聚碳酸酯材料,保证供电的可靠性。

根据变压器原理可知,二次侧感应电动势的有效值为

$$E_2 = \sqrt{2} \pi f N_2 \phi_{\max} \quad (1)$$

输出功率为

$$P = \sqrt{2} \pi f N_2 \phi_{\max} \cdot \frac{I_1}{N_2} \quad (2)$$

式(1)~(2)中 f 为频率; N_2 为二次线圈匝数; ϕ_{\max} 为最大磁通量; I_1 为输电线路电流有效值。具体地,当铁芯未饱和时,磁感应强度与磁场强度成比例关系,这时得到:

$$E_2 = \frac{2\pi f N_2 S \mu_0 \mu_r I_1}{l} \quad (3)$$

式中 S 、 l 分别为铁芯的横截面积和磁路长度; $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m 为真空磁导率; μ_r 为相对磁导率。当铁芯饱和后,二次侧不能输出稳定的电压,深度饱和时,二次电压波形就会发生畸变,后端器件不能承受时,就会造成损坏,因此,必须避免铁芯工作在饱和状态。

根据文献[14]可知,开气隙是抑制铁芯过快饱和的有效手段,此处取气隙长度 $\delta = 1$ mm,同时得到:

2.2 能量管理设计

取能装置在输电线路周围感应的能量主要用于两部分:自身电路损耗和锂电池充放电。当能量较低时,由锂电池放电,保证稳定的双路输出;当能量较高时,首先,需满足自身电路和负载的需求;其次,若有多余能量并且锂电池需要充电,则为锂电池充电,再有多余的能量则通过保护电路中的 MOS 管泄出。

如图 4 所示,LM339 迟滞比较器通过检测输出电压与基准电压进行比较,其输出端用来控制芯片 CN3052A 的开断,高电平使得芯片处于正常工作状态,同时控制锂电池的工作状态。当输出电压未达到额定值时,表明线圈取能不足,需要接入锂电池进行供电,当输出电压达到额定值时,表明取能充足,由取能支路供电。引脚 TEMP 是电池温度检测输入端,与电池的 NTC 传感器的输出端相连,当电池温度过高时,充电暂停,FAULT 管脚动作,表明电池进入故障状态。

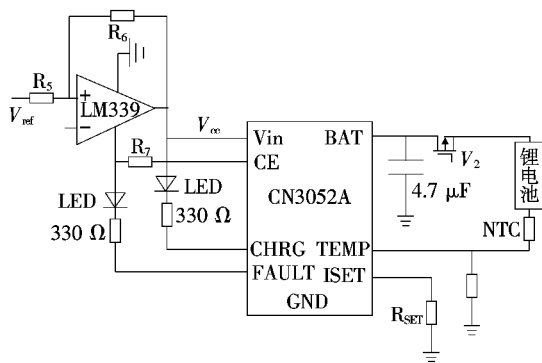


图 4 充电电路

Figure 4 Charging circuit

2.3 锂电池 SOC 监测

为了保证锂电池的使用寿命,应尽量避免锂电池的过充过放,设置充电上限 4.2 V 和放电下限 3.6 V,当达到限定值时,锂电池无条件停止充放电。这时就需要对锂电池的荷电状态(SOC)进行监测,主要通过检测锂电池的电压进行判断,具体电路如图 5 所示,其中, V_b 为锂电池电压, V_r 为锂电池的基准电压,这里选取 $V_r=4.0\text{ V}$, V_B 为反馈电压。 $R_3=R_4=R_5=R_6=R_7=R_8=R_9$,得到 6 个基准电压,根据反馈电压的输出情况,可以使不同的二极管发光,以此来显示锂电池的电量。具体显示情况如表 1 所示。

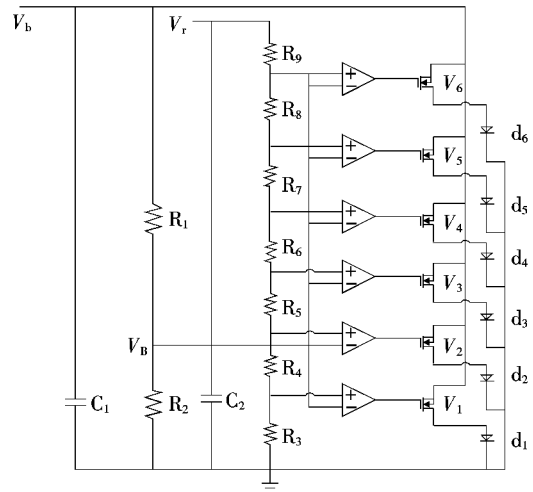


图 5 锂电池电量监测电路

Figure 5 Lithium battery power monitoring circuit

表 1 锂电池电量显示情况

Table 1 Lithium battery power display status

V_B/V	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	个数	电量
(0,3.6]	—	—	—	—	—	—	0	3.6
(3.6,3.7]	亮	—	—	—	—	—	1	3.7
(3.7,3.8]	亮	亮	—	—	—	—	2	3.8
(3.8,3.9]	亮	亮	亮	—	—	—	3	3.9
(3.9,4.0]	亮	亮	亮	亮	—	—	4	4.0
(4.0,4.1]	亮	亮	亮	亮	亮	—	5	4.1
(4.1,4.2]	亮	亮	亮	亮	亮	亮	6	4.2

该文的锂电池电量显示仅仅用于粗略显示,方便对锂电池的监测,当二极管全部不发光时,表明锂电池进入过放状态;当 6 只二极管全部发光时,表明锂电池进入过充状态,应该及时对电池进行维护。

3 仿真分析

运用 Saber 软件对内径 60 mm、外径 115 mm、高 45 mm、开气隙 1 mm、匝数 300 的取能线圈进行分析,线圈的原副边电压电流值均为正弦波形,当线路电流从 50 A 不断增大时,取能线圈二次侧输出电压也增加。在线路电流达到 50 A 时,即可输出 5 V 的电压,以后电流每增加 100 A 电压值就上升约 4 V;若出现较大电流冲击时,输出电压正常情况下可以增加至近 35 V。

在仿真分析中,线路电流达到 20 A 时,就能实现 12.5 V 的稳定输出,即在较小母线电流下,也可以保证监控设备的正常使用,这 2 个电压值是常见的监控设备的额定电压值,输出结果如图 6 所示。

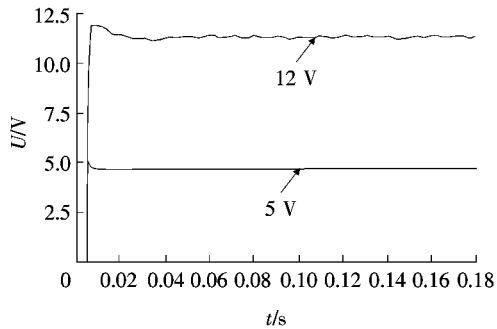


图 6 稳定输出电压波形

Figure 6 Steady output voltage waveform

对图 6 得到的仿真结果进行分析,在 12 V 的输出下,纹波系数为 $(0.0625/12) \times 100\% = 0.52\%$; 在 5 V 的输出电压下,纹波系数更是基本为 0,实现了稳定的双路输出。

4 实验验证

在实验室输电线路平台下完成相关实验。采用升流器模拟一次侧母线电流的变化。实验室所选用的大电流发生器为由武汉火炬机电仪表成套工程有限公司生产的 SLQ-82-3000 A 型大电流发生器,容量为 $15 \text{ kV} \cdot \text{A}$,输入电压为 220 V,输入电流为 39.5 A,输出电压为 5 V,输出电流为 3 kA。线圈的尺寸和仿真使用的数据相同,分别对电源的输出电压、锂电池充放电情况、蓄电池电量等进行测试。

4.1 输出电压测试

该文利用实物进行试验,末端连接 5 W 的小灯泡,可以实现稳定的电压输出。实验平台搭建如图 7 所示。

在不接入控制电路进行实验时,当线路电流达到 85 A 时,线圈二次侧电压可以达到 8 V,具体波形如图 8 所示,二次侧输出电压峰值在 9~10 V 波动,产生波动的原因主要是因为升流器电流有波动,二次侧输出电压与线路电流有关系,且经过实验验证,两者呈正相关。与此同时,一次侧通入不同电

流,接入线圈匝数为 300,负载用 50Ω 电阻,测得电压有效值如表 2 所示。

实验结果可以得到,当母线电流正常变化时,可以保证稳定的双路输出,若发生短路及雷击故障情况,保护电路作用,TVS 可以吸收瞬时脉冲,从而保证电压稳定。该文侧重于研究小电流时感应取电装置的取能效率问题,因此,主要测试 0~300 A 的电流,保证在小电流时,可以得到稳定的输出电压。装置在 5 V 端口的输出波形如图 9 所示。

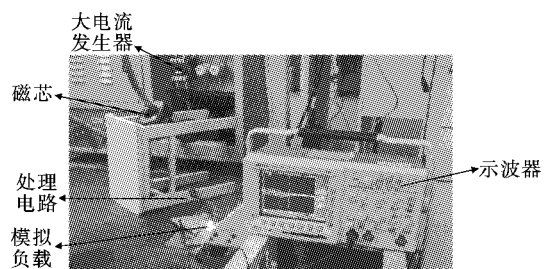


图 7 实验平台

Figure 7 Experiment platform

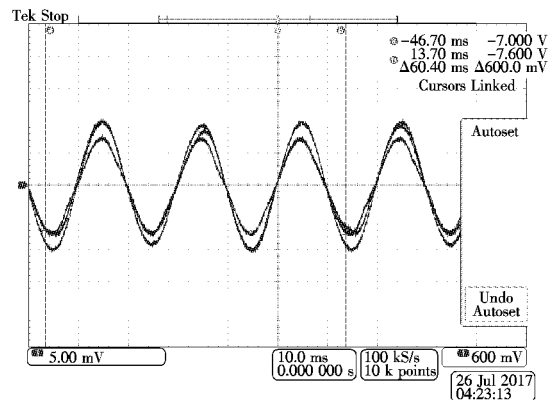


图 8 二次侧电压输出波形

Figure 8 Secondary voltage output waveform

表 2 实验结果数据

Table 2 Experimental results data

线路电流/A	二次侧电压有效值/V		负载侧电压有效值/V	
	300 匝	50Ω	5 V 输出端	12 V 输出端
20	3.96	10.25	4.96	11.95
50	5.92	14.14	4.96	11.95
70	6.57	16.23	4.96	11.95
100	8.13	18.73	4.97	11.95
150	9.69	24.04	4.98	11.96
300	13.56	37.22	4.98	11.97

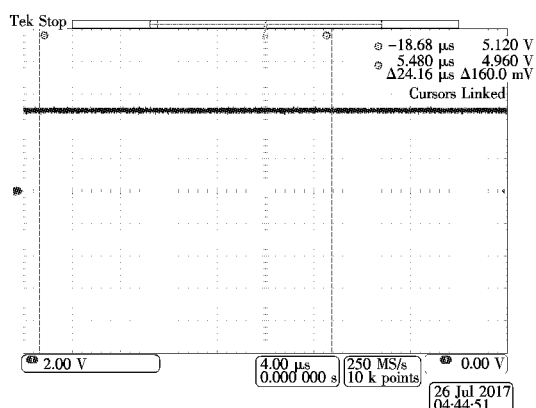


图 9 稳压输出波形

Figure 9 Constant voltage output waveform

根据图 9 波形可知,随着线路电流的变化,装置的输出电压可以稳定在 12.5 V,与普通的感应取电装置相比,保证了装置的普遍适用性,且实现了低母线电流下的稳定输出,是一种高效稳定可靠的供能装置。

4.2 锂电池充放电测试

在互感器取能不足时,将由锂电池进行供能;当互感器取能充足且锂电池需要充电时,将为锂电池充电。锂电池充放电的测试主要验证在线路电流较小或较大时,可以实现锂电池的充放电及电量显示。

选取常见的 3.7 V18650 锂电池进行实验,其额定电压为 3.7 V,范围为 3.6~4.2 V,低于 3.6 V 会过放电,高于 4.2 V 会过充电,过放电和过充电都会严重损伤电池,甚至出现危险。测试情况如表 3 所示。设定锂电池的初始值为 4.0 V,即不需要充电状态。

表 3 实验测试结果

Table 3 Experimental test results

时间/s	线路电流/A	输出电压/V		锂电池充放电情况
		5 V 端口	12 V 端口	
0~60	60	4.9	11.9	不充电、不放电
60~120	30	4.8	11.9	放电
120~180	80	4.9	11.9	电量低于 3.6 V, 充电

5 结语

该文主要针对目前感应取电装置存在的问题进行优化设计,解决了装置安全性能差,不具有通用

性,取电功率低的问题。本论文的优化设计使得感应取电装置不仅可以为监控设备供电,还可用于雷击定位、故障测距、导线温度监测等装置的供电,是一种更加广泛通用的取能装置。具体地,优化设计后的装置可以实现在小电流的情况下,实现稳定的双路输出;双重保护电路,解决了装置的安全隐患,锂电池电量显示功能,避免锂电池的过充过放。经测试,双路输出和锂电池的电量监测功能能够精确实现。

参考文献:

[1] 董小青,吴军,王浩,等. 输电线路机载紫外巡检和故障诊断技术[J]. 电力科学与技术学报,2017,32(1):117-122.
 DONG Xiaoqing, WU Jun, WANG Hao, et al. Research on airborne ultraviolet equipment and fault diagnosis technique for transmission line[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2017,32(1):117-122.

[2] 李振华,李红斌,张秋雁,等. 一种高压电子式电流互感器在线校验系统[J]. 电工技术学报,2014,29(7):229-236.
 LI Zhenhua, LI Hongbin, ZHANG Qiuyan, et al. An on-line calibration system for high voltage electronic current transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2014,29(7):229-236.

[3] 李维峰,付兴伟,白玉成,等. 输电线路感应取电电源装置的研究与开发[J]. 武汉大学学报:工学版,2011,44(4):516-520.
 LI Weifeng, FU Xingwei, BAI Yucheng, et al. Development of power induction devices for transmission lines [J]. Engineering Journal of Wuhan University,2011,44(4):516-520.

[4] 范兴明,莫小勇,张鑫. 无线电能传输技术的研究现状与应用[J]. 中国电机工程学报,2015,35(10):2584-2600.
 FAN Xingming, MO Xiaoyong, ZHANG Xin. Research status and application of wireless power transmission technology[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(10):2584-2600.

[5] 聂一雄,文波,刘艺. 无接触功率传输技术[J]. 电力科学与技术学报,2010,25(3):13-24.
 NIE Yixiong, WEN Bo, LIU Yi. Contactless power transmission technology[J]. Journal of Electric Power

- Science and Technology, 2010, 25(3): 13-24.
- [6] 李江, 张鹏, 马腾, 等. 磁耦合谐振式无线电能传输系统的仿真与实验[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(11): 72-77.
- LI Jiang, ZHANG Peng, MA Teng, et al. Simulation and experiment analysis of wireless power transmission system via magnetic resonance coupling[J]. Electric Machines and Control, 2015, 19(11): 72-77.
- [7] 张献, 杨庆新, 崔玉龙, 等. 大功率无线电能传输系统能量发射线圈设计、优化与验证[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 12-18.
- ZHANG Xian, YANG Qingxin, CUI Yulong, et al. Design optimization and verification on the power transmitting coil in the high-power wireless power transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 12-18.
- [8] 赵争鸣, 张艺明, 陈凯楠. 磁耦合谐振式无线电能传输技术新进展[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(3): 1-13 + 21.
- ZHAO Zhengming, ZHANG Yiming, CHEN Kainan. New progress of magnetically-coupled resonant wireless power transfer technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(3): 1-13+21.
- [9] 郭昊坤, 吴军基. 一种新型的可充电式高压感应取电装置[J]. 电测与仪表, 2014, 51(3): 86-90.
- GUO Haokun, WU Junji. A new equipment of rechargeable induction power supply at high voltage[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(3): 86-90.
- [10] 邸荣光, 刘仕兵. 光电式电流互感器技术的研究现状与发展[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(8): 98-100.
- DI Rongguang, LIU Shibing. Research status quo and development of optical current transducer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(8): 98-100.
- [11] 熊兰, 何友忠, 宋道军, 等. 输变电线路在线监测设备供电电源的设计[J]. 高电压技术, 2010, 36(9): 2252-2257.
- XIONG Lan, HE Youzhong, SONG Daojun, et al. Design on power supply for the transmission line on-line monitoring equipment[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(9): 2252-2257.
- [12] 白玉成, 吴功平, 肖华, 等. 输电线路感应取电装置参数匹配方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(21): 75-80.
- BAI Yucheng, WU Gongping, XIAO Hua, et al. A parameter matching method for power induction devices on power transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(21): 75-80.
- [13] 褚强. 光磁互补型输配电线路在线监测系统供能装置研制[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
- [14] 龚贤夫, 周浩, 戴攀, 等. 一种输电线路大功率取电电源的设计[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(3): 124-128+134.
- 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+134.
- [15] 肖波, 徐敏捷, 席朝辉, 等. 高压侧感应取电电源的研究[J]. 高压电器, 2013, 49(1): 1-5+12.
- XIAO Bo, XU Minjie, XI Zhaohui, et al. Research of induction power supply at high voltage side[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(1): 1-5+12.
- [16] 褚强, 李刚, 张建成. 一种基于超级电容的输电线路在线监测系统电源设计[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(3): 152-157.
- CHU Qiang, LI Gang, ZHANG Jiancheng. Power supply of transmission line online monitoring system based on super-capacitor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(3): 152-157.
- [17] 任晓东, 陈树勇, 姜涛. 电子式电流互感器高压侧取电装置的设计[J]. 电网技术, 2008, 32(18): 67-71+76.
- 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+76.