DOI:10.14188/j.1671-8844.2023.0445 文章编号:1671-8844(XXXX)XX-0001-11

高压输电线路电场感应取能系统的研究与设计

蒋燕[1],周正[1],孙志峰[1],刘文涛[2],陶磊[1],高星冉[3*]

(1. 国网湖北省电力有限公司信息通信公司,武汉 430000; 2. 国网襄阳供电公司,襄阳 441100; 3. 武汉大学电气与自动化学院,武汉 430072)

摘要: 高压输电线路在线监测装置能有效提升电力系统的安全性与稳定性,是智能电网的重要组成部分。然而,在实际应用中,供能问题一直是制约在线监测装置发展的关键瓶颈。为满足在线监测装置稳定可靠的用能需求,本文基于电场感应取能原理,提出并开发了一套从高压输电线路周围的高压电场中拾取能量的空间取能系统。首先,给出了空间取能的系统结构,并分析了系统的工作原理。然后,对空间取能所用的耦合极板进行了优化设计,使用环框型耦合极板实现了取能功率和极板尺寸之间的平衡。进一步的,根据取能系统准电流源输出的特点,设计了DC/DC降压电路,大幅提升了系统的输出功率。最后,针对在线监测装置的断续用能需求,设计了滞回充放电逻辑。理论及实验结果均表明,该系统可以稳定输出25mW以上的电能。经储能模组存储后,可以满足在线监测装置每2小时进行一次拍照回传的工作需求。

关键词: 高压输电线路;微源取能;电场环境;DC-DC降压电路

中图分类号: TM 457 **文献标志码:** A

Research and design of an electric field induction-based energy harvesting system for high voltage power transmission lines

JIANG Yan[1], ZHOU Zheng[1], SUN Zhifeng[1], LIU Wentao[2], GAO Xingran[1]

(1. Information and Communication Company, Hubei Electric Power Co., Ltd., State Grid, Wuhan 430000, China;
2. Xiangyang Power Supply Company, State Grid, Xiangyang 441100, China;
3. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: High-voltage transmission line online monitoring device can effectively promote the safety and stability of the power system, thus acting as an important part of the smart grid. However, for practical applications, the power supply problem is always the key limitation that restricts the development of online monitoring device. To provide stable and reliable power supply to the online monitoring devices, a space energy harvesting system based on the electric field induction is proposed to pick up power from the high voltage electric field around the transmission lines. Firstly, the system structure is demonstrated, with the analysis of the system's working principles. Then, the coupling plates for space energy harvesting is optimized, with the use of frame-shaped plates to seek a balance between the power level and the system sizes. Furthermore, based on the sys-tem's quasi-current source characteristics, a DC/DC converter is designed to notably improve the

收稿日期: XXXX-XX-XX

作者简介: 蒋燕(1982-),女,博士,高级工程师,主要从事电力通信运行,无线电能传输等研究及相关工作,E-mail: yanyanjiang2023@gmail.com。

通信作者: 高星冉(1992-),男,博士,武汉大学博士后,主要从事电机驱动、无线电能传输以及电网智能化方面的研究,E-mail: gaoxran@foxmail.com。

基金项目: 国网湖北省电力有限公司科技项目(521533200083)。

本文引用格式: 蒋燕,周正,孙志峰,等.高压输电线路电场感应取能系统的研究与设计[J].武汉大学学报(工学版),XXXX,XX(XX):1-11.

Citation: JIANG Yan, ZHOU Zheng, SUN Zhifeng, et al. Research and design of an electric field induction-based energy harvesting system for high voltage power transmission lines[J]. Engineering Journal of Wuhan University, XXXX, XX(XX):1-11.

output power level. Finally, with respect to the discontinuous power demand of the on-line monitoring device, a hysteresis discharge mechanism is de-signed. Both the theoretical and the experimental results show that the system is able to output more than 25mW power sta-bly. With the use of energy storage module, the on-line monitoring device is able to upload the picture information every two hours.

Key words: HV Transmission line; Energy Harvesting; Electric Field; DC-DC converter

近年来,国家电网和南方电网公司均提出了智能电网的概念,以提升电力系统的可靠性、灵活性和可持续性。随着物联网技术的发展,大量的在线监测装置已经被广泛应用,可以为电力系统,特别是高压输电线路的早期预警、主动自愈和灾害预防提供高准确度和高密度的监测信息[1-3]。这些监测装置包含了大量的智能传感器,并安装在输电线路塔架上对线路的运行状态进行实时监控,包括电气信息(如电压、电流等)[4]、机械信息(如积雪覆冰、线缆舞动等)[5]、气候信息(如风速、闪络、污秽等)[6]等多种信息。然而,这些在线监测装置通常需要稳定可靠的电源供应,以支撑其长时间的户外工作。其中,一些功能单一的传感器,如振动传感器、温湿度传感器等,功耗通常在数十μW至数mW之间,间隔数分钟至数小时采集一次数据;图像、覆冰等传感器的功耗通常达到W级,间隔数分钟至数小时采集一次数据;通信装置的峰值功率也在3W左右,根据实际需要定时进行数据上传。

当前,研究人员已提出多种方案为在线监测装置提供电能。其中,传统的供电方式包括架设专用低压线、太阳能电池、激光无线传能、小型风力发电机、光纤传输和电容分压取能等[7-11]。然而,受地理、绝缘等条件的限值,或者输出功率、体积、成本、技术成熟度等问题,上述方法难以满足架空输电线路在线监测发展的用电需求。

为克服上述供电方式的各种弊端,近年来有关研究提出使用取能线圈或电流变换器(Current Transformer,简称CT)从架空导线上在线取电的方式,但是只能用于高电位(如导线)的设备供电,对于大多数处于地电位(如接地的杆塔塔身和地线)的监测装置则无能为力[12]-[13]。进一步地,文献[14]-[19]提出了一种基于无线输电技术的供能方法,首先使用CT装置以磁场感应耦合的方式从输电线路周围的工频磁场中拾取电能,然后再以无线输电的方式传输至低压侧的塔架上,从而在不破坏线路绝缘的条件下为地电位侧在线监测装置供电。然而,该方式一方面系统复杂,可靠性低,另一方面也受限于线路上负荷电流的大小,在用电低谷时无法可靠的输出电能。为规避CT感应取能方式遇到的绝缘问题,文献[20-21]针对双地线逐塔接地的架空输电线路,提出了基于地线的涡旋感应取能方法。然而,该方法需要对取能回路范围内的地线进行绝缘处理,对线路的继电保护会带来一定影响,同时取能功率也受多种因素影响。此外,文献[22]提出了一种利用电流互感器和地线感应电流取能的方法,从地线电流产生的感应磁场中抽取电能。然而,对于典型架空输电线路,地线通常由光纤复合架空地线(OPGW,逐塔接地)和普通地线(分段绝缘、单点接地)组成,其中只有OPGW上才有电流流过。如果采用多匝式CT取能,则需要在OPGW上形成一个开口,而OPGW通常是连续的(除了续接塔);如果不采用多匝式CT,由于地线电流通常较小(<10A),一般难以获得较大的取能功率。

除了由输电导线电流产生的磁场能之外,架空导线周围还存在由导线电压产生的电场能。相比于磁场能,电场能不受负荷电流的影响,更加稳定。因此,文献[23]-[24]提出了一种电场能采集方式,通过使用一块与输电导线形成容性耦合的取能极板,实现电场能的采集。然而,由于该耦合电容较小(数pF到数十pF),其输出功率也只有数mW。针对上述问题,文献[25]-[28]提出了使用变压器提升输出功率的方法。然而,该取能变压器的阻抗需要达到数MΩ才能有效发挥作用,这意味着变压器的感量和体积都较为庞大。

针对上述问题,本文提出一种带有DC/DC装置的高压输电线路电场感应空间取能的方法,既大幅提升取能系统的输出功率,也大幅缩减了取能极板的尺寸,使其更便于安装实施。本文通过理论分析、系统仿真和高压试验的方式,验证了所提方法的可行性和有效性。本文的主要创新点包括:

1)设计了一种单极板电场感应空间取能的系统架构,根据系统准电流源输出的特性,设计了DC/DC环节,以较小的电路尺寸,将输出功率从6-8 mW提升至25 mW以上。

2)利用电荷分布的边缘效应,设计了环框型耦合极板,将耦合极板尺寸缩减了70%,而取能功率

仅下降20%,实现了缩减尺寸和保持取能功率之间的平衡。

3)根据在线监测装置定时上报的需求,设计了系统输出电能的滞回控制模式,能够实现每2小时进行一次拍照回传。

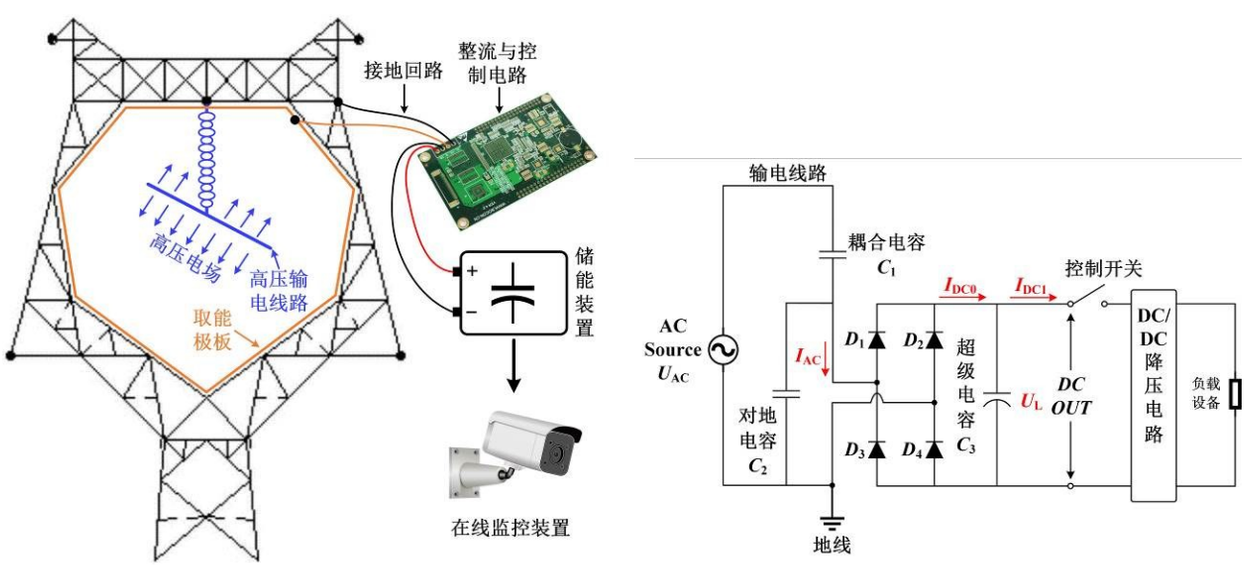
表1 适用于110 kV等级线路的实际取能系统电路参数

Table 1 Practical circuit parameters of the energy harvesting system for 110 kV lines

序号	供能方式	输出功率等级	输出功率主要影响因素	是否需要人工参与	供能稳定性	其他问题
1	激光供能	数十mW至数十W	设备尺寸	是	间歇性供能	需精准照射
2	可再生能源(风能/太阳能)	数十W	风速/辐照度	否	不稳定	受天气影响
3	电容分压器	数W	高压电容容值	否	稳定	存在绝缘可靠性问题
4	磁场感应取电	数W	导线负荷电流	否	不稳定	用电高峰时才有输出
5	磁场感应取电+无线输电	数W	导线负荷电流/无线输电效率	否	不稳定	用电高峰时才有输出
6	电场感应取电	<10 mW	耦合电容	否	稳定	
本文	新型电场感应取电	>25 mW	耦合电容/储能装置电压等级	否	稳定	

1 高压电场感应取能系统架构

高压输电线路电场感应取能系统架构如图1-(a)所示,在塔架内侧铺设一层金属材质的取能极板。该极板与高压输电线路形成容性耦合。整个系统通过高压输电线路、远端变压器、接地回路、取能极板构成一个完整的电流回路。其中,取能极板与高压输电线路形成的耦合电容,在线路电压变化时会产生工频感应电流,经整流与控制电路处理后转换成直流电能,然后供给储能装置。储能装置在电能存储至一定阈值后,释放给用电设备使用,如在线监控装置等。



(a)系统整体结构 (b)系统原理电路

图1 高压输电线路电场感应取能系统架构

Fig.1 The structure of the electric field induction-based space energy harvesting system

高压输电线路电场感应取能系统的原理电路如图1-(b)所示。高压输电线路、远端变压器和接地塔架共同被等效为一个交流电压源U_{AC},其电压等级由线路的电压等级决定。取能极板与输电线路之间的耦合电容等效为C_1,取能极板对塔架寄生的耦合电容等效为C_2。取能极板和塔架上的接地线作为整流桥的一对交流输入,对整流桥后级的超级电容模组C_3进行充电。在超级电容模组C_3的储

能满足一定阈值后,便会闭合控制开关,输出给后级的DC/DC模组,转换为标准的12 V电源后供给用电设备使用。这样,取能时在较高的电压区间对C_3进行充电,用电时再转化为标准的12 V电源为负载供电。这里,C_3是由1 F/6 V的单体超级电容通过3个并联为一组,然后10组串联而成,整体容量为0.3 F,最高耐压60 V。如图1-(b)所示,高压输电导线和接地塔架通过取能极板构建的耦合电容C_1感应出工频交流I_{AC},经整流桥整流后对超级电容模组C_3进行充电。

特别地,因为取能极板和接地塔架共同作为整流桥的一对交流输入,取能极板需要通过绝缘螺柱与塔架进行隔离,以避免取能极板与塔架被短接。

为使所提出的高压输电线路电场感应取能系统具备实用性,系统应满足以下三项条件:

1) 系统具备较大的输出功率,使其能够在较短的时间内(如2-3小时)储存到足够在线监测设备完成一次数据采集与回传所需的电能。

2) 取能极板尺寸/重量合适,便于安装,且具备户外防风、防积雪的能力。

3) 需设计合适的工作流程,使得储能装置能够根据储能状态进行电能释放与储存。

2 系统工作特性分析与优化设计

2.1 功率输出特性分析与优化设计

对于图1-(b)所示的原理电路,将整流桥和后级电路整体视为负载R_L,则可得到系统简化后的等效电路,如图2所示。根据图2所示的等效电路,可以得到负载的充电电流如式(1)所示。

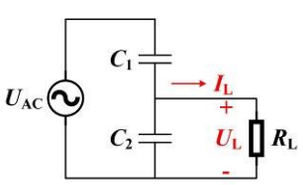


图2 取能系统等效电路

Fig.2 Equivalent circuit of the energy harvesting system

$$I_L=\frac{U_{AC}\cdot\left(\frac{1}{j\omega C_2}\Big\|R_L\right)}{\left(\frac{1}{j\omega C_1}+\frac{1}{j\omega C_2}\Big\|R_L\right)\cdot R_L} \tag{1}$$

式(1)中ω表示工频系统的角频率。由式(1)可见,对于确定电压等级的U_{AC},耦合电容C_1的值越大,则系统回路阻抗越小,充电电流I_L就越大;对地耦合电容C_2越大,则其与负载R_L的并联阻抗越小,在整个回路中的分压越小,充电电流I_L也越小。因此,为得到较大的充电电流I_L,需要通过合理的设计得到较大的C_1值和较小的C_2值。另一方面,对于一个实际系统,C_1的阻抗通常远大于C_2,且C_1和C_2同时远大于R_L。因此,充电电流I_L可近似为由U_{AC}和C_1决定,视为电流源输出,如式(2)所示:

$$I_L\approx U_{AC}\cdot j\omega C_1 \tag{2}$$

表2给出了安装于110 kV电压等级线路的电场感应取能系统的相关参数(单相对地电压为线电压的$1/\sqrt{3}$)。由表2可见C_1值约为40 pF,C_1在工频条件下阻抗值约为79.6 MΩ,远大于C_2的2.1 MΩ。同时,C_1和C_2的阻抗都远大于R_L数十kΩ的阻抗范围。因此,充电电流可以近似用式(2)进行计算。

表2 适用于110 kV等级线路的实际取能系统电路参数

Table 2 Practical circuit parameters of the energy harvesting system for 110 kV lines

参数名	参数值	参数名	参数值
U_{AC}	63.5 kV	充电电压U_L	0—60 V
C_1	39.9 pF	充电电流I_L	0.68 mA
C_2	1522 pF	等效负载R_L	0—100 kΩ

进一步地,由式(2)可以得到系统的取能功率:

$$P_L=I_L\cdot U_L \tag{3}$$

可见,在充电电流I_L近似恒定的条件下,图1-(b)中用以储能的超级电容模组C_3的充电电压越高,系统的充电功率越大。然而,在线监控装置等用电装置通常为12 V供电。若使用12 V的储能模组进行储能,则系统的取能功率总体较小,不足10 mW。因此,如图1-(b)所示,本文在储能模组C_3的后级,增加了一级DC/DC变换装置。系统以较高的电压进行充电储能,释放电能时经DC/DC转换为12 V后再供给用电设备使用。特别地,当C_3的充电电压达到40 V以上时,系统的取能功率将超过25 mW,从而有效地提升了系统的输出功率。

2.2 取能极板优化设计

考虑到取能极板应用于户外工况时,需要应对防风、积雪积水等问题,本文将全面板极板优化为空心的框型极板,以提升取能装置对户外工况的适应能力。同时,这一优化工作也能显著降低取能极板的重量和尺寸,更易于安装实施。对取能极板的优化,是基于电荷分布的边缘效应实施的[29]-[30]。如图3所示,当耦合距离较大时,耦合极板上

的电荷主要分布在边缘区域，对耦合电容起主要作用的也是极板的边缘区域。其中，边缘A点的电荷密度为3.629E-9 nC，中心B点的电荷密度为0.463E-9 nC。可见边缘区域的电荷密度为中心区域电荷密度的7.8倍以上。因此，决定与高压输电导线之间耦合电容的主要是取能极板的边缘区域，可以在不显著影响耦合电容C_1的前提下，将取能极板的中间区域移除。

图4给出了移除中间区域后的取能极板的仿真图，与全面板取能极板的对比如表3所示。可见，将全面板取能极板70%的区域移除后，耦合电容C_1仍保留了80%。根据以上结果，本文决定采用框型极板进行空间电场取能，从而获得更好的户外工况适应能力，并降低施工安装的难度。

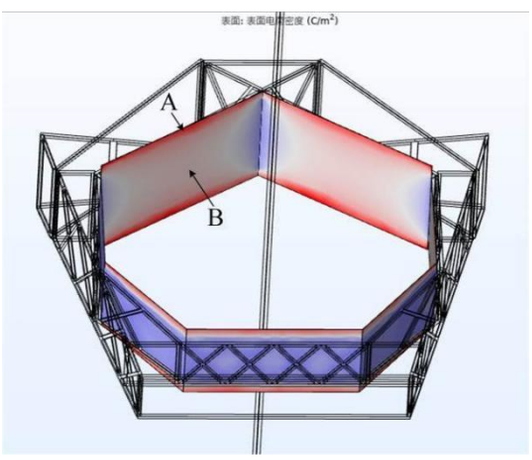


图3 全面板耦合极板的电荷分布

Fig.3 Charge distribution of full-area coupling plate

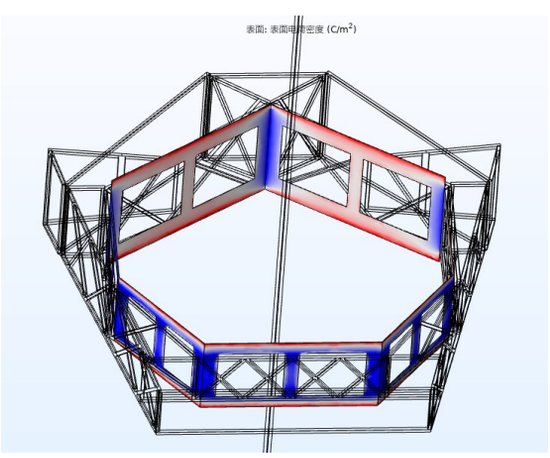


图4 框型耦合极板的电荷分布

Fig.4 Charge distribution of frame-shaped coupling plate

2.3 充放电流程设计

通常而言，在线监测装置的功耗在数百mW至数W之间，这一功耗远大于电场感应取能数十mW的功率输出。同时，对线路积雪、覆冰、污秽等状态的监测和数据上传，往往并不需要连续工作。因此，本文所提的取能系统设计了一种滞回工作模式，即当储能模组C_3的电压U_L达到一定电压阈值U_{th1}后，闭合输出控制开关，允许在线监控装置以较大功率完成一次状态监测和数据上传；当U_L低于一定电压阈值U_{th2}后，断开输出开关，继续进行储能。

表3 全面板极板与框型极板耦合性能对比

Table 3 Comparison between the full-area coupling plate and the frame-shaped coupling plate

对象	面积占比	对导线电容C_1	对地电容C_2
全面板极板	100%	49.1 pF	2.02 nF
框型极板	30%	39.9 pF	1.52 nF

系统的工作流程如图5所示，当输出开关断开时超级电容C_3开始充电，电压缓慢上升；持续t_1时间后，C_3的电压值达到U_{th1}，输出开关闭合，超级电容C_3开始放电，电压迅速下降；持续t_2时间后，电压降低到U_{th2}，断开输出开关，C_3继续储电；如此循环往复。

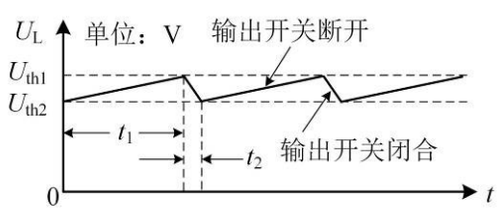


图5 系统充放电流程

Fig.5 The charge/discharge process of the system

输出开关闭合后单次释放的电能如式(4)所示：

$$W_L = 0.5 \cdot C_3 \left(U_{th1}^{\ 2} - U_{th2}^{\ 2} \right) \tag{4}$$

由式(4)可见，超级电容模组C_3的电容值越大，单次释放的电能越多，可支持在线监测装置工作的时间越长。另一方面，U_{th1}和U_{th2}的差值越大，单次释放的电能也越多。但实际设计时，U_{th1}和U_{th2}的选取一方面需要考虑功率器件的耐压值，另一方面也要尽量保持足够高的电压值，以增大取电功率。

3 系统仿真验证

3.1 功率输出特性仿真验证

根据图1所示的电路拓扑，在Simulink软件中搭建了仿真系统，并根据表2设置了仿真参数。其中，等效负载R_L设置为60 kΩ，为缩短仿真时间，超级电容模组C_3设置为100 uF，在不影响整体趋势的

前提下,使输出电压尽快达到稳定值。

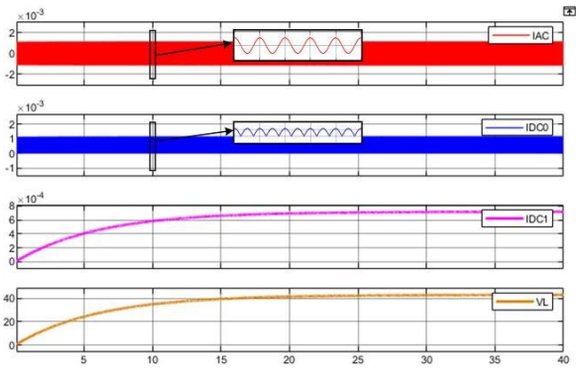


图6 取能系统的仿真结果

Fig.6 Simulation results of the energy-harvesting system

仿真结果如图6所示,其中,I_{AC}是交流侧的充电电流,I_{DC0}是整流桥之后,电容C_3之前的充电电流,I_{DC1}是电容C_3供给负载的直流电流,U_L是C_3两端的输出电压。从仿真结果可见:

1)交流侧的充电电流I_{AC}保持恒定,其幅值为1.2 mA,频率为50 Hz。

2)整流后的充电电流I_{DC0}同样保持恒定,其幅值也为1.2 mA,是100 Hz的馒头波。I_{DC0}的一部分用以给电容C_3充电,使得输出电压U_L持续上升,另一部分用以给负载供电,即I_{DC1}。当C_3充电完成后,平衡状态下,I_{DC1}的值为0.68 mA。

3)负载电压U_L从零上升至44 V稳定电压的过程中,等效负载值逐渐增大至65 kΩ,在此过程中,I_{AC}始终保持1.2 mA的幅值。可见,充电电流几乎不受负载阻抗的影响,系统可近似为一个电流源。

此外,将极板对地电容C_2的值从0 pF调节至仿真值1.52 nF,I_{DC0}和平衡态下的I_{DC1}几乎保持不变,可见C_2对输出电流的影响也可以忽略不计。

3.2 系统安全性分析

使用COMSOL仿真软件对系统的电场强度分布进行分析。如图7所示,对高压输电导线施加63.5 kV(有效值)的工频电压,并导出从图7中A点到C点的电场强度值,导出结果如图8所示。可见,最大场强处存在于导线周围极近距离内。增加极板后,最大场强相对于未增加极板的工况仅增加了3.9%,变化微弱。可见,高压输电系统的电场安全性仍在其裕量范围之内。

4 系统实验验证

4.1 实验环境搭建

为验证所提高压输电线路电场感应取能系统

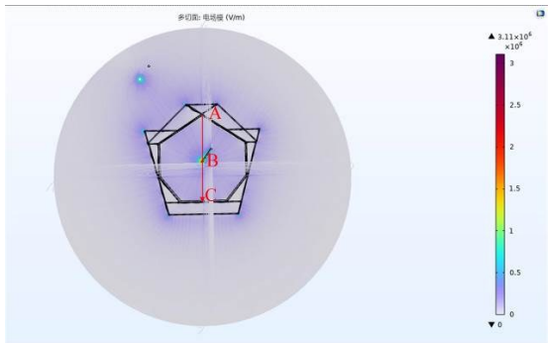


图7 空间电场强度仿真模型

Fig.7 Simulation model of the space electric field strength

的可行性和有效性,搭建了高压试验装置并进行了实测验证。实验装置如图9-(a)所示,测试系统包括110 kV等级绝缘子串、模拟导线、耦合极板、储能装置和地线回路五个部分。其中,模拟导线与高压发生器输出连接,提供63.5 kV电压(110 kV/√3)。图9-(b)给出了耦合极板的尺寸图,按照1:1尺寸模拟110 kV等级M1型猫头塔,横向最大宽度为5176 mm,纵向最大高度4510 mm。同时,耦合极板由木架支撑,与地面保持绝缘。这是因为,耦合极板和接地线共同作为整流桥的一对输入,不能被短接。

图9-(c)给出了测试用的电路装置,包含了整流桥、超级电容储能模块,以及DC/DC变换模块。特别地,对于整流桥的交流输入,分别连接至取能极板和高压发生器的接地端子。因此,系统通过高压发生器的高压输出端、模拟导线、耦合极板、整流桥、接地导线构成了一个完整的闭合回路。

另一方面,考虑到取能系统的输出电流很小(<1mA),电路的各个部件均需由漏电流极低的器件构成,以保证系统能够有效输出功率。本文的核心器件选型及漏电流参数如表4所列,可见电路部分整体的漏电流控制在50 μA以下,小于取能输出电流的十分之一。其中,DC/DC控制选用TI公司的LMR36506-Q1,以发挥其超低静态电流的优势。同时,通过控制其使能脚的电平,可以控制其工作在正常输出模式或待机模式。考虑到该型IC最大工作电压为65V,实际设计正常输出的门槛电压U_{th1}为55.8V,关闭输出的门槛电压U_{th2}为42.3V。

4.2 实验过程与结果分析

考虑到测试时,高压发生器只能持续工作5分钟。如果使用超级电容作为负载,则充电时间会达到数个小时,无法完成整个实验。因此,为缩短测试时间,实际测试时使用的储能装置为100 V/220 μF的电解电容。此外,负载设备使用的是12 V/

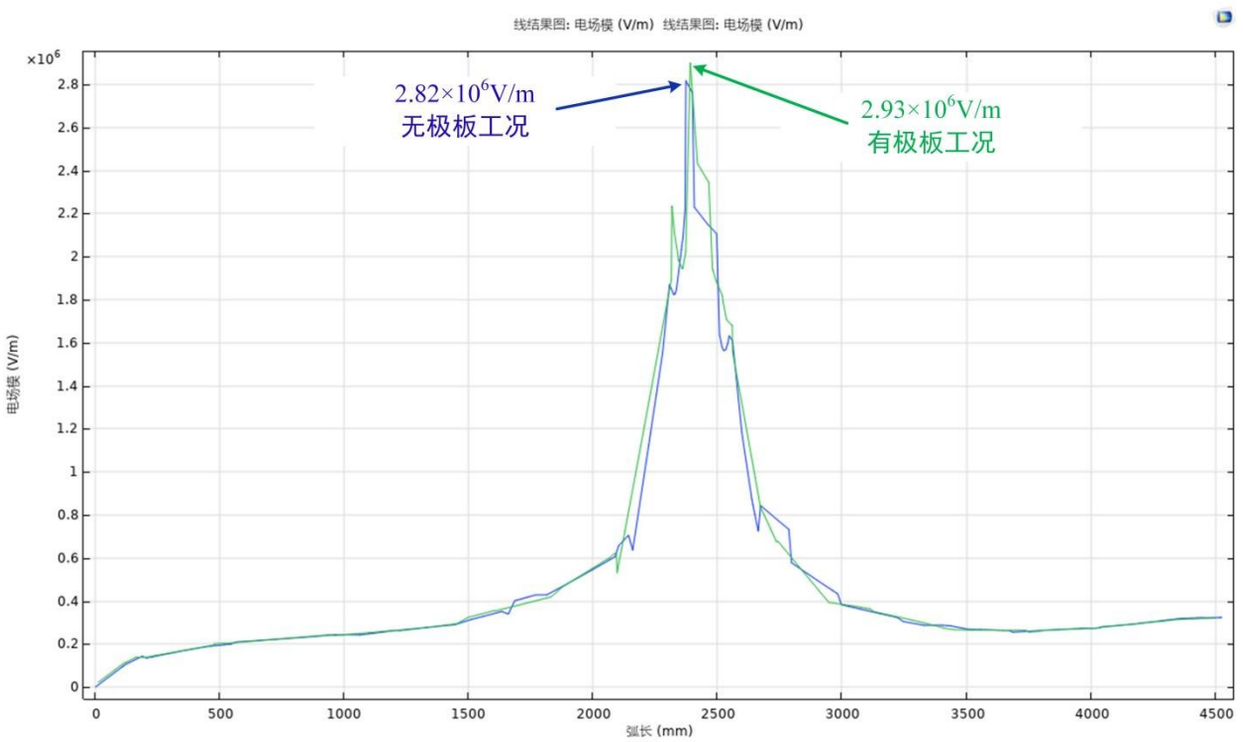


图8 有极板工况与无极板工况电场对比

Fig.8 Comparison of the electric field strength between occasions with and without the coupling plates

2.5 W LED灯带。这是因为实际使用的在线监控装置在全功率运行时最大功率为2.5 W。需要说明的是,对于在线监控装置,最大功率仅发生在拍照并进行数据传输的过程中,持续时间不超过30s。在非拍照期间,其待机功耗仅为0.15W。

按照图9所示装置,在模拟导线上施加63.5 kV电压(110 kV/√3),测量充电电流和储能装置的电压波形。通过毫安表测量得到,充电电流为0.64 mA。考虑到极板对地杂散电容的影响和各部件漏电流的影响,0.64 mA的充电电流符合理论预期。

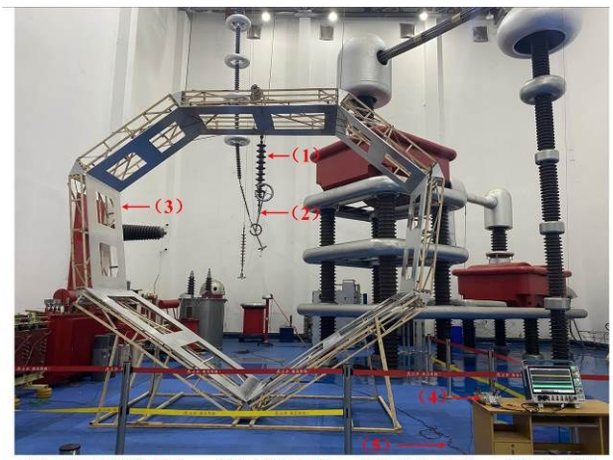
使用示波器记录储能电容在充电和放电时的电压波形如图10所示。可见,储能模块在电压达到55.8 V时,开始对外释放电能,DC/DC芯片输出12V电压;当储能模块电压降到42.3 V时停止释放,DC/DC芯片输出为零,进入待机模式。实际使用的储能模组为0.3 F/60 V的超级电容模组,根据上述阈值,一次可释放电能198.6 J,可以支撑在线监控装置以满功率工作80 s,以待机模式工作1324 s。此外,根据0.64 mA的充电电流计算可知,首次充电至释放阈值耗时5.51小时,之后每1.75小时释放一次电能。

最后,本文所提系统在襄阳供电公司余结线110 kV猫头塔进行了挂网试运行,如图11所示,系统能够按照预期效果对线路工况进行定时监测。以上结果验证了本文所提系统的有效性。

5 结论

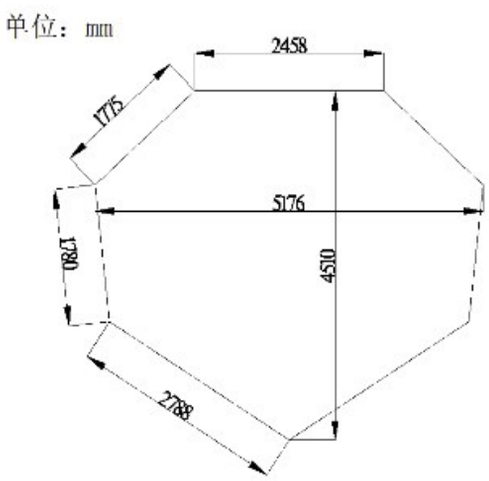
本文针对高压输电线路在线监测装置的低成本高可靠供能问题,提出了一种基于输电线路高压电场感应取能的方案。通过对电路拓扑、耦合极板、充放电模式进行优化设计,本文所提出的空间电场取能系统能够稳定输出25 mW的电能,通过超级电容储能后,能够支持在线监测装置每1.75小时进行一次数据回传。同时,系统结构简单可靠,安装便捷,适用于严苛的户外工况。此外,本文也通过有限元仿真,验证了系统的安全性能。

参考文献:



(1) 110kV绝缘子串；(2) 模拟导线；(3) 耦合极板；(4) 储能装置；(5) 地线回路

(a)整体设置



(b)取能极板尺寸



(c)取能电路

图9 电场感应取能系统测试装置

Fig.9 The experimental setup of energy harvesting system

表4 核心器件选型与漏电流参数

Table 4 The key components and their leakage current

电路部件	型号/供应商	漏电流参数
整流二极管D_1－D_4	1N4148/Onsemi	5μA@75V
超级电容模组C_3	CHM－6R0L105R/智烽维	3*6μA(三组并联)
DC/DC控制芯片	LMR36506－Q1/TI	18μA

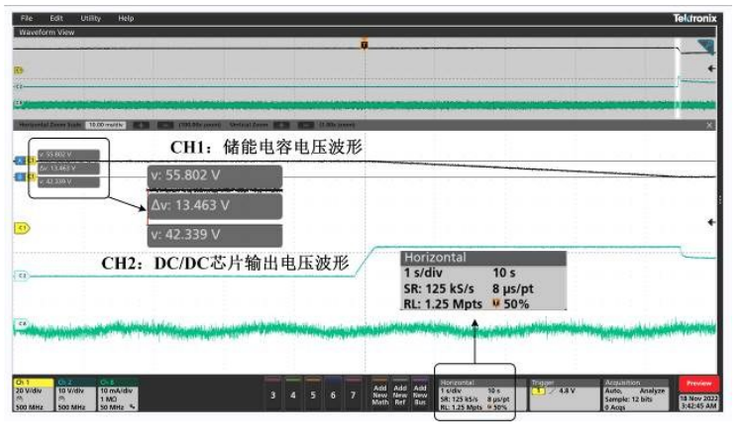


图 10　储能电容充放电阈值波形

Fig.10　The charge and discharge threshold waveform of energy storage capacitor



图 11　现场实物系统和图像回传

Fig.11　Practical system in outdoor environment and the captured pictures.

[1] OU Q. H., WANG Z., ZHEN Y., et al., Status monitoring and early warning system for power distribution network based on IoT technology[C]// Proceedings of 3rd International Conference on Computer Science & Network Technology. Dalian, China, 2013: 641 - 645.

[2] 李鹏, 黄新波, 赵隆, 等. 智能输电线路状态监测代理的研究与设计[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 153-161.
LI Peng, HUANG Xin-bo, ZHAO Long, et al., Research and design of transmission line condition monitoring agent [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33 (16): 153-161.

[3] 袁龙, 栗维勋, 李一鹏, 等. 基于云平台的智能电网监测体系研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(23): 87-91.
YUAN Long, LI Wei-xun, LI Yi-peng, et al., Research on cloud-based monitoring system for smart grid [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(23): 87-91.

[4] SUN X., HUANG Q., JIANG L. J., et al., Overhead high-voltage transmission-line current monitoring by magneto resistive sensors and current source reconstruction at transmission tower[J], IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(1), no. 4000405.

[5] YIN T., CHEN X. S., DU Y., and HE Y. J., Research on power supply employed in ices real-time monitoring system of high-voltage transmission lines [C]// Proceedings of International Conference High Voltage Engineering and Application. Chongqing, China, 2008: 626 - 628.

[6] 郭卫, 周松霖, 王立, 等. 电力电缆状态监测系统的设计及应用[J]. 高电压技术, 2019, 45(11): 3459-3466.
GUO Wei, ZHOU Song-lin, WANG Li, et al., Design and application of online monitoring system for electrical cable states[J], High Voltage Engineering, 2019, 45(11): 3459-3466.

[7] 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 You-zhong, SONG Dao-jun, et al., Design on power supply for the transmission line online monitoring equipment[J], High Voltage Engineering, 2010, 36(9): 2252-2257.

[8] 周凯, 张涛, 董秀成, 等. 基于电容分压的配电网过电

压在线监测[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(21): 86-89.
ZHOU Kai, ZHANG Tao, DONG Xiu-cheng, et al., On-line monitoring of overvoltage in power distribution network based on the capacitance divider[J], Automationn of Electirc Power Systems, 2007, 31(21): 86-89.

[9] YE F., QIAN Y., HU R. Q., Energy efficient self-sustaining wireless neighborhood area network design for smart grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(1): 220 - 229.

[10] WANG Z., ZONG F., WANG W., et al., Development of power supply in high voltage side of transmission lines[J]. Power System and Clean Energy, 2010, 26(6): 24 - 27.

[11] MOSER M. J., BRETTERKLIEBER T., ZANGL H., and BRASSEUR G., Strong and weak electric field interfering: Capacitive icing detection and capacitive energy harvesting on a 220-kV high-voltage overhead power line[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(7): 2597 - 2604.

[12] 娄杰, 陈常涛. 基于启动电流的电流互感器取能电源优化分析及实验验证[J]. 高电压技术, 2018, 44(6): 1774-1781.
LOU Jie, CHEN Changtao. Optimization analysis and experiment verification of current transformer power supply based on starting current[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(6): 1774-1781.

[13] 张秋雁, 李红斌, 程含渺, 等. 有源电子式电流互感器在线监测技术研究[J]. 高电压技术, 2016, 42(1): 208-213.
ZHANG Qiuyan, LI Hongbin, CHENG Hanmiao, et al., Research on online monitoring technology for active electronic current transformer[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(1): 208-213.

[14] CHEN J. F., HUA Z. Y., WANG S. M., CHENG Y. Z., and LIU M. H., Investigation of wireless power transfer for smart grid on-line monitoring devices under HV condition[C]// Proceedings of 2nd International Workshop Wireless Technology Innovation in Smart Grid, Madrid, Spain, 2016: 1307 - 1312.

[15] ZHOU H., GAO X. R., LAI J. G., et al. Natural frequency optimization of wireless power systems on power transmission lines[J]. IEEE Access, 2018, 6: 14038 - 14047.

[16] 毛行奎, 黄起升, 兰石发, 等. 高压电气设备在线监测无线传感器的磁谐振非接触供电[J]. 高电压技术, 2017, 43(11): 3718-3725.
MAO Xing-kui, HUANG Qi-sheng, LAN Shi-fa, et al. Contactless powering via magnetic resonance for on-line monitoring wireless sensor of high-voltage electrical equipment[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(11): 3718-3725.

[17] GAO X. R., LIU C. H., ZHOU H., et al. Design and analysis of a new hybrid wireless power transfer system with a space-saving coupler structure[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(5): 5069-5081.

[18] CAI C. S., WANG J. H., LIU Rong, et al., Resonant wireless charging system design for 110-kV high-voltage transmission line monitoring equipment[J], IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(5): 4118-4129.

[19] GAO X. R., ZHOU H., HU W. S., et al., Capacitive power transfer through virtual self-capacitance route[J]. IET Power Electronics, 2018, 11(6): 1110-1118.

[20] VASQUEZ-ARNEZ R. L., MASUDA M., JARDINI J A., et al., Tap-off power from a transmission line shield wires to feed small loads[J]. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2010: 116-121.

[21] VASQUEZ-ARNEZ R. L., MASUDA M., JARDINI J. A., et al., Tap-off power from the overhead shield wires of an HV transmission line[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(2): 986-992.

[22] YAMAGUCHI T., TAKANO S., NAGANUMA O., et al., Development of power supply system for obstruction lights exploiting induced current which flows through overhead ground wires[C]. Transmission and Distribution Conference and Exposition 2002: Asia Pacific IEEE/PES, 2002: 2176-2180.

[23] KEUTEL T., ZHAO X., KANOUN O., Energy scavenging for monitoring of overhead power line networks[J]. Proceeding Sensors, 2009: 207-212.

[24] ZHAO X., KEUTEL T., BALDAUF M., et al., Energy harvesting for overhead power line monitoring. International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices. IEEE, 2012: 1-5.

[25] 赵东生, 戴栋, 李立涅, 等. 变压器的阻抗变换特性在交流输电线路杆塔侧电场能采集中的应用[J]. 高电压技术, 2015, 41(12): 3967-3972.
ZHAO Dong-sheng, DAI Dong, LI Li-cheng, et al., Electric field energy harvesting around AC transmission line using impedance conversion of transformer[J], High Voltage Engineering, 2015, 41(12): 3967-3972.

[26] 赵东升. 交流输电线路杆塔侧电场能采集技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
ZHAO Dong-sheng, Research of electric field energy harvesting away from high voltage transmission lines

[D], Guangzhou: South China University of Technology, 2015.

[27] 许永强. 基于电场感应的无线取能电源研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
XU Yong-qiang, Research on wireless power supply based on electric field induction[D], Jinan: Shandong University, 2016.

[28] MINTEER T. M., The many capacitance terms of two parallel discs in free space[J], Europe Journal of Physics, 2014, 35(3): 1-15.

[29] NISHIYAMA H., NAKAMURA M., Capacitance of disk capacitors[J]. IEEE Transactions on Components, Hybrids, and Manufaturing Technology, 1993, 16(3): 360-366.

[30] CHOW Y. L., YOVANOVICH M. M., The shape factor of the capacitance of a conductor[J]. Journal of Applied Physics, 1982, 53: 8470-8475.