

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.10.016

一种用于输电线路视频监测的取能电源的设计

程钰¹, 曾翔君¹, 马朝瑜¹, 骆一萍¹, 田昊洋², 吴天逸²

(1. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049; 2. 国网上海市电力公司电力科学研究院, 上海 200437)

摘要: 供电电源是保证高压输电线路在线监测装置稳定运行的关键,文中提出了一种基于高压电场感应取能技术的取能电源,并分别对其功率电路和控制电路进行分析设计。感应极板产生的位移电流作为取能电源的输入,直接决定着取能电源的输入功率,文中利用Comsol软件研究了感应极板尺寸对位移电流的影响,确定了感应极板的尺寸,并和实测数据进行对比,验证了仿真的正确性。基于此,文中研制了一套视频监测装置,通过感应极板和取能电源实现装置的自取能,拍摄输电线及周围环境视频并发送到远程终端。最后,通过实验确定了当视频监测装置应用在110 kV电压等级下时,远程终端接收到的单次视频时长为2.2 min,视频间隔为54.9 min。

关键词: 高压电场感应取能; 取能电源; 感应极板; 输电线路; 视频监测

Design of an Energy Extraction Power Supply for Video Monitoring of Transmission Lines

CHENG Yu¹, ZENG Xiangjun¹, MA Zhaoyu¹, LUO Yiping¹, TIAN Haoyang², WU Tianyi²

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company Electric Power Research Institute, Shanghai 200437, China)

Abstract: Power supply is the key to ensure stable operation of on-line monitoring device of high-voltage transmission line. In this paper, a kind of energy extraction power supply based on the high-voltage electric field induction energy extraction technology is proposed, and its power circuit and control circuit are analyzed and designed respectively. The displacement current generated by the inductor pole plate as the input of the energy extraction power supply directly determines the input power of the energy extraction power supply. The influence of the size of the inductor pole plate on the displacement current is investigated by using the Comsol software, the size of the inductor pole plate is determined and compared with actually measured data so to verify the correctness of the simulation. Based on this, a set of video monitoring device is developed in the paper, which realizes the self-energy extraction of the device through the inductor pole plate and the energy extraction power supply, shoots the video of the transmission line and the surrounding environment and sends it to the remote terminal. Finally, it is experimentally determined that when the video monitoring device is applied at voltage level at 110 kV, the duration of a single video received by the remote terminal is 2.2 min, and the video interval is 54.9 min.

Key words: high-voltage electric field induction energy extraction; energy extraction power supply; inductor pole plate; transmission line; video monitoring

0 引言

随着社会经济的发展,电力网络日益复杂,其

中输电线路是影响电力系统安全运行的关键因素之一。由于输电线路大多暴露在空气中,存在很大的安全隐患,如在低温雨雪天气下,输电线路可

收稿日期:2024-05-15; 修回日期:2024-08-03

基金项目:国家电网有限公司科技项目(面向能源互联网自供电传感关键技术研究)。

Project Supported by Science and Technology Project of the State Grid Corporation of China(Research on Key Technologies of Self-powered Sensing for Energy Internet).

能会出现雨淋或覆冰现象, 导致线路和杆塔过载^[1-3]; 在大风天气下, 输电线路会发生舞动, 对杆塔、金具等硬件造成损伤^[4-5]。随着智能电网的建设, 输电线路在线监测技术得到了快速发展^[6-8]。因此, 如果能对输电线路及周围环境进行在线视频监控并发送到远程终端, 那么将有利于电网工作人员及时发现输电线路运行中的潜在问题, 或者当故障发生后可以通过视频判断故障发生的原因, 快速解决问题, 从而保障电力系统的安全运行。

供电电源是保证在线监测设备稳定运行的关键, 由于输电线路所处地域环境的特殊性和复杂性, 其电源配置存在很大的难度^[9-11]。近年来不少学者提出了基于太阳能、风能、磁场、电场等能量收集技术, 以求解决输电线路在线监测设备的供电问题^[12]。然而, 太阳能、风能具有受地域和环境影响大、夜间无法工作、维护困难等缺点, 一般和其他取能方式混合使用^[13]。磁场取能虽能够获得较大取能功率, 但作为能量来源的磁场由线路电流决定^[14], 电流的不稳定将直接导致取能功率的不稳定, 存在供电死区和传感器及取能电路发热严重等问题^[15]。与前面几种取能方式相比, 电场感应取能技术是一种基于线路交流电压的非接触取能技术, 具有很高的稳定性和安全性, 且受电力线工况和环境影响很

小, 近年来发展迅猛^[16-22]。

综上, 文中提出一种输电线路视频监控装置, 通过电场感应取能技术实现监测装置的自取能, 拍摄输电线路及周围环境视频并发送到远程终端。文中研究了感应极板的尺寸对位移电流的影响, 并提出了一种基于电场感应取能技术的取能电源。最后在实验室条件下测试了应用在 110 kV 的视频监测装置的工作情况。实验结果表明, 文中提出的视频监控装置设计方案可为高压输电线路其他在线监测设备的设计提供参考。

1 视频监控装置整体方案设计

视频监控装置整体方案见图 1, 主要由安装在绝缘子上的感应极板及位于感应极板内部的取能电源、电压监测电路、视频监控与无线传输电路构成。其中, 视频监控与无线传输电路包括 DC/DC 变换器、控制主板、4G 通讯板、摄像头模组, DC/DC 变换器用于给控制主板、4G 通讯板和摄像头模组提供所需电压和能量, 摄像头模组用来拍摄视频并将数据送至控制主板, 控制主板主要用来控制摄像头模组工作并对接收到的视频数据进行处理, 控制 4G 通讯板将数据发送到远程终端, 4G 通讯板则用来连接 4G 信号, 实现远程通讯功能。

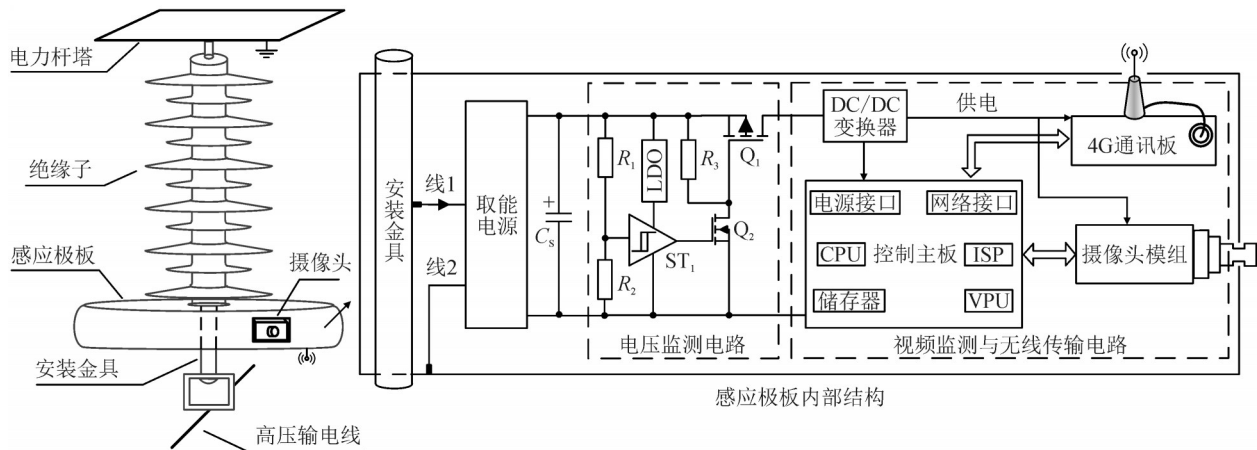


图1 视频监控装置整体方案

Fig. 1 Overall program of video monitoring devices

感应极板采用中空圆筒状结构, 安装在绝缘子的高压输电线侧, 其电场感应取能原理见图 2。感应极板与地(电力杆塔)之间存在寄生电容 C_p , 取能电源与 C_p 串联在高压输电线与地之间形成导电回路, 并产生位移电流 i , 其中 U_p 为高压输电线对地电压, U_{p1} 为感应极板对地电压, U_{p2} 为取能电源输入端电压。图 1 中感应极板的主要作用是产生 C_p , 从而产生位移电流 i 作为视频监控装置的能量输入来源。此外, 感应极板还兼具充当均压环改善输电线

周围的电场分布、充当屏蔽罩起到电磁屏蔽、挡鸟和防污秽等功能。

在感应极板内部, 取能电源的输入端线 1(对应图 2 中的线 1)和线 2(对应图 2 中的线 2)分别接在安装金具(导体, 与高压输电线相连)和感应极板内壳上, 流过两者的位移电流 i 通过取能电源为超级电容器 C_s 进行充电, C_s 则主要为视频监控与无线传输电路提供能量。由于视频监控与无线传输电路的功率较大, 取能电源无法使此部分电路连续工作,

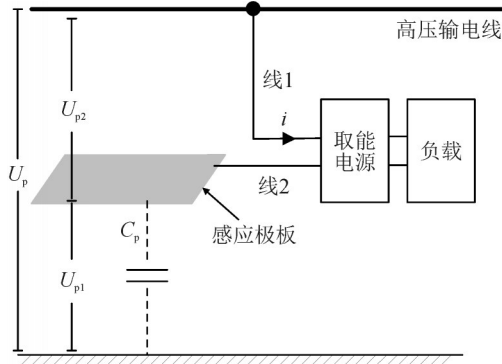


图2 图1对应的电场感应取能原理

Fig. 2 Corresponding electric field induction energy extraction principle

因此提出视频监控与无线传输电路的间歇式工作方案。增加电压监测电路,监测 \$C_s\$ 电压 \$U_s\$, \$U_s\$ 变化曲线见图3,当 \$U_s\$ 上升到 \$U_{s2}\$ 时,电压监测电路中的施密特触发器 \$ST_1\$ 输出高电平, \$Q_2\$ 导通,从而使 \$Q_1\$ 导通,视频监控与无线传输电路开始工作,此时 \$U_s\$ 下降,当 \$U_s\$ 下降至 \$U_{s1}\$ 时, \$ST_1\$ 输出低电平, \$Q_2\$ 关断, \$Q_1\$ 的栅源电压在泄放电阻 \$R_3\$ 的作用下变为 0 V,从而使 \$Q_1\$ 关断,视频监控与无线传输电路停止工作, \$U_s\$ 再次上升。显然,取能电源的输出功率越高,拍摄视频间隔 \$\Delta t_1\$ (\$\Delta t_1 = t_3 - t_2\$) 越短,而输出功率不仅与取能电源本身相关,还与取能电源的输入即位移电流有关,上文也已提高感应极板的主要作用是产生位移电流,因此文中接下来将对感应极板和取能电源进行研究和设计。

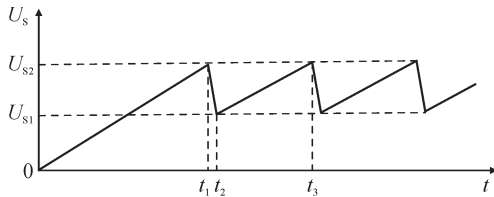


图3 视频监控装置工作时 \$U_s\$ 的变化曲线

Fig. 3 Variation curve of \$U_s\$ when the video monitoring device is working

2 感应极板设计及分析

感应极板的尺寸主要影响图2中的 \$C_p\$, 进而影响到位移电流 \$i\$, 由于与 \$U_{p1}\$ 相比 \$U_{p2}\$ 可以忽略不计, 因此 \$i\$ 的表达式见式(1), 当 \$U_p\$ 恒定时, \$i\$ 与 \$C_p\$ 成正比

$$i = \omega U_p C_p \quad (1)$$

式(1)中, \$\omega\$ 是电压角频率, rad/s。

由于感应极板的高度 \$h\$ 受限于安装金具的长度, \$h\$ 的变化对 \$C_p\$ 的影响可以忽略不计, 因此文中主要研究 \$C_p\$ 与感应极板的半径 \$r\$ 的关系。在 Comsol 仿真软件中搭建的“线路(transmission line)—绝缘子

(electrical insulator)—感应极板(induction plate)”有限元模型见图4, 以下简记为“T-E-I”模型, 其尺寸见表1。

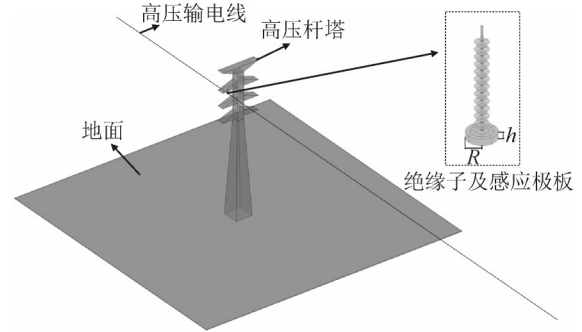


图4 T-E-I模型

Fig. 4 T-E-I model

表1 T-E-I模型相关尺寸

Table 1 T-E-I model related dimensions

参数	数值	参数	数值
塔全高/m	41.8	绝缘子长度/m	1.2
呼高/m	28.5	绝缘子伞数	13
导线横担长/m	9.2	导线截面积/mm ²	70

文中所研究的电压等级为 110 kV, 对地电压 \$U_p = 63.5\$ kV。\$C_p\$ 与感应极板半径 \$r\$ 的关系曲线见图5, 右 \$y\$ 轴为左 \$y\$ 轴 \$C_p\$ 根据式(1)计算的对应的位移电流 \$i\$, 从图5可以看出, \$C_p\$ 和 \$r\$ 呈线性关系, 当 \$r = 150\$ mm 时, \$C_p = 6.24\$ pF, 对应的 \$i = 124.5\$ mA, 选取此时的 \$r\$ 值为设计值。

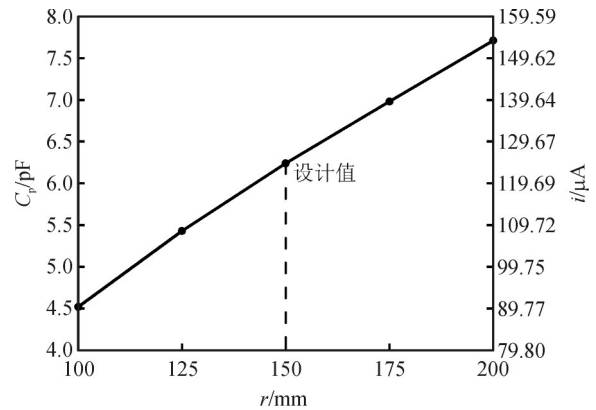


图5 寄生电容 \$C_p\$ 随感应极板半径 \$r\$ 的变化情况

Fig. 5 Variation of parasitic capacitance \$C_p\$ with radius \$r\$ of the induced pole plate

当 \$r = 150\$ mm 时, 实测感应极板对地电压 \$U_p\$ 与流过感应极板的位移电流 \$i\$ 的关系曲线见图6, \$i\$ 与 \$U_p\$ 成正比, 根据拟合线斜率可计算出实际的感应极板与地之间的寄生电容 \$C_p = 6.79\$ pF, 与仿真得到的 6.24 pF 基本相符, 验证了感应极板仿真和设计的正确性。根据图6曲线, 可以计算出当 \$U_p = 63.5\$ kV 时, \$i = 135.5\$ mA。

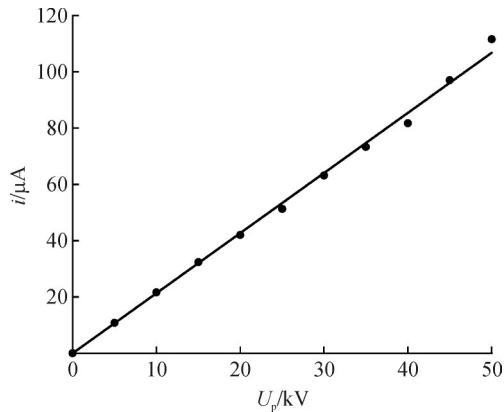


图6 感应极板半径150 mm时*i*与 U_p 的实测关系曲线

Fig. 6 Measured curves of i versus U_p at 150 mm radius of the induction pole plate

3 取能电源设计及分析

3.1 功率电路设计

功率电路原理图见图7(a),由全波整流电路、级联能量转换电路和降压斩波电路构成。全波整流电路用来将位移电流*i*整流为直流 I_{DC} 。级联能量转换电路由*n*级电路级联构成,取能电容 $C_1 \sim C_n$ 先通过串联的方式将恒流源的能量储存起来,再通过并联的方式将储存的能量转换到稳压电容 C_e 中。级联能量转换电路可通过级联的方式提高取能功率,以此来适应不同的应用场合。降压斩波电路通过对 Q_{n1} 和 Q_{n2} 的互补控制,及时将 $C_1 \sim C_n$ 转换到 C_e 的能量转换至储能电容 C_s 中,从而稳住 C_e 的电压。

在级联能量转换电路中,HFCC为第1级电路的控制电路,LFCC为第2~*n*级电路的控制电路。级联能量转换电路工作时, I_{DC} 对取能电容 $C_1 \sim C_n$ 进行串联充电,当 $C_2 \sim C_n$ 两端电压达到各级的放电阈值时,LFCC控制相应的 $Q_{22} \sim Q_{nn}$ 导通,此时 $C_2 \sim C_n$ 并联在HFCC两端,HFCC控制 Q_{11} 进行高频开关动作,实现 $C_1 \sim C_n$ 的并联脉冲放电。随着 U_e 的升高, $C_1 \sim C_n$ 的并联放电时间变长,流过 L_1 的电流 I_L 的峰值变小,控制电路的损耗变大,不利于电路设计和分析。因此文中增加降压斩波电路稳住 U_e ,使级联能量转换电路在每次 $C_1 \sim C_n$ 放电过程中的工作状态都相同,便于电路最优设计和控制。在降压斩波电路中,使用TPS65270稳压电源芯片,内部集成同步BUCK电路,采用电流峰值控制,使用到的主要引脚有输入引脚VIN,地引脚GND,参考引脚VCC,反馈引脚FB,使能引脚EN。通过电压偏置电路将 U_e 反向并偏置为正压后送入FB引脚以此来稳住 U_e 。为了减小TPS65270的功耗,添加使能逻辑电路连接至TPS65270的使能引脚EN,只有当A为高电平或者

U_e 达到上限时,EN才为高电平,TPS65270工作,其余时间TPS65270处于低功耗模式,几乎不消耗能量。

3.2 控制电路设计

控制电路见图7(b)。HFCC由供电模块、阈值控制模块、开关控制模块和高频驱动输出模块4个部分构成,通过检测 U_1 的大小,控制输出恒定占空比的PWM。供电模块为HFCC提供能量,产生 U_{cc1} 和 U_{cc2} ,其中 Q_{n1} 为电压跟随器,在 U_1 上升的过程中, U_{cc1} 按比例跟随 U_1 上升,从而实现 C_{n1} 能量的补充。阈值控制模块通过施密特触发器 $ST_{1,1}$ 判断 U_1 是否达到取能电容的充放电阈值, $ST_{1,1}$ 的输出信号A一方面作用于图7(a)中的使能逻辑电路,另一方面通过 Q_{n2} 与 Q_{n3} 组成的取反逻辑电路作用于开关控制模块。开关控制模块根据阈值控制模块的输出对 Q_{n4} 和 Q_{n5} 进行控制,其中, Q_{n4} 用于切断或投入对后级模块的供电,以此来减小HFCC的损耗, Q_{n5} 用于及时泄放掉 C_{n2} 的电压,防止高频驱动输出模块逻辑错误。高频驱动输出模块中 R_{n5} 、 C_{n2} 、 R_{n6} 、 Q_{n6} 和 $ST_{1,2}$ 构成恒定占空比的PWM发生电路, $ST_{1,2}$ 输出的PWM通过驱动器DRIVE放大后作用于 Q_{n1} 的栅极。

LFCC与HFCC的工作原理大致相同,读者可自行分析其工作过程,不再赘述。主要区别在于LFCC控制输出持续高电平的驱动信号。

3.3 取能电源的工作过程

以取能电源仅含第1级电路(简称一级电源), C_s 充电($U_s < U_{S2}$)为例,详细分析取能电源的工作过程和原理。一级电源工作时重要电参量的变化曲线见图8,从上至下依次为图7(a)中 C_1 电压 U_1 ,图7(b)中 $ST_{1,1}$ 的输出电压 U_A 、图7(a)中TPS65270的EN引脚电压,图7(b)中HFCC的DRIVE输出电压 U_{G1} ,图7(a)中 C_e 电压 U_e 、 C_s 电压 U_s 。

$0 \sim t_1$: 0时刻,取能电源处于初始状态,在 I_{DC} 的作用下, U_1 上升。

$t_1 \sim t_2$: t_1 时刻, U_1 达到HFCC的放电阈值 U_{1max} ,图7(b)中 $ST_{1,1}$ 输出电压 U_A 为高电平,一方面经取反逻辑后变为低电平,使得 Q_{n4} 导通,为高频驱动输出模块供电, Q_{n5} 关断,允许 C_{n2} 电压变化,使得高频驱动输出模块输出电压 U_{G1} 为PWM波。另一方面通过图7(a)的使能逻辑电路使TPS65270的EN引脚为高电平,使TPS65270工作。在此过程中, C_1 的能量转换至 C_e 中, U_1 下降, U_e 上升,但由于 U_e 小于稳压值 U_{e1} ,即使TPS65270被使能,但 Q_{n1} 始终关断, U_s 一直为零。

需要注意,在 U_{G1} 为高电平时, Q_{n1} 管导通,此时GND与GND₁被短路,处于同一电位,因此信号A可以使使能逻辑电路输出高电平。但是当 U_{G1} 为低电

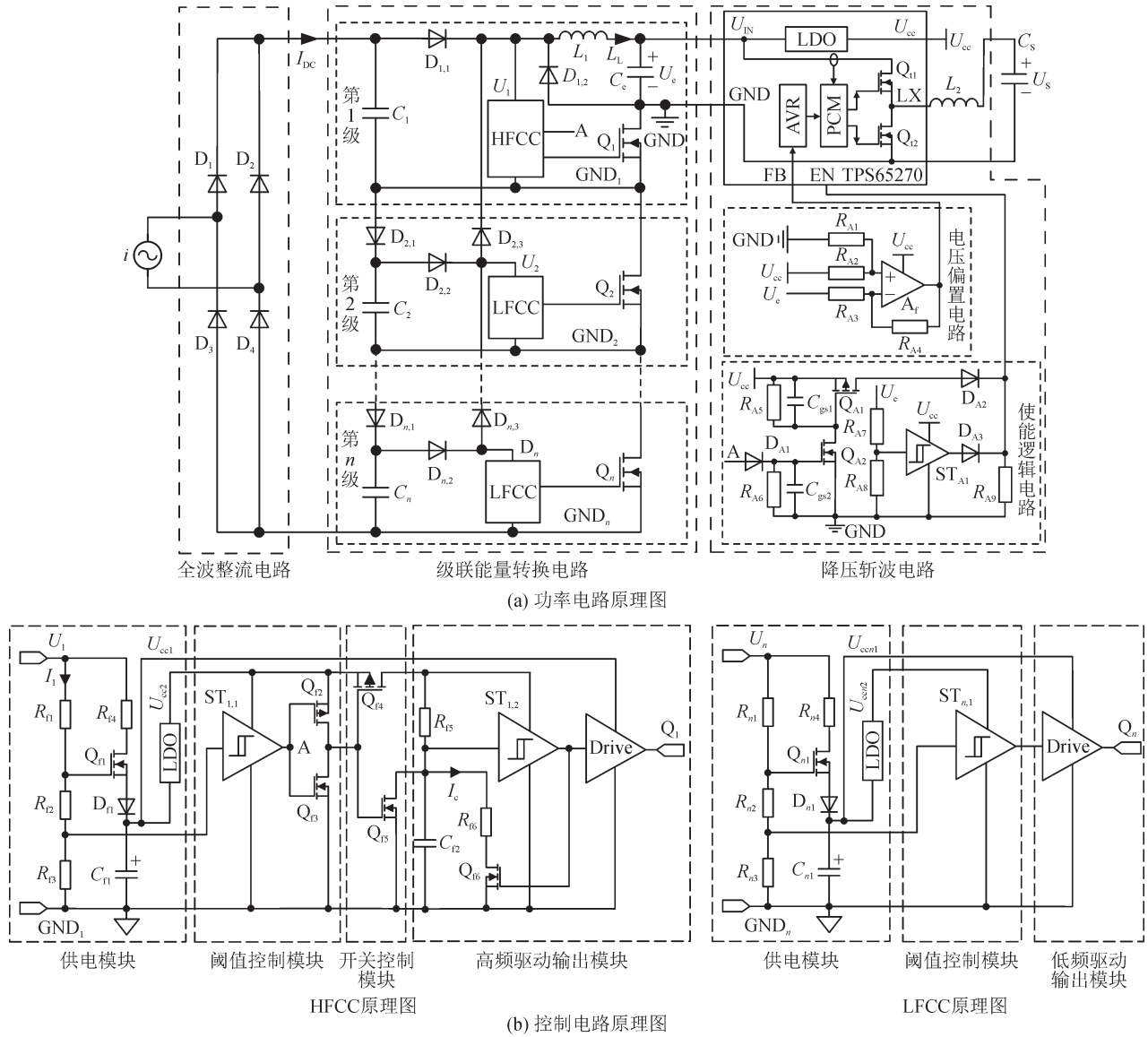


图7 取能电源原理图

Fig. 7 Energy extraction power supply schematic diagram

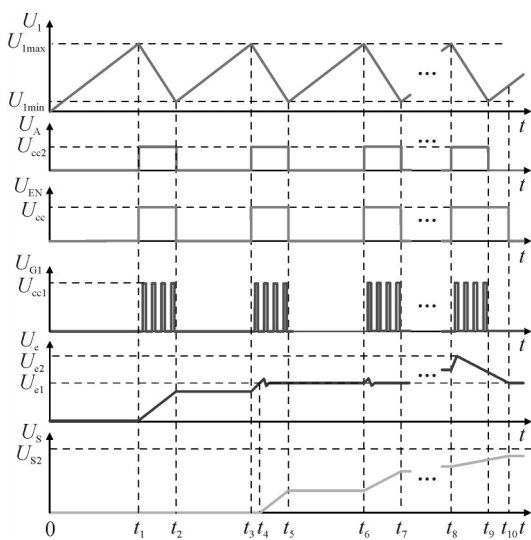


图8 一级电源参量变化曲线

Fig. 8 Primary power supply parameter change curve

平时, Q_1 截止, GND 的电位大于 GND_1 , 此时二极管 D_{A1} 处于截止状态, Q_{A2} 的栅源电压 U_{gs2} 在 R_{A6} 的作用下缓慢下降, 当 U_{gs2} 小于 Q_{A2} 的阈值电压 U_{th2} 时, Q_{A2} 关断。然后 Q_{A1} 的栅源电压 U_{gs1} 在 R_{A5} 的作用下缓慢下降, 当 U_{gs1} 小于 Q_{A1} 的阈值电压 U_{th1} 时, Q_{A1} 关断, EN 引脚为低电平。为了保证在 $t_1 \sim t_2$ 内 EN 引脚始终为高电平, 需要 R_{A5} 、 C_{gs1} 、 R_{A6} 、 C_{gs2} 满足式(2)

$$R_{A6} C_{gs2} \ln \frac{U_{cc2}}{U_{th2}} + R_{A5} C_{gs1} \ln \frac{U_{cc}}{U_{th1}} > \frac{(1-D)}{f} \quad (2)$$

式(2)中: D 为 PWM 占空比; f 为 PWM 频率。

$t_2 \sim t_3$: t_2 时刻, U_1 达到 HFCC 的充电阈值 U_{1min} , $ST_{1.1}$ 输出信号 A 变为低电平, 一方面通过图 7(a) 的使能逻辑电路使 TPS65270 的 EN 引脚为低电平, TPS65270 进入低功耗模式, 减小功率电路的损耗。另一方面经取反逻辑后变为高电平, 使得 Q_{14} 关断,

切断高频驱动输出模块的供电,减小控制电路的损耗。需要注意,即便切断高频驱动输出模块的供电,该模块电源电容的存在使得其电源电压变化是个连续的过程,可能导致逻辑错误而误发PWM或者长时间输出高电平,为此增加 Q_{15} ,当 Q_{14} 关断时, Q_{15} 导通,将 C_{12} 短路,从而确保 $ST_{1,2}$ 输出低电平,保证逻辑的正确性。

$t_3 \sim t_4$: t_3 时刻, $U_1 = U_{1max}$, U_c 上升,同样的由于 $U_c < U_{e1}$, TPS65270不工作, U_s 一直为零。

$t_4 \sim t_5$: t_4 时刻, $U_c = U_{e1}$, 同时 EN 引脚为高电平, TPS65270开始工作, 将 $C_1 \sim C_n$ 的能量转换到 C_s 中, U_c 电压保持恒定, U_s 上升。

$t_5 \sim t_6$: 与 $t_2 \sim t_3$ 过程相同。

$t_6 \sim t_7$: t_6 时刻, $U_1 = U_{1max}$, 此时 $U_c = U_{e1}$, EN 高电平, TPS65270 将 U_c 稳定在 U_{e1} , 将 $C_1 \sim C_n$ 的能量转换到 C_s 中, U_s 上升。

$t_7 \sim t_8$: 若 TPS65270 无法保持 U_c 的稳定, 则经过多次 $C_1 \sim C_n$ 的放电过程后, U_c 的电压将升高。

$t_8 \sim t_{10}$: 若 TPS65270 无法保持 U_c 的稳定, 则当 U_c 达到上限 U_{e2} 时, 使能逻辑电路中 ST_{A1} 输出高电平。即便 t_9 时刻, $U_1 = U_{1min}$, U_A 为低电平, 但使能引脚 EN 仍为高电平, TPS65270 将 C_c 的能量转换到 C_s 中, 直至 t_{10} 时刻 U_c 下降至 U_{e1} , ST_{A1} 输出低电平使 EN 引脚变为低电平, TPS65270 停止工作。

综上,文中取能电源具有如下特点:

- 1)通过级联的方式提高取能功率,可以根据功率要求灵活调整级联级数。
- 2)采用降压斩波电路稳住 C_c 电压,使级联能量转换电路在取能电容每次充放电过程中的工作状态相同,便于电路设计和器件选型。
- 3)增加使能逻辑电路,在不需要 TPS65270 工作时,使其进入低功耗模式,以此来减小功率电路损耗。
- 4)HFCC 采用恒定占空比控制,控制电路简单,可靠性高。

4 视频监测装置实验测试

在实验室搭建的高压实验平台见图9,其由单相调压器 T_{adj} , 升压变压器 T_1 、 T_2 , 整流硅堆 D_0 、 D_1 , 限流电阻 R_i , 直流微安表, 取能电源与电压监测电路、超级电容器 C_s , 视频监测与无线传输电路构成。 T_1 、 T_2 与 D_0 、 D_1 构成变压器中心抽头的全波整流电路, R_i 用来将整流后的直流电压转换成直流电流 I_{DC} 。取能电源与电压监测电路实物见图10,取能电源采用四级级联,相关参数见表2,其中标号与图7对应。

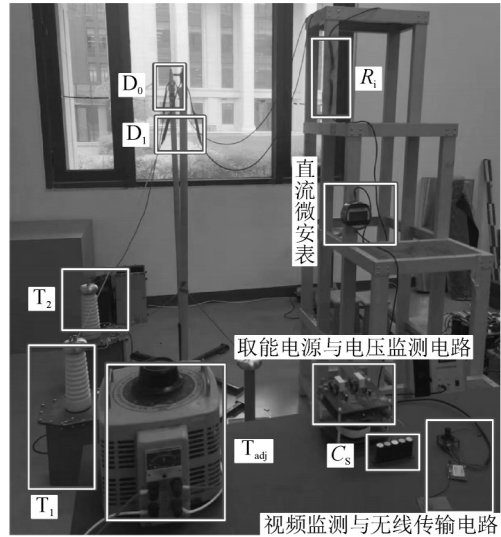


图9 高压实验平台

Fig. 9 High-voltage experiment platform

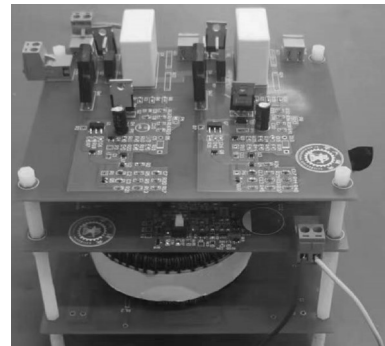


图10 取能电源与电压监测电路实物图

Fig. 10 Physical diagram of energy extraction power supply and voltage monitoring circuit

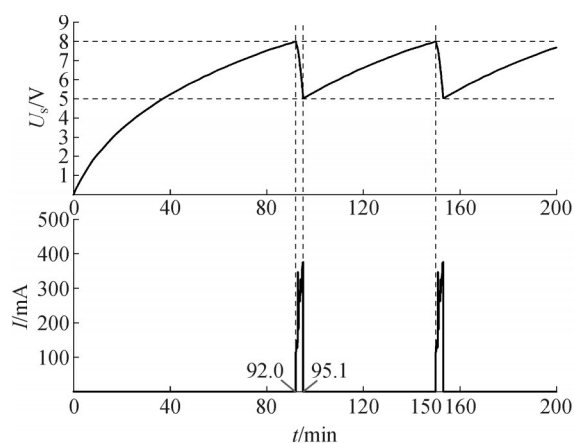
表2 取能电源与电压监测电路相关参数

Table 2 Parameters related to energy extraction power supply and voltage monitoring circuit

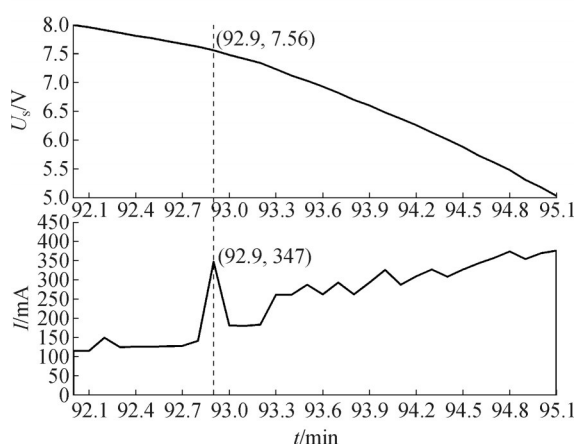
标号	参数
L_1/mH	10
C_c/mF	2 200
U_c/V	稳压值12, 上限15
L_2/mH	4.7
C_s/F	16.4
U_s/V	5~8
f/kHz	2
$D/\%$	3

由第2章可知,当 $U_p = 63.5$ kV 时,实际产生的位移电流 $i = 135.5$ mA, 调节 T_{adj} , 使直流微安表示数 $I_{DC} = 0.9i = 122$ mA, 以此来等效 110 kV 下感应极板产生的位移电流,并在该位移电流输入下,观察视频监测装置的工作情况。在取能电源的作用下, C_s 充放电电压 U_s 及视频监测与无线传输电路消耗电流 I 波形

见图11,由图11(a)可知,取能电源把 U_s 从0 V充到8 V需要92 min,随后 $I>0$,视频监测与无线传输电路工作, U_s 下降,历经3.1 min后, U_s 下降至5 V, $I=0$,视频监测与无线传输电路停止工作, U_s 再次上升,历经54.9 min后 U_s 再次达到8 V,视频监测与无线传输电路再次工作,从而完成第1章提出的间歇式工作方案。图11(b)为图11(a)在 $92\text{ min}<t<95.1\text{ min}$ 的 U_s 和 I 波形,在这个阶段,视频监测与无线传输电路工作, U_s 下降, I 有波动,但整体呈上升趋势。当 $t=92.9\text{ min}$ 时, I 电流剧增到347 mA,这是因为此时视频监测与无线传输电路连接到4G信号,开始拍摄视频并将数据发送到远程终端而产生的瞬时电流,此时 U_s 从8 V下降至7.56 V。从图11(b)中可以得出,视频监测与无线传输电路工作时长为3.1 min,其中搜索4G信号时长0.9 min,拍摄视频时长2.2 min。



(a) U_s 和 I 在 C_s 多个充放电周期波形



(b) U_s 和 I 在 C_s 放电阶段波形

图11 视频监测装置工作时 U_s 和 I 波形

Fig. 11 U_s and I waveforms during video monitoring device operation

综上,文中在实验室条件下测试了应用在110 kV电压等级下的视频监测装置的工作情况,远程终

端接收到的单次视频时长为2.2 min,视频间隔为54.9 min。

5 结论

文中提出了用于高压输电线路的视频监测装置整体设计方案,并对实现装置自取能的感应极板及取能电源进行分析设计和实验,得出以下结论。

1)感应极板安装在高压输电线路侧,其电位略小于高压输电线。感应极板与地之间存在寄生电容,在感应极板高电位的作用下,产生微安级的位移电流。当感应极板半径为150 mm时,感应极板与地之间的寄生电容为6.79 pF,在110 kV电压等级的输电线路可产生135.5 mA的位移电流。

2)提出了一种基于电场感应取能技术的取能电源,将输入的位移电流转换为电压输出为视频监测与无线传输电路提供所需电压和能量。利用降压斩波电路稳住 C_s 电压,从而简化级联能量转换电路的设计和控制。增加使能逻辑电路,减小降压斩波电路的功耗,提高功率电路的效率。在110 kV电压等级、四级级联取能电源下,视频监测装置向远程终端发送的单次视频时长2.2 min,视频间隔54.9 min。

文中对感应极板及取能电源的研究除了用于高压输电线视频监测装置之外,还可用于其他在线监测设备上,简而言之,感应极板用来产生位移电流,而取能电源则将位移电流转换为电压为监测设备供电。而当监测设备的功率较大时,文中提出的间歇式监测方案及设计可供读者借鉴。

参考文献:

- [1] 邹建章,张宇,胡京,等. 输电线路覆冰拆地线后避雷器选型问题研究[J]. 电瓷避雷器,2022(3):26-31.
ZOU Jianzhang, ZHANG Yu, HU Jing, et al. Selection of lightning surge arrester in the event of removing ground wires from iced transmission line[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(3):26-31.
- [2] HUANG X, LI H, ZHU Y. Short-term ice accretion forecasting model for transmission lines with modified time-series analysis by fireworks algorithm[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2018, 12(5): 1074-1080.
- [3] 李先锋,徐志钮,郭一帆,等. 基于光纤传感的输电线路覆冰监测技术应用评述[J]. 华北电力大学学报(自然科学版),2023,50(2):22-34.
LI Xianfeng, XU Zhiniu, GUO Yifan, et al. Review of application of icing monitoring technology for transmission

- lines based on optical fiber sensing[J]. Journal of North China Electric Power University, 2023, 50(2):22-34.
- [4] 袁敬中, 潘国兵, 谢景海, 等. 基于多模空间距离权重融合的高压架空输电线舞动监测模块的设计[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24):173-179.
YUAN Jingzhong, PAN Guobing, XIE Jinghai, et al. Design of a galvanic monitoring module for high-voltage overhead transmission lines based on the fusion of multi - mode spatial distance weights[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24):173-179.
- [5] 王欣欣, 赵建平, 邓 慰, 等. 跨越高速铁路输电线路绝缘子振颤分析[J]. 电瓷避雷器, 2022(6):174-179.
WANG Xinxin, ZHAO Jianping, DENG Wei, et al. Vibration behavior of insulators of transmission line when crossing g - series high - speed railway[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(6):174-179.
- [6] HOSSEINIMEHR T, TABESH A. Magnetic field energy harvesting from AC lines for powering wireless sensor nodes in smart grids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(8):4947-4954.
- [7] YUAN Sheng, HUANG Yi, ZHOU Jiafeng, et al. Magnetic field energy harvesting under overhead power lines[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(11): 6191-6202.
- [8] 戴 栋, 张 敏, 赵东生, 等. 输电线路在线监测装置研制及其通信组网应用[J]. 高电压技术, 2015, 41(12):3902-3908.
DAI Dong, ZHANG Min, ZHAO Dongsheng, et al. On-line monitoring device for transmission lines and its communication network application[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(12):3902-3908.
- [9] 朱永灿, 黄新波, 张冠军, 等. 输电线路在线监测设备供电电源应用分析[J]. 高压电器, 2018, 54(7):231-236.
ZHU Yongcan, HUANG Xinbo, ZHANG Guanjun, et al. Application research of the power supply for transmission line on-line monitoring devices[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(7):231-236.
- [10] QU Jialong, HE Liangxi, TANG Niang, et al. Wireless power transfer using domino-resonator for 110 kV power grid online monitoring equipment[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(11):11380-11390.
- [11] BAGDADEE H A, HOQUE Z M, ZHANG L. IoT based wireless sensor network for power quality control in smart grid[J]. Procedia Computer Science, 2020(167):1148-1160.
- [12] 陈 赦, 胡东阳, 汪 汎, 等. 电网状态监测装置自取能技术综述[J]. 高电压技术, 2023, 49(5):2077-2089.
CHEN She, HU Dongyang, WANG Feng, et al. Review on energy - harvesting technology for power grid condition monitoring device[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5):2077-2089.
- [13] 樊汝森, 谢方明, 钟振东, 等. 太阳能供电系统的多目标优化设计方法研究[J]. 电源技术, 2017, 41(6):874-877.
FAN Rusen, XIE Fangming, ZHONG Zhendong, et al. Research on multi-objective optimization design method of solar power supply system[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2017, 41(6):874-877.
- [14] 许晨进, 王 维, 汪 鹤, 等. 输电线路感应取能电源宽流带拓扑性能对比分析与优化[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(22):7631-7639.
XU Chenjin, WANG Wei, WANG He, et al. Topology comparison and optimization design of energy harvester based on wide-range current overhead AC transmission line [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(22):7631-7639.
- [15] 柳百毅, 陈 为, 李 榜, 等. 基于感应取能的微功率能量收集器[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5):1474-1484.
LIU Baiyi, CHEN Wei, LI Bang, et al. Micro-power energy harvester based on electromagnetic induction[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5):1474-1484.
- [16] RODRÍGUEZ J C, HOLMES D G, MCGRATH B, et al. A self-triggered pulsed-mode flyback converter for electric-field energy harvesting[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6(1):377-386.
- [17] ZANGL H, BRETTERKLIEBER T, BRASSEUR G, et al. A feasibility study on autonomous online condition monitoring of high-voltage overhead power lines[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(8): 1789-1796.
- [18] GUO F, HAYAT H, WANG J, et al. Energy harvesting devices for high voltage transmission line monitoring[C]// 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting. USA:IEEE, 2011:1-8.
- [19] VAN SCHALKWYK J A, HANCKE G P. Energy harvesting for wireless sensors from electromagnetic fields around overhead power lines[J]. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2012, 41(3):1128-1135.
- [20] RODRÍGUEZ J C, HOLMES D G, MCGRATH B P, et al. Maximum energy harvesting from medium voltage electric-field energy using power line insulators[C]//2014 Australasian Universities Power Engineering Conference(AUPEC). Australia:IEEE, 2014:1-6.
- [21] ZENG X, YANG Z, WU P, et al. Power source based on electric field energy harvesting for monitoring devices of high - voltage transmission line[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(8):7083-7092.
- [22] 骆一萍, 曾翔君, 雷永平, 等. 基于放电法的高压电场感

- on vibration sensing properties of metal core PVDF fiber with symmetrical electrode[J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2017(12): 110-113.
- [6] 刘佳佳. GIS暂态过电压对电子式互感器电磁干扰影响及其抑制研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学, 2022.
LIU Jiajia. Research on the influence of GIS transient overvoltage on electromagnetic interference of electronic transformers and its suppression[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2022.
- [7] 陈维江, 赵军, 边凯, 等. GIS变电站开关操作瞬态电磁骚扰研究进展[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(16): 4935-4948.
CHEN Weijiang, ZHAO Jun, BIAN Kai, et al. Research progress on transient electromagnetic disturbance due to switching operations in GIS substation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2019, 39(16): 4935-4948.
- [8] GARCÍA Y R, CORRES J M, JAVIER G. Vibration detection using optical fiber sensors[J]. *Journal of Sensors*, 2010 (1): 1-12.
- [9] VILLATORO J, ANTONIO-LOPEZ E, SCHÜLZGEN A, et al. Miniature multicore optical fiber vibration sensor[J]. *Optics Letters*, 2017, 42(10): 2022-2025.
- [10] BIN Ma, JIAN Xu. Experimental research of coupling fiber-optic sensor for vibration measurement[C]//2010 Symposium on Photonics and Optoelectronics. China: IEEE, 2010: 1-4.
- [11] PAN Chao, LIU Xiaorui, ZHU Hui, et al. Distributed optical fiber vibration sensor based on sagnac interference in conjunction with OTDR[J]. *Optics Express*, 2017, 25(17): 20056-20070.
- [12] DENG Ming, ZHANG Tianhe, NAN Xinhao, et al. Enhanced sensitivity of optical fiber vibration sensor based on radio-frequency Michelson interferometer[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(24): 6079-6082.
- [13] SUI Guanghui, LIU Huanhuan, PANG Fufei, et al. Broadband acoustic vibration sensor based on cladding-mode resonance of double-cladding fiber[J]. *Photonic Sensors*, 2019, 9(3): 230-238.
- [14] LIU Yingfang, WANG Fang, PENG Yufeng, et al. Optical fiber vibration sensor with wide detection range based on STDS structure designed by mach-zehnder interferometer[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2023, 23(22): 27351-27360.
- [15] DONG Miaoyun, TONG Zhengrong, ZHANG Weihua, et al. Temperature-insensitive sensor for glucose brix measurement based on compact spindle-shaped structure with two-mode fiber[J]. *Optoelectronics Letters*, 2022, 18(12): 737-742.
- [16] 刘洋, 章子潇, 赵贤根, 等. 进气流量对滑动电弧放电分解CO₂的瞬态电-光-热特性和转化性能的影响[J/OL]. *电工技术学报*, 1-13[2024-05-07]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.231860>.
LIU Yang, ZHANG Zixiao, ZHAO Xiangen, et al. The effect of inlet flow rate on the transient electrical-optical-thermal characteristics and conversion performance of CO₂ decomposition in gliding arc discharges[J/OL]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 1-13[2024-05-07]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.231860>.
- [17] LUO Weixuan, CHEN Yao, XIAO Anping, et al. Three-core fiber-based temperature-insensitive twist sensor[J]. *Optics Communications*, 2024(554): 130229.

郝宇亮(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为高压电器产品检测技术(E-mail: 13572521201@163.com)。

梁新钰(2002—), 男, 硕士, 主要研究方向为电力设备在线监测技术(E-mail: 358454297@qq.com)。

李宣健楠(1992—), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为高压电器产品检测技术(E-mail: 13991196423@163.com)。

张孟炜(2002—), 男, 硕士, 主要研究方向为绝缘检测技术(E-mail: zmw0214@stu.xjtu.edu.cn)。

刘鹏(1979—), 男, 博士, 主要研究方向为高电压技术(E-mail: pengliu@xjtu.edu.cn)。

王青于(1991—), 女, 博士, 主要研究方向为高电压技术(E-mail: wqy.1991624@xjtu.edu.cn)。

陈宸(1991—), 女, 博士, 主要研究方向为绝缘检测技术(E-mail: chenchen613@xjtu.edu.cn)。

(上接第163页)

应取能技术[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(8): 113-119.

LUO Yiping, ZENG Xiangjun, LEI Yongping, et al. High voltage electric-field induction energy-acquisition technology based on discharge method[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(8): 113-119.

程钰(1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为传感器取能及大功率电源等电力电子技术(E-mail: 3121104002@stu.xjtu.edu.cn)。

曾翔君(1976—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为大功率风电系统中功率变换和新能源等电力电子技术(通信作者)(E-mail: zengxj@mail.xjtu.edu.cn)。

马朝瑜(2001—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为传感器取能及开关电源等电力电子技术(E-mail: mzy_xjtu@163.com)。

骆一萍(1975—), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为智能仪器设计及工业自动化技术(E-mail: luoyip@mail.xjtu.edu.cn)。