

夏竹青, 吴细秀, 苏超, 等. 高压输电线路感应电场能量收集新方法研究[J]. 电波科学学报, 2020, 35(5): 699-707. DOI: 10.13443/j. cjors. 2019072501

XIA Z Q, WU X X, SU C, et al. Novel energy harvesting method-using capacitance inducing voltage to harvest energy under the transmission line [J]. Chinese journal of radio science, 2020, 35(5): 699-707. (in Chinese). DOI: 10.13443/j. cjors. 2019072501

高压输电线路感应电场能量收集新方法研究

夏竹青¹ 吴细秀¹ 苏超² 李超群¹ 唐金锐¹

(1. 武汉理工大学自动化学院, 武汉 430000; 2. 广东电网有限责任公司清远供电局, 清远 511500)

摘要 针对现有能量收集装置存在易受天气影响、安装复杂、寿命短、绝缘要求高等问题, 文中提出采用电容收集高压输电线路来感应电场能量的方法。这种与高压输电线路无直接电器连接的方法, 具有供能稳定、能源清洁、操作简便等特点。根据该方法收集能量的原理, 建立了相应的等效电路, 分析了该方法收集能量的特点。在此基础上, 建立了三维场计算模型, 计算了高压输电线路电场分布特性, 讨论了电容极板尺寸、放置位置、高度等对能量收集的影响。最后, 基于理论分析, 开展了电容板收集高压输电线路周围电场试验。并采用曲线拟合方式对试验数据进行了分析。理论和试验结果表明: 电容极板上的感应电压为与输电线路同相位的正弦波形, 最高感应电压幅值可达 21.98 kV; 感应电压幅值会随着距输电线路距离减小和电容极板尺寸增大而增大, 距输电线路距离对感应电压幅值影响更大。

关键词 输电线路; 电容极板; 能量收集; 电场计算; 感应电压

中图分类号 TM726

文献标志码 A

文章编号 1005-0388(2020)05-0699-09

DOI 10.13443/j. cjors. 2019072501

Novel energy harvesting method-using capacitance inducing voltage to harvest energy under the transmission line

XIA Zhuqing¹ WU Xixiu¹ SU Chao² LI Chaoqun¹ TANG Jinrui¹

(1. Wuhan University of Technology, Wuhan 430000, China;

2. Qingyuan Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid, Qingyuan 511500, China)

Abstract Aiming at the problems that existing energy harvesting devices are susceptible to weather, complicated installation, short life and high insulation requirements, the paper proposes a method for harvesting induced electric field energy of high voltage transmission line by using capacitor. This method of isolated electrical connection with high-voltage transmission lines has the characteristics of stable energy supply, clean energy and easy operation. According to the principle of harvesting energy by the method, the paper establishes the corresponding equivalent circuit and analyzes the characteristics of the energy harvested by the method. On this basis, a three-dimensional field calculation model is established, and the electric field distribution characteristics of high-voltage transmission lines are calculated. The effects of capacitance plate size, placement position and height on energy harvesting are discussed. Finally, based on theoretical analysis, the paper carried out an electric field test around the high-voltage transmission line of the capacitor plate. The test data was analyzed by curve fitting. Both theoretical and experimental results show that the induced voltage on the capacitor plate is a sinusoidal waveform with the same phase as the transmission line, and the highest induced voltage amplitude can reach 21.98 kV; the amplitude of the in-

收稿日期: 2019-07-25

联系人: 吴细秀 E-mail: wuxixiu@whut.edu.cn

duced voltage will increase as the distance from the transmission line decreases and the size of the capacitor plate increases. The distance from the transmission line has a greater influence on the amplitude of the induced voltage.

Keywords transmission line; capacitor plate; energy harvesting; electric field calculation; induced voltage

引言

随着电网智能化的不断推进,电网需监控的参数愈来愈多,在线监测装置的供电问题越来越突出^[1]. 目前常见的在线监测装置供能方式有蓄电池供能、太阳能供能、激光供能和电磁供电^[2].

蓄电池供能稳定,但是需要定期充电更换,且循环寿命偏短,存在污染环境的风险^[3];太阳能供能具有间歇性和不稳定性,能量吸收设备占用面积较大,储能设备能量密度小、效率低,储能体系还不完善^[4];激光供能是利用激光二极管电源在低压侧产生光能,经过光功率转换和 DC-DC 变换器后,为检测装置的电源提供电能,这种方式稳定性高,但是光电转换效率低,设备成本高,电源激光二极管易受到温度和电流的影响,使用不当时容易被击穿,导致高压侧电路使用寿命较短^[5];利用电磁感应原理进行供能,最典型的代表是将电流互感器置于高压输电线路上进行取能^[6],该方法取能最大的缺陷是安装过程复杂,对器件绝缘性能要求高,安装时需停电^[7],且在输电线路电流变化范围较宽时,容易造成磁路饱和,铁芯涡流过大大过热,直接危害二次电路,甚至危及人身安全^[8].

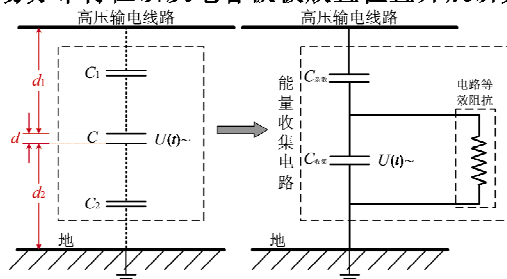
高压输电线路周围存在着大量的电场能和磁场能,且这种能量不受恶劣天气和地理环境的影响,伴随着输电线路的存在长期稳定存在. 若能将这部分能量收集起来为在线监测装置供能,则可以克服其他取能装置受天气状态影响、二次设备寿命短、安装操作复杂等缺点. 理论上收集电场能和磁场能具有同样效果,且由于采用电容收集输电线路电场能更容易实现,故论文对此方法开展研究. 目前很少有直接采用电容收集能量的文献报道. 较为通用的做法是将电容器与电压互感器串联的装置,直接从高压导线上获取电能^[9-10],本质上这种方法仍是利用了互感器的电磁感应原理进行取能,电容器只是起到了与电压互感器一次绕组的感抗进行分压的作用.

为此,本文开展了直接采用电容极板收集输电线路电场能量的研究. 根据该方法收集能量的原理,建立了相应的等效电路,分析了该方法收集能量的

特点,并在此基础上开展了相应的试验测试.

1 取能原理

本文方法是将电容极板直接放置于高压输电线路下方,电容极板收集输电线路感应电场能量的等效电路如图 1 所示. 图中 C_1 为电容极板上表面与输电线路间的杂散电容, C_2 为电容极板下表面与大地之间的杂散电容, C 为能量收集电容极板电容. 其中,杂散电容的大小与导体材料属性、形状、导体上感应电压的大小和频率都有关系^[11]. 根据平板电容计算原理计算: $C = \epsilon S / (4\pi kd)$, 其中 ϵ 为相对介电常数, S 为电容极板间正对面积, d 为极板间距, k 为静电力常量. 电容上极板距离高压线路距离为 d_1 , 下极板距离地面距离为 d_2 , 根据实际情况有 $d_1, d_2 \gg d$, 因此 C_1, C_2 电容构成的杂散电容 $C_{\text{杂散}}$ 值远小于 C 电容值^[12]. 故可以将图 (a) 简化为图 (b). 由图 (b) 可知, $C_{\text{杂散}}, C_{\text{收集}}$ 实质上构成了电容分压器, 极板 $C_{\text{收集}}$ 的电压大小与分压比密切相关. 由于论文主要侧重于感应电场能量收集方法介绍, 因此暂时忽略 $C_{\text{杂散}}$ 对储能装置的影响. 对单相输电线路而言, 从电容分压原理可知, 极板 C 上感应电压与输电线路电压波形、相位等相同, 对于三相输电线路而言, 由于三相间存在着耦合电场, 电场间相互影响, 因此电容板 $C_{\text{收集}}$ 上的感应电压与其放置的水平位置密切相关. 故论文需要对高压输电线路三相耦合电场分布特征以及电容极板放置位置开展研究.



(a) 能量收集原理示意图 (b) 能量收集等效电路图
(a) Energy harvesting principle schematic (b) Energy harvesting equivalent circuit schematic

图1 高压输电线路能量收集原理及其等效电路图

Fig. 1 High-voltage transmission line energy harvesting equivalent circuit schematic

2 高压输电线路感应电场分布特征

2.1 计算模型

为分析高压输电线路电场能量分布特征,以 500 kV 为例,建立了三维有限元模型,仿真计算模型及各参数设置如图 2 和表 1、表 2 所示。

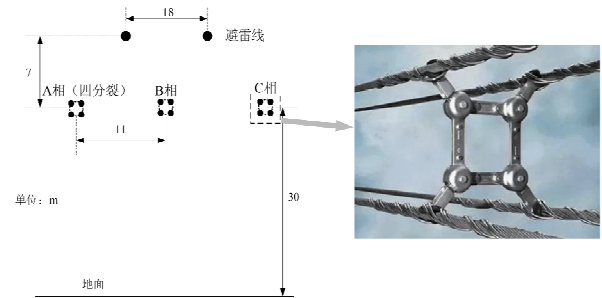


图 2 500 kV 仿真计算模型示意图
Fig. 2 Schematic diagram of 500 kV simulation calculation model

表 1 仿真模型参数设置

Tab. 1 Simulation model parameter setting

模型名称	材料属性	激励
A 相导线	钢芯铝绞线	500 kV(0°)
B 相导线	钢芯铝绞线	500 kV(120°)
C 相导线	钢芯铝绞线	500 kV(240°)
地线	铝包钢绞线	0 V

表 2 仿真模型线路参数设置

Tab. 2 Simulation model line parameter setting

输电线路电压等级	导线型号	导线等效半径/mm	相间距/m	避雷线间距/m	避雷线距导线垂直距离/m
500 kV	LGJ-400/35	42.45	11	18	7

2.2 计算结果及分析

图 3 为 500 kV 输电线路周围电场分布矢量云图。

提取计算结果,将距输电线路下方垂直距离 1~5 m 处电场强度绘制成曲线,得到如图 4 所示 500 kV 输电线路下方电场强度分布曲线。

输电线路间三相电场的耦合效应导致 B 相下方电场相对于 A、C 相而言小得多,A、C 相下方电场强高达 9 000 V/m,B 相下方场强为 2 000 V/m。为收集更多的能量,电容极板的水平放置位置应位于 A 相或 C 相正下方。

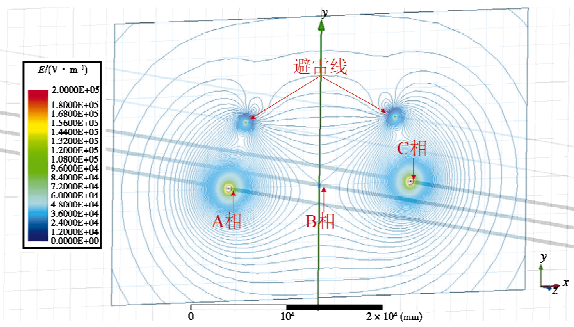


图 3 500 kV 电压等级水平排列输电导线周围电场分布矢量云图

Fig. 3 500 kV voltage level horizontal arrangement of electric field distribution around the transmission line vector cloud diagram

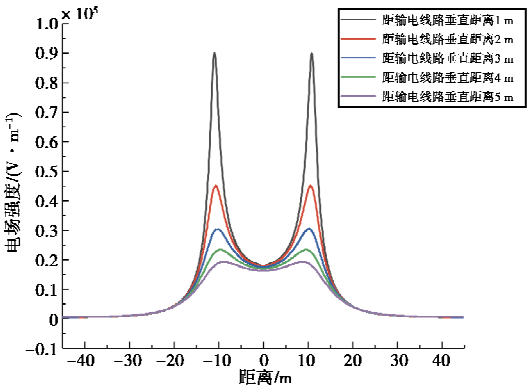


图 4 距 500 kV 输电线路下方不同垂直距离电场分布曲线图

Fig. 4 Electric field distribution curve of different vertical distances below 500 kV transmission line

3 电容极板上的感应电压计算

3.1 模型建立

将电容极板置于高压输电线路下方,极板上就会感应出电压,该电压为一悬浮电位^[13-15]。

在场域 Ω 中含有电位悬浮导体边界 Γ_0 :

$$\oint_{\Gamma_0} \epsilon \frac{\partial \varphi}{\partial n} d\Gamma = Q_c, \varphi = \varphi_c. \quad (1)$$

式中: Q_c 为电位悬浮导体 Γ_0 上带的净电荷; φ_c 为悬浮导体 Γ_0 上待求电位值。

令本电容网络节点关联矩阵为 A ,支路电容元件电荷列向量为 Q_b ,支路电压列向量为 U_b ,节点电位列向量为 Φ_n ,节点净电荷列向量为 Q_n ,支路电容对角矩阵为 C , S 为刚度矩阵元素矩阵, F 为有限元边界形状函数列向量矩阵。

根据节点电荷守恒定律、基尔霍夫电压定律和

电容支路的库伏关系可以求解出能量二次型:

$$W = \frac{1}{2} \Phi_c^T A C A^T \Phi_c - Q_n^T \Phi_c. \quad (2)$$

电位悬浮导体的电场分布计算问题可归结为能量最小问题,用矩阵表示为

$$S \Phi = F. \quad (3)$$

有限元方程式(3)对应能量泛函数为

$$W = \frac{1}{2} \Phi^T S \Phi - F^T \Phi - Q_n^T \Phi_c. \quad (4)$$

设场域有 L 个电位悬浮导体, $\Phi_c = [\varphi_{c1}, \varphi_{c2}, \dots, \varphi_{cL}]^T$, 则

$$\Phi = \Phi_0 + \sum_{k=1}^L \alpha_k \varphi_{ck}, \quad (5)$$

$$F = F_0 + \sum_{k=1}^L \beta_k \varphi_{ck}. \quad (6)$$

式中, Φ_0 和 F_0 为所有电位悬浮导体置零电位后仅由非电位悬浮导体、体电荷产生的有限个电位悬浮导体独立作用时的单位电位($\varphi_{ck} = 1$). 令

$$A = [\alpha_1 \alpha_2 \dots \alpha_L], B = [\beta_1 \beta_2 \dots \beta_L],$$

则式(5)和(6)可表示为

$$\Phi = [\Phi_0 A] \begin{bmatrix} 1 \\ \Phi_c \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$F = [F_0 B] \begin{bmatrix} 1 \\ \Phi_c \end{bmatrix}. \quad (8)$$

将式(7)和(8)带入式(5),并令 $\frac{\partial W}{\partial \Phi_c} = 0$ 可得

$$(A^T S A - B^T A - A^T B) \Phi_c = -A^T S \Phi_0 + A F_0 + B^T \Phi_0 + Q_n. \quad (9)$$

将式(7)和(8)代入式(4)得:

$$\Phi_0 = S^{-1} F_0, \quad (10)$$

$$A = S^{-1} B. \quad (11)$$

将式(10)和(11)代入式(9),可求得悬浮导体电位为^[13]

$$\Phi_c = -(B^T A)^{-1} (B^T \Phi_0 + Q_n). \quad (12)$$

为得到电容极板上电压大小,在 500 kV 输电线路模型的基础之上,建立了电容极板模型,材料选取及激励施加情况见表 3.

表 3 材料选取及激励施加

Tab. 3 Material selection and excitation application

模型名称	材料	激励
上极板	铝	无
下极板	铝	0 V

3.2 仿真计算结果及分析

图 5 为 500 kV 电压等级水平排列输电导线加电容极板周围电场分布矢量云图.

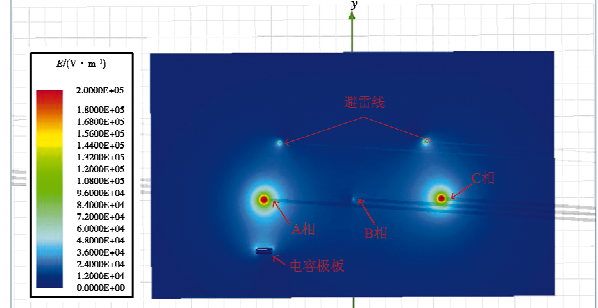


图 5 500 kV 电压等级水平排列输电导线加电容极板周围电场分布矢量云图

Fig. 5 500 kV voltage level horizontally arranged transmission line plus electric field distribution vector cloud diagram around the capacitor plate

对边长尺寸不同时电容极板上所感应的电压大小进行仿真分析,可得到如下结论:

1) 电容极板上产生的感应电压均为标准正弦波. 图 6 是在距输电线路下方垂直距离 6 m 时,电容极板上的感应电压波形.

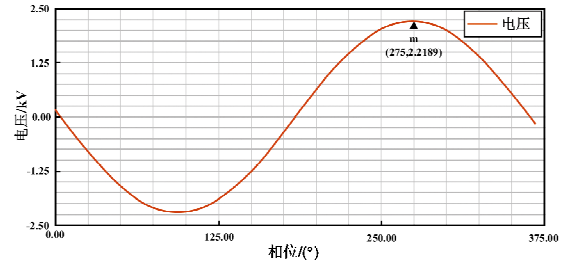


图 6 距 500 kV 导线下方垂直距离 6 m 时电容极板上感应电压波形图

Fig. 6 Waveform of induced voltage on the capacitor plate when the vertical distance is below 6 m from the 500 kV wire

2) 比较电容极板放置在不同水平位置时的感应电压发现,放在 A、C 相正下方与 B 相下方时,感应电压值相差很大. 在距输电线路垂直距离 6 m 时,分别为 2.2 kV 和 576 V,两者相差约 3.82 倍,结果表明:若想获得更大的感应电压,需将电容极板放置在 A、C 相下方,计算结果与图 4 的分析相吻合.

3) 表 4 为 500 kV 等级下电容极板距输电线路距离不同及电容极板边长尺寸不同时感应电压计算值,其随距离变化结果表明:电容极板与输电线路距

离越近,感应电压越大,当两者距离达到 6 m 时,感应电压可达 3.08 kV. 将计算结果进行拟合得到 500 kV 下不同尺寸电容上感应电压幅值变化曲线,如图 7 所示,电容上感应电压随着距离输电线路越远其值越小,且电压值下降速率也逐渐减小. 式(13)和(14)所示为电容极板上感应电压随距输电线路距离变化函数表达式,均为指数函数.

表 4 500 kV 等级下电容极板距输电线路距离不同和尺寸不同时感应电压计算值

Tab. 4 Calculated value of induced voltage at different distances between capacitor plate and transmission line at 500 kV level

距输电线路 距离/m	不同尺寸电容极板上电压幅值	
	20 cm×20 cm	20 cm×30 cm
6	2.20 kV	3.08 kV
7	1.94 kV	2.616 kV
8	1.34 kV	1.82 kV
9	920.24 V	1.18 kV
15	788.04 V	991.20 V
20	662.88 V	779.84 V
21	498.15 V	610.42 V
22	391.28 V	470.04 V
23	276.79 V	380.24 V
24	194.84 V	291.78 V
25	145.98 V	197.62 V
26	106.56 V	145.65 V
27	70.37 V	91.07 V
28	28.06 V	38.16 V
29	15.34 V	20.64 V

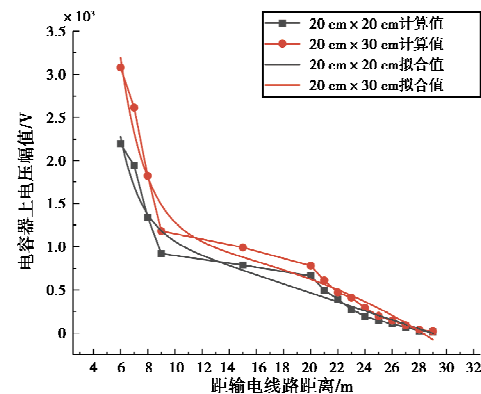


图 7 500 kV 下不同尺寸电容上感应电压幅值变化曲线

Fig. 7 Induced voltage amplitude on capacitor plates of different specifications at 500 kV

$$y_{20\text{cm}\times 20\text{cm}}=5600\text{e}^{-\frac{x}{1.49}}+1.6\times 10^8\text{e}^{-\frac{x}{3}}-1.6\times 10^8,$$
(13)

$$y_{20\text{cm}\times 30\text{cm}}=48036\text{e}^{-\frac{x}{1.9}}-213.5\text{e}^{\frac{x}{14.7}}+1451.$$
(14)

表 5 为不同电压等级输电线路下,距离输电线路 3 m 处感应电压随电容极板尺寸变化计算值,其变化曲线如图 8 所示.

表 5 三种电压等级下不同尺寸电容极板上感应电压幅值

Tab. 5 Induced voltage amplitude on capacitor plates of different specifications under three voltage levels

电压等级	电容极板距 Δ 相垂直距离/m	10 cm× 10 cm/ kV	20 cm× 20 cm/ kV	20 cm× 30 cm/ kV	50 cm× 50 cm/ kV
		10 cm/	20 cm/	30 cm/	50 cm/
500 kV	3	16.26	21.98	25.51	29.41
220 kV	3	1.18	1.92	2.32	2.92
110 kV	3	0.85	1.51	1.85	2.31

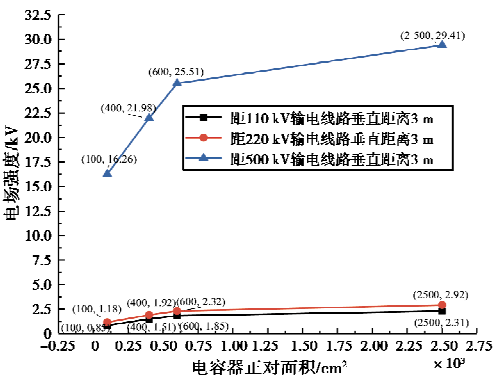


图 8 三种电压等级下不同尺寸电容极板上感应电压幅值变化曲线

Fig. 8 Induced voltage amplitude on capacitor plates of different specifications under three voltage levels

在进行感应电压计算时,电容极板距输电线路距离以单位距离 $\Delta H=1\text{ m}$ 进行递减, ΔH_N 为在距离输电线路 $N\text{ m}$ 时递减 ΔH ;电容极板尺寸以单位面积 $\Delta S=125\text{ cm}^2$ 递增, ΔS_N 为电容极板面积在 $N\text{ cm}^2$ 时递增 ΔS . ΔV 为电容极板距输电线路距离每递减 ΔH 和电容极板面积每递增 ΔS 时,电容极板上感应电压增加值. 图 9 为感应电压增加值 ΔV 随电容极板距输电线路距离 ΔH 和电容极板面积 ΔS 的变化曲线.

结果表明:当平行板电容极板尺寸一定时,电容极板距输电线路垂直距离越小,其感应电压越大,感应电压单位距离增长幅值也越大;当电容极板距输电线路下方垂直距离一定时,电容极板尺寸越大,其

感应电压越大,但是感应电压单位面积增长幅值越小. 其中,随着距输电线路距离越小和电容极板面积增大,单位距离 ΔH 相对感应电压的大小影响更明显.

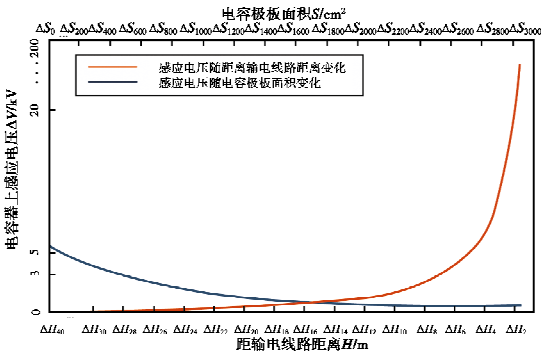


图 9 感应电压随距离差与尺寸面积差变化趋势
Fig.9 Induced voltage changes with distance difference and size area difference

3.3 感应电能计算

根据高压输电线路能量收集等效电路的原理,感应电能计算时应该将寄生电容与电容极板共同等效为电流源再进行电能计算,本文则根据公式 $W = \frac{1}{2}CU^2$ 对感应电能值进行粗略估算,计算出的距离输电线路 3 m 时不同尺寸下的电容板电能值如表 6 所示.

表 6 不同尺寸电容极板电容值及其在距离输电线路 3 m 时电能值

Tab.6 Capacitance values of capacitor plates of different specifications and their energy values when they are 3 m away from the transmission line

尺寸	电压值/kV	电容值/pf	电能值/mJ
10 cm×10 cm	16.26	17.72	2.34
20 cm×20 cm	21.98	70.88	17.12
20 cm×30 cm	25.51	106.32	34.60
50 cm×50 cm	29.41	443.00	191.58

由表 6 可知,50 cm×50 cm 电容板在距输电线路垂直距离 3 m 时,可达到电能值为 191.58 mJ. 输电线路在线监测装置主要是由各类传感器(电流、电压、温度、湿度传感器)、CPU 核心模块和射频模块等组成. 各类传感器用来收集输电线路周围的声光电磁信号,其工作电压变化范围为 3.0~5.5 V/DC; CPU 核心模块的功能是处理传感器收集到的信号,所使用的芯片供电电压一般为直流 1.25 V、3.3 V、5 V 等;射频模块负责数据传输,一般发射功率范围

为 50~200 mW^[16-20]. 根据公式 $W = Pt$ 可以算得在线监测传感器 1 s 内所需电能值在 50~200 mJ 即可.

50 cm×50 cm 电容板在距离输电线路 3 m 时的电能值 191.58 mJ 就能够满足一般监测装置的需求,在后期设计放电电路时需控制放电时间,以满足检测装置的功率要求.

4 取能试验

4.1 试验方案

完成上述工作后,开展取能试验. 试验目的:① 电容极板电压的测量;② 加负载后能量大小的测量. 图 10 是试验现场图,图 11 是试验电路图. 试验是在某 500 kV 输电线路下完成,试验电路由电容极板、负载电阻、电压测量仪表、示波器组成,其中负载电阻为 10 Ω.



(a) 500 kV 杆塔图 (b) 电容极板与输电线路距离变化

(a) 500 kV pole tower (b) Distance variation of capacitance pole plate from transmission line

图 10 试验现场图

Fig.10 Test site picture

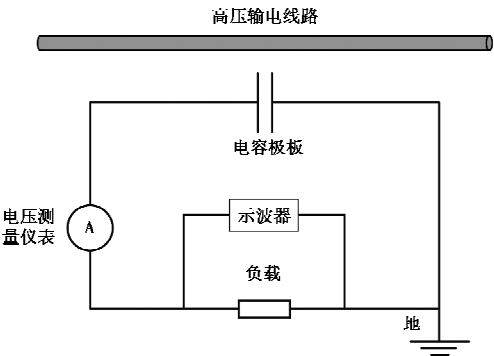


图 11 试验电路图

Fig.11 Test circuit diagram

由前文分析可知,当电容极板距离输电线路越近时,电容极板上的电压越高. 为尽可能让电容极

板接近输电线路(远大于安全距离),试验采用无人机搭载带有引线电容极板的方法,利用无人机将飞行高度控制在距离输电线路杆塔 20~29 m,引线通过变压器接入电压测量装置,如图 11 所示. 由此构成一个以铝板为恒功率源“电源”的电路回路,通过测取负载两端的电压电流,进而得到铝板上的电压电流.

4.2 试验结果

为了得到准确的试验数据,进行了三次取能试验. 图 12 是距 A 相垂直距离为 27.5 m 时 20 cm×20 cm 铝板上测得的电压波形,由示波器的波形可以看出,电容板上感应电压为正弦波,与仿真计算波形一致,验证了理论分析的正确性.

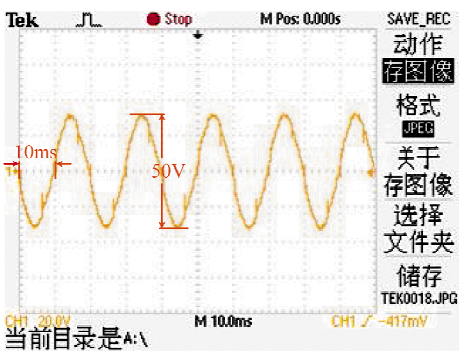


图 12 距输电线路距离 27.5 m 时 20 cm×20 cm 铝板上电压波形图

Fig. 12 Voltage waveform of 20 cm×20 cm aluminum plate when the distance from the transmission line is 27.5 m

表 7 为两种尺寸下铝板能量采集装置试验数据.

表 7 铝板能量采集装置试验数据

Tab. 7 Aluminum plate energy harvesting device test data sheet

距 A 相垂直距离/m	20 cm×20 cm			20 cm×30 cm		
	空载电压/V	负载电流/ μ A	测量误差	空载电压/V	负载电流/ μ A	测量误差
29	14	3.0	8.70%	19	5.0	7.90%
28	30	7.5	6.90%	41	8.2	7.40%
27	68	14.0	3.40%	89	14.8	2.23%
26	100	22.0	5.60%	140	26.0	3.80%
25	140	30.0	4.10%	200	36.8	1.20%
24	190	45.0	2.50%	280	52.0	4.00%
23	300	55.0	8.30%	400	60.0	5.00%
22	430	64.0	9.80%	470	75.0	0.01%
21	500	73.0	0.03%	600	90.0	1.70%
20	700	108.0	5.50%	770	126.0	1.30%

通过对表 7 的理论计算值进行拟合得到曲线如图 13 所示,可以看出理论计算值与实测值间误差不超过 10%,进一步通过理论与实测验证了电容收集输电线路感应电场能方法的可行性与正确性^[21-22].

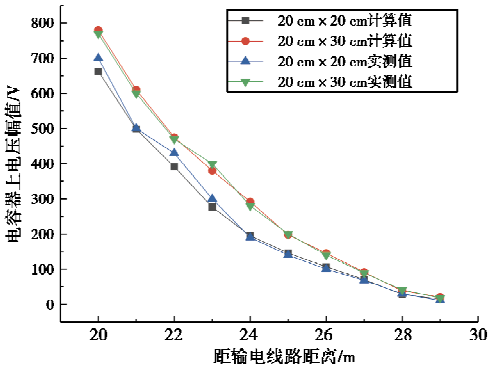


图 13 理论计算和实际测量值结果对比

Fig. 13 Comparison of theoretical calculations and actual measured values

根据实验数据计算可得两种尺寸铝板收集装置在距输电线路距离不同时负载功率大小,如表 8 所示.

表 8 铝板能量采集装置试验负载功率和测点电场计算值
Tab. 8 Aluminum plate energy harvesting device test load power and measured point electric field calculation value

距 A 相垂直距离/m	采集装置测点场强/($\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$)	采集装置功率/ μ W	
		20 cm×20 cm	20 cm×30 cm
29	3.451	9×10^{-5}	2.5×10^{-5}
28	3.720	5.625×10^{-4}	6.724×10^{-4}
27	3.998	1.96×10^{-3}	2.19×10^{-3}
26	4.337	4.84×10^{-3}	6.76×10^{-3}
25	4.686	9×10^{-3}	1.354×10^{-2}
24	5.558	2.025×10^{-2}	2.704×10^{-2}
23	5.094	3.025×10^{-2}	3.6×10^{-2}
22	6.123	4.096×10^{-2}	5.625×10^{-2}
21	6.816	5.329×10^{-2}	8.1×10^{-2}
20	7.578	0.116 64	0.158 76

从前文的研究可以看出,距离输电线路越近,电场值越大,能量越大,相同情况下的电容极板收集的能量越多,感应电压越大,负载功率也就越大。

常规取能方法为电流互感器取能,当传统电流互感器在原边电流设置为 50 A/50 Hz,电感值为 0.346 6 H 情况之下,储存的电能为 433.25 J,取得的最大功率为 680 mW^[23]。论文所提出的取能方法,在距离输电线路 3 m 时,可储存 191 mJ 电能,在距离输电线路 10 m 时,可取得 0.1 μ W 功率。由于目前试验设备有限,电容极板距输电线路距离存在限制,电容极板距离输电线路较远,因此取能功率较小,后期将在距离输电线路较近处进行试验。同时试验发现:论文所提出的高压输电线路电场能量收集方法理论上可行,关键之处在于电容设计,电容容量增加,便可以满足在线监测设备能量要求。

5 结 论

针对高压输电线路在线监测装置供电电源操作繁琐、供能不稳的问题,本文提出一种直接采用电容收集输电线路感应电场的方法。论文分析了本方法的原理,并通过理论和试验相互验证了该方法的科学性和可行性,得到如下结论:

1) 电容极板上产生了与输电线路同相位的正弦波形感应电压,其中尺寸为 20 cm $\times$ 20 cm 的电容极板在距离输电线路 3 m 时电压幅值可高达 21.98 kV。

2) 电容极板垂直放置位置和尺寸均对感应电压大小有影响;电容极板尺寸一定时,电容极板距离输电线路越近,其感应电压越大,感应电压单位距离增长幅值也越大;与输电线路距离一定时,电容极板尺寸越大,其感应电压越大,但是感应电压单位面积增长幅值越小;其中电容极板的放置位置对感应电压大小的影响更大。

3) 尺寸为 50 cm $\times$ 50 cm 电容极板在距离输电线路 3 m 附近时,带负载后理想状态下所存储的能量在 100 mW 数量级,可以满足基本的在线监测装置供能需求。后期将尝试使用超级电容或者采用并联方式增大电容,增加电容的储能能量,为在线监测装置提供更高的输出功率。

综上所述,论文所提出的高压输电线路感应电场能量收集方法能够为在线监测装置提供稳定的电能,是一种极具前景的在线取能方法。

参考文献

[1] DONALDSON E F, GIBSON J R, JONES G R, et

- al. Hybrid optical current transformer with optical and power-line energisation [J]. IEE proceedings: generation, transmission and distribution, 2002, 147 (5): 304-309.
- [2] 王维. 高压输电线路在线监测设备无线供能关键技术研究及系统优化设计[D]. 南京: 东南大学, 2017.
WANG W. Key technology research and system optimization design of wireless power supply for on-line monitoring equipment of high voltage transmission line [D]. Nanjing: Southeast University, 2017. (in Chinese)
- [3] CAO X, JIANG Y, YU C L, et al. Study on the efficiency and persistence of power supply for transmission line monitoring device under low temperature conditions [C]//The 37th China Control Conference, 2018.
- [4] 刘锋, 章学来, 华维三, 等. 一种太阳能储能装置的模拟计算与实验分析[J]. 可再生能源, 2017, 35(9): 1310-1317.
LIU F, ZHANG X L, HUA W S, et al. Simulation and experimental analysis of a solar energy storage device [J]. Renewable energy resources, 2017, 35(9): 1310-1317. (in Chinese)
- [5] 刘明兴. 输电线路在线监测装置感应电源的研究与设计[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.
LIU M X. Research and design of induction power supply for on-line monitoring device of transmission line [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [6] 凌子恕. 高压互感器技术手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [7] 王黎明, 李海东, 陈昌龙, 等. 新型高压输电线路下限死区大功率在线取能装置[J]. 高电压技术, 2014, 40(2): 344-352.
WANG L M, LI H D, CHEN C L, et al. A novel on-line energy extracting device with low lower limit deadband on transmission line [J]. High voltage engineering, 2014, 40(2): 344-352. (in Chinese)
- [8] 李青山, 皇甫羽飞, 张帅, 等. 110 kV 输电线路电容降压取电系统雷电过电压分析[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 2058-2063.
LI Q S, HUANGFU Y F, ZHANG S, et al. Lightning over-voltage analysis of 110 kV transmission line capacitor step-down power system [J]. Power system technology, 2015, 39(7): 2058-2063. (in Chinese)
- [9] 赵东生. 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 D S. Research on electric field energy collection technology at tower side of AC transmission line [D]. Guangzhou: South China University of Technol-

- ogy, 2015. (in Chinese)
- [10] 刘铮,樊绍胜,胡劭睿. 基于阻抗匹配的输电线路在线取能方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(23): 6867-6876+7100.
LIU Z, FAN S S, HU J R. Research on the method of on-line energy acquisition of transmission line based on impedance matching[J]. Chinese journal of electrical engineering, 2019, 39(23): 6867-6876+7100. (in Chinese)
- [11] 谢伟伦, 许家凤, 黄志威, 等. 杂散电容对电容式电压互感器测量误差的影响[J]. 宁夏电力, 2018(3): 9-13.
XIE W L, XU J F, HUANG Z W, et al. Influence of stray capacitance on the measurement errors of capacitor voltage transformer[J]. Ningxia electric power, 2018(3): 9-13. (in Chinese)
- [12] 陈乐坤. 平行板和圆柱形电容器电容表达式推导及应用[J]. 电子世界, 2018(17): 36-37.
CHEN L K. Derivation and application of capacitance expression of parallel plate and cylindrical capacitor[J]. Electronic world, 2018(17): 36-37. (in Chinese)
- [13] 刘丽娜, 陶加祥, 万健, 等. 悬浮导体感应电压的估算及对策[J]. 中国电力, 2017, 50(11): 127-133.
LIU L N, TAO J X, WAN J, et al. Estimation and countermeasures of floating conductor induced voltage[J]. Electric power, 2017, 50(11): 127-133. (in Chinese)
- [14] 王俊, 田刚领, 张国跃, 等. 悬浮电位引起电场放电的计算分析[J]. 电气开关, 2010, 48(5): 70-71+74.
WANG J, TIAN G L, ZHANG G Y, et al. The calculation and analysis of the electric field discharge caused by floating potential[J]. Electric switcher, 2010, 48(5): 70-71+74. (in Chinese)
- [15] 官瑞磊, 蔡韬远. 含悬浮电极的 550 kV 六氟化硫终端电场的有限元分析[J]. 绝缘材料, 2007(1): 72-74.
GONG R L, CAI T Y. Finite element analysis of electric field of 550 kV SF6 terminal with suspended electrode[J]. Insulating materials, 2007(1): 72-74. (in Chinese)
- [16] TARDY A, DEROSSIS A, DUPRAZ J P. A current sensor remotely powered and monitored through an optical fiber link[J]. Optical fiber technology materials devices & systems, 1995, 1(2): 181-185.
- [17] 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 H K, WU J J. A new type of rechargeable high voltage induction power take off device[J]. Electrical measurement and instrument, 2014, 51(3): 86-90. (in Chinese)
- [18] GUAN H L, SHANG Q F, YANG Y H. Ferromagnetic ring concentrator sensor head of hybrid optical current transformer[J]. Electric power automation equipment, 2005.
- [19] 徐娟. 基于物联网的输变电设备无线监测技术研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
XU J. Research on wireless monitoring technology of power transmission and transformation equipment based on Internet of things[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017. (in Chinese)
- [20] 邵杰. 基于物联网技术的电力电缆无线测温系统设计[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2016.
SHAO J. Design of wireless temperature measurement system for power cable based on Internet of things technology[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2016. (in Chinese)
- [21] 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(1): 76-80.
LI X Z, DU L, CHEN W G, et al. New design principle of power supply for transmission line condition monitoring system[J]. Power system automation, 2008(1): 76-80. (in Chinese)
- [22] 汪金刚, 林伟, 李健, 等. 电容式交变电场传感器与工频电场检测试验研究[J]. 传感器与微系统, 2010, 29(9): 21-23+26.
WANG J G, LIN W, LI J, et al. Experimental study on capacitance alternating electric field sensor and power frequency electric field detection[J]. Sensors and microsystems, 2010, 29(9): 21-23+26. (in Chinese)
- [23] 王智博. 电流互感器取电电源的研究与设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
WANG Z B. Research and design of current transformer power supply[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015. (in Chinese)

作者简介

夏竹青 (1996—), 女, 湖北人, 武汉理工大学自动化学院硕士研究生, 研究方向为高电压与绝缘研究。

吴细秀 (1976—), 女, 湖北人, 武汉理工大学自动化学院副教授, 博士, 研究方向为高电压与绝缘研究。

苏超 (1985—), 男, 吉林人, 广东电网有限责任公司清远供电局, 在读博士, 研究方向为输电系统运维及智能化。