

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.05.019

一种交流电场无线取能电源的优化设计

王黎明¹, 李 宗¹, 孟晓波², 梅红伟¹, 李剑超¹

(1. 清华大学深圳研究生院, 广东 深圳 518055; 2. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广州 510663, 中国)

摘要: 针对交流电场无线取能电源取能功率低, 难以满足输电线路铁塔在线监测装置的用电需求, 对交流电场无线取能电源进行了优化设计。首先, 理论分析了取能电源的电路模型, 给出了取能功率方程以及影响取能的关键因素; 其次, 通过有限元软件仿真计算确定了取能极板的形状和尺寸, 并通过理论分析与仿真计算优化了放电电路的参数; 最后, 通过仿真优化计算得到了当耦合电容为 15 pF, 取能电容为 0.1 μ F, 充电电压为 200 V 时, 500 Ω 的负载能获得 25 mW 的取能功率, 相比于未进行优化的取能电源功率提升了 2.5 倍。仿真优化计算结果与理论分析相一致, 验证了仿真计算对该电源优化设计的合理性和准确性。

关键词: 交流电场; 无线取能; 电源; 优化设计

Optimization Design of an AC Electric Field Wireless Power Supply

WANG Liming¹, LI Zong¹, MENG Xiaobo², MEI Hongwei¹, LI Jianchao¹

(1. Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Guangdong Shenzhen 518055, China; 2. Electric Power Research Institute, CSG, Guangzhou 510663, China)

Abstract: In view of the low power intake power of AC electric field power supply power supply, it is difficult to meet the demand of power supply for the on-line monitoring device of transmission line iron tower, and the wireless power supply power supply of AC electric field is optimized. Firstly, the circuit model of the power source is theoretically analyzed, and the power equation and the key factors affecting the energy acquisition are given. Then, the shape and size of the energy absorbing plate are determined by finite element software simulation, and the discharge circuit parameters are optimized by theoretical analysis and simulation. At the end of the simulation, it is obtained that when the coupling capacitance is 15 pF, the energy taking capacity is 0.1 μ F, the charge voltage is 200 V, the load of 500 Ω can get the power of 25 mW, and the power of the power supply is 2.5 times higher than that of the un-optimized power supply. The simulation results are consistent with the theoretical analysis, which verifies the rationality of the optimal design of the power supply.

Key words: AC electric field; wireless energy acquisition; power supply; optimization design

0 引言

高压架空输电线路是电力系统的动脉, 需要对其实施在线监测, 及时反映运行状况, 保证电力系统安全^[1]。但是在线监测设备多安装在杆塔上, 如何给电力杆塔上的在线监测设备供电成为一个技术难点。目前主要的取能方式有两种: 传输供电和自主取能。传输供电方式主要是通过光纤或微波

将能量从地面传输到在线测量装置, 这种供能方式的主要缺点是造价昂贵, 不适合大量普及^[2-3]。自主取能的主要方式包括以下几种: ①太阳能和蓄电池储能, 其基本的原理是利用太阳能电池板获取的太阳能配合蓄电池的储能来供电^[4-5], 但是该方法受环境影响因素比较大, 遇到极端天气(大风、阴雨等)会严重影响其供电稳定性, 并且蓄电池寿命有限, 需定时间更换电池; ②电流互感器取能, 其主要利用

收稿日期: 2019-10-06; 修回日期: 2019-12-14

基金项目: 深圳市基础研究项目(JCYJ20170307153851342)。

Project Supported by Shenzhen Basic Research Project(JCYJ20170307153851342).

安装在电力线上的线圈,利用电磁感应原理进行取能,但是电力线中的负荷电流是不断变化的,因此这种供电方式不稳定;并且在线监测设备大多安装在杆塔上,电流互感器取能难以将电能传送到杆塔侧^[6-8];③地线取能,其主要利用架空地线与大地之间形成涡旋电势进行取能^[9-11],但是,因为取能装置安装在地线上,危险性高,易损坏,难以提供稳定可靠的电能供应。因此,如何为在线监测设备提供稳定可靠的电能供应,已经成为制约输电线路在线监测技术发展的瓶颈之一。

近年来,国内外已有关于在电场能比较丰富的高压输电线路或变电站利用电容式采集器采集电能的研究报道。文[12-14]利用开关促进金属极板感应电荷的流动提高能量采集,但是开关需要复杂的控制,并需消耗额外的能量,且取能功率较小;文[15-17]在输电线路采用圆筒状金属采集器进行取能,由于耦合电容较小,自身阻抗较大,需负载阻抗极大时才能达到最大输出功率^[15-16],或者通过阻抗变压器进行阻抗变换调节负载的等效阻抗^[17];文[18-19]相对于文[15-17]改变了取能电源的运行方式,将金属极板安装在杆塔上,可以直接为杆塔上的在线设备供电。但是受限于金属极板的安装位置,取能功率较小。

鉴于以上分析,一种微弱能量采集技术^[20]得到了研究界广泛关注,该技术相对于直接取能,可极大提升取能功率。文[20]初步提出了该取能方法,但没有详细分析影响取能电源功率的关键因素。因此,文中在此基础上,详细分析了该取能技术的实施原理,得出了影响取能功率的关键因素,优化取能电源的电路结构,实现了更大取能功率。

1 技术原理

电场感应取能的基本原理:在输电杆塔上搭建一块金属板,则在高压电力线与金属板之间形成耦合电容,利用其产生的空间位移电流给电容充电,再利用电容的储能为后续的在线监测设备供电。目前常规的直接电场感应取能的原理见图1。

图1中: C_m 为电力线与金属极板之间形成的耦合电容,该电容的大小与金属极板、电力线之间的距离以及金属极板的面积有关。电力线的电压有效值为 U_{ac} ,流过 C_m 的交流电流有效值为 I_{ac} , I_{ac} 经过二极管 D_1 至 D_4 整流成直流电流 I_{dc} 对电容 C_s 充电,当电容的电压为 U_s 时,为后面的在线监测装置供电。电容储存的能量为

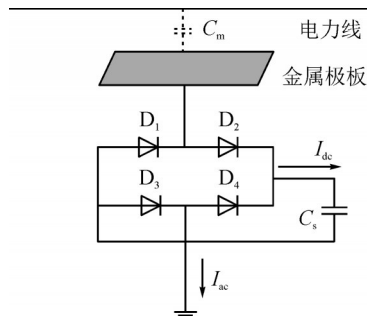


图1 直接电场感应取能原理

Fig. 1 Principle diagram of direct energy acquisition by electric-field induction

$$E = \frac{C_s U_s^2}{2} \quad (1)$$

电容电压达到 U_s 所需要的时间 t 为

$$t = \frac{q}{I_{dc}} = \frac{C_s U_s}{k_r I_{ac}} \quad (2)$$

式(2)中, $k_r=0.9$ 为全波整流系数。

由于 C_s 上的电压相对于电力线路上的电压要小的多,即 $U_s \ll U_{ac}$,所以 $I_{dc}=k_r U_{ac} \omega C_m$, $\omega=314 \text{ rad/s}$ 。可知当电力线的电压 U_{ac} 不变时,充电电流 I_{dc} 可以等效成一个恒流源。由此可以得到平均功率 P

$$P = \frac{E}{t} = \frac{\frac{C_s U_s^2}{2}}{\frac{C_s U_s}{I_{dc}}} = \frac{U_s k_r U_{ac} \omega C_m}{2} \quad (3)$$

由表达式(3)可知,由于 k_r 、 U_{ac} 、 ω 均为常数,平均功率 P 的大小仅与电容 C_s 的充电电压 U_s 和耦合电容 C_m 有关,而与 C_s 大小无关。考虑到输电线路恶劣的运行环境,如大风、暴雨暴雪等天气,故金属极板设计不易过大。因此要提高平均功率,在满足 $U_s \ll U_{ac}$ 的条件下,可以提高电容的充电电压。

考虑在线监测设备的供电电压一般比较低(3.3、5、12 V),并且大电容的耐压值比较低,难以提升取能功率;小电容的耐压一般比较高,由式(3)知,可以极大的提升平均功率。

文中设计的电场感应取能电路见图2。

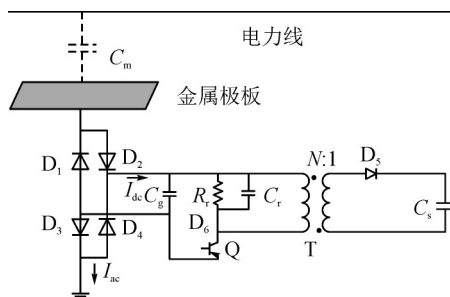


图2 电场感应取能原理

Fig. 2 The principle of electric field sensing

图2中 R 、 C_r 以及二极管 D_6 组成反激变压器 T 的

缓冲电路,其作用是吸收反激变压器漏感的能量,防止产生过电压。

该电路的主要原理是让位移电流 I_{dc} 先给一个小电容 C_g 进行充电,使其达到较高的电压,然后通过一个开关 Q 和反激变压器 T 将 C_g 上的储能释放到 C_s 上。当 C_s 上储存了一定的能量,再给负载供电。由于小电容向大电容的放电时间相比于位移电流给小电容充电的时间要小的多,可以基本忽略。因此该方法充分利用了小电容高耐压值,增大对 C_g 的充电电压,极大地提升了平均功率。但是在小电容向大电容放电的过程中,能量传递效率受放电电路参数,取能极板的大小影响,下面将对以上影响因素进行分析,给出优化方案。

2 取能电源的优化设计

2.1 取能极板的优化设计

由式(3)可知,电场感应取能的平均功率取决于耦合电容 C_m 与 C_g 的充电电压。耦合电容 C_m 越大,则空间位移电流越大,取能功率越大。平行板电容器表达式

$$C = \frac{\epsilon S}{d} \quad (4)$$

式(4)中: ϵ 为空气的介电常数; S 为极板面积; d 为极板间距。由式(4)可知,理想平行板电容器的大小取决于极板面积与极板间距。实际中,由于受到边缘效应的影响^[21],电容实际值往往大于理论值,根据文[22]的推导可知,只有当极板宽度与板间距之比足够大时(大约 16.64),边缘效应的附加电容值低于电容值 10%时才可以使用时(4)计算。

由以上的分析可知,增大 C_m 的方法有:①减小取能极板与导线的距离;②增大取能极板的面积;③增加取能极板的边缘效应,即增加取能极板的边缘长度。由于取能极板与输电导线之间的距离受绝缘安全距离的影响,且取能极板安装在杆塔上,设计的面积过大,在强风作用下受力过大,容易发生安全事故,不利于设备安全运行。

文中设计的3种取能极板见图3。正方形极板、网状极板、栅状极板。在 Comsol 中搭建的仿真模型见图4。110 kV 输电线路的安全距离为 1.5 m,线径为 2 cm。由文[18]知,当导线长度是取能极板宽度的 20 倍时,几乎可以等效成无限长输电导线。仿真中,导线长度为 10 m,正方形极板边长 r 分别为 0.3、0.4、0.5、0.6、0.7 m。栅状极板与网状极板的间距与极板宽度均为 $r/20$ 。仿真数据绘制图见图5。

如图5所示,栅状极板面积为正方形极板面积的 50%,电容值下降仅为 20%;网状极板面积为正方

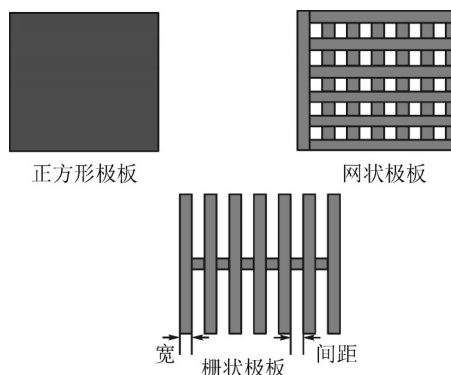


图3 取能极板设计

Fig. 3 Take the plate design

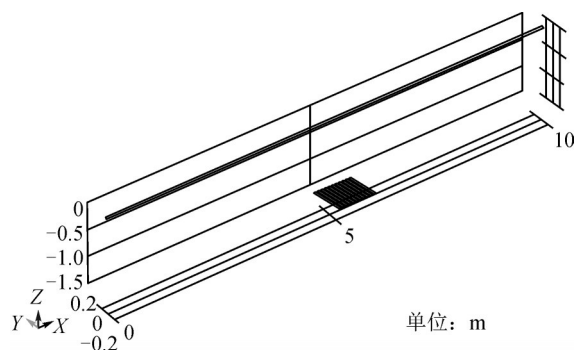


图4 仿真图

Fig. 4 Simplify the equivalent circuit diagram

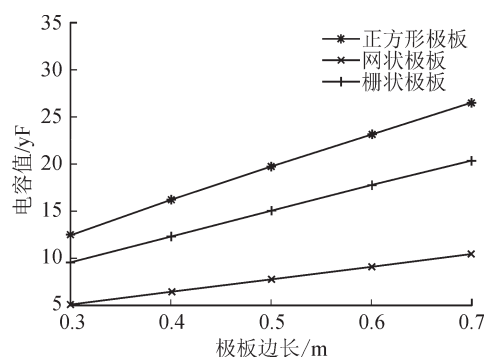


图5 极板形状对电容的影响

Fig. 5 Influence of plate shape on capacitance

形极板面积 75%,电容值下降约 60%,这说明在此情形下,极板的边缘效应对耦合电容值的影响占主导作用。由于金属极板安装在杆塔上,考虑强风作用下的受力影响,可以采用栅状极板,在减少 50%极板面积的情况下,而电容值下降仅为 20%。针对栅状极板,当 $r = 0.5$ m 时,分别对不同的极板宽度与极板间距进行仿真,记录见表 1。

由表 1 中数据可以得知,改变栅状极板的宽度与间距对电容值的影响非常小,因此可以说明,取能极板的边缘效应极大地影响了电容值。而在输电杆塔上,减小取能极板的面积,相应的减小了取能极板的重量以及强风作用下的应力。因此在工程应用中,可以根据功率需求以及输电线路应力要求合理选择栅状极板长度、宽度、间距。

表1 不同尺寸栅状极板的耦合电容值

Table 1 Coupling capacitance of grids with different sizes				
导线长度/m	栅状极板			电容值/pF
	长度/cm	宽度/cm	间距/cm	
10	50	1.0	4.0	14.75
10	50	2.0	3.0	14.98
10	50	2.5	2.5	15.05
10	50	3.0	2.0	15.11
10	50	4.0	1.0	15.18

2.2 放电电路优化设计

放电电路的简化理想等效原理图见图6, I_{dc} 代表图3中由交流恒流源经过整流桥得到的直流电流平均值; L_1 、 L_2 代表反激变压器理想一次侧二次侧电感值。其具体的原理: 当 U_g 的电压达到设定电压 U_{g0} 时, 开关导通, 电容对反激变压器放电; 当电容的电压降到 0 V 时, 此时储存在 C_g 的能量为 0, 使开关关断, 防止电感中的能量回流到电容中, 使反激变压器中储存的能量达到最大。具体分析如下。

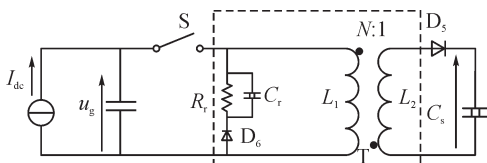


图6 简化等效电路图

Fig. 6 Simplify the equivalent circuit diagram

当开关导通时, 因为 I_{dc} 相对于放电电流要小的多, 可以忽略不计, 因此可以列出等效电路的状态方程为:

$$C_g \frac{du_g}{dt} = -i \quad (5)$$

$$L_1 \frac{di}{dt} = u_g \quad (6)$$

初始条件为:

$$i|_{t=0} = 0 \quad (7)$$

$$u_g|_{t=0} = U_{g0} \quad (8)$$

$$L_1 \frac{di}{dt}|_{t=0} = U_{g0} \quad (9)$$

其中 $L = L_1 + L_a$, 解状态可得:

$$i_1 = \frac{U_{g0}}{L_1 \omega_r} \sin(\omega_r t) \quad (10)$$

$$U_g = U_{g0} \cos(\omega_r t) \quad (11)$$

式(10)、(11)中

$$\omega_r = \sqrt{\frac{1}{L_1 C_g}} \quad (12)$$

由表达式(10)、(11)知, 其本质上即是一个二阶振荡电路, 能量在电感与电容中来回传输, 因此控制开关在电容最小值时关断, 防止电流回流到电容中, 使能量传输到二次侧。同理可以得到二次侧电

流及 C_s 上的电容电压 U_s :

$$i_2 = \frac{U_{g0}}{L_2 \omega_s} \cos(\omega_s t) \quad (13)$$

$$\omega_s = \sqrt{\frac{1}{L_2 C_s}} \quad (14)$$

$$U_s = \sqrt{\frac{C_g}{C_s}} U_{g0} \sin(\omega_s t) \quad (15)$$

由式(12)、(15)可知, 一次侧电容将能量传输到反激变压器所需要的时间、二次侧电容 C_s 充电时间取决于 ω_r 、 ω_s 。一般的设定中由于 C_g 较小, 而 C_s 较大, 导致 ω_r 很小, ω_s 相对较大。在设计中, 要保证一次侧电容 C_g 将能量传输到反激变压器所需要的时间远小于 C_g 充电时间, 二次侧电容 C_s 充电时间要小于 C_g 充电时间, 合理设计 C_g 、 C_s 、 L_1 、 L_2 的关系匹配。

2.3 取能电容的优化设计

根据取能原理知, 取能功率的大小与取能电容 C_g 的大小无关, 而仅与 C_g 充电达到的电压值有关。针对这一特性, 在 Simulink 中搭建如图1所示的实验模型, 设定充电电压为 200 V, $C_m = 15$ pF, 理论计算 $I_{dc} = 0.33$ mA, 取能平均功率理论值为 33 mW, C_g 分别取 3、1、0.1、0.01 μ F, 仿真结果记录见表2。

表2 不同电容值对取能的影响

Table 2 Effects of different capacitance values on energy acquisition

$C_g/\mu\text{F}$	$Q_{g1}(C_g U_g)/\mu\text{C}$	充电时间/s	$Q_{g2}(I_{dc} T)/\mu\text{C}$	储能能量/mJ	平均功率/mW
3.000	600.0	1.818 600	600.10	60.00	33.0
1.000	200.0	0.603 400	199.10	20.00	33.1
0.100	20.0	0.059 800	19.70	2.00	33.4
0.010	2.0	0.006 800	2.20	0.20	29.4
0.001	0.2	0.000 325	0.11	0.02	61.5

观察表2中数据可以看出, 当充电时间较长时, 即 $T > 0.005$ s (工频交流电周期四分之一), $Q_{g1} = C_g U_g = Q_{g2} = I_{dc} T$, 充电电流 I_{dc} 可以等效成一个恒流源; 当充电时间小于工频交流电周期四分之一时, 充电阶段处于工频交流电的某一个阶段, 充电电流 I_{dc} 不再可以等效成一个恒流源。因此在设计中, 根据充电电压的不同合适的选择充电电容。在下面的仿真中 C_g 选取 0.1 μ F, 此时周期为 60 ms, 远大于工频交流电的四分之一周期, 充电电流 I_{dc} 可以等效成一个恒流源; 并且此时电容储存的能量为 2 mJ, 考虑到反激变压器每次传输的能量越小, 则反激变压器的体积越小, 因此在设计中 C_g 可选取 0.1 μ F。

2.4 反激变压器的优化设计

电感值与匝比影响到电容的充放电时间以及电流的大小。在 Simulink 中搭建图2所示的仿真电

路, 设定电路中总电阻为 0.7Ω , $U_g=200 \text{ V}$, 二极管压降为 0.4 V , $C_g=0.1 \mu\text{F}$, $C_s=1\ 000 \mu\text{F}$, 一次侧电感值分别取 0.5 mH 到 1.2 mH , 匝比分别取 $1:1$ 、 $2:1$ 、 $5:1$, 仿真时间为 1 s , 电容 C_s 最终理论储能值为 33 mJ , 将 C_s 上的电压转化为其储存能量, 得到能量传输效率 η 随一次侧电感值及匝数的变化曲线见图 7。

由图 7 观察可知, 3 条曲线皆类似于一个对数函数, 初级电感在 0.5 mH 到 4 mH 之间时, 传输效率随电感值的增大而迅速增大, 而当初级电感值大于 4 mH 时, 传输效率呈现缓慢增长。同时可以看出, 随着匝比的增大, 传输效率有一定的下降, 但是下降相对不明显。通过分析可知, 初级电感值为 4 mH , 匝比为 $2:1$ 时, 此时传输效率达到 72.8% , 同时变压器的体积相对较小, 而再增大电感值对传输效率提高较小, 因此设计中初级电感值设计为 4 mH , 匝比为 $2:1$, 次级电感值则为 2 mH 。

3 仿真分析

为了验证上述理论分析的正确性, 在 Simulink 搭建实验模型进行仿真分析。

根据前面的优化分析结果, 在 Simulink 搭建的仿真电路见图 8, 其中总电阻为 0.7Ω , $U_g=200 \text{ V}$, 二

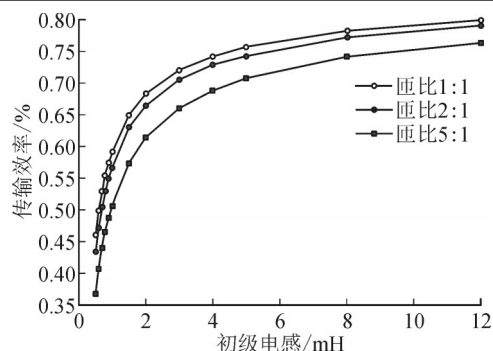


图 7 初级电感及匝数对传输效率的影响

Fig. 7 Influence of primary inductor and number of turns on transmission efficiency

极管压降为 0.4 V , $C_g=0.1 \mu\text{F}$, $L_1=4 \text{ mH}$, $L_2=2 \text{ mH}$, $C_s=1\ 000 \mu\text{F}$ 。

电容电压波形图见图 9。从图 9 可以看出, 在无负载的情况下, 当电容 C_g 上的电压充电达到 200 V 时, 开关导通, 将能量通过反激变压器迅速传递到电容 C_s 中, 每次 C_g 传输到 C_s 的能量均为 2 mJ , 在 1 s 时间内, C_s 上的电压达到 7.2 V , 储存能量 26 mJ , 平均功率为 26 mW , 考虑到电路中的电阻以及二极管的功率损耗, 这与理论计算的取能功率 33 mW 基本相符。

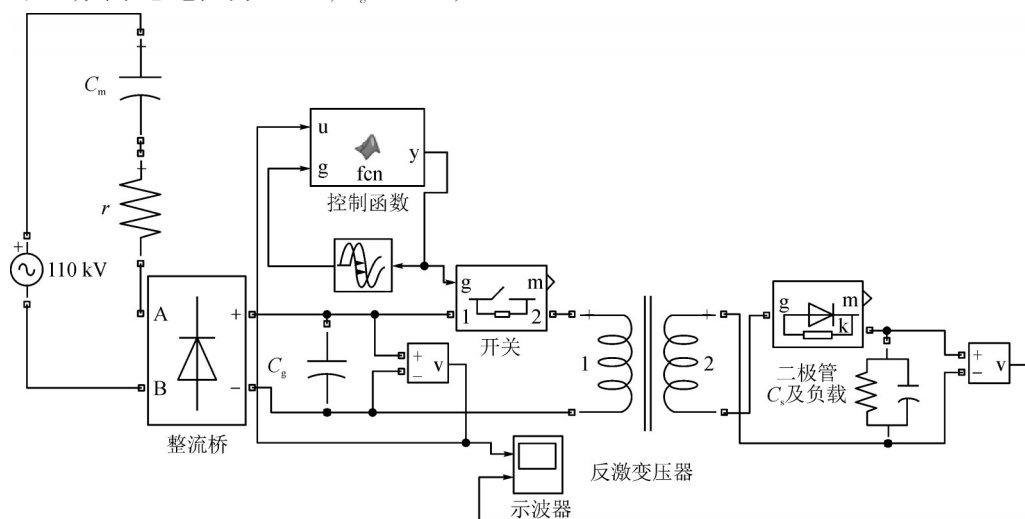


图 8 仿真电路图

Fig. 8 Simulation circuit diagram

当接入 500Ω 负载时, 负载电压波形图见图 10。从图 10 可以看出, 在接入负载 0.5 s 时, 负载电压几乎维持在 3.5 V 左右, 此时负载获得功率为 25 mW (直接取能功率为 $P=I_{dc}^2 R_L=54 \mu\text{W}$), 能够满足某些低功率在线监测设备功率需求。并且纹波相对较小, 在用电设备的可接受范围之内。

4 结论

文中针对一种交流电场无线取能电源进行了优

化设计, 并通过理论分析与仿真研究验证了优化结果的可行性。得到结论如下:

1) 影响取能功率的关键因素为取能电容的充电电压以及耦合电容, 当充电电压远小于输电线路电压时, 取能功率与取能电容的充电电压、耦合电容呈正相关关系。

2) 栅状极板由于耦合电容值接近正方形极板, 而远大于网状极板, 并且其极板面积为正方形极板的 $1/2$, 为网状极板的 $3/4$, 在强风作用下, 受力较小,

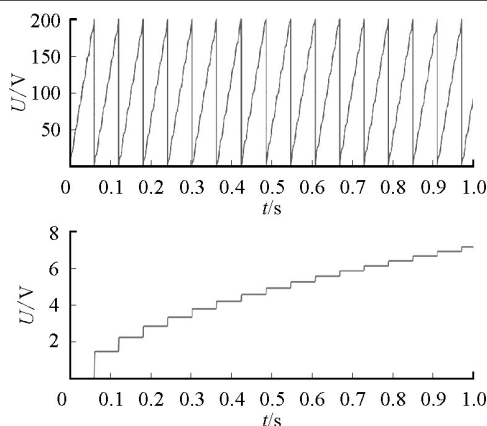


图9 电容电压波形图

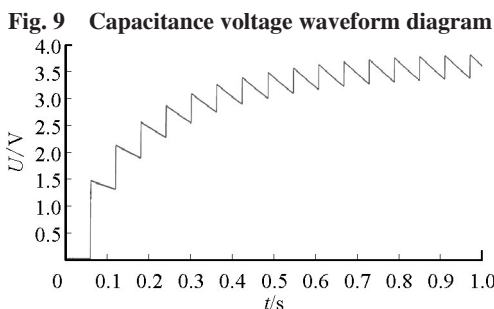


图10 负载电压波形图

Fig. 10 Load voltage waveform diagram

更加适合安装在输电杆塔上。

3)放电电路采用了反激变压器以及新的控制方式,仿真优化了反激变压器的参数,使得能量传递更加高效。

4)在 $C_m=15\text{ pF}$ 、 $C_g=0.1\text{ }\mu\text{F}$ 、 $U_g=200\text{ V}$ 时, $500\text{ }\Omega$ 负载上仿真获得取能功率为 25 mW ,与理论分析相一致,验证了取能模型的正确性。该方法相比于直接取能方式极大提升了取能功率,能够满足某些低功耗在线检测设备功率需求。

参考文献:

[1] 李成榕,吕玉珍,崔翔,等. 冰雪灾害条件下我国电网安全运行面临的问题[J]. 电网技术, 2008, 32(4): 14-22.
LI Chengrong, LYU Yuzhen, CUI Xiang, et al. Research issues for safe operation of power grid in China under ice-snow disasters[J]. Power System Technology, 2008, 32(4): 14-22.

[2] 邱红辉,李立伟,段雄英,等. 用于激光供能电流互感器的低功耗光电传输系统[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(20): 72-76.
QIU Honghui, LI Liwei, DUAN Xiongying, et al. Opt-electric transmission system of low power consumption for optically powered electronic current transformers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(20): 72-76.

[3] 陈韬,朱永,王宁,等. 基于无线传感器网络的激光主动供能系统[J]. 传感器与微系统, 2012, 31(11): 91-93.

CHEN Tao, ZHU Yong, WANG Ning, et al. Laser active power supply system for wireless sensor networks[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2012, 31(11): 91-93.

[4] 熊兰,何友忠,宋道军. 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. Design on power supply for the transmission line on-line monitoring equipment[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(9): 2252-2257.

[5] 汪磊. 一种输电线路状态监测装置的分布式能源供电技术研究[J]. 信息通信, 2013(9): 3-6.
WANG Lei. A state of transmission line monitoring device of the distributed energy supply technology research[J]. Information & Communications, 2013(9): 3-6.

[6] 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.

[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 Liming, LI Haidong, CHEN Changlong, et al. A novel online energy extracting device with low lower limit deadband on transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(2): 344-352.

[8] 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.

[9] 蒋兴良,谢彦斌,胡建林,等. 典型架空输电线路地线电磁取能等效电路的分析[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 2052-2057.
JIANG Xingliang, XIE Yanbin, HU Jianlin, et al. Analysis of equivalent circuit for tapping electromagnetic power from overhead ground wires of typical transmission lines[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 2052-2057.

[10] 范松海,谢彦斌,刘益岑,等. 逐塔接地条件下OPGW地线取能方法研究[J]. 高压电器, 2017, 53(11): 141-145.
FAN Songhai, XIE Yanbin, LIU Yicen, et al. Study on power tapping method from optical power ground wire (OPGW) grounded to each tower of transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(11): 141-145.

[11] 谢彦斌,蒋兴良,胡建林,等. 典型架空输电线路分段绝缘地线取能研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(3):

- 947-955.
- XIE Yanbin, JIANG Xingliang, HU Jianlin, et al. Study on power-tapping from segmented insulation ground wire of typical overhead transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(3): 947-955.
- [12] ZHU M, REID A, FINNEY S, et al. Energy scavenging technique for powering wireless sensors[C]//International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Beijing, China: IEEE, 2008: 881-884.
- [13] ZHU M, BAKER P C, ROSCOE N M, et al. Alternative power sources for autonomous sensors in high voltage plant [C]//Electrical Insulation Conference. Montreal, Canada: IEEE, 2009: 36-40.
- [14] 黄金鑫, 张黎, 于春辉, 等. 自供能转换器调理单元的等效建模与拓扑优化[J]. 山东大学学报(工学版), 2012, 42(2): 138-142.
- HUANG Jinxin, ZHANG Li, YU Chunhui, et al. Equivalent modeling and topological optimization for the conditioning unit of an energy harvesting converter[J]. Journal of Shandong University(Engineering Science), 2012, 42(2): 138-142.
- [15] ZHAO X M, KEUTEL T, BALDAUF M, et al. Power module for a wireless sensor node of a power line monitoring system[C]//8th International Multi-Conference on Systems Signals and Devices (SSD). Sousse, Tunisia: [s. n.], 2011: 1-5.
- [16] XINMING Z, KEUTEL T, BALDAUF M, et al. Energy harvesting for overhead power line monitoring[C]//9th Int. Multi-Conf. on Systems, Signals and Devices (SSD). Chemitz, Germany: [s. n.], 2012: 1-5.
- [17] ZANGL H, BRETTTERKLIEBER T, BRASSEUR G. A feasibility study on autonomous online condition monitoring of high-voltage overhead power lines[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2009, 58(5): 1789-1796.
- [18] 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 Dongsheng. Research of electric field energy harvesting away from high voltage transmission lines[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2015.
- [19] 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 Dongsheng, DAI Dong, LI Licheng, et al. Electric field energy harvesting around AC transmission line using impedance conversion of transformer[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(12): 3967-3972.
- [20] 骆一萍, 曾翔君, 雷永平, 等. 基于放电法的高压电场感应取能技术[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.
- [21] 曹家骏. 正方形平行板电容器的边缘效应[J]. 大学物理, 1990, 12(5): 17-19.
- CAO Jiajun. The ringing effect of square plate capacitor[J]. College Physics, 1990, 12(5): 17-19.
- [22] 朱益清, 徐坚宏. 计及边缘效应的平行板电容器的电容计算[J]. 工科物理, 1998, 8(1): 7-10.
- ZHU Yiqing, XU Jianhong. The calculation of capacitance for the parallel-plate capacitor with edge-effects[J]. Engineering Physics, 1998, 8(1): 7-10.
- 王黎明(1963—), 男, 博士(后), 现主要从事高电压外绝缘、输变电设备电晕、电磁环境及电工新技术的研究。
- 李宗(1991—), 男, 硕士研究生, 现主要从事高压电场取能研究。