

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.06.023

# 一种基于交流电场感应的取能电源设计

刘宏伟<sup>1</sup>, 郑遵国<sup>1</sup>, 李玉付<sup>2</sup>, 左昆<sup>1</sup>, 焦重庆<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206;

2. 国网山东省电力公司临沂供电公司, 山东 临沂 276002)

**摘要:**文中介绍了一种基于交流电场感应的取能电源,用于输电线路在线监测装置的供电。然而该类电源的输出功率较低,无法满足在线监测装置的用电需求。因此,在理论分析的基础上,文中设计了一种同轴双柱形的感应电极结构,以提高电源的输出功率。文中利用 COMSOL Multiphysics 软件建立仿真模型,并进行电磁场仿真分析。仿真结果表明,在 10 kV 电压等级下,所设计的感应电极可产生 3.35 mA 以上的感应电流。为验证仿真结果的准确性,文中利用自行搭建的测试平台进行实验验证,并将实验结果与仿真结果进行对比。实验结果表明,在负载电阻大于 5 kΩ 时,文中设计的取能电源可以输出超过 630 mW 的连续功率,与仿真结果基本吻合。通过文中的研究,成功解决了电场感应取能电源输出功率低下的问题,并提供了一种新型取能电路的设计思路和技术方案。

**关键词:**在线监测;供电技术;电场感应;感应电流;取能电源;感应电极

**中图分类号:** TM910.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2023)06-0214-09

## 0 引言

为了确保电力系统的安全稳定运行,需要在线监测高压架空输电线路。这些在线监测设备通常安装在导线或铁塔上,因此为这些设备供电是在线监测发展中的技术难点<sup>[1]</sup>。现有的在线监测设备的供电电源包括蓄电池、光伏发电板、电流互感器等<sup>[2-3]</sup>。电池供电稳定,但老化较快。光伏发电利用太阳能发电,但供电不稳定。电流互感器供电是应用最广泛的技术之一,然而电流互感器供电存在发热问题和死区问题<sup>[4]</sup>。

近年来,交流电场感应取能技术备受关注,其可以利用交流输电线路周围的金属感应电极与输电线路之间产生的感应电流来获取能源,且输出功率不受输电线路负载的影响<sup>[5-8]</sup>。然而,感应电极形状、输出功率和输出稳定性等技术难题仍需要解决。文献[9]提出一种扁平的圆盘形感应电极,可实现对 220 V 交流电源能量的采集,输出功率达到了数百毫瓦级别,但是其耐受电压低,不适合输电线路感应取能。文献[10]则采用圆环形的感应电极对 110 kV 的输电线路进行取能,但是仿真得到其输出电流只有微安级。文献[11]采取方形取能极板结构,取能电源的输出功率为 25 mW。文献[12]设计的取能极板已在杆塔进行了实际应用,实际测量中 110 kV 输电系统该电极可以产生超过 200 μA 的感应电流,能够保证终端装置正常工作。文献

[13]同样设计了一种金属感应电极,但是由于所设计的感应电极平面结构,并且与输电线路距离较远,所以只获得了微安级的位移电流。除了感应电极的设计,取能电路的设计也是决定取能装置输出功率的重要因素。文献[14]则通过选择滤波器、最优变比的变压器来实现对感应电极所采集到的微弱交流电能的滤波和放大。文献[15-16]设计的取能电路一定程度上提高了充电功率,但由于其开关器件仅能控制取能电容的放电时机,而未能控制其充电时机,使得取能电路的平均输入电压较低,取能电路输出功率均在 100 mW 以下。

为了感应电源的输出功率,文中提出了一种新型感应电极结构,并进行了仿真分析和实验验证。结果表明,设计的感应电极在 10 kV 电压等级下可以产生 3.35 mA 以上的感应电流,当负载电阻大于 5 kΩ 时,输出功率可超过 630 mW。

## 1 电场感应取能原理

### 1.1 感应电极结构及取能功率的决定因素

感应电极结构的示意如图 1 所示。该结构包括内电极和外电极,内电极的半径为  $r_1$ ,外电极的半径为  $r_2$ ,二者正对部分的长度为  $l$ 。内外电极之间填充了介电性能较强的电介质,该电介质的介电常数为  $\varepsilon$ ,电导率为  $\gamma$ 。

图 2 为应用上述感应电极结构的电场感应取能原理一般形式,其中感应电极的内电极接高压输电线,外电极接后端取能电路。

图 2 中,  $i_0$  为在高压时变电场作用下由内电极

收稿日期:2023-05-08;修回日期:2023-07-28

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2021YFB2400602)

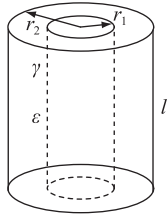


图1 感应电极结构

Fig.1 Inductive electrode structure

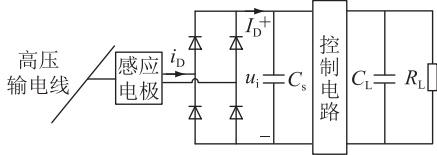


图2 电场感应取能原理的一般形式

Fig.2 General form of electric field induction energy harvesting principle

流向外电极的感应电流,经整流后输出为脉动的直流电流  $I_D$ ,  $I_D$  对取能电容  $C_s$  进行恒流充电,  $u_i$  为  $C_s$  的两端电压,也是取能电路的输入电压。充放电控制电路将  $C_s$  电能释放给储能电容  $C_L$  以及负载电阻  $R_L$ ,若  $C_L$  足够大,在电路达到稳态时其两端电压基本保持不变。

$C_s$  由  $I_D$  充电时  $u_i$  将线性增大,假设充电到  $u_i = U_{on}$  时  $C_s$  开始放电,放电到  $u_i = U_{off}$  时再次充电,  $U_{on}$ 、 $U_{off}$  分别为放电、充电阈值电压。从  $U_{off}$  充电到  $U_{on}$  的时间记为  $\Delta t$ ,从  $U_{on}$  放电到  $U_{off}$  时释放的电能为  $\Delta E$ ,从而有:

$$\begin{cases} \Delta E = C_s \frac{U_{on}^2 - U_{off}^2}{2} \\ U_{on} = \frac{I_D \Delta t}{C_s} + U_{off} \end{cases} \quad (1)$$

放电电流一般远大于充电电流,所以不计放电时间,由式(1)可得单次充放电的输入功率  $P_i$  为:

$$P_i = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{I_D}{2} (U_{on} + U_{off}) = k_x U_{avg} I_D \quad (2)$$

式中:  $k_x$  为全波整流系数,取值为 0.9;  $U_{avg}$  为取能电路的平均输入电压,  $U_{avg} = (U_{on} + U_{off})/2$ 。

因此,取能电源输入功率的决定因素为感应直流电流  $I_D$  和取能电路的平均输入电压  $U_{avg}$ 。

## 1.2 感应电流表达式

如图3所示,在输电导线交流电压的作用下,内外电极之间的电场分布为一簇沿半径方向的射线,从内电极经过电介质流向向外电极的电流不仅有感应电流  $i_D$ ,还包括传导电流(泄漏电流)  $i_C$  [17]。

在内外电极之间取半径为  $r$  的圆柱面  $S$ ,根据电荷守恒原理,有:

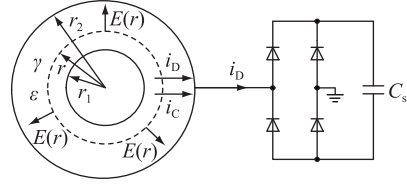


图3 感应电极等效电路

Fig.3 Equivalent circuit of inductive electrode

$$I_C = \iint_S J(r) dS = 2\pi r l J(r) \quad (3)$$

式中:  $I_C$  为泄漏电流有效值;  $J(r)$  为穿过曲面  $S$  的泄漏电流密度。根据电流密度和电场强度的关系,半径  $r$  处的电场强度为:

$$E(r) = \frac{J(r)}{\gamma} = \frac{I_C}{2\pi r l \gamma} \quad (4)$$

从而内外电极之间的电压 [18] 为:

$$U = \int_{r_1}^{r_2} E(r) dr = \frac{I_C}{2\pi l \gamma} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (5)$$

输电导线对地电位  $\varphi$  一般远大于外电极电位,从而有  $U \approx \varphi$ ,进而由式(5)可得到  $I_C$  与  $\varphi$  的关系式为:

$$I_C = \frac{2\pi l \gamma \varphi}{\ln(r_2/r_1)} \quad (6)$$

电介质选用电导率极小的绝缘材料时,  $I_C$  可忽略不计。将式(6)代入式(4)可得  $E(r)$  与  $\varphi$  关系:

$$E(r) = \frac{\varphi}{r \ln(r_2/r_1)} \quad (7)$$

根据全电流定律的积分形式(忽略泄露电流  $I_C$ ),穿过曲面  $S$  的感应电流瞬时值表达式为:

$$i_D = \iint_S \epsilon \frac{\partial E}{\partial t} dS = \frac{2\pi l \epsilon}{\ln(r_2/r_1)} \times \frac{d\varphi}{dt} \quad (8)$$

从而感应电流有效值为:

$$I_D = \frac{2\pi l \epsilon \omega \varphi}{\ln(r_2/r_1)} \quad (9)$$

式中:  $\omega$  为导线电压的角频率。根据式(9)易知,由于导线电压不变,对于某一特定的感应电极,其产生的感应电流可近似为幅值不变的交流电流源。

综上分析,提高输入功率进而提高取能电源输出功率包括 2 种途径:根据式(9)设计感应电极,获得较大的感应电流  $I_D$ ; 优化设计取能电路,提高取能电路的平均输入电压  $U_{avg}$ 。下面将阐述如何分别通过上述 2 种途径来提高取能电路输出功率。

## 2 取能电源设计

### 2.1 感应电极设计

(1) 绝缘材料的选择以及电极尺寸设计。

由式(9)可知,感应电流  $I_D$  与绝缘介质的介电

常数  $\varepsilon$  成正比,与电极内外半径比的对数  $\ln(r_2/r_1)$  成反比,以此为依据进行绝缘材料的选择以及电极尺寸设计。

感应电极应首先满足绝缘要求,由式(7)易知,电场强度最大出现在内电极表面( $r=r_1$ )处,取绝缘材料被击穿的临界条件,并留有一定的裕度,从而有:

$$\frac{\varphi}{r_1 \ln(r_2/r_1)} = kE_b \quad (10)$$

式中: $E_b$ 为绝缘材料的介电强度; $k$ 为裕度系数, $0 < k < 1$ 。由式(10)可得:

$$r_2 = r_1 \exp(\varphi / (r_1 k E_b)) \quad (11)$$

式(11)即为在绝缘材料和输电线路电压等级一定时,内外电极半径至少应满足的条件。将式(11)代入式(9)得:

$$I_D = 2\pi\varepsilon l \omega k E_b r_1 \quad (12)$$

由式(12)可知,在内外电极半径满足式(11)所示的必要关系时,感应电流的大小与输电线路的电压等级无关。因此,若要提高感应电流,首先应选用介电强度和相对介电常数较高的绝缘材料。绝缘材料产品众多,表1列出了部分绝缘材料的相关性能参数<sup>[19]</sup>。

表1 部分绝缘材料的相关性能参数

Table 1 Related performance parameters of some insulating materials

材料名称	相对介电常数	介电强度/ ( $\text{MV}\cdot\text{m}^{-1}$ )	密度/ ( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )
环氧浇注胶	$\leq 5$	$\geq 20$	1.50~1.60
层压板	$\leq 5.5$	$\geq 18$	1.30~1.45
层压管	$\leq 4.5$	$\geq 15$	$\geq 1.45$
酚醛塑料	$\leq 7$	$\geq 14$	$\leq 1.45$
云母板		$\geq 20$	$\geq 2.20$
云母带		$\geq 35$	$\geq 1.60$

由表1可知,酚醛塑料具有较高的相对介电常数和良好的介电强度,并且密度较小,因此文中选用酚醛塑料作为绝缘材料。为更直观地分析在一定感应电极尺寸、绝缘材料参数下产生的感应电流 $I_D$ 的大小,根据式(12)得到感应电流 $I_D$ 与内电极半径 $r_1$ 的关系如图4所示。

从图4可以看出,感应电流可达数毫安以上,并随内电极半径线性增大。当内电极半径相同时,绝缘材料 $\varepsilon$ 和 $kE_b$ 的乘积越大,产生的感应电流越大。

此外,设计感应电极尺寸时还须考虑绝缘材料的长期绝缘问题,为此应尽可能减小内外电极之间的电场强度<sup>[20]</sup>。由式(7)可知,可通过同时增大 $r_2/r_1$ 和 $r_1$ 的值来减小电场强度,即增大内外电极间距

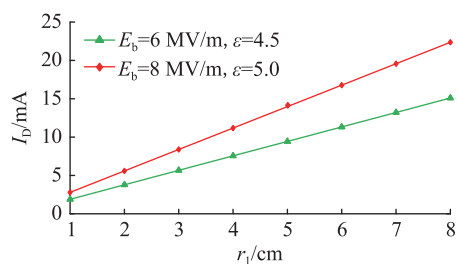


图4 感应电流 $I_D$ 与内电极半径 $r_1$ 的关系

Fig.4 Relation between induced current  $I_D$  and inner electrode radius  $r_1$

的同时增大内电极半径。根据式(9),由 $r_2/r_1$ 增大引起的感应电流下降可通过增大感应电极长度来弥补。

(2) 感应电极的安装位置。

文中设计的感应电极安装在导线上,其安装示意如图5所示,其中内电极与输电线路通过导线直接接触。

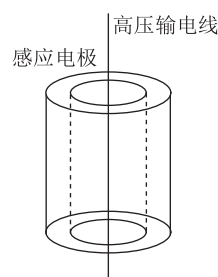


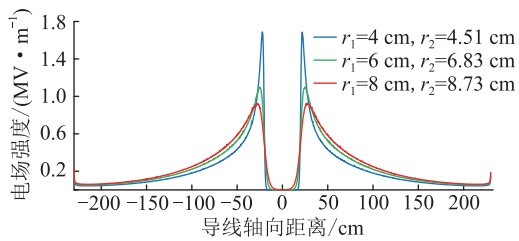
图5 感应电极安装在导线上的示意

Fig.5 Schematic diagram of inductive electrode mounted on conductor

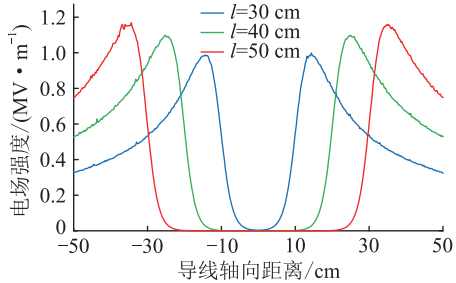
为此,在COMSOL Multiphysics仿真软件中搭建感应电极安装在输电导线的仿真模型,其中导线电压等级设置为110 kV,以无穷远处为参考电位,导线半径为1.5 cm<sup>[21]</sup>。首先, $l$ 取40 cm,根据式(11)取3组不同的内、外电极半径( $kE_b = 10 \text{ MV/m}$ ),仿真得到导线表面电场强度沿轴向的变化如图6(a)所示。然后,取其中一组内、外电极半径( $r_1 = 6 \text{ cm}$ 、 $r_2 = 6.83 \text{ cm}$ ),取3个不同的 $l$ ,仿真得到导线表面电场强度沿轴向的变化如图6(b)所示。

从图6可以看出,感应电极使沿中心轴线的导线表面电场强度变得不均匀,电场强度峰值出现感应电极边缘位置,半径越小或长度越大则电场强度峰值越大。当导线表面附近的电场强度超过起晕场强时将会导致电晕放电现象的发生。目前计算交流输电线路起晕场强的常用方法为美国工程师Peek提出的经验公式<sup>[22]</sup>,其有效值表示为:

$$E_c = 21.4\delta \left( 1 + \frac{0.298}{\sqrt{r\delta}} \right) \quad (13)$$



(a) 不同内外电极半径的导线表面电场强度



(b) 不同内外电极长度的导线表面电场强度

图6 导线表面沿中心轴线的电场强度

Fig.6 Electric field intensity of conductor surface along the central axis

式中: $E_c$ 为导线表面的电晕起始场强; $\delta$ 为相对空气密度。对于仿真中选取半径为1.5 cm的导线,相对空气密度取1,计算得到起晕场强为2.942 MV/m。根据仿真结果可知,只要感应电极半径大于某个值,导线表面就不会达到起晕场强。

此外,受边缘效应的影响,应注意内外电极边缘处电场强度的大小。取 $l=40$  cm、 $r_1=6$  cm、 $r_2=6.51$  cm,电压等级仍为110 kV,仿真得到沿导线轴向电场强度分布如图7所示。

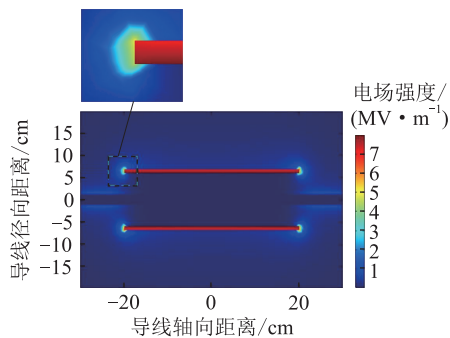
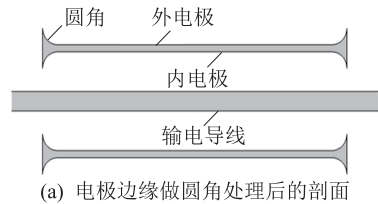


图7 沿导线轴向电场强度分布

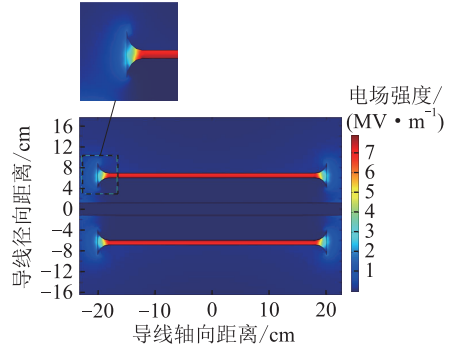
Fig.7 Axial electric field intensity distribution along conductor

从图7中可发现,内外电极边缘及其周围的电场强度明显高于其他地方,电场集中问题严重。为改善感应电极的电场分布,将电极边缘部分做圆角处理<sup>[23]</sup>,剖面图如图8(a)所示,进行仿真得到如图8(b)所示,沿输电导线轴向的电场分布图,其中电压等级和感应电极尺寸与图7中相同。

对比图7和图8(b)可发现,电极边缘做圆角处



(a) 电极边缘做圆角处理后的剖面



(b) 电极边缘做圆角处理后的电场分布

图8 电极边缘做圆角处理后的剖面 and 电场分布

Fig.8 Profile and electric field distribution of rounded electrode edge

理后能够显著降低其周围的电场强度,有效改善了感应电极的电场分布,降低了感应电极边缘及其周围的绝缘要求。

### 2.2 取能电路优化设计

根据式(2),除了提高感应电流 $I_D$ 外,还可以通过提高取能电路的平均输入电压 $U_{avg}$ 达到提高取能电源输出功率的目的。为此,可以同时提高 $U_{on}$ 和 $U_{off}$ 的值。优化设计后的取能电路如图9所示。

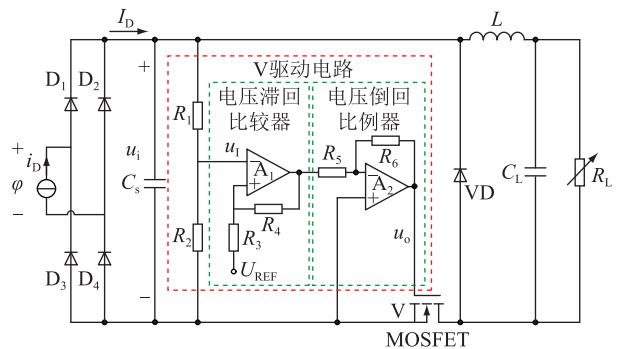


图9 取能电路

Fig.9 Energy harvesting circuit

图9中,感应电流以电流源 $i_D$ 等效, $D_1-D_4$ 构成整流桥。 $I_D$ 始终为取能电容 $C_s$ 充电, $V$ 为金属氧化物半导体场效应晶体管(metal oxide semiconductor field effect transistor, MOSFET),当其导通时, $C_s$ 开始对储能电容 $C_L$ 以及等效负载电阻 $R_L$ 放电,其中电感 $L$ 起到抑制放电电流的作用, $V$ 关断后,电感电流由续流二极管 $VD$ 进行续流。 $C_L$ 容量足够大时负载电压将基本保持不变。

$U_{on}$ 和 $U_{off}$ 的值受开关器件 $V$ 通断的控制。文

中优化设计后的 V 驱动电路如图 9 所示,由电压比较器和电压倒向比例器构成。其中,电压比较器由运算放大器 A<sub>1</sub>及电阻 R<sub>3</sub>、R<sub>4</sub>组成,其反相输入电压 u<sub>1</sub>由电压采样电阻 R<sub>1</sub>、R<sub>2</sub>分压后得到,U<sub>REF</sub>为参考电压。电压倒向比例器由运算放大器 A<sub>2</sub>及电阻 R<sub>5</sub>、R<sub>6</sub>组成,其作用是将电压比较器的输出电压反向。根据电压比较器<sup>[24]</sup>的电压传输特性,有:

$$\begin{cases} U_{T1} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} U_{REF} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} U_Z \\ U_{T2} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} U_{REF} + \frac{R_3}{R_3 + R_4} U_Z \\ U_{off} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = U_{T1} \\ U_{on} \frac{R_2}{R_1 + R_2} = U_{T2} \end{cases} \quad (14)$$

式中:U<sub>T1</sub>、U<sub>T2</sub>分别为电压比较器下门限值和上门限值;U<sub>Z</sub>为电压比较器的输出电压。

取能电路的工作过程为:I<sub>D</sub>对C<sub>s</sub>进行恒流充电,u<sub>i</sub>线性上升,当升至U<sub>on</sub>时,u<sub>1</sub>升至U<sub>T2</sub>,电压比较器输出低电平(-U<sub>Z</sub>),经电压倒向比例器输出为高电平,驱动V导通,C<sub>s</sub>开始放电,放电电流远大于充电电流,u<sub>i</sub>迅速下降,当下降至U<sub>off</sub>时,u<sub>1</sub>下降至U<sub>T1</sub>,电压比较器输出高电平(+U<sub>Z</sub>),经电压倒向比例器输出为低电平,驱动V关断,C<sub>s</sub>停止放电,u<sub>i</sub>开始回升,由此进入下一个充放电过程。

由式(14)可知,调节电阻R<sub>3</sub>、R<sub>4</sub>或U<sub>REF</sub>的值即可改变U<sub>T1</sub>、U<sub>T2</sub>的值,调节电阻R<sub>1</sub>、R<sub>2</sub>的值即可改变U<sub>on</sub>、U<sub>off</sub>的值,从而达到可同时提高U<sub>on</sub>和U<sub>off</sub>的目的。此外,该电路还具有通过调节U<sub>on</sub>和U<sub>off</sub>来控制输出功率的功能。

### 3 仿真与实验验证

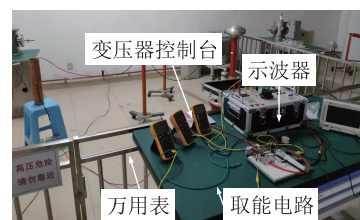
#### 3.1 仿真与实验平台搭建

为验证上述理论分析的正确性和所设计取能电源的有效性,通过MATLAB/Simulink进行仿真分析,并搭建实验平台进行实验验证。仿真电路模型如图9所示。图10(a)为实验室现场照片,图10(b)为操作台照片。

图9中,φ为升压变压器副边电压(电源电压);整流桥型号为KBPC5010,最大反向耐压1000V;C<sub>s</sub>为高压瓷片电容,耐压1000V,容量4.7μF;C<sub>L</sub>为电解电容,耐压63V,电容量4700μF;L为磁环电感,电感量60mH;V为IRF830的电力MOSFET,耐压500V,最大持续电流4.5A,导通电阻1.5Ω;VD型号为RU4A,反向耐压600V,导通压降0.6V;U<sub>o</sub>为



(a) 实验现场照片



(b) 操作台照片

图10 实验平台搭建示意

Fig.10 Schematic diagram of experimental platform construction

C<sub>L</sub>两端的电压,输出功率以P<sub>o</sub>=U<sub>o</sub><sup>2</sup>/R<sub>L</sub>计算。

图10中,感应电极的绝缘材料为酚醛电木管,内外电极为铜箔胶带,紧密贴合于绝缘材料。为避免内外电极在两端放电,使绝缘材料两端超出铜箔一部分长度(约1.5cm)。针对10kV电压等级设计的感应电极尺寸为:r<sub>1</sub>=40mm,r<sub>2</sub>=46mm,l=410mm。

为便于仿真与实验对比分析,仿真电路中各元件参数根据实验元器件参数进行设置,其中电流源i<sub>D</sub>值根据实验中所测得的感应电流值进行设置。

#### 3.2 取能电路输入电压波形测量

由于元器件耐压值有限,根据式(14)设置取能电路的电阻参数,使取能电路输入电压最高不超过500V。图11(a)、(b)、(c)分别为电源电压为10kV时取能电路的输入电压u<sub>i</sub>、MOSFET控制电压u<sub>o</sub>的仿真波形、实验波形。

从图11中可以看出,u<sub>o</sub>为低电平时,u<sub>i</sub>为充电状态,近似为线性上升;u<sub>o</sub>为高电平时,u<sub>i</sub>为放电状态,电压几乎在瞬间从U<sub>on</sub>跌落至U<sub>off</sub>,这是因为放电电流远大于充电电流,从而放电时间远小于充电时间。仿真波形与实验波形基本一致,二者也与2.2节设计的取能电路预期波形一致。

#### 3.3 感应电流与取能电路输入、输出功率测量

实验时,取R<sub>L</sub>=2kΩ,保持u<sub>i</sub>=357.1V不变,逐次改变电源电压φ,测得感应电流I<sub>D</sub>,并根据测得的感应电流值逐次改变仿真中电流源参数,得到感应电流I<sub>D</sub>和输出功率P<sub>o</sub>(仿真值和实验值)随电源电压φ的变化关系如图12所示。

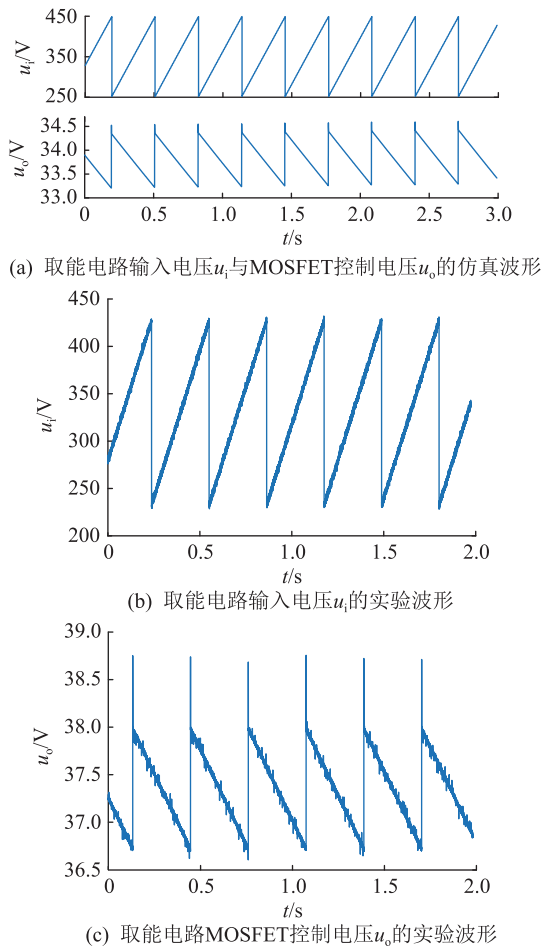


图 11 电压等级为 10 kV 时取能电路的输入电压  $u_i$  与 MOSFET 控制电压  $u_o$  的波形

Fig.11 At a voltage level of 10 kV, the input and voltage of the energy harvesting circuit  $u_i$  and the control voltage of MOSFET  $u_o$  waveforms

从实验结果可知,相比于现有研究中的微安级感应电流,文中所设计感应电极所产生的感应电流可达数毫安以上,这与 2.1 节理论分析结果相一致,验证了所设计感应电极的有效性。从图 12 中可以发现,输出功率随着电源电压增大而增大,这是因为电源电压增大使感应电流增大,从而使输入功率增大,进而使输出功率增大,验证了式(2)及式(9)。同时还可发现,输出功率仿真值与实验值有较大差距,其主要原因在于:实验中 MOSFET 存在开断损耗,且开断频率较高,损耗值较大,而仿真中所用 MOSFET 为理想开关器件,不存在开关损耗;桥式整流器件的漏电流和浪涌电流会造成功率损耗,仿真中不存在此类损耗;瓷片电容和电解电容等无功器件的泄漏电流和寄生电阻造成了一定损耗,仿真中使用的是理想器件,无此类损耗;以及取能电路所使用的排针式电路板电阻造成损耗,仿真中采用的是理想导线不存在此类损耗。若使用高品质的元

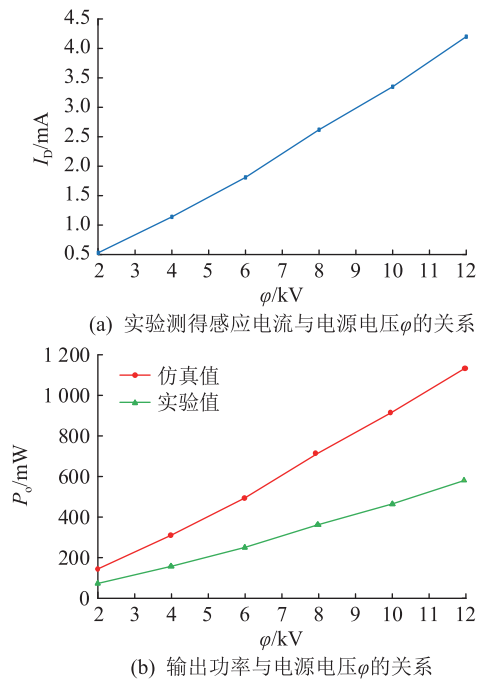


图 12 感应电流  $I_D$  和输出功率  $P_o$  随电源电压  $\phi$  变化的关系

Fig.12 The relationship between induced current  $I_D$  and output power  $P_o$  varies with the supply voltage  $\phi$

器件和超低阻的连接电路,可以获得更高的输出功率。

实验中,取  $R_L = 2 \text{ k}\Omega$ ,保持电源电压为 10 kV 不变,并将仿真电路中的电流源设置为 3.35 mA,根据式(14)改变取能电路平均输入电压  $U_{\text{avg}}$ ,根据式(2)计算取能电路输入功率,得到取能电路输入功率  $P_i$ 、输出功率  $P_o$  (仿真值和实验值)随  $U_{\text{avg}}$  变化的关系如图 13 所示。

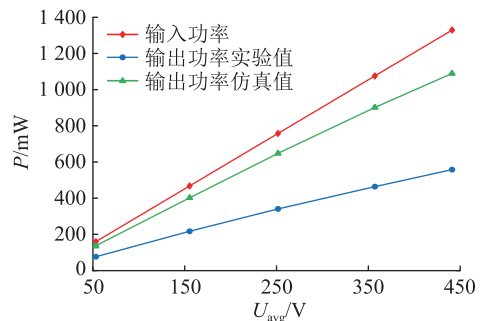


图 13 取能电路输入功率  $P_i$  和输出功率  $P_o$  随平均输入电压  $U_{\text{avg}}$  变化的关系

Fig.13 The relationship between the input power  $P_i$  and the output power  $P_o$  of the energy harvesting circuit varies with the average input voltage  $U_{\text{avg}}$

由图 13 可知,增大取能电路  $U_{\text{avg}}$  可提高输出功率,进一步验证了式(2)。由仿真和实验结果可知,改变开关器件驱动电路相关参数可得到不同取能

电路  $U_{avg}$ , 进而可以控制取能电源输出功率, 验证了 2.2 节所设计驱动电路的有效性。

### 3.4 带负载能力分析

实验时, 保持  $\varphi = 10 \text{ kV}$ 、 $u_i = 357.1 \text{ V}$  不变, 即此时取能电路输入功率  $P_i$  保持  $1\ 076.7 \text{ mW}$  不变。改变负载电阻  $R_L$ , 测得输出电压  $U_o$ 、输出功率  $P_o$  和取能效率  $\eta = P_o/P_i$  随负载电阻  $R_L$  的变化曲线如图 14 所示。

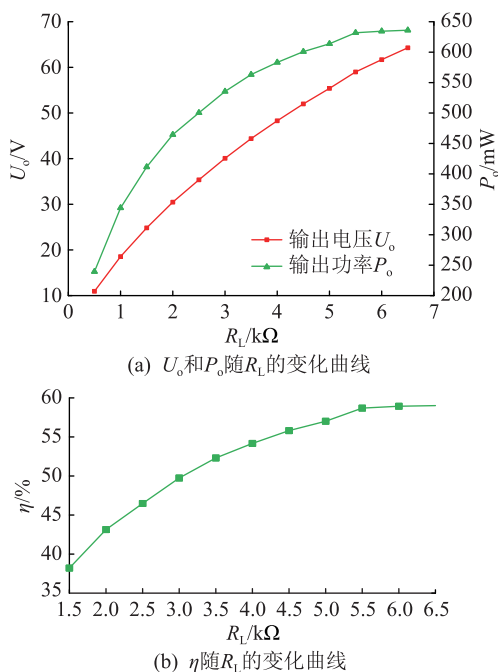


图 14 输出电压  $U_o$ 、输出功率  $P_o$ 、取能效率  $\eta$  随负载电阻  $R_L$  的变化曲线

Fig.14 The relationship between the output voltage  $U_o$ , output power  $P_o$  and energy harvesting efficiency  $\eta$  varies with load resistance  $R_L$

由图 14 可知, 输出功率随着负载电阻增大而增大, 但当负载电阻大于  $5 \text{ k}\Omega$  时, 输出功率基本稳定在  $630 \text{ mW}$ 。相比于现有研究中电场感应取能供电电源功率输出不足  $100 \text{ mW}^{[13]}$ , 文中设计的电场感应取能供电电源将感应电流提高至毫安级, 并有效提高了取能电路的  $U_{avg}$ , 较大幅度提升了取能功率。同时随负载电阻增大, 取能电路的功率传输效率也逐渐增大, 但是, 当电阻超过  $5.5 \text{ k}\Omega$  时, 功率传输效率逐渐稳定在  $58.8\%$  左右。相对于文献 [16] 只有  $30\%$  的传输效率, 文中取能电路的功率传输效率有了较大的提升。

表 2 列出了近年部分代表性研究中电场取能电源的设计参数和输出性能, 并与文中设计进行了对比。从表 2 可以看出, 文中设计的感应电极及取能电路尺寸较小, 获得的输出功率较大, 体现出材料节约、获能更高的优点。

表 2 部分代表性取能电源结构参数和输出功率  
Table 2 Structural parameters and output power of some representative energy harvesting power supplies

年份	电极结构	电压等级/ kV	尺寸	输出功率/ mW
2018	管状电极 <sup>[16]</sup>	12.7	<绝缘子尺寸	23.6
2020	栅形电极 <sup>[11]</sup>	110	长 50 cm, 宽 50 cm	25
2021	板状电极 <sup>[25]</sup>	10	长 45 cm, 宽 45 cm	0.12
2021	板状电极 <sup>[13]</sup>	65	长 100 cm, 宽 50 cm	40
2022	柱状电极 <sup>[26]</sup>	50	直径 25 cm, 长 100 cm	300
2022	同轴圆柱 (文中)	10	内径 4 cm, 外径 4.6 cm, 长 40 cm	630

实验结论表明, 文中设计的取能电源可输出数百毫瓦以上的连续功率。需要指出的是, 该功率级别仅代表了文中特定条件下(指电压等级、感应电极尺寸、后端取能电路输入电压)的功率输出, 仅验证了文中所提设计方法的有效性。更高的电压等级、更大的感应电极尺寸、更高的取能电路输入电压都会使取能功率大幅提升。并且可根据负载的实际功率需求来设定这 3 个条件, 从而使应用范围更加广泛。

## 4 结语

文中设计了以同轴双柱形铜箔作为取能电极的交流电场取能装置, 并对取能电路中开关器件的驱动电路进行了优化设计, 达到了提高取能功率的目的。实验测得感应电极在电源电压为  $10 \text{ kV}$  时可以产生  $3.35 \text{ mA}$  以上的感应电流, 验证了文中取能装置设计的正确性和有效性。

另外文中对取能电路的带负载性能进行试验测试, 试验结果表明在  $10 \text{ kV}$  电源电压下, 负载电阻大于  $5 \text{ k}\Omega$  时取能电路可输出  $630 \text{ mW}$  以上的连续功率。其他电压等级的输电线路可以参考该方法进行相关设计。

### 参考文献:

[1] 雷朝煜, 郝良收, 戴甲水, 等. 高压直流输电线路故障定位研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(11): 178-187.  
LEI Zhaoyu, HAO Liangshou, DAI Jiashui, et al. A review of fault location methods in HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(11): 178-187.

[2] 高淑萍, 姜元月, 宋国兵, 等. 混合三端直流输电线路故障测距方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(15): 76-83.  
GAO Shuping, JIANG Yuanyue, SONG Guobing, et al. Research on a fault location method for a hybrid three-terminal DC transmission line[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(15): 76-83.

[3] 任小明, 范兴明, 胡秋生, 等. 电力系统电气设备自供电技术

- 探讨[J]. 山东电力技术, 2018, 45(2): 6-11.  
REN Xiaoming, FAN Xingming, HU Qiusheng, et al. Discussion on self-supply technology of electrical equipment in power system[J]. Shandong Electric Power, 2018, 45(2): 6-11.
- [4] 王琼, 车传强, 张建英, 等. 电流互感器批量缺陷的成因诊断分析和模拟试验研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(2): 48-53.  
WANG Qiong, CHE Chuanqiang, ZHANG Jianying, et al. Study on diagnosis analysis and simulation tests for batch defects of current transformers[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(2): 48-53.
- [5] 陈赦, 胡东阳, 汪泓, 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.
- [6] 李杰. 低压电力线电场取能电源的研究与实现[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2020.  
LI Jie. Research and realization of electric field energy harvesting power supply for low voltage power line[D]. Chongqing: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2020.
- [7] 王秉卓, 司剑飞, 于春风. 基于脉冲功率技术的高压电场感应取能设计[J]. 电力工程技术, 2019, 38(6): 160-166.  
WANG Bingzhuo, SI Jianfei, YU Chunfeng. A design of high voltage electric-field induction energy-acquisition based on pulsed power technology[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(6): 160-166.
- [8] 李春龙, 黄辉, 梁云, 等. 面向电力传感器的环境能量收集技术发展现状及面临的挑战[J]. 中国电力, 2021, 54(2): 27-35.  
LI Chunlong, HUANG Hui, LIANG Yun, et al. Development trends and challenges of environmental energy collection technology for power sensors[J]. China Electric Power, 2021, 54(2): 27-35.
- [9] ZHANG J J, GU J, TIAN X L, et al. Simulation of electric field energy harvesting based on electret electrostatic enhancement[C]//2021 4th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering (CEEPE). Chongqing, China. IEEE, 2021: 977-981.
- [10] 江翼, 刘正阳, 肖黎, 等. 基于多级电容充电的输电线路电场感应取能装置的研制[J]. 高压电器, 2020, 56(2): 176-182.  
JIANG Yi, LIU Zhengyang, XIAO Li, et al. Development of electric field-induced energy acquisition device based on multi-stage capacitor charging[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(2): 176-182.
- [11] 王黎明, 李宗, 孟晓波, 等. 一种交流电场无线取能电源的优化设计[J]. 高压电器, 2020, 56(5): 121-127.  
WANG Liming, LI Zong, MENG Xiaobo, et al. Optimization design of an AC electric field wireless power supply[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(5): 121-127.
- [12] 张佩. 应用于线路智能感知终端的高压取能技术[J]. 电工电气, 2021(1): 71-73.  
ZHANG Pei. High-voltage energy extraction technology applied to line intelligent sensing terminal[J]. Electrotechnics Electric, 2021(1): 71-73.
- [13] 何宁辉, 张佩, 吴旭涛, 等. 用于输电线路监测设备的一种电场感应取能电源[J]. 电源学报, 2020, 18(5): 203-209.  
HE Ninghui, ZHANG Pei, WU Xutao, et al. Electric field induction power supply used in monitoring device of transmission line[J]. Journal of Power Supply, 2020, 18(5): 203-209.
- [14] 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 harvesting technology based on discharge method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8): 113-119.
- [15] RODRÍGUEZ J C, HOLMES D G, MCGRATH B P, et al. Energy harvesting from medium voltage electric fields using pulsed flyback conversion[C]//2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia). Hefei, China. IEEE, 2016: 3591-3598.
- [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] 江俊勤. 充电圆平行板电容器的电磁场分布[J]. 大学物理, 2016, 35(2): 21-26.  
JIANG Junqin. Electromagnetic field from a charging circular parallel plate capacitor[J]. College Physics, 2016, 35(2): 21-26.
- [18] 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.  
XIA Zhuqing, WU Xixiu, SU Chao, 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.
- [19] 李英葆, 陈京生. 绝缘材料便查手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.  
LI Yingbao, CHEN Jingsheng. Handbook of convenient inspection of insulating materials[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- [20] 任广振, 吴健儿, 李翔翔, 等. 高压电缆交联聚乙烯绝缘长期服役后的性能变化研究[J]. 绝缘材料, 2020, 53(7): 51-56.  
REN Guangzhen, WU Jianer, LI Xiangxiang, et al. Properties of high voltage cable XLPE insulation after long-term service[J]. Insulating Materials, 2020, 53(7): 51-56.
- [21] 陈静. 110 kV 输变电工程导线选型研究[J]. 黑龙江工业学院学报(综合版), 2019, 19(3): 47-51.  
CHEN Jing. Selection of the conductor for 110 kV transmission and transformation project[J]. Journal of Heilongjiang University of Technology (Comprehensive Edition), 2019, 19(3): 47-51.



[22] 段娜娜,王雪焕,徐伟杰,等. 不同电离系数和附着系数对导线起晕场强的影响综述[J]. 高压电器,2021,57(4):1-9.  
DUAN Nana, WANG Xuehuan, XU Weijie, et al. Summary of the influence of different ionization coefficients and attachment coefficients on the corona inception field strength [J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(4): 1-9.

[23] 王钰楠, 仵杰. 导体表面圆角化过程中的电荷分布特性研究[J]. 工业控制计算机, 2017, 30(4): 126-127.  
WANG Yunan, WU Jie. Characteristics of charge distribution in process of conductor surface rounded [J]. Industrial Control Computer, 2017, 30(4): 126-127.

[24] 杨德旺,张春华,郭春炳. 一种超低输入共模电压的动态比较器电路设计[J]. 电子技术应用,2021,47(10):48-52.  
YANG Dewang, ZHANG Chunhua, GUO Chunbing. Design of a dynamic comparator circuit for ultra-low input common-mode voltage [J]. Application of Electronic Technique, 2021, 47(10): 48-52.

[25] 王黎明,李宗,孟晓波,等. 基于电场感应的低功率在线监测传感器的供电技术[J]. 高电压技术,2020,46(2):538-545.

WANG Liming, LI Zong, MENG Xiaobo, et al. Power supply technology of low power on-line monitoring sensor based on electric field induction [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(2): 538-545.

[26] 倪源,谢施君,贾程乾,等. 电场耦合取能技术的仿真与试验研究[J]. 四川电力技术,2021,44(4):1-5,10.  
NI Yuan, XIE Shijun, JIA Chengqian, et al. Simulation and experimental research on influencing factors of coupling power technology [J]. Sichuan Electric Power Technology, 2021, 44(4): 1-5, 10.

作者简介:



刘宏伟

刘宏伟(1975),女,博士,副教授,研究方向为先进输电技术、电力系统自动化(E-mail: hwliu@ncepu.edu.cn);

郑遵国(1997),男,硕士在读,研究方向为高压电场取能技术;

李玉付(1995),男,硕士,从事输电线路监测工作。

## Optimal design of energy harvesting power supply based on AC electric field induction

LIU Hongwei<sup>1</sup>, ZHENG Zunguo<sup>1</sup>, LI Yufu<sup>2</sup>, ZUO Kun<sup>1</sup>, JIAO Chongqing<sup>1</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. State Grid Shandong Electric Power Company Linyi Power Supply Company, Linyi 276002, China)

**Abstract:** An energy harvesting power supply based on AC electric field induction is introduced, which is used for power supply of online monitoring devices for transmission lines. However, the output power of this type of power supply is relatively low, which cannot meet the electricity demand of online monitoring devices. Therefore, based on theoretical analysis, a coaxial dual column inductive electrode structure is designed in the article to improve the output power of the power supply. A simulation model is established using COMSOL Multiphysics software and electromagnetic field simulation analysis is conducted. The simulation results show that the designed inductive electrode can generate an induced current of over 3.35 mA at a voltage level of 10 kV. To verify the accuracy of the simulation results, an experimental verification is conducted using a self built testing platform in the laboratory, and the experimental results are compared with the simulation results. The experimental results show that when the value of load resistance is higher than 5 kΩ, an energy harvesting power supply can output continuous power exceeding 630 mW, which is basically consistent with the simulation results. Through the research in the article, the problem of low output power of electric field induction energy harvesting power supply has been successfully solved, and a new design concept and technical solution of energy harvesting circuit has been proposed.

**Keywords:** online monitoring; power supply technology; electric field induction; induced current; energy harvesting power supply; inductive electrode

(编辑 吴昊)