

电场耦合取能技术的仿真与试验研究

倪源^{1,2}, 谢施君², 贾程乾^{1,2}, 夏亚龙², 张晨萌²

(1. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

摘要:为给输电线路的监测器件提供稳定、便利的电源,基于电磁感应的原理设计了无线电容取电装置,可以最大化利用空间能量,对支撑输电线路的运行状态监测具有重要意义。首先,分析了电容取电的结构,以此得到取能装置输出功率与高压杂散电容、低压杂散电容、负载电阻等参数的计算关系,发现合理增加感应电极面积、减小感应电极电容值和增加负载电阻值可以有效提升取能装置输出功率;其次,利用多物理场仿真软件模拟了电容取电的影响因素,最后,通过 Matlab 软件设计了高压实验装置,对实际情况进行模拟与实验。实验结果表明,当电源电压为 10 kV、耦合电容为 14 pF 时,1 MΩ 的负载可以得到 0.12 mW 功率。

关键词:电磁感应;运算放大器;无线;电容取电;最大能量

中图分类号:TM 76 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2021)04-0001-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210401

Simulation and Experimental Research on Influencing Factors of Coupling Power Technology

Ni Yuan^{1,2}, Xie Shijun², Jia Chengqian^{1,2}, Xia Yalong², Zhang Chenmeng²

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology,

Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. State Grid Sichuan Electric Power

Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: In order to provide a stable and convenient power supply, based on the principle of electromagnetic induction, a wireless capacitance power take-off device is designed, which can maximize the use of space energy. It is important for the monitoring of the operation status of transmission line. First of all, the structure of capacitance power draw-out is introduced, and the calculation relationship between the output power of energy extraction device and the high-voltage stray capacitance, low-voltage stray capacitance, load resistance and other parameters is deduced. It is found that increasing the area of the sensing electrode, reducing the capacitance value of sensing electrode and increasing the load resistance value reasonably can effectively increase the output power of energy extraction device. Secondly, specify software is used to simulate the influencing factors of capacitance power supply. Finally, a high-voltage experimental device is designed with Matlab software, and the actual situation is simulated and tested. The experimental results show that 1 MΩ load can get 0.12 mW power when the power supply voltage is 10 kV and the coupling capacitance is 14 pF.

Key words: electromagnetic induction; operational amplifier; wireless; capacitor for power; maximum energy

0 引言

智能电网已经成为电网不可分割的一部分,如今已经有大量的传感器、监测装置应用于电网,获取电网运行的关键数据信息^[1-3]。多数传感器和监测

装置所处工作场景,并不具备常规电源的供电条件。因此,独立于常规电源供电系统的取能技术对于传感器的推广应用就尤为重要。

目前,常规的取能技术主要有太阳能、地线取能、磁场取能等方式^[4-7]。其中,太阳能受环境影响较大,不便应用于日照条件不充足的地区;地线取能技术仅适用于架空输电线路的传感器,且易受到雷

基金项目:国家电网有限公司总部管理科技项目(宽频暂态电压测量装置溯源及现场校准技术研究 52199918000G)

击的威胁;磁场取能技术目前应用较为广泛,但是一般需要将取能线圈靠近高压导线,且取能大小与导线通流密切相关,无法用于空载的高压导线。由于被监测电力设备一般处于高电压状态下,且特定电压等级的电力设备电压波动较小,因此基于电场的取能技术可提供稳定输出的电源。

近年来,国内外已有学者对电场耦合取能技术开展研究。典型的取能原理是将一个不接地的感应极板布置于电场中,在电场作用下感应极板将感应电荷,采用后续电路可将感应极板的能量供给负荷^[11-12]。由于基于电场耦合的取能装置功率一般较低,提升其功率是研究该取能技术的关键^[13]。有学者提出在后级电路中加入电力电子开关,通过其高频通断提升能量的传递效率;然而开关自身耗能较高且容易发生故障^[14-16]。另一种思路是在后级电路中加入电能变换电路,但其结构复杂、成本较高,且同样需要开关控制,电能消耗比较大^[17]。

为探究电场耦合取能装置输出能力的影响因素为取能电路设计提供参考思路,下面将分析电场耦合取能回路的基本原理,推导后级电路输出电压的理论计算公式,并分析感应极板结构参数、位置、后级电路参数等因素对取能装置输出电压的影响。最后,采用实验室试验对理论分析结果进行验证,从而对后续电场耦合取能技术的优化提供参考。

1 基本原理

采用两个平行布置的金属极板产生均匀电场,电场大小通过金属极板的施加电压幅值和极板距离进行调整。电场耦合取能回路的基本结构如图 1 所示。其中, A_1 、 A_2 分别为产生均匀电场的高压极板和接地极板; B_1 、 B_2 分别为电场耦合回路的高压感应极板和接地极板; T_c 为不控整流桥,可将电场耦合极板上的交流电压整流为直流电压; R 为负载; U_s 为金属极板上施加的电压; C 为滤波电容; U 为最终施加于负载上的电压。

在图 1 所示的回路结构中,可采用电路的思想对其进行分析。不控整流桥 T_c 将交流分量变为直流分量,对于直流分量,滤波电容 C 相当于开路,所以计算时可以忽略。其中,负载上的电压 U 可以视为由感应极板电容 C_2 、负载电阻 R 并联形成的二次回路阻抗 Z_L 与感应极板和高压极板之间高压杂散

电容 C_1 分压后得到。

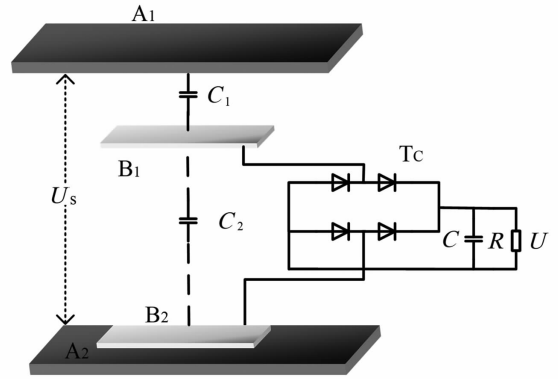


图 1 电场耦合取能回路的基本结构

C_2 、 R 并联阻抗为 Z_L :

$$Z_L = \frac{R}{1 + j\omega C_2 R} \quad (1)$$

根据并联阻抗和高压杂散电容的分压公式可以得到电阻两端的电压 U 为

$$U = \frac{R^2 \omega^2 C_1 (C_1 + C_2) + j\omega R C_1}{1 + R^2 \omega^2 (C_1 + C_2)^2} \times U_s \quad (2)$$

故负载上的功率 P 为

$$P = \frac{R^3 \omega^4 C_1^2 (C_1 + C_2)^2 + R \omega^2 C_1^2}{[1 + R^2 \omega^2 (C_1 + C_2)^2]^2} \times U_s^2 \quad (3)$$

由式(3)可知,影响负载实际获得的功率与 C_1 、 C_2 、 R 这 3 个因素有关,下面将通过理论分析具体讨论。

2 影响因素分析

2.1 高压杂散电容的影响

取 $R=1 \text{ M}\Omega$ 、 $C_2=10 \text{ pF}$ 、 C_1 从 0 到 0.1 nF 变化时,负载 R 上的取能功率如图 2 所示。当电阻 R 、感应极板电容 C_2 不变时,负载取能功率 P 随着高压杂散电容 C_1 的增大而增大,且增长速度逐渐加快。因此,为提升取能功率,应在合理范围内增大高压杂散电容 C_1 。

高压杂散电容 C_1 的大小可由式(4)进行估计,其主要取决于极板结构、填充介质的介电常数以及极板间的相对位置。

$$C_1 = \varepsilon \frac{S}{d_1} \quad (4)$$

式中: ε 为介电常数; S 为极板的正对面积; d_1 为极板间距。因此,通过改变式(4)中的 3 个因数,可以获得不同的高压耦合电容值。

为获得准确的高压耦合电容值,在有限元分析

软件中搭建了图 1 所示试验结构的计算模型。

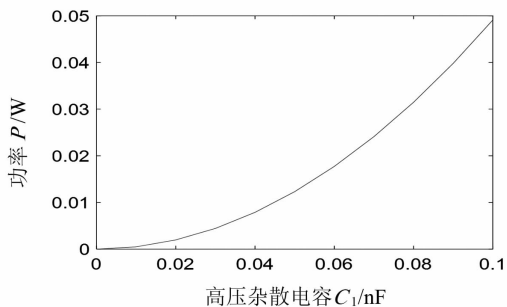
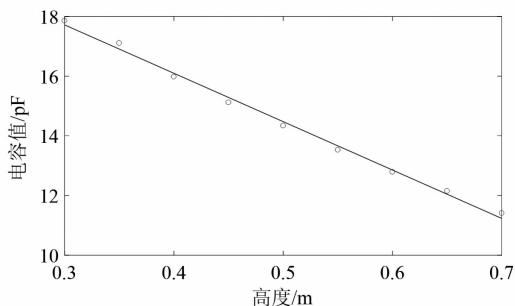
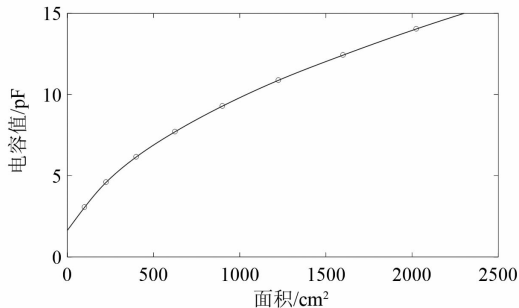


图 2 负载功率随耦合电容的变化

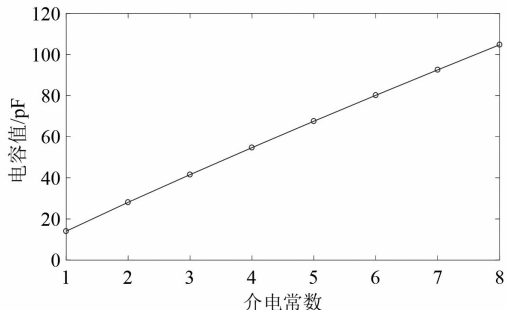
当分别改变感应极板面积 S 、高压极板与感应极板之间的距离 d_1 、介电常数 ϵ 时,电容值 C_1 的计算结果如图 3 所示。



(a) 电容值随极板间距的变化



(b) 电容值随极板面积变化



(c) 电容值随介质的相对介电常数变化

图 3 极板结构变化的仿真结果

在图 3(a) 中,极板正对面积 $S = 2025 \text{ cm}^2$ 、相对介电常数 $\epsilon = 1$ 、极板间距 d_1 从 0.3 m 到 0.7 m 变化时,高压杂散电容 C_1 与距离 d_1 成线性变化,距离 d_1 越大,高压杂散电容 C_1 越小,结合图 2 计算结果,负载功率也随之减小。

在图 3(b) 中,相对介电常数 $\epsilon = 1$ 、距离 $d_1 = 0.3 \text{ m}$ 、面积 S 从 100 cm^2 到 2025 cm^2 变化时,电容值 C_1 随着面积 S 增大而逐渐增大,但增长的幅度逐渐降低。一方面,该现象由平板电极的边缘效应所影响。当平板电极无限大时,电荷均匀分布在电极中;然而实际中的平板面积大小有限,平板边缘电荷相对集中。另一方面,极板边长的增长速度要低于面积。结合图 2 计算结果可知,极板面积增加有利于提高负载功率。然而,受恶劣环境以及极端天气等因素的影响,若面积 S 过大会造成安全隐患,故应在满足使用条件的情况下,选取合适的面积值,提高利用效率。

在图 3(c) 中,面积 $S = 2025 \text{ cm}^2$ 、 $d_1 = 0.3 \text{ m}$ 、相对介电常数 ϵ 从 1 到 8 改变时,电容值 C_1 随着介电常数 ϵ 的增大而线性增加。然而,在实际情况中, C_1 的绝缘介质通常为空气,其相对介电常数难以大幅度改变。因此,一般较难通过改变 C_1 的相对介电常数来提升负载的取能功率。

2.2 负载阻值的影响

取 $C_1 = 14 \text{ pF}$ 、 $C_2 = 10 \text{ pF}$,负载阻值 R 从 0Ω 到 $5 \text{ M}\Omega$ 变化时,负载功率变化如图 4 所示。取能功率 P 随着电阻 R 的增大而增大,所以当负载变大时,可以得到更大的取能功率。

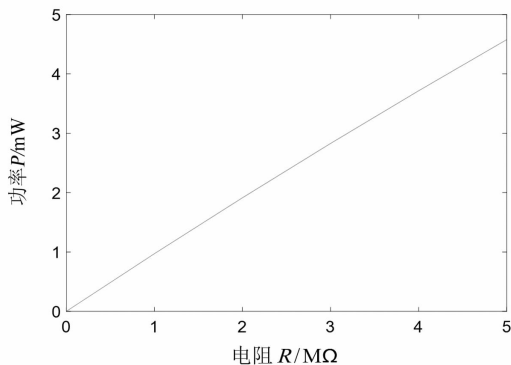


图 4 负载功率随负载阻值变化

2.3 感应极板面积的影响

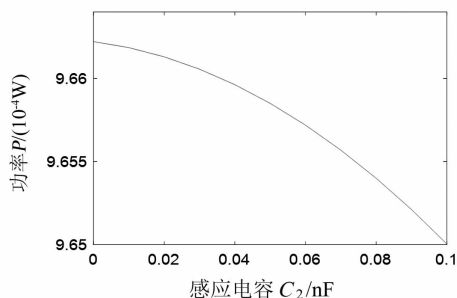


图 5 负载功率随感应极板电容的变化

取 $R=1\text{ M}\Omega$ 、 $C_1=14\text{ pF}$ 、 C_2 从 0 到 0.1 nF 变化时,负载 R 上的功率 P 变化如图 5 所示。取能功率 P 随着感应极板电容 C_2 的增大而减小。故为提升功率,应尽量降低感应极板电容 C_2 的电容值。

3 仿真与实验分析

在 Matlab 中,针对第 2 章中实际运算放大器的取能电路在 Simulink 模块中进行仿真研究。取电源内阻 $r=0.1\ \Omega$ 、电压源 $U=10\text{ kV}$ 、高压杂散电容 $C_1=14\text{ pF}$ 、感应电容 $C_2=10\text{ pF}$ 、滤波电容 $C=10\ \mu\text{F}$ 、负载 $R=1\text{ M}\Omega$,取能装置仿真模型如图 6 所示。

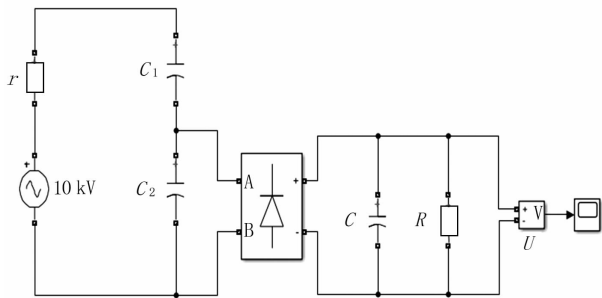


图 6 电场耦合取能回路的仿真模型

此时,取能装置中负载 R 两端的电压波形如图 7 所示。

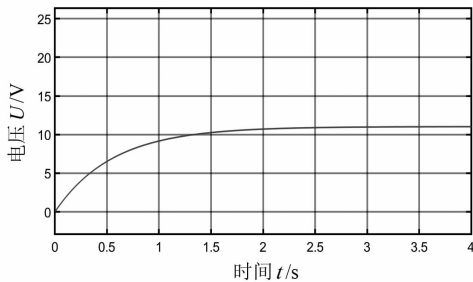


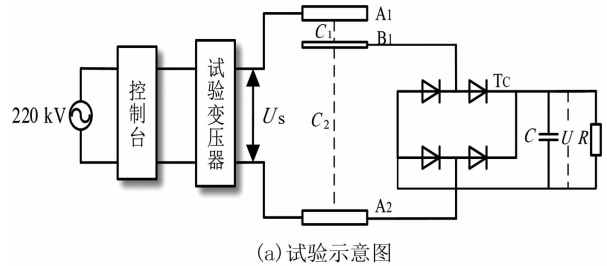
图 7 负载电压仿真波形

如图 7 所示,2 s 后,电阻两端电压稳定在 11 V,在 10 ~ 15 V 之间,所设计的取电装置可以在电场中给阻抗为 $1\text{ M}\Omega$ 的运算放大器提供稳定的电压。

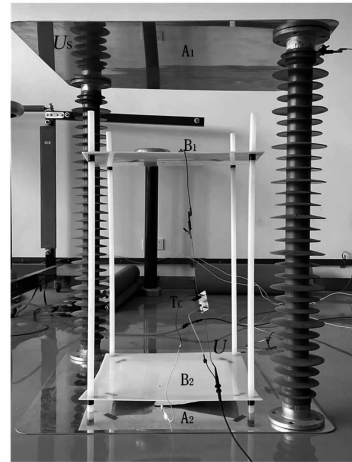
同时,为进一步验证第 2 章分析的取能效率与相关影响因素的变化关系,针对第 2 章分析的试验结构开展试验研究。试验回路示意图及现场布置如图 8 所示,主要由高压试验变压器、电场极板、感应极板和负载组成。电场极板的面积为 $1\text{ m}\times 1\text{ m}$,两块极板的间距高度为 1.24 m ,空间电场值可由施加电压和极板间距初步估计,在所仿真的研究中,该电场值与实际变电站中工频电场值相当。感应极板面

积和高度可以灵活调节。负载 R 两端的感应电压 U 通过示波器探头进行测量。

当调节高压试验变压器输出的工频高压 U_s 时,负载上的电压 U 随工频高压 U_s 线性增加,故在电场强度较大的空间中,相同条件的感应极板可以取得更大功率。



(a) 试验示意图



(b) 现场布置

图 8 取能装置高压试验布置

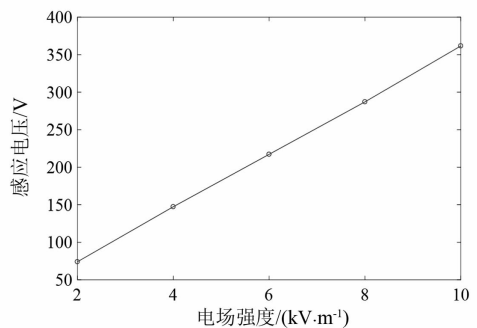


图 9 感应电压随电场强度变化

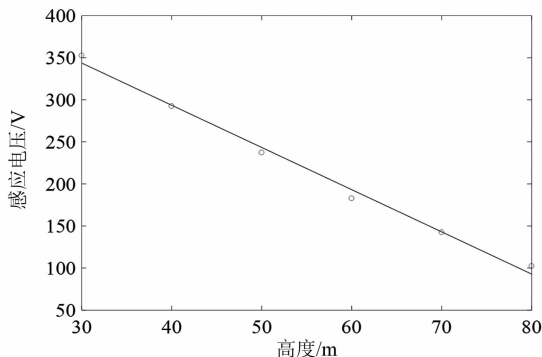
图 10 为调整感应电极与高压电极距离、感应电极面积下的负载电压值。当感应电极与高压电极距离 d_1 从 30 cm 到 75 cm 变化时,负载 R 两端的感应电压 U 与 d_1 成线性降低变化趋势。感应极板 B_1 与高压极板 A_1 的距离 d_1 越小,感应电容 C_2 越小,则负载能够取得的能量越多。

当感应电极面积从 100 cm^2 增加到 2025 cm^2 时,感应电压 U 随着面积 S 的增大而增大,但是增

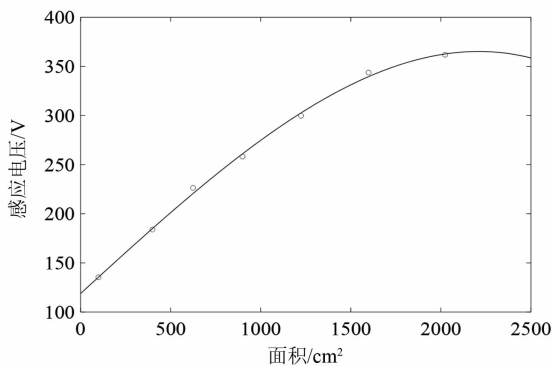
长速度逐渐降低。

在高压极板和感应极板相对结构确定的情况下,通过改变负载 R ,测量其不同的电压值,可求得实际的 C_1 、 C_2 值。

根据实验结果可知,感应电压随着电场强度的增大、极板高度的减小、面积的增大而增大,与第 2.2 节中所得到的取能功率随着金属板上施加的电压的增大、极板高度的减小、面积的增大而增大结果相一致。



(a) 感应电压随感应极板高度变化曲线



(b) 感应电压随极板面积变化曲线

图 10 实验结果

同时在实验中,当电场强度为 10 kV/m 、感应极板 B_1 与高压极板 A_1 的距离 d_1 为 50 cm 、感应极板面积 S 为 2025 cm^2 时, C_1 、 C_2 与前面的仿真高压杂散电容和感应电容取值相同,负载电阻 R 在 $1 \text{ M}\Omega$ 到 $10 \text{ M}\Omega$ 变化时,功率的变化曲线(见图 11)与理论计算基本相同,由于存在实际损耗,功率略小于计算值。

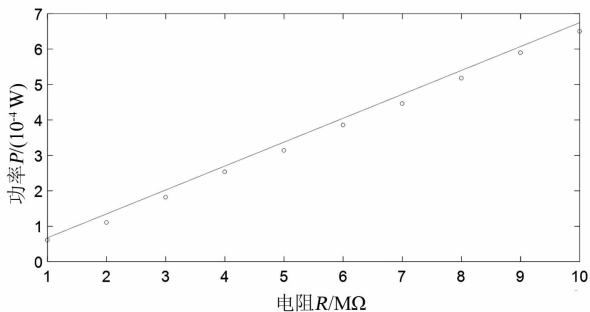


图 11 负载两端功率试验值

4 结 语

上面探究了在匀强电场中的电容取能模型,根据模型建立了取能功率 P 与交流电压 U_s 、高压杂散电容 C_1 、感应电容 C_2 和负载电阻 R 的关系,可知增大取能功率 P 有以下几种方法:1) 增加感应极板面积 S ; 2) 减小感应极板与电场极板的距离 d_1 ; 3) 在电压等级较高的地方取电; 4) 选取负载值较大的电力电子元件。接下来还可以进一步从实际需求出发,将其运用于实际的工程之中,可以进一步改进取能电路以获得更多能量。

参考文献

- [1] 闫嵩琦. 智能电网的信息化系统管理实现[J]. 微型电脑应用, 2020, 36(10): 161 - 164.
- [2] 田伟明. 电容分压式高压取电电源的研究与设计[D]. 西安: 西安科技大学, 2019.
- [3] 聚焦下一代智能电网新亮点[J]. 电源世界, 2013(10): 44.
- [4] R Moghe, Y Yang, F Lambert, et al. A Scoping Study of Electric and Magnetic Field Energy Harvesting for Wireless Sensor Networks in Power System Applications[C]// 2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2009: 3550 - 3557.
- [5] O Cetinkaya, O B Akan. Electric - Field Energy Harvesting in Wireless Networks[J]. IEEE Wireless Communications, 2017, 24(2): 34 - 41.
- [6] 董叶叶. 基于电流互感器的电压源设计及控制方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- [7] 毛先胤, 马晓红, 彭赤. 输电线路分段地线感应取能方法研究[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 219 - 223.
- [8] Vendik I B, Steblevska I, Gerasimov V A, et al. Energy Harvesting for Wireless Sensors From Power Lines Electric Field[C]// 2017 IEEE International Conference on RFID Technology & Application (RFID - TA), 2017: 125 - 128.
- [9] S Y Dudnikov, I B Vendik, V A Gerasimov, et al. Energy Harvesting Device for Wireless System of Monitoring Environmental Parameters[C]// 2017 IEEE II International Conference on Control in Technical Systems (CTS), 2017: 330 - 332.
- [10] F Guo, H Hayat, J Wang. Energy Harvesting Devices for High Voltage Transmission Line Monitoring[C]// 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2011: 1 - 8.