

基于 MEMS 传感器的线路电压测量方法研究

栗晓政¹, 崔凤庆¹, 宋晓燕¹, 梁 纲¹, 樊彦国¹, 邱震辉³, 杨 庆³

(1. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450018;

2. 国网河南省电力公司, 河南 郑州 450018;

3. 重庆大学 电气工程学院 输变电装备技术全国重点实验室, 重庆 400044)

摘要: MEMS 电场传感器体积小、功耗低, 应用于非侵入式电压测量技术中可以有效减小装置测量体积、成本, 契合当前分布式测量需求。因此该文设计了一种基于 MEMS 电场传感器的电压测量方案, 首先介绍了 MEMS 电场传感器的工作原理, 其次针对传感器结构特点基于电容分压原理设计了电压测量方案, 并进一步分析其等效电路模型, 最后对该测量方案进行了可行性和准确性测试。结果表明设计的测量方案能在 1~10 kV 内准确地反演工频电压, 测量的最大幅值偏差为 2.21%。该文提出的非侵入式电压测量方案搭载简便, 能够稳定的对线路电压进行测量, 为架空线路电压的实时监测提供可靠的技术手段。可以为线路电气量参数实时测量提供可靠的数据支撑。

关键词: MEMS 传感器; 耦合电容; 电压测量; 输电线路

中图分类号: TP212

文章编号: 1000-0682(2024)03-0123-05

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.03.022

Research on line voltage measurement method based on MEMS sensor

LI Xiaozheng², CUI Fengqing¹, SONG Xiaoyan¹, LIANG Gang², FAN Yanguo², QIU Zhenhui³, YANG Qing³

(1. State Grid Henan Electric Power Research Institute, Henan Zhengzhou 450018, China;

2. State Grid Henan Electric Power Company, Henan Zhengzhou 450018, China;

3. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment Technology, School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: MEMS electric field sensor has small size and low power consumption, which can effectively reduce the measurement volume and cost of the device in non-invasive voltage measurement technology, and meet the current distributed measurement needs. Therefore, a voltage measurement scheme based on MEMS electric field sensor is designed in this paper. Firstly, the working principle and capacitance voltage division principle are introduced. Secondly, the voltage measurement scheme is designed based on the structure characteristics of the sensor, and its equivalent circuit model is further analyzed. The results show that the designed measurement scheme can accurately invert the power frequency voltage within 1~10 kV, and the maximum deviation of the measured value is 2.21%. The non-intrusive voltage measurement scheme proposed in this paper is easy to carry and can measure the line voltage stably, providing a reliable technical means for the real-time monitoring of overhead line voltage. It can provide reliable data support for the real-time measurement of line electrical parameters.

Keywords: MEMS sensor; coupling capacitance; voltage measurement; transmission line

0 引言

电力物联网的建设对信息感知的深度、广度和

密度提出了更高要求^[1]。电力物联网的海量元数据来源于信息感知与采集, 而各种传感器是电力物联网的底层感知单元, 是电力调度、保护测控、安全运维、在线监测、互联互通的必要基础设施。通过对电网设备进行全面、精准的感知及监测, 可提高电网的稳定性和可靠性, 保证电网高效率运行^[2]。通过电场传感器获取电场大小间接实现带电导体电压测量的非侵入式测量技术, 不仅可以减小测量设备体

收稿日期: 2024-01-24

第一作者: 栗晓政(1985—), 河南郑州人, 工程师, 硕士, 主要研究计算机软件及计算机应用。E-mail: lixiaozhen@dky.hn.sgcc.com.cn

通信作者: 崔凤庆(1981—), 男, 河南郑州人, 硕士, 副高, 研究方向为电力系统在线监测。

积、成本,还由于良好的电气隔离使其具有较高的安全性,而广受关注^[3-4]。

近年来随着微机电系统(MEMS)技术的发展,为非侵入式电压反演技术的实现提供了新的器件基础。MEMS 传感器体积小、功耗低^[5-6],契合当前分布式测量需求。将 MEMS 电场传感器应用于非侵入式电压测量除了可以实现更高的数字化程度和更小的体积,同时,其为电力系统信息的全面、精准采集提供了更高的灵活性和更多的可能性,具有广阔的应用前景。文献^[7-8]研究了一种热驱动的电场微传感器,可以在一定距离内检测交流和直流线路电压。文献[9]采用压电驱动的电场微传感器进行电场测量,对测量结果进行积分实现输电线路电压反演。文献[10]设计了一种基于传感器阵列的非接触式输电线路电压测量方法,通过 MEMS 电场传感器进行验证。上述文献中虽然都较好地完成了线路电压的测量,但没有进行抗干扰处理,输出容易受到相邻电源线的干扰和噪声。中科院电子所彭春荣^[11-12]研究团队提出了一种基于微传感器的带屏蔽结构的非侵入式电压测量方法,通过金属感应片将导线电压转为平板电极间的电场测量。由于内部采用场磨式 MEMS 电场传感器,因此该传感器可以用于交直流电压测量。该方法布置传感器数量少,测量精度高,测量可行性高。

该文研发了基于 MEMS 电场传感器的交流线路电压测量方案。根据传感器测量原理,建立电压测量理论模型,并计算所提出测量方案的各反演参数值,获取测量结果与待测电压间的比例关系。最后在实验室搭建了测试平台,验证了测量方法的可行性。

1 基于 MEMS 传感器的线路电压测量原理

MEMS 敏感元件测量电场的原理如图 1 所示。其敏感结构包括感应电极、屏蔽电极、驱动结构、和后端放大电路。

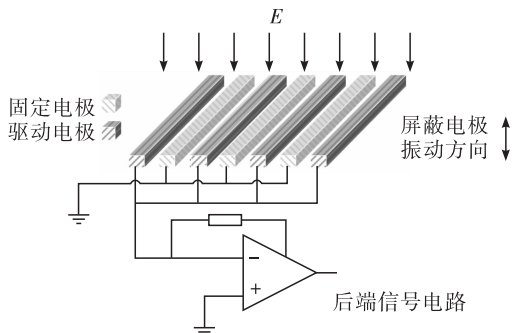


图1 场磨式 MEMS 电场传感器测量原理图

施加交流驱动电压时,驱动结构会带动屏蔽电极来回振动。当屏蔽电极靠近感应电极时,屏蔽电极上的电场强度较强。屏蔽电极靠近感应电极时,屏蔽电极上的电场强度较弱。根据高斯定理,金属电极上的电场强度与其表面的电场强度成正比^[13]。

$$Q = \varepsilon E_n \quad (1)$$

式中: ε 为敏感结构周围介电常数; E_n 为感应电极上电场强度。由于屏蔽电极的周期性屏蔽,在电荷感应原理的作用下感应电极上会出现交变电荷。假设外部待测电场为 E_n ,屏蔽电极上的感应电荷量 Q 为:

$$Q(t) = k_q X_r E_n \sin(\omega_s t + \theta) + Q_0 \quad (2)$$

式中: k_q 为感应电极发生单位振幅时的电荷变量,其与介电常数和屏蔽电极振动方式等因素有关; X_r 为屏蔽电极的振动幅度; ω_s 为驱动电压角频率; θ 为驱动电压的相位角; Q_0 为感应电极初始感应电荷量。则 MEMS 电场传感器的输出电流 i_{out} 为:

$$i_{out} = dQ(t)/dt = k_q X_r \omega_s E_n \cos(\omega_s t + \theta) \quad (3)$$

MEMS 电场传感器的输出信号一般是电压信号是由输出电流的锁相放大形成,MEMS 传感器的输出电压 U_{out} 为:

$$U_{out} = k i_{out} \quad (4)$$

式中: k 为传感器锁相放大倍数,令 $k_E = k k_q X_r \omega_s$ 表示内部 MEMS 电场传感器芯片的灵敏度系数,则输出电压 U_{out} 可表示为:

$$U_{out} = k_E E_n \cos(\omega_s t + \theta) \quad (5)$$

根据式(5)可得,输出信号的幅值与待测电场幅值 E_n 呈线性关系,输电线路电场与线路电压存在相关性^[14]。通过电场传感器对输电线路电场进行测量,即可通过推导待测线路电压与传感器输出结果的相关系数,实现线路电压测量。

基于此,设计 MEMS 传感器电压测量方案如图 2 所示。

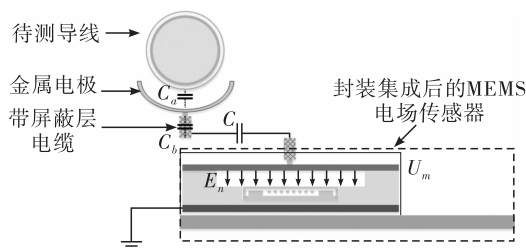


图2 基于 MEMS 电场传感器的电压测量装置结构分析图

其结构包括:封装集成后的 MEMS 电场传感器,金属电极、带屏蔽层电缆(外层已接地),标准电容。将金属电极和带屏蔽层电缆通过填充绝缘树脂

进行固定,待测导线与金属电极之间由于位移电流 i_x 流过产生耦合电容 C_2 [15]。然后将金属电极通过屏蔽电缆连接一个标准定值电容再与封装的 MEMS 电场传感器上金属板相连,金属顶板上由于电容分压原理产生与待测导线电压 U_s 大小成正比的分压 U_m 。电位 U_m 将在封装的 MEMS 电场传感器中产生垂直电场 E_n 。因此,电场传感器通过测量 E_n 得到电位 U_m ,然后得到待测导线电压 U_s 。

根据上述测量方案建立等效电路模型如下图 3 所示。图中 U_s 为待测导体的电压, U_m 为金属顶板的电压,电容 C_a 为待测导线与金属电极间的耦合电容,电阻 R_b 为金属电缆和金属片的等效电阻,电容 C_b 为屏蔽层电缆内部导线和接地屏蔽层的耦合电容,电容 C 为连接的标准电容。

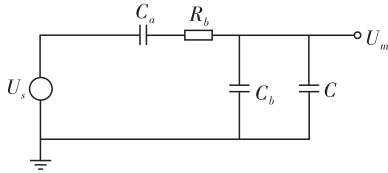


图3 MEMS传感器的电压测量系统等效电路图

忽略边缘效应,耦合电容 C_a 可估计为:

$$C_a = \frac{\alpha \varepsilon_0 \varepsilon_1 L_1}{\ln(b_1/a_1)} \quad (6)$$

式中: ε_0 为空间介电常数; ε_1 为填充绝缘树脂的相对介电常数; α , L_1 分别为金属电极的弧度和宽度; a_1 , b_1 为弧角 α 对应的导线和电极弧长。

由于长度为 L_1 的屏蔽电缆是同轴的,因此电阻 R_1 和电容 C_2 由以下公式计算:

$$R_b = \frac{L_2}{2} \sqrt{\frac{f\mu}{\pi\sigma}} \left(\frac{1}{a_2} + \frac{1}{b_2} \right) \quad (7)$$

$$C_b = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_2 L_2}{\ln(b_2/a_2)} \quad (8)$$

式中: μ 为磁导率; σ 为电导率; f 为待测导线的频率; ε_2 为屏蔽电缆介质的相对介电常数; a_2 为内导线半径; b_2 为外屏蔽半径。

基于以上等效电路模型和电容分压原理,传感器金属顶板上电压与待测导体电压的关系式:

$$U_m = \frac{C_a}{C_a + (1 + sC_a R_b)(C_b + C)} \cdot U_s \quad (9)$$

设计金属电极的形状为半径 1.5 cm, 长 4 cm, 弧长为 120° 的圆弧电极; 屏蔽电缆长为 6 cm, 根据公式(6)和公式(7)可以大致计算出, C_a 为 7.38 pF, R_b 为 $2.84 \times 10^{-5} \Omega$, 可以得出 $sC_1 R_1 \ll 1$, 公式(6)可以简化为:

$$U_m = \frac{C_a}{C_a + C_b + C} \cdot U_s \quad (10)$$

所以待测电压与传感器金属顶板上电压可表示为:

$$U_s = \frac{C_a + C_b + C}{C_a} \cdot U_m = k U_m \quad (11)$$

式中: k 为待测电压与金属顶板上电压的分压比。忽略边缘效应, MEMS 芯片上方电场是分布均匀的, 封装金属板与传感单元之间的电场 E_n 可采用并联板电容器的电场计算方法求解, 基于电容分压原理等效和以上电路模型, 可计算 MEMS 电场传感器输出电压 U_{out} 与待测导体电压 U_s 的关系:

$$U_{at} = K_E E_h = K_E \frac{U_m}{d} = \frac{K_E U_s}{kd} \quad (12)$$

式中: k_E 为内部 MEMS 电场传感器芯片的灵敏度系数; d 为金属顶板和接地地板的等效距离。可以看出 MEMS 电场传感器的输出电压与待测电压成比例关系。实际测量时可以按照此比例系数进行电压反演。

2 MEMS 传感器测试

为了获取传感器的灵敏度系数以及测量线性度, 搭建测试平台如下图 4 所示。其由任意函数发生器和高压放大器产生和控制所需的高压信号至上极板, 在标准平板电极上产生匀强电场。高压放大器; 电容分压器为实验室定制, 分压比为 370:1; 标准平板电极也是实验室定制, 平板电极大小 60 cm × 60 cm, 平板间距可动态可调。

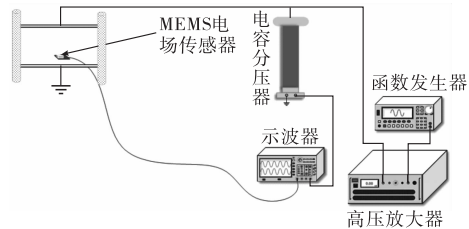


图4 MEMS电场传感器标定测试平台

调整两平板电极的板间距离为 10 cm, 将测试所需 MEMS 电场传感器放置于平行板电极中心位置。逐次增加函数信号发生器输出工频信号的幅值, 使平板电极间交流电场强度波形幅值由 0 kV/m 逐渐增大至 100 kV/m。依次记录传感器的输出信号值, 拟合传感器的输出输出特性曲线如图 5 所示。

结果显示该 MEMS 电场传感器在 0 ~ 100 kV/m 的工频电场范围内具有良好的线性度, MEMS 传感

器的输出灵敏度为 $3.24 \text{ mV}/(\text{kV}/\text{m})$ 。

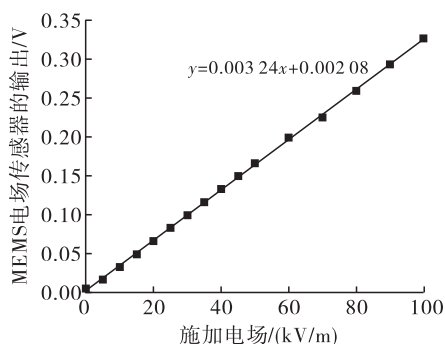


图 5 MEMS 传感器输入输出拟合曲线

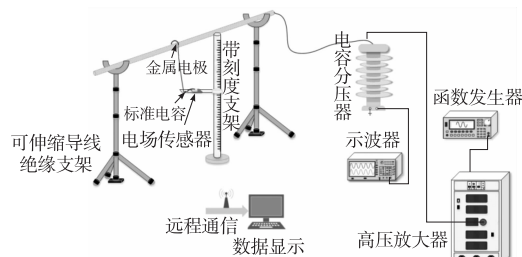
3 非侵入电压测量方案测试

为了对测量方案进行验证,搭建电压测量方案测试平台如图 6 所示。通过高压放大器产生工频交流高压至金属棒导体上。其中金属棒导体直径为 16 mm ,长度为 3 m ,通过两个可伸缩绝缘支架支撑至一定高度。设计金属电极的形状为半径 1.5 cm ,长 4 cm ,弧长为 120° 的圆弧电极;设计屏蔽结构的形状为半径 2 cm ,长 5 cm ,弧长为 240° 的圆弧电极,使其能完全包裹金属电极;屏蔽电缆长为 6 cm ,采用 AB 胶环氧树脂将金属电极、屏蔽结构固定在导线金属棒导体上。计算出 R_b 、 C_a 以及 C_b 的大小为 $2.84 \times 10^{-5} \Omega$ 、 7.38 pF 以及 3.90 pF 。选择标准电容 C_2 大小为 1 nF 。根据公式(10)计算出待测电压与传感器金属顶板上电压的分压比 k 为 137.03 。

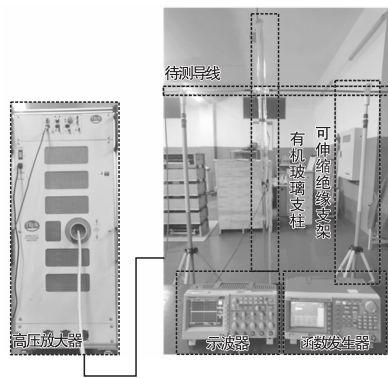
根据计算 U_m 的电压有效值大约为 40 V ,设实际测量时 MEMS 电场传感器的封盖上的感应电压为有效值 40 V 的交流电压,陶瓷封装的底部接地,盖板与微传感器之间的距离 $d = 1.5 \text{ mm}$ 。芯片单元正上方的电场强度的有效值约为 $26.67 \text{ kV}/\text{m}$,该 MEMS 电场传感器在 $0 \sim 50 \text{ kV}/\text{m}$ 的工频电场范围内具有良好的线性度,能满足此大小电场值测量。

调整函数信号发生器输出工频信号的幅值,使高压放大器输出电压初始值为 1 kV 。逐次增加函数信号发生器输出工频信号的幅值,使高压放大器的输出电压以 1 kV 步长逐渐增大至 10 kV 。采用分压器读取所加在金属棒导体上的电压,通过无线通讯装置将传感器输出传输至电脑进行信号的示波器的示值为 U_N (即实际值),测量方案标定后的结果为 U_X ,令测量相对误差为 δ :

$$\delta = (U_X - U_N) \times 100\% / U_N \quad (13)$$



(a) 原理图



(b) 测试现场

图 6 架空线路非侵入式电压测量试验平台

实验数据结果记录如表 1。

表 1 测量输出结果

试验电压 / kV	标准值		标定测量结果	
	示波器读数 / V	理论真实值 U_N / kV	测量结果 U_X / kV	$\delta / \%$
1	2.705	1000.85	0.986	-1.48
2	5.408	2000.96	1.974	-1.35
3	8.112	3001.44	2.941	-2.01
4	10.812	4000.44	3.925	-1.89
5	13.515	5000.55	4.914	-1.73
6	16.220	6001.4	5.893	-1.81
7	18.924	7001.88	6.925	-1.10
8	21.625	8001.25	7.879	-1.52
9	24.326	9000.62	8.805	-2.17
10	27.031	10001.47	9.780	-2.21

实验结果表明该测量方案可以准确的对 $1 \sim 10 \text{ kV}$ 线路电压进行测量,但测量结果小于真实值,与标定系数设定偏小有关。在此范围内测量的最大误差来自输电线路为 10 kV 的测量结果为 -2.21% ,测量过程中无异常波动情况,该测量方案可以准确对线路电压进行测量。

图 7 为非接触电压传感器测量得到波形和实际线路电压的波形对比图。结果显示 MEMS 电压传感器测量得到的电压波形与实际线路电压波形基本吻合。表 1 和图 7 的试验结果验证了设计的非接触

电压测量方案的准确性。

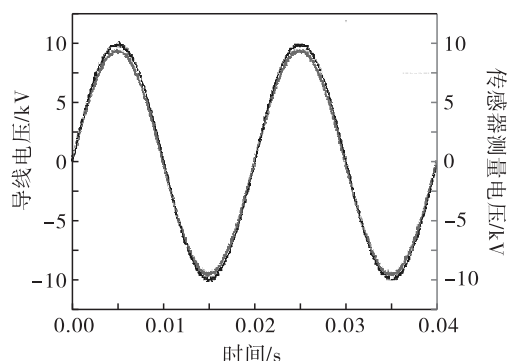


图 7 MEMS 电场传感器标定后波形与导线电压对比图

4 结束语

该文根据 MEMS 电场传感器的测量原理及其结构设计了一种基于电容耦合分压的非侵入式线路电压测量方案。对该测量方案进行了理论研究,得出了测量方案的传递函数表达式。在此基础上,搭建了试验平台对测量方案进行了测量准确性测试。试验结果表明:该测量方案能准确地对 1~10 kV 线路电压进行测量,测量误差保持在 -2.21% 以下。该测量方案成本低,搭载简便,并且具有较高的可行性和准确度,可以方便、稳定的对线路电压进行监测。

参考文献:

- [1] 张宁,马国明,关永刚,等. 全景信息感知及智慧电网[J]. 中国电机工程学报,2021,41(04):1274-1283+1535.
- [2] 杜小磊. 智能电网下全景感知录波系统的研究与应用[J]. 电气自动化,2019,41(04):8-10+49.
- [3] 杨庆,孙尚鹏,司马文霞,等. 面向智能电网的先进电压电流传感方法研究进展[J]. 高电压技术,2019,45(2):349-367.
- [4] CHEN K L, GUO Y, MA X. Contactless voltage sensor for overhead transmission lines [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(4): 957-966.
- [5] 韩志飞,胡军,李立涅,等. 面向新型电力系统的微型电场传感技术[J]. 中国电机工程学报,2023,43(01):399-415.
- [6] KAINZ A, STEINER H, SCHALKO J, et al. Distortion-free measurement of electric field strength with a MEMS sensor[J]. Nature electronics, 2018, 1(1): 68-73.
- [7] WIJEWEERA G, BAHREYNI B, SHAFI C, et al. Micromachined electric-field sensor to measure AC and DC fields in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(3): 988-995.
- [8] WIJEWEERA G, SHAFI C, RAJAPAKSE A. Measuring power system voltage remotely using micromachined electric field sensor[C]//2008 1st Microsystems and Nanoelectronics Research Conference. IEEE, 2008: 209-212.
- [9] LIAO W, YANG Q, KE K, et al. Non-intrusive voltage-inversion measurement method for overhead transmission lines based on near-end electric-field integration[J]. Energies, 2023, 16(8): 3415.
- [10] 冯迪,刘源,李嘉贤,等. 基于电场传感器阵列的输电线路电压非接触式测量方法[J/OL]. 高电压技术:1-11 [2023-12-16].
- [11] 闻小龙,杨鹏飞,储昭志,等. 基于 MEMS 的距离自适应型非接触静电仪[J]. 电子与信息学报,2021,43(10):3068-3074.
- [12] YANG P, WEN X, LÜ Y, et al. A non-intrusive voltage measurement scheme based on MEMS electric field sensors: Theoretical analysis and experimental verification of AC power lines[J]. Review of Scientific Instruments, 2021, 92(6).
- [13] 冯可,佟建华,王宇,等. 压电悬臂梁式微型电场传感器的设计与制备[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(08): 90-94.
- [14] 孔旭,李跃波,刘黎,等. MMC 与混合式直流断路器开关操作的瞬态电场实测及其在状态监测中的应用[J]. 中国电机工程学报,2023,43(23):9010-9020.
- [15] 周正伟,妥国华,李丹. 基于电容耦合原理的非接触式家用电压测量装置研究[J]. 电气自动化,2020,42(02):98-100.

欢迎投稿！ 欢迎订阅！ 欢迎刊登广告！

国内邮发代号:52-49

国际发行代号:BM529

定价:18.00 元/期 108.00 元/年

地址:西安市高新区沣惠南路 8 号

邮编:710075

电话:029-81871277

网址: <http://yb-zdh.shaangu-group.com>

电子邮箱:gyybbjb@126.com