

[环网柜]

户外环网柜一体化套管型电压检测技术研究

文/李永旭 白玉庆 宋纯伟 修俊瑞
国网山东省电力公司聊城供电公司

环网柜在电力系统中应用较多，起到重要的电能汇聚与分配功能。尤其是户外环网柜，为节省安装空间其结构布局紧密，导致难以后续加装传感装置实现对户外环网柜运行电压等关键参数的获取。提出一体化绝缘套管型电压检测技术，在绝缘套管制作过程中，融合基于电容分压原理的网状传感电极，实现对套管内导电杆高压电压的检测，解决户外环网柜狭窄空间关键位置电压的检测。通过仿真分析可知，所设计的套管型电压检测设备分压比为2000:1，能够实现10 kV环网柜电压的准确检测。

随着城市化进程的加快和城市电力需求的不断增长，城市配电系统的建设和改造变得尤为重要。户外环网柜起着配电网的连接、分流和保护的作用，扮演着至关重要的角色^[1-3]。

户外环网柜运行状态的评估及故障检测重要指标是对关键带电体的电压检测，当前主要采用电压互感器实现。文献[4]提出利用外部电压互感器与变压器出线末屏串联构成分压器获取电压信号，实现过电压可靠检测。文献[5]利用宽频带电流互感器将宽频带电流转换成电压信号，然后再积分得到一个正比于冲击高压的低压信号成功测量冲击电压。在前人基础上赵晶等人提出基于高准确度宽频带电流传感器检测容性设备的泄漏电流，通过有源积分电路将电流信号重构成电压信号的方法检测内部过电压^[6]。文献[7]介绍了电压互感器中性点与地之间加装非线性电阻的消谐方式。这种消谐方式接入的电阻越大，消谐效果越好，但是电阻过大会影响保护的灵敏度^[8]。发生铁磁谐振时首先区别高频、基频和分频谐振，然后通过电阻将开口三角绕组短接的消谐方式叫做二次消谐，由于短接时间短，这样消

谐不会给电压互感器带来额外负担^[9]。

当前电压互感器应用广泛，但是其体积大、重量大，并且需要与被测带电体进行直接的电气连接，因此当前电压互感器主要安装在户外环网柜电缆室，仅实现对进线电压的检测^[10-12]。但是环网柜母排、绝缘套管内导电杆等位置处电压的实时在线检测，更能反映设备运行状态，能够为环网柜智能运维提供丰富的检测信息，尤其是套管类设备电压检测无法直接采用当前电压互感器。

针对当前户外环网柜绝缘套管内导电杆电压检测存在的问题，本文提出一体化柜套管型电压检测技术，在绝缘套管制作过程中，融合基于电容分压原理的网状传感电极，实现对套管内导电杆高压电压的检测，解决户外环网柜狭窄空间关键位置电压的检测。

一体化套管型电压检测装置设计

1. 一体化套管型电压检测装置结构组成

本文选取10 kV户外环网柜作为研究背景，选取其典型绝缘套管结构作为融合对象。

基金项目：国网山东省电力有限公司科技项目(520611230003)

图1为所设计的套管型电压检测装置剖面图，中间载流导体与内侧极板构成内电容和内外两侧极板之间的外电容同轴嵌套在一起。相邻两层导体与夹在中间的介质组成同轴电容器，两个同轴电容器作为分压电容完成分压后，输出一个较低的电压到电磁单元，完成电压互感器的电压测量功能。

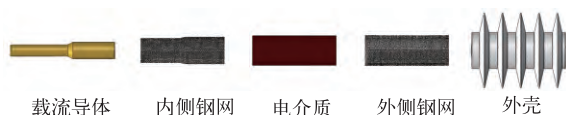


图1 套管型电压检测装置剖面图

套管型电压检测装置外观如图2所示。包含绝缘环在内的外壳是一体浇铸制造的，使用的材料是相对介电常数为4.3的环氧树脂。整个装置通常是提前生产载流导体、内外两侧极板以及电介质，极板与电介质组合后，将组合体和载流导体用夹具固定牢固后装入外壳的浇铸模具完成浇铸。经过这样的生产流程，外壳可以锁定载流导体不松动，并且与极板紧密贴合。

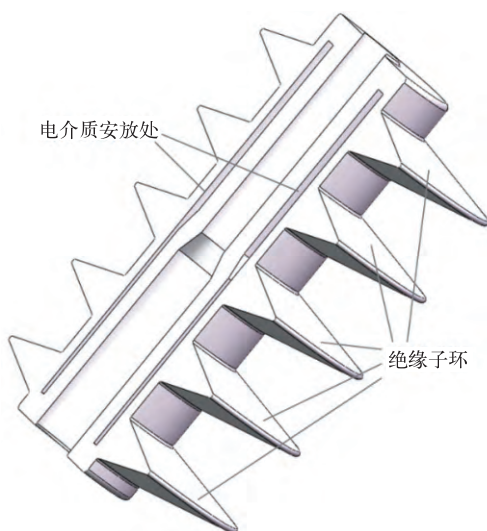


图2 套管型电压检测装置外观图

2. 电压检测原理

套管型电压检测装置原理上是一种电容式电压互感器，如图3所示。一次侧高电压等级电压经过分压结构两分压电容分压后，转化成容易被电磁单元承受的较低电压等级电压后，接入电磁单元完成电压检测。套管型电压检测装置正因为电容分压结构的存在，使其能够精准可靠检测很高等级的电压。

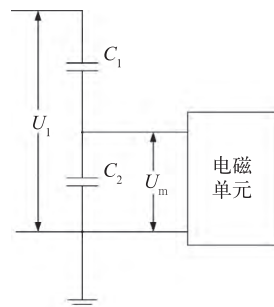


图3 套管型电压检测装置外观图

套管型电压检测装置的电容分压结构是由内电容 C_1 和外电容 C_2 串联组成，电磁单元并联在外电容上，因此互感器分压比 K 为

$$K = \frac{C_1 + C_2}{C_1} \quad (1)$$

同轴结构的套管型电压检测装置分压电容都是同轴电容器，静电场中两圆柱筒状极板间电容大小可以由高斯定理求解得到。由高斯公式得，两极板间任意半径 r 位置处电场强度 E 为

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r r} \quad (2)$$

式中， λ 为电容器单位长度极板带有电荷量的绝对值； ϵ_0 为真空介电常数； ϵ_r 为电介质的相对介电常数。

设同轴电容器内侧极板半径为 R_i ，外侧极板半径为 R_o ，则将电场由内而外沿半径方向积分可以计算得到内外极板间电势差 U 为

$$U = \int_{R_i}^{R_o} \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r r} dr = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0\epsilon_r} \ln \frac{R_o}{R_i} \quad (3)$$

式中， λ 是电容器单位长度极板带有电荷量的绝对值。

设 b 为同轴电容器正对长度，则 $q = \lambda b$ 为电容器全部长度极板带有电荷量的绝对值，将 q 以及式(3)代入 $C = q/U$ 即可推导出同轴电容器电容值 C_0 为

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r b}{\ln \frac{R_o}{R_i}} \quad (4)$$

装置内电容两极板间电介质是与外壳一体的环氧树脂材料，环氧树脂相对介电常数 ϵ_r 为4.3。上端内外极板半径分别为11 mm和23 mm，下端内外极板半径分别为16 mm和25.5 mm，根据这些数据可以理论计算出内电容的电容大小 C_1 为66.97 pF。装置外电容两极板间电介质是相对

介电常数 ϵ_r 为5.6的树脂材料。外电容上端内外极板半径分别为23 mm和28 mm，下端内外极板半径分别为25.5 mm和28 mm，根据这些数据可以计算出内电容的电容大小 C_2 为0.133 85 nF，根据内外电容大小可以计算出分压比 K 的大小为：

$$K = \frac{66.97 + 133.850}{66.97} = 1\,999.65 \approx 2\,000。$$

通过分压比大小可以看出套管型电压检测装置的分压效果比较理想，很大程度上降低了电压等级，有效缓解电磁单元的绝缘压力，有利于提高测量准确度和降低测量成本。

本分压电容值大小为在理想情况下通过理论推导得到的，通常称为计算电容。此计算电容与套管型电压互感器实际电容之间可能存在较大差距，因为套管型电压互感器实际采用了网状极板，而理论推导仅能完成板状极板的电容值计算。目前尚没有系统的理论足以支持网状极板同轴电容器电容值计算，欲获取网状极板同轴电容器精准电容值可采用有限元仿真计算。

仿真计算与分析

1. 仿真模型建立

1.1 网状感应电极模型建立

网状感应电极模型建立过程为，首先建立一个与极板外表面相切的基准面，在基准面与极板外表面对切线处绘制一组两个全等的菱形，菱形边长1.7 mm顶角 45° ，两个菱形一组边平行相距0.25 mm；其次，运用线性草图阵列沿点划线将一组孔洞扩充成整列孔洞草图，经过测算相邻两组间隔3.12 mm，共绘制56组孔洞可以构成覆盖极板的一整列孔洞草图。最后，运用拉伸切除工具将孔洞草图转化为贯穿极板的孔洞，切除深度定为2 mm。运用圆周阵列工具将一系列孔洞复制成覆盖整个圆柱筒的孔洞，经过测算相邻两列孔洞间隔 4.8° 共复制75列恰好可以均匀覆盖整个圆柱筒，从而完成图4所示的网状感应电极模型的建立。



图4 网状感应电极模型

2. 一体化套管型电压检测装置模型建立

完成关键部件网状感应电极建模后，需要对装置其他部件进行模型的建立，最后将不同部件进行配合形成一体化套管型电压检测装置模型的建立。其中电介质也是圆柱筒结构，两端外径相同但内径上端小下端大。外侧极板是与内侧极板相同厚度的圆柱筒，也均匀密布同款菱形孔洞。由于外侧极板是两端直径相同的标准圆柱筒，所以直接在上视基准面绘制内直径大小的圆作为草图后，使用拉伸凸台基体工具选择薄壁特征外扩0.5 mm，可以方便地直接建立出薄壁圆柱筒，比内侧极板的建立方案快速高效。

套管型电压检测装置外壳三维模型的建立分为两步：第一步绘制草图加旋转凸台基体工具建立外形；第二步运用旋转切除工具在电介质位置做出避让处理。模型建立时需要注意，电压互感器作为电气设备长期运行在强电场环境，有必要避免尖端处电场畸变，所以所有带有棱角的地方都需要倒角处理。具体需要倒角的位置包括所有绝缘子环的顶端和底端与柱面的交汇处、上下两圈外檐还有与载流导体的交汇处，尤其需要注意上表面与载流导体的交界处需要向载流导体方向倒角。

最后一步是将组件装配成套管型电压检测装置。将各组件加入其中再加以配合即可完成如图5所示的装置模型。装配过程中多使用斜面重合的配合可提高装配的效率和准确度。

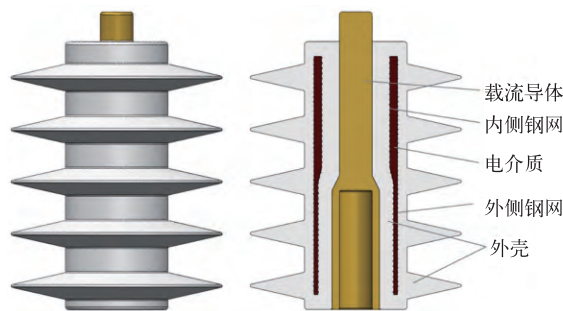


图5 网状感应电极模型

3. 仿真结果分析

对套管型电压检测装置进行仿真能获得电场强度及电势分布图，内侧极板与外侧极板之间的电势差为电压测量值。在载流导体施加一次电压有效值。

仿真过程中设置装置导电极电压等级为1~10 kV，每隔1 kV电压等级进行仿真计算，得到等效电容 C_2 两端电压值，以验证管型电压检测装置分

压比和等效电容值。图6所示为导电杆电压等级为10 kV时空间电场分布情况。

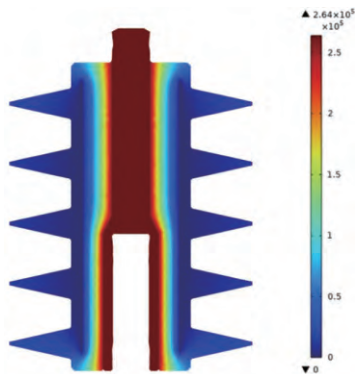


图6 电场强度仿真结果

通过仿真计算得到数据见表1，表1中显示不同导电杆电压等级下 C_2 两端电压值 U_{C2} 。通过对数据分析可知，本文设计的套管型电压检测装置，忽略常数项后可得

$$Y = 2\,000X \tag{6}$$

通过式（6）可知，采用本文设计的套管型电压检测装置，当导电杆电压等级为10 kV时，装置输出电压为5 V，分压比为2 000：1，验证了本文理论计算正确性。

表1 导电杆不同电压等级装置输出电压值

电压等级/kV	U_{C2}/V
1	0.4913
2	1.0842
3	1.5101
4	2.0106
5	2.5042
6	2.9813
7	3.5047
8	4.0716
9	4.4852
10	4.9723

结束语

本文提出一种一体化绝缘套管型电压检测技术及装置设计方案，能够在以下方面起到有益效果：

- 1) 在绝缘套管制作过程中，融合基于电容分压原理的网状传感电极，实现对套管内导电杆高压电压的检测，解决户外环网柜狭窄空间关键位置电压的检测。
- 2) 一体化绝缘套管型电压检测装置，体积小、

重量轻及安装使用方便，能够应用于安装空间有限的使用场合，尤其适用于户外环网柜有限狭窄空间的应用环境。

3) 通过仿真分析可知，所设计的套管型电压检测设备分压比为2 000：1，能够实现对10 kV环网柜电压的准确检测。EA

(收稿日期：2025-01-19)

参考文献

[1] 杜永永. 基于频域介电响应的油纸电容式套管受潮和老化状态评估[D]. 重庆：重庆大学，2017.

[2] 方程，温章良，智李，等. 基于Fluent的户外环网柜通风效果优化研究[J]. 电工材料，2024，(3)：90-92+96.

[3] 李书田. 基于ZigBee技术的环网柜在线监测系统研制[D]. 哈尔滨：哈尔滨理工大学，2022.

[4] 张晓东，苏强. 一起500 kV电容式电压互感器二次回路短路故障计算与仿真分析[J]. 机电信息，2025 (4)：12-15.

[5] 徐波，刘勇，曾宁，等. 基于最大Lyapunov指数的配电网铁磁谐振过电压预测[J]. 电工技术，2023(5)：55-58.

[6] 赵晶，邵梦雅，梁景璇，等. 40.5 kV气体绝缘环网柜复合套管和连接铜排区域的电场仿真及优化[J]. 高压电器，2024，60 (12)：49-56.

[7] 杨玥，郭红兵，陈波. 一起谐振引起的配网电压互感器故障分析及抑制措施[J]. 变压器，2023，60 (6)：48-53.

[8] 吕欢欢. 环网柜在线监测及状态评估方法研究[D]. 吉林：东北电力大学，2023

[9] 张运林. 输配电网中光伏发电系统智能环网柜设计[J]. 光源与照明，2024，(12)：126-128.

[10] 赖荣光，高成成，谭武汉. 环网柜联络关口新型高压电能计量装置的研制[J]. 现代信息科技，2022，6 (12)：40-43+48.

[11] 王昕，朱峻永，明经亮，等. 基于多功能测量较准系统的校验技术[J]. 电气技术与经济，2025 (2)：113-116.

[12] 赵腾飞，聂永杰，孙宸. 10 kV环网柜电缆肘型头故障分析[J]. 山西电力，2022(3)：26-29.