

高海拔充气绝缘环网柜设计探究

刘振华 芮祖存

(双杰电气合肥有限公司)

摘要：海拔在1000m以上的地区统称为高海拔地区，我国1000m以上高海拔地区面积占全国总面积65%，而1000m以下国土面积仅占35%。高海拔地区具有较恶劣的自然气候条件，对开关设备有较大影响的因素为：空气压力及空气密度减小；空气温度较低，温度变化较大；普通气体绝缘环网柜气箱到了高海拔地区后，气箱内和气箱外的压力差变大，会引起如下变化：气箱的内外气压差增大，变形量增大，漏气率增大；压力释放装置更容易动作；气压表或者普通密度表在高海拔环境中无法准确显示气体密度值，无法准确监测气箱内气体绝缘性能，以上因素都在影响开关设备在高原地区的设计和应用，急需有合理的高海拔气体绝缘环网柜设计方案。

关键词：高海拔；充气绝缘环网柜；全绝缘

0 引言

气体绝缘环网柜是一种适用于中压配电自动化系统的既紧凑又可扩充的开关设备，该设备用于12~40.5kV环网供电，双辐射供电系统，也可用于终端供电，作为电能的控制和保护装置，设备亦适用于装入箱式变电站，通过对电能的分配和调度，保障电力系统的稳定运行。这种设备核心部分采用断路器或负荷开关和熔断器的组合，具有结构简单、体积小、价格低，可提高供电参数和性能以及供电安全等优点。它被广泛用于城市住宅小区、高层建筑、大型公共建筑、工厂企业等负荷中心的配电站以及箱式变电站中，采用各种绝缘气体作为绝缘介质，气体可以是SF₆，也可能是干燥空气、氮气或者混合气体，具有较高的绝缘性能和环保性能，在电力系统中得到了广泛的应用。

这类环网柜的主要元器件安装在一个密封焊接的

充满绝缘气体的箱体内（以下简称气箱）。气箱是气体绝缘环网柜的核心部件，它的主要作用是保证箱体内的高压元器件的运行不受外界环境如污秽、潮湿、腐蚀等因素的影响，保证元器件运行环境的同时保证电气性能的正常。气箱内的元器件都可以受到密封气箱的保护，气箱有气压或气体密度的测量设备如气压表或密度表，一般测量值为气箱内外的压力差。

本文主要解决高海拔环境造成的环网柜机械和电气性能受到影响的问题。

1 常用气体绝缘环网柜高海拔设计方案及存在问题

气体绝缘环网柜为全绝缘设计，其主导电回路被由密封气箱、全绝缘的进出线穿墙套管、全绝缘电缆终端头组成的全绝缘系统包覆起来，由于气箱内环境不受外界影响，其气体密度、湿度保持不变，理论上绝缘性能不受外界湿度、污秽、腐蚀气体等因素

影响，由绝缘材料如环氧树脂、硅橡胶等包覆设计的进出线套管和电缆终端的绝缘性能也不受外界环境影响，所以表面上看常规设计气体绝缘环网柜可以适应高原环境，很多生产制造单位也认为气体绝缘环网柜符合高海拔运行的要求，直接将气体绝缘环网柜应用于高海拔地区。

目前气体绝缘环网柜应用于高海拔环境时采用的技术方案主要为以下两种。

1.1 直接将气体绝缘环网柜应用于高海拔地区

设计思路：该方案基于气体绝缘环网柜的主导电回路被由密封气箱、全绝缘的进出线穿墙套管、全绝缘电缆终端头组成的全绝缘系统包覆起来，绝缘不受高海拔环境影响的理念。

存在问题：在实际运行环境中，由于受高海拔地区的外界大气压力变低影响，气体绝缘环网柜气箱内外压力差变大，引起气箱整体鼓胀变形加大，对电气元器件如断路器、隔离开关等机械性能受到影响，容易引起操作卡滞、机械特性变化等问题。

1.2 降低出厂气箱气压

设计思路：该方案考虑气箱到了高海拔地区内外压力差会增大的问题，将气箱内气体压力在出厂时降低气压作为补偿，待气体绝缘环网柜运达高海拔地区时，气箱内外压力差因大气压力降低而升高至设备技术条件要求值，从而实现气压表值显示达到设备要求的压力值。

存在问题：该设计方案实际上降低了气箱内绝缘气体的密度，虽然到了高海拔地区后气压表值表面上达到了设计压力，但根据德国物理学家帕邢的帕邢曲线（见图1）的理论，气体的绝缘性能是和绝缘气体的密度息息相关的，帕邢曲线是根据帕邢定律的函数表达式所绘制的曲线，物理意义：击穿电压 $U(kV)$ 是电极距离 $d(cm)$ 和气压 $P(Torr)$ 乘积的函数，即 $U=apd/\ln(Pd)+b$ （见图1）， a 和 b 是常数。曲线的

主要意义：在绝缘距离不变时，升高气压或者降低气压到真空（例如 $10^{-6}Torr$ ）都能提高间隙击穿电压，在趋向于真空的气压下，真空度降低（即空气密度变大）会导致电极间更容易电气击穿，在达到一定气压后，随着压力升高绝缘性能逐渐提升，在此阶段（如图1中的 a 点以后），气压降低，即气体密度降低后击穿电压是随之降低的，即绝缘性能是降低的，气体绝缘环网柜的适用气压区间都在此区间（图1所示 a 点后面的区间）。

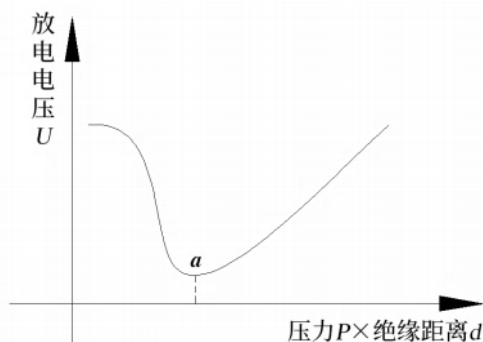


图1 帕邢曲线

1.3 高海拔常规设计存在问题汇总

- 1) 气箱内外压力差增大，气箱变形量增大，影响开关机械操作和性能。
- 2) 气箱内外压力差增大的情况下压力释放装置更容易启动。
- 3) 气压表测量值为气箱内外相对气压，气体密度表是在气压表的基础上增设了温度补偿功能，两者均无法准确显示高海拔气箱内气体密度值，而气体密度和绝缘性能息息相关。
- 4) 高海拔大气密度降低同时也降低了气箱外绝缘件的综合绝缘性能。

2 高海拔气体绝缘环网柜的设计方案

综合以上分析，由于气体绝缘环网柜本身的结构属于全绝缘设计，其主导电回路全部被密封气箱、全

绝缘的进出线穿墙套管、全绝缘电缆终端头组成的全绝缘系统包覆起来，绝缘性能不受影响，但是会受高海拔引起的气箱内外压力差变大、气箱内绝缘气体密度不能降低、气体密度指示必须准确等因素影响，所以高海拔地区气体绝缘环网柜的设计关键在于气箱和泄压装置的设计，满足高海拔的环境对气箱气压表的设计要求，解决高海拔下气箱外绝缘件综合绝缘能力降低问题。

2.1 高海拔地区气体绝缘环网柜气箱和泄压装置的设计

为了解决上述技术问题，本文提供了一种高海拔型气体绝缘环网柜设计新思路，不同于普通的未做针对设计的或者只是简单降低气压的气体绝缘环网柜，该环网柜在如下方面进行针对设计。

(1) 加强气箱的结构强度

根据高海拔引起的气箱内外压差增大，设计提高气箱的结构强度，使气箱在高海拔环境中的变形仍然在技术要求范围内，保证气箱内高压元器件的机械性能不受影响。

根据国际标准大气模型，可以通过以下公式计算某一海拔处的标准大气压：

$$P=P_0 \times (1 - 0.0065H/288.15)^{5.256}$$

式中， P 为某海拔处的大气压； P_0 为海平面上的标准大气压； H 为海拔。

以海拔 4000m 为例， $P=P_0 \times (1 - 0.0065 \times 4000/288.15)^{5.256} \approx 0.064\text{MPa}$ 。

以常用的 10kV SF₆ 气体绝缘环网柜为例，在非高海拔地区气箱设计压力通常为 0.07MPa，考虑高原型气压降低因素，实际海拔 4000m 地区气箱设计压力可按 $P_1=P_0 - 0.064 + 0.07=0.107\text{MPa}$ 计算得出。

(2) 高海拔地区气体绝缘环网柜泄压装置的设计

按最新国标 GB/T 3906—2020《3.6kV-40.5kV 交流金属封闭开关设备和控制设备》中 7.103 规定，气体绝缘环网柜气箱需满足在 1.3 倍设计压力 (P_1) 保持

1min 压力释放装置不动作，当压力继续升高在大于 1.3 倍设计压力到 3 倍 (P_2) 设计压力之间时压力释放装置可能动作，只要符合设计单位的设计要求，是可以接受的，试验结束后气箱可以变形，但不能破裂。按以上要求设计气体绝缘环网柜气箱和压力释放装置的强度即可满足国家标准要求，不同海拔的气体绝缘环网柜气箱和压力释放装置均可按此计算和设计。

$$P_1=0.107 \times 1.3=0.139\text{MPa}$$

$$P_2=0.107 \times 3=0.321\text{MPa}$$

通过对气箱结构的加强设计如使用加厚钢板或增加加强筋等措施，使气箱完全能满足在高海拔地区引发的气箱内外压力差变大对气箱强度的要求，避免了因气箱变形引发对箱内高压开关的机械和电气性能的影响，使气箱在额定气体压力下稳定运行，使开关在高海拔环境拥有和平原地区同样的机械和电气性能。

通过设计计算和试验验证，增加泄压膜的厚度和强度，提高泄压膜的压力耐受能力，保证气箱的压力释放范围符合上述压力范围要求，避免气箱因高海拔环境增大气箱内外压力差引起压力释放装置提前释放的可能性，保证气箱内的绝缘水平，保证环网柜的电气性能。

2.2 高海拔气体绝缘环网柜气体密度指示装置的设计

绝缘气体密度指示装置采用密封型密度表，其数值显示不受温度和外界气压变化带来的影响。

高海拔地区气体绝缘环网柜气箱的密度表，选型为密封型的全工况密度表，不受温度和海拔影响，其原理为密度表内部设计有补偿片可实现温度补偿功能，不受温度影响；同时表头内为密封结构，密封室气压为标准大气压，密度表实际显示压力值为气箱内压力和标准大气压的压力差。以上设计，保证了环网柜气箱上安装的密度表的刻度始终能真实反映气箱内的实际气体密度，显示值不受温度和海拔影响，完全满足高海拔地区的运行要求。

2.3 高海拔气体绝缘环网柜全绝缘进出套管的设计

高海拔除了对气箱和测量仪表有影响，还对气箱外的全绝缘元器件如进出线穿墙套管、电缆终端接头的设计有影响。

这些气箱外的全绝缘元器件，其绝缘性能同时受绝缘材料的绝缘强度和绝缘件对地沿面的绝缘强度的综合影响，在高海拔地区由于空气密度减小降低了绝缘件对地沿面的绝缘强度，实际应用中经常会遇到普通设计的气体绝缘环网柜到了高海拔地区后，绝缘套管或者顶扩母线等气箱外绝缘件做工频耐压试验失败的情况。

针对以上情况，在高海拔气体绝缘环网柜全绝缘进出套管的设计方面，本文提供一种新的设计方案：在此类绝缘件的外层设计接地屏蔽层，一方面提高电场的均匀性，一方面避免主回路母线的对地放电现象。某公司在西藏那曲地区的户外10kV开闭所工程应用中，在验收试验中，出现设备相对地工频耐压测试只能到29kV/1min的情况，在采取对进出线套管和气箱外母线的绝缘层外增加接地屏蔽层后，达到了设备的相对地工频耐压测试42kV/1min的国标要求。

2.4 技术关键点总结

高海拔充气绝缘环网柜设计关键如下：

1) 通过增加钢板厚度或增加加强筋，加强气箱结构强度，满足高海拔造成气箱内外气压差增大后对气箱压力耐受值的范围和变形量的要求。

2) 对气箱压力释放装置加强泄压膜强度的设计，泄压膜加强后，满足高海拔造成气箱内外气压差增大后对压力释放装置压力耐受值的范围的要求。

3) 气压指示装置采用密封型密度表，其数值显示不受温度和外界气压变化带来的影响，适应高海拔环境。

4) 在气箱外的绝缘件的外层设计接地屏蔽层，提高电场的均匀性，避免主回路母线的对地放电。

3 高海拔充气绝缘环网柜设计的意义

本设计方案旨在提供一种能真正满足高海拔型运行环境的气体绝缘环网柜，实现气箱强度提升、压力释放装置压力耐受能力提升、可准确测量气箱内气体密度、合理设计相关绝缘件的同时，使环网柜从技术上完全具备对高海拔环境的适应能力，保证了环网柜机械和电气性能，真正实现了气体绝缘环网柜在高海拔环境的正常运行。

我国高海拔地区地域辽阔，对能适应高海拔条件的电力设备需求量非常庞大，产品设计的规范性和合理性急需提高，针对高海拔地区的实际环境变化，对产品的设计提出了新的要求。本技术方案提供一套新的设计理论和方法，做出了新的探索。

在实际应用中，双杰电气合肥有限公司已经将该方案批量应用于国内的高海拔地区的电力工程设计生产实践中，经过试验站和客户的检测，已经全部满足国家标准和企业标准的规范要求，在高海拔产品的实际设计应用中得到验证，取得经济效益的同时，为高海拔电力设备的设计应用作出了有益的探索。

参考文献

- [1] 肖霞. 高原地区的电气设计 [J]. 科技信息, 2011 (23): 528-529.
- [2] GB / T 3906—2020 3.6kV-40.5kV 交流金属封闭开关设备和控制设备 [S]. 2014
- [3] 电子学名词审定委员会. 电子学名词[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [4] Q/GDW 13001—2014 高海拔外绝缘配置技术规范 [S]. 2014.

(收稿日期: 2024-03-27)