

[配电网]

关于SF₆电气设备检漏补漏技术的研究现状及案例分析

文/魏存金¹ 韩建玮² 赵云龙¹ 金佳美¹ 董晨晨¹

1. 国网安徽省电力有限公司阜阳供电公司; 2. 国网安徽省电力有限公司太和供电公司

配电网中大量的电气设备采用SF₆气体作为主绝缘介质,但是随着设备的长期运行,气体泄漏故障时有发生,直接影响配电网安全稳定运行。通过对SF₆目前应用较为广泛的检漏方法是红外成像检测法,而补漏技术需要根据现场情况制定对应的措施。阜阳供电公司SF₆电气设备漏气点处理采用双抱箍法,为以后设备绝缘气体泄漏故障处理工作提供了一种新思路。最后提出一种全工况带电补漏的新技术理念及装置,可以更加完美地处理任何情况下的漏气点故障。

随着城区配网网架的不断完善、电气设备的不断更新,SF₆电气设备广泛应用于众多市区的配网建设中。SF₆气体在常温下无色、无味、无毒性,具备优良的阻燃性能和绝缘性能,成为各类电气设备的主要绝缘介质。

SF₆电气设备属于全包裹、集密性的高技术电气设备,虽然SF₆电气设备内部的一次设备在SF₆气体严密的包裹下保证设备之间足够安全的带电距离,但是其外表面常常面临SF₆气体泄漏的问题。SF₆气体泄漏后造成严重的安全隐患和环境污染。SF₆电气设备发生气体泄漏后,空气中的水分沿着漏气处进入设备内部,造成SF₆绝缘气体中的微水明显增大,水分是影响电气设备绝缘性能的主要因素。SF₆绝缘气体只有在压力101.325 Pa、温度为20℃的环境下,绝缘灭弧性能才最好,一旦发生泄漏,势必影响SF₆电气设备内部的温度及压力环境,使SF₆气体的绝缘性能降低,直接影响设备的安全可靠运行。SF₆电气设备发生泄漏后,需要重新补充绝缘气体,如不能及时处理,有大面积停电的风险。另外,SF₆气体由于局部放电、电弧放电等故障分解出大量低氟硫化物,这些低氟硫

化物与空气中的水分结合生成SF₄、SO₂等有毒气体,对生物及环境产生危害。因此,有效检测和及时处理SF₆电气设备绝缘气体泄漏故障,成为电力生产迫切需要解决的问题。

SF₆电气设备绝缘气体泄漏检漏方法

1. 肥皂泡检漏法

肥皂泡检漏法又称为“皂水法”,是最为常见的检漏方式。具体操作方法是將皂化水涂抹到疑似漏气点上面,利用肥皂水遇气体会起泡的原理来确定漏点。该方法原理简单、操作简便且可以带电检漏,因此得到广泛运用。但是皂水法应用的前提是找到疑似漏气点并且漏气较明显,可以对漏点做到有效诊断,因此,该方法精度较差,工作量大,局限性强。

2. 包扎法

包扎法是将疑似漏点范围处用专用材料进行包扎,如果发生漏气,一段时间后,包裹处出现鼓包现象。最后可以根据鼓包的大小大致测算漏点泄漏的速度。该方法虽然可以带电检漏,但是准确性较差,不具备实时性。

3. 抽真空检漏法

抽真空检漏法主要运用于投入运行前或者检修重新组装后的SF₆电气设备。具体操作方法为：将被测设备与抽真空的仪器相连，对被测设备进行抽真空操作，经过一段时间后，观察仪表是否有气压变化，若仪表气压数据无明显变化，则证明被测设备无漏点。该方法原理简单，但是运用限制条件较大，局限性较强。

4. 卤化物检测法

卤化物检测法是利用卤化物检测仪对SF₆电气设备气体泄漏点进行检测，原理是利用铂元素的“卤素效应”。铂元素在一定温度下发生正离子发射，当与卤素气体相遇时，正离子发射加剧。该方法可以较为精确地检测出SF₆电气设备泄漏气体的速率和浓度，但是卤化物检测法由于检测手段单一、检测范围较小，一般用于小型设备的漏点诊断。

5. 红外成像检漏法

红外成像检漏法主要是利用SF₆气体对红外线较为敏感的特性进行成像。工作原理为：当检测器对被测设备发出红外线激光时，经过被测区域的反射或散射后会形成反射激光进入激光摄影机成像系统，最后形成视频画面。当泄漏的SF₆气体与发射的红外线激光相遇时，造成一部分射线能量被吸收，因此最后形成的视频画面与无泄漏画面不同。该方法操作简单、精度较高，且可以直观地反映被测设备画面，已广泛应用于SF₆电气设备气体泄漏故障诊断。

6. 气敏、湿敏传感器检测法

气敏、湿敏传感器检测法的原理是：利用SF₆气体与某些特质金属接触并被吸附后，使该金属部件重量增加。当气敏传感器与SF₆接触并吸附后，部件的重量增加，使石英晶体振荡盘与特殊部件的共振频率产生变化。通过测量频率的变化，可以推算出SF₆泄漏的严重程度。但是该诊断方法所需的元器件要经常更换，不适合长期观测。

7. 紫外电离型检测法

紫外电离型检测法的原理是通过水银灯发射的紫外线照射，在阴极电离产生电子，电离产生的电子与O₂及SF₆结合后形成负离子。当被测电阻有高压通过时，由于负离子的存在有电流通过；如果没有发生气体泄漏，便无法形成负离子，被测电阻也不会在高压下产生电流。该检测仪检测精度较低、成

本较高，因此该方法并没有大范围普及。

8. 超声波检测法

超声波检测法的原理是超声波在不同介质之间传播的速度存在差异。可以根据超声波在空气中和SF₆气体中的传播速度不同，对比区分出是否发生气体泄漏。但是该方法的影响因素太多，对推测结果影响大，因此常用差分的方法消除温度的影响，使超声波传输速度只与介质的分子量有关。该方法测量精度高、操作简易，但价格较为昂贵，且只适用于SF₆泄漏量较大的情况。

通过上述分析可知，肥皂泡检漏法、包扎法和卤化物检测法原理简单，便于对小范围SF₆电气设备故障点进行快速定位；红外成像检漏法操作简便、精度高，广泛应用于电力部门；抽真空检测法对设备的运行状态要求较高，一般应用于设备投运前和维修重组后；而紫外电离型检测法、超声波检测法机器成本较高，不能得到普及使用。

SF₆电气设备绝缘气体泄漏堵漏方法

1. 更换设备外壳

SF₆电气设备的外壳上常由于工艺问题或者运行工况等原因出现细微的砂眼或漏气点，如果该漏气点位于旁路连接管等非主要设备气室上面，那么整体更换该连接管是快速高效的漏气点处理方式。

2. 重新焊接连接铜管

压力表通过焊接方式与铜管相连。铜管出现漏气点后，将该铜管进行拆卸处理，然后重新焊接，最后检查铜管上是否还有漏气点，消除漏气故障后设备才能正常运行。

3. 采用高质量阀门

阀门出现漏气点的主要部位是阀门中的波纹管。当波纹管裂开或断开后，阀门处出现相应的漏气点。所以采用高质量的阀门是避免设备发生气体泄漏的关键。

4. 采用密封胶进行封堵

若气体泄漏位置位于法兰盘、管壁、气室等重要部件外壳上，先使用密封胶涂抹漏气点，减小漏气点气压，再运用专用胶水进行二次涂抹，最后采用特殊照明灯照射胶水快速固化，完成补漏。

综上所述，SF₆电气设备补漏方案不是固定唯一的，需要根据现场具体情况制定相应的补漏措施。

需要注意的是，补漏工作结束后，要对该漏气点进行一段时间的跟踪检测。

案例分析

1. 故障发现

2021年12月15日，阜阳供电公司下辖110 kV某变压器110 kV II段母线50200接地开关气室压力降至0.33 MPa左右，气压下降直接导致设备绝缘水平降低，影响设备正常运行。公司采取两方面措施：一方面，检修人员进行检漏和补气工作，使其气压恢复至0.42 MPa；另一方面，使用仪器对该设备进行故障检测。

2. 缺陷定位

使用SF₆红外成像仪对110 kV II段母线50200接地开关气室附近GIS（SF₆封闭式组合电器）本体外表面进行诊断检测。经过仔细观测，最终确定漏气点位置为110 kV II段母线50200接地开关与母线筒连接处。如图1所示，在位于接地开关与母线筒连接处的弧面位置处有直径约为1 mm的砂眼漏气点。SF₆红外成像仪检测图如图2所示。由图2可以看出，漏气点位置有明显的气体冒出。



图1 砂眼漏气点位置



图2 SF₆红外成像仪检测图

3. 故障处理

由于漏气点位置处于两个气室连接处的弧形面，较难采用常规方法进行带电补漏，因此，采用一种全新的堵漏方法——双抱箍法进行消缺。双抱箍法的结构是将辅助抱箍固定于主抱箍钢圈上面，而且辅助抱箍的上面有一段位置用橡皮垫包裹。双抱箍法工作原理：主抱箍钢圈套合在GIS管道上面，并固定与之连接的辅助抱箍，使辅助抱箍与弧形面接触的受力点正好覆盖砂眼漏气点，以此方式提供一个防止GIS设备中SF₆气体从漏气点中溢散的压力，起到对不规则弧形表面的漏气点堵漏的作用。砂眼漏气点位置简图如图3所示，双抱箍法处理砂眼漏气点简图如图4所示，双抱箍法直观图如图5所示。

图5所示。

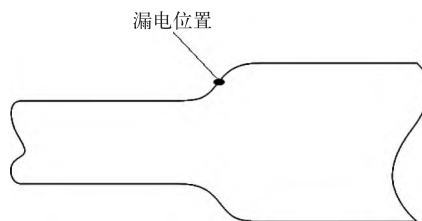


图3 砂眼漏气点位置简图

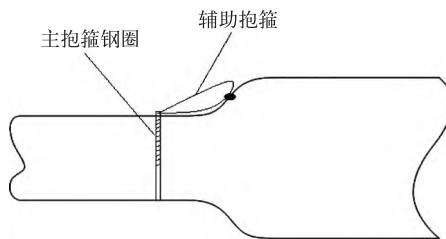


图4 双抱箍法处理砂眼漏气点简图

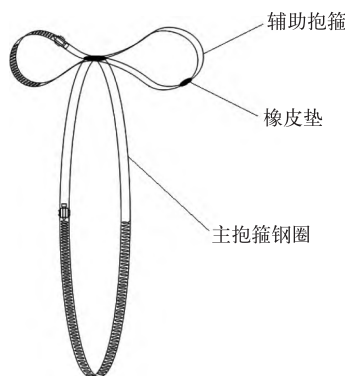


图5 双抱箍法直观图

4. 处理结果

2021年12月25日，对该漏气点使用双抱箍法进行消缺工作。现场中，对主抱箍钢圈位置与漏气点距离反复测量调整，终于达到一个理想的状态，使辅助抱箍的橡胶垫可以将漏气点完全覆盖。堵漏工作结束后，使用SF₆红外成像仪观测到气体不再从漏气点冒出。最后，使用密封胶对漏气点位置进行密封处理，并再次对110 kV II段母线50200接地开关气室进行补气工作，使其气压恢复至0.4 MPa。经过两个月对该气室气压的跟踪巡视发现，110 kV某变压器某110 kV II段母线50200接地开关气室气压稳定在0.4 MPa。2022年每季度对该漏气点进行跟踪复测，气压正常，未见漏气，现场设备运行良好。使用双抱箍法对SF₆电气设备进行带电堵漏，避免了一次非计划性停电，为后

续带电检修作业提供新方法。堵漏后SF₆红外成像仪检测图如图6所示。



图6 堵漏后SF₆红外成像仪检测图

综上所述，阜阳供电公司下辖110 kV某变压器110kVⅡ段母线50200接地开关气室砂眼漏气点故障处理，采用双抱箍法，主抱箍钢圈提供固定作用，与之连接的辅助抱箍提供补漏压力，采用两者的简单结合解决了漏气点在斜面、弧形面等不容易受力位置的GIS设备SF₆漏气故障，为以后电气设备绝缘气体泄漏故障处理提供了一种新思路。

全工况带电补漏新技术

SF₆电气设备绝缘气体泄漏故障一直是影响电网安全稳定运行的主要原因，而泄漏点的产生是由于施工工艺、外界环境、运行状况等多重原因造成的，导致漏气点分布具有不确定性，直接加剧了补漏工作的难度和强度。因此，提出一种全工况带电补漏的新技术理念及装置。

1. 外形归一化

由于SF₆电气设备是以SF₆作为绝缘介质的一体式气体绝缘设备，内部结构紧密，外部形状复杂，而气体泄漏点出现的位置不固定，可能出现在管壁的平面上、管道之间的连接面和螺母附近的不规则面等，间接增加了补漏的难度。因此，该装置第一步需要将包括气体泄漏点附近的SF₆电气设备管壁在内的部分进行归一化处理，即根据气体泄漏点的位置设计一个可以将漏气点及其周围部分管壁包裹在内的柱状物，该柱状物将漏气的部分及其周围金属外壳进行封闭处理，使漏气部位与外界完全隔绝，形成一个独立的内部空间，完成外形归一化。

2. 漏气点平整化

完成了气体泄漏处的外形归一化处理后，需要进一步将SF₆电气设备金属壳的漏气点进行平整化处理。由于SF₆电气设备是多个电气设备功能的整合，因此其金属壳存在较多不规则、不平整的连接面，

而漏气点可能位于金属壳切面处、连接处、弧面等难以运用传统抱箍法处理的位置，并且漏气点的形状是不唯一的，所以要将漏气点位置及其形状进行平整化处理。方法是从柱状物开口处向内部空间延伸进一条柔性软管，一直到SF₆气体泄漏气点附近位置并将漏点大致遮盖。此时泄漏的SF₆气体可以通过柔性软管导出到外部空间，柔性软管成为沟通内部空间和外部空间的漏气排出的通道，使金属壳上面不规则的漏气点转变为柔性软管端口的规则漏气点，从而实现了漏气点的平整化。

3. 凝胶全覆盖

漏点的平整化使泄漏的SF₆气体可以通过柔性软管导出到外部空间。但是由于柔性软管不具有可支撑性，依然会有部分绝缘气体没有进入导出通道而溢散到内部空间，因此，需要通过注胶孔注入大量的凝胶，限制SF₆气体在内部空间的溢散并固定柔性软管的位置。在充胶过程中，可以通过另一端的观察窗观察凝胶是否溢满整个内部空间。由此便实现了凝胶的全覆盖，使绝缘气体完全从用柔性软管建立的导出通道输出到外界。

4. 补漏装置

按照全工况带电补漏的新理念设计的补漏装置包括柱状外壳、注胶孔、密封垫片、观察窗、泄压口、溢胶孔、柔性软管、压力表、SF₆气体在线监测终端、采样口和导管孔等。该装置首先通过柱状外壳将SF₆电气设备的SF₆气体泄漏点封闭在内部，柱状外壳上面的密封垫片和卡扣可以加强其内部空间的密封效果，柔性软管经柱状外壳上的导管孔延伸至SF₆气体最大泄漏点附近，与泄漏部位贴合，若是盘面环状漏气，应先将软管一侧扎1~2排小孔，然后将软管扎孔侧缠绕贴合在漏气的盘面上，靠快插三通连接，将气体聚集到同一点，使泄漏的SF₆气体可以通过柔性软管导出到外部空间；经过注胶孔注入密封凝胶，完全充满整个内部空间，确保密封效果。导管孔、观察窗、注胶孔、泄压口和溢胶孔位于柱状外壳上，压力表、SF₆气体在线监测终端、采样口连接在柔性软管上。

柱状外壳是由两个半圆柱体组合而成，合并套装在SF₆气体泄漏点外面，隔绝形成内部空间和外部空间，密封垫片和卡扣共同作用于柱状外壳，可以有效增强合并状态下柱状外壳内部空间的密封效

果, 保证凝胶注入后不会溢出; 柔性软管经柱状外壳上的导管孔延伸至SF₆气体泄漏点附近过程中, 可以通过观察窗查看柔性软管在内部空间的位置, 以便于调整; 压力表可以实时地显示柔性软管导出的SF₆气体的压力值, SF₆气体在线监测终端可以实时地分析显示柔性软管导出的SF₆气体成分, 在常规性试验时取样口可以进行就地采样; SF₆气体在线监测终端能实现SF₆气体智能采集、实时分析、就地显示、远程传输和自动报警等功能; SF₆气体在线监测终端采用蓄电池和太阳能电池板双供电模式, 保证系统能够独立长期运行。凝胶通过注胶孔进入内部空间, 内部空间的空气需要经过泄压口排出; 泄压口在泄压后由对应形状的封帽封盖; 当凝胶溢满整个内部空间后, 可以通过底部的溢胶孔流出, 溢胶孔由对应形状的封帽封盖; 取样孔安装有逆止阀, 不采样时逆止阀处于关闭密封状态, 采样或凝胶未有效凝固前取样孔的逆止阀通过开启工具打开处于通路状态。补漏装置整体结构图如图7所示。

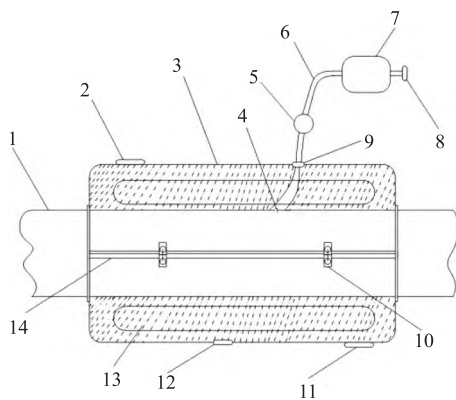


图7 补漏装置整体结构图

1—SF₆电气设备 2—注胶孔 3—柱状外壳 4—漏气点
5—压力表 6—柔性软管 7—SF₆气体在线监测终端 8—取样口
9—柔性软管口 10—卡扣 11—溢胶口 12—泄压口
13—观察窗 14—密封垫片

结束语

SF₆电气设备作为一种高技术、高集合的电气设备, 已经在配电网内得到了广泛应用, 其绝缘气体SF₆泄漏故障的检查消缺工作已经成为重中之重。

提出一种全工况带电补漏的新技术理念及装置, 通过对漏气点实施外形归一化、漏气点平整化和凝胶全覆盖操作, 可以更加完美地处理任何情况下的漏气点故障。EA

(收稿日期: 2023-04-17)

参考文献

- [1] 罗学深. SF₆气体绝缘全封闭组合电器(G投)[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998: 19-24.
- [2] 金立军, 刘卫东, 钱家麵. GIS绝缘配合中的故障分析及诊断和检测技术[J]. 中国电力, 2002, 35(3): 52-55.
- [3] 汪飒, 马江泓, 王建生, 等. SF₆气体绝缘全封闭开关设备的早期绝缘故障诊断[J]. 电力设备, 2002, 3(1): 34-35.
- [4] 吴展锋, 常腾飞, 吴斌. 一起1 000 kV GIS设备六氟化硫气体泄漏分析与处理[J]. 电工电气, 2020(2): 35-38.
- [5] 朱文明, 周峰, 束云豪. 一种用于SF₆分解气体检测的光纤增强拉曼光谱检测装置[J]. 电气应用, 2022, 41(12): 77-82.
- [6] 杨振宇, 晋陵变. 220 kV GIS的漏气检修及其相关问题[J]. 高压电气, 2010, 46(6): 93-97.
- [7] 梁方建, 王 钰, 王志龙, 等. 六氟化硫气体在电力设备中的应用现状及问题[J]. 绝缘材料, 2010, 43(3): 43-46.
- [8] 王伟, 冯新岩, 牛林, 等. 利用红外成像法检测GIS设备SF₆气体泄漏[J]. 高压电器, 2012, 48(4): 84-87.

