

Causes of Gas Moisture Increase in SF₆ Circuit Breaker and the Harm of Serious Exceeding the Standard

Yuezhong Zhao

Maintenance Substation of Panjiakou Hydropower Station, Luan River Diversion Project Management Bureau, Haihe River Commission, Ministry of Water Resources, Tangshan, Hebei, 063000, China

Abstract

SF₆ circuit breakers, as important electrical equipment, are widely used in power systems due to their excellent insulation properties. However, the increase in moisture content within the SF₆ gas is one of the main factors affecting its normal operation. The increase in moisture is typically caused by factors such as gas leakage, poor sealing, and equipment aging, which subsequently leads to a decline in the gas's insulating performance, affecting the reliability and safety of the circuit breaker. Excessive moisture not only accelerates the internal corrosion process but may also lead to equipment failure, threatening the stability of the power system. By studying the causes and hazards of moisture increase in SF₆ circuit breakers, theoretical support for the maintenance and management of related equipment can be provided, thereby reducing the risk of circuit breaker failure in the power system and improving the operational safety and reliability of the equipment.

Keywords

SF₆ circuit breaker; Gas moisture; Insulating performance; Electrical equipment; Equipment failure

SF₆ 断路器内气体水分增大的原因及严重超标的危害性

赵跃忠

水利部海委引滦工程管理局潘家口水力发电厂检修分场, 中国·河北唐山 063000

摘要

SF₆断路器作为重要的电气设备, 广泛应用于电力系统中, 具有优良的绝缘性能。然而, 断路器内SF₆气体的水分增大却是影响其正常运行的主要因素之一。水分的增加通常由于气体泄漏、密封不良以及设备老化等原因, 进而导致气体绝缘性能的下降, 影响断路器的可靠性与安全性。严重的水分超标不仅会加速内部腐蚀过程, 还可能导致设备故障, 进而威胁到电力系统的稳定性。通过研究SF₆断路器内水分增大的原因和危害性, 可以为相关设备的维护与管理提供理论依据, 从而降低电力系统中断路器故障发生的风险, 提高设备的运行安全性和可靠性。

关键词

SF₆断路器; 气体水分; 绝缘性能; 电气设备; 设备故障

1 引言

SF₆ 断路器作为高压电气设备中的重要组成部分, 以其优越的绝缘性能和灭弧能力被广泛应用于电力传输与配电系统中。然而, SF₆ 气体的水分含量是影响其性能的关键因素之一。当水分浓度过高时, 断路器的绝缘性能会显著降低, 导致设备发生故障或提前老化。气体水分增大的原因通常与设备密封不良、空气湿气进入以及长期运行中的气体泄漏密切相关。除此之外, 水分积累还可能导致气体与电弧作用产生有害副产物, 进一步加剧断路器的老化和腐蚀。因此,

及时了解 SF₆ 断路器水分增大的机制, 采取有效的检测与控制措施, 对于延长设备的使用寿命, 保障电力系统的安全运行具有重要意义。

2 SF₆ 断路器的基本工作原理

SF₆ 断路器是一种利用六氟化硫气体 (SF₆) 作为绝缘介质的开关设备, 主要由气体箱、断路器本体、灭弧室及控制系统等组成。气体箱内装有 SF₆ 气体, 其主要功能是提供电气绝缘和灭弧功能。SF₆ 断路器的工作原理是, 当电路需要断开时, 断路器的触头会迅速分开, 形成电弧, SF₆ 气体在高压下会迅速吸收电弧释放的能量, 从而迅速熄灭电弧并恢复电路的绝缘。SF₆ 气体的高电气性能使得断路器能够承受较高的电压和电流, 广泛应用于高压电力系统中。除灭弧功能外, SF₆ 气体还提供了优异的绝缘性能, 防止了电气设备的损坏。因此, SF₆ 断路器具备了很高的可靠性和使用

【作者简介】赵跃忠 (1972—), 男, 中国河北易县人, 变电检修工技师, 从事本单位变电检修及SF₆开关, 辅助电力设备等日常维护研究。

寿命,适用于要求较高的电力环境,过高或过低的温度可能导致气体的性能不稳定,从而增加设备故障的风险。定期检测和维护对于防止这些故障至关重要^[1]。

3 SF6 断路器内气体水分增大的原因

3.1 气体泄漏与空气湿气进入

SF6 断路器内部的水分增大常常与气体泄漏和外部空气湿气进入有关。当断路器的密封性能下降时, SF6 气体可能会泄漏,导致外部空气进入。空气中通常包含一定量的水蒸气,当这些水蒸气进入到断路器内部时,水分就会随着气体流动而逐渐增加。水分的进入不仅会影响 SF6 气体的绝缘性能,还可能加速内部材料的腐蚀,影响断路器的稳定运行。随着设备的运行时间增长,泄漏点可能进一步扩大,水分积累的速度也会加快,因此定期的密封检查与维修至关重要,能够有效防止外部空气湿气进入,从源头上减少水分增大的风险。

3.2 密封不良导致的水分积累

SF6 断路器的密封性能是保证气体不泄漏的关键。密封不良是导致断路器内气体水分增大的一个主要原因。当密封材料老化、磨损或者因操作不当导致密封失效时, SF6 气体就可能泄漏,外部潮湿空气进入。这些水分进入后会在断路器内部逐渐积累,影响 SF6 气体的绝缘性能。水分对 SF6 气体的电气性能产生负面影响,降低了其绝缘强度,增加了电气击穿的风险。此外,水分还可能导致设备的金属部分发生腐蚀,进一步加剧设备故障。因此,密封材料的定期检查和更换、设备的密封性测试是防止水分增大和保持断路器稳定运行的必要措施。

3.3 气体循环与温度波动的影响

SF6 断路器内气体的循环和温度波动也是导致水分增大的重要因素。随着气体在断路器内部的流动和循环,水蒸气可能被带入到断路器内的不同部位,尤其是在温度发生剧烈变化时。温度变化会导致气体内部的水分凝结或蒸发,从而影响水分在气体中的分布。温度较高时,气体中的水分会蒸发并可能向断路器的其他部位迁移;而在低温环境下,水蒸气则可能凝结成水滴,从而积聚在断路器内部。这种水分的积累会影响设备的整体稳定性和工作效率。因此,温控系统的设计、气体循环的优化以及温度波动的控制对于减少水分增大具有重要意义。

4 SF6 断路器内气体水分增大的危害

4.1 水分对 SF6 气体绝缘性能的影响

水分进入 SF6 断路器内部后,会显著降低 SF6 气体的绝缘性能。SF6 气体本身具有极高的绝缘强度,但水分的存在会改变气体的分子结构,导致气体的介电强度下降。当水分浓度超过一定限度时, SF6 气体的介电性能大幅度降低,增加了电气击穿的风险,进而威胁到断路器的正常运行。水分的影响不仅仅表现在气体绝缘性能上,还可能导致电气设备

在负荷较大时产生击穿现象,严重时可能造成设备故障。此外,水分的增加也会影响气体的灭弧性能,使断路器在开关操作过程中无法有效熄灭电弧,从而增加了设备损坏的几率^[2]。

4.2 水分导致的断路器内部腐蚀

SF6 断路器内部水分的积累会加速金属部件的腐蚀,特别是在高温和高湿度的环境下,腐蚀现象更加严重。水分进入后,与金属材料发生反应,生成氧化物和其他腐蚀产物,逐渐破坏断路器的内部结构,降低其机械强度。这种腐蚀不仅影响断路器的电气性能,还会使设备的结构出现松动或损坏,进而影响设备的安全性。腐蚀还可能导致密封材料老化,增加气体泄漏的风险。长时间的水分积累和腐蚀过程会大大缩短断路器的使用寿命,并引发频繁的设备故障和维护,增加运维成本。

4.3 电气设备的绝缘故障与短路风险

水分过多会导致电气设备的绝缘性能恶化,增加绝缘故障的发生概率。断路器内部的水分对 SF6 气体的电气性能构成威胁,降低其绝缘强度,使设备更容易发生绝缘击穿。绝缘失效可能导致短路、设备损坏等严重后果,甚至引发电力系统的大规模停运事故。断路器在处理高电压负载时,水分的存在使得设备在高压条件下无法有效隔离电流,极大地增加了短路风险。尤其在高负荷运行期间,水分浓度过高的断路器可能无法及时切断电流,造成连锁故障。因此,水分超标不仅影响设备的单体性能,还可能引发电网系统的连锁故障,影响电力供应的稳定性。

5 SF6 断路器水分超标的检测与控制方法

5.1 水分浓度检测技术

检测 SF6 断路器内水分浓度是确保设备正常运行的关键步骤。目前常用的水分检测技术包括湿度传感器法、红外吸收法和化学试剂法等。湿度传感器通过检测 SF6 气体中的水分含量,能够实时监测气体的湿度变化。红外吸收法利用水分对红外线的吸收特性,精确测定气体中的水分含量。化学试剂法通过反应生成可见变化,帮助判断气体中水分的含量。不同的检测技术具有不同的灵敏度和精确度,可以根据实际情况选择合适的检测方法。定期检测 SF6 气体的水分含量,有助于及时发现水分超标问题,从而采取有效的措施进行控制。

5.2 水分超标的预警与监控系统

随着技术的发展,水分超标的预警与监控系统逐渐成为维护 SF6 断路器的重要工具。这些系统通过实时监测气体中的水分浓度,并与设定的阈值进行对比,一旦水分浓度超过预设值,系统会自动发出警报,提醒工作人员及时采取措施。这些系统通常结合温度、压力等参数综合分析,确保监控数据的准确性和可靠性。通过自动化监控和预警系统,不仅可以及时发现水分增大的趋势,还能够减少人工巡检的工作量,提高维护效率。此外,监控系统还可以实现远程监

控和数据记录，为设备维护提供有力支持^[3]。

5.3 控制措施与定期维护

为防止 SF6 断路器内水分超标，必须采取一系列控制措施。首先，设备的密封性能需要定期检查，确保没有泄漏，避免外部湿气进入断路器内部。其次，可以采用气体再生装置，定期对 SF6 气体进行净化，去除其中的水分及其他杂质。

此外，在断路器的设计和使用过程中，应充分考虑温湿度的变化，采取有效的温控措施，以避免温度波动导致水分凝结或蒸发。定期的检修和维护是防止水分增大的关键，包括定期更换密封件、清洁设备内部以及检查气体浓度等。通过综合措施的实施，可以有效控制水分的积累，保障设备长期稳定运行，图 1 为 SF6 断路器水分管理影响与解决方案。

	影响因素	描述	影响程度(1-5)	发生频率(每年次数)	可能导致的后果	解决方案
1	水分对SF6气体绝缘性能的影响	水分增大会导致SF6气体介电强度下降，增加电气击穿的风险，威胁设备的正常运行。	5	12	设备故障、停机、系统安全威胁	控制水分含量，定期检测，维护密封性能
2	水分导致的断路器内部腐蚀	水分进入后与金属部件反应，生成腐蚀物质，加速设备损坏。	4	10	设备老化、维修成本增加、安全隐患	使用抗腐蚀材料，减少水分积累，优化设计
3	水分对断路器寿命与稳定性的威胁	水分积累会影响灭弧效率，导致设备寿命缩短，影响稳定性。	5	15	频繁故障、无法满足电网稳定性要求	采用先进材料，优化设备设计，进行水分控制
4	电气设备的绝缘故障与短路风险	水分超标导致绝缘性能下降，增加短路风险，可能引发电力系统事故。	5	8	大规模电力中断、设备严重损坏	加强监控与故障预警，定期维修与检查
5	水分浓度检测技术	采用湿度传感器、红外吸收法等技术实时监测水分浓度，预防	3	20	设备过早退役、环境污染增加	结合气体净化技术，及时净化与再生气体

图 1 SF6 断路器水分管理影响与解决方案

6 SF6 断路器水分管理的改进方向

6.1 密封技术的提升

SF6 气体水分超标的一个主要原因是密封不良，导致外部湿气渗入断路器内部。为了防止水分进入并保证 SF6 气体的绝缘性，密封技术的提升是至关重要的。密封件的质量和设计直接影响断路器的水分管理能力。新的密封材料应具备较强的抗老化、耐高温、耐腐蚀等性能，能更有效地避免气体泄漏。通过定期检查和更换老化的密封件、改进密封结构设计，以及使用双重密封等技术，可以显著减少水分进入的风险。此外，施工和现场组装时的环境控制也同样重要，确保设备密封完整，从源头上预防水分超标问题。

6.2 气体净化与再生技术

气体中的水分超标通常是由于气体中杂质的积累，尤其是在设备使用过程中，水分与 SF6 气体发生水解反应，产生各种腐蚀性物质，如 CuF2、WO3 等，这些物质对设备的绝缘性能和金属部件有强烈的腐蚀作用。采用气体净化技术是有效减少水分和杂质积累的重要手段。使用分子筛、干燥剂等材料可以有效吸附气体中的水分，并去除其他腐蚀性杂质。此外，再生技术也可通过回收使用过的 SF6 气体，去除水分及其他污染物，恢复气体的绝缘性能。这不仅提高了 SF6 气体的利用效率，也有效延长了断路器的使用寿命，减少了水分增大的风险。

6.3 智能监测与故障预防系统的应用

为了防止水分超标带来的危害，智能监测与故障预防系统应得到广泛应用。通过集成湿度传感器、压力传感器和温度传感器等设备，实时监测断路器内部气体的水分浓度。系统可自动记录气体的变化趋势，发现水分浓度超标的迹象

时，及时发出警报并自动调节设备工作参数。进一步地，智能系统能够结合人工智能和大数据技术，对设备运行状态进行全面分析，预测设备可能出现的故障，进行提前预警，从而避免因水分过多而导致的设备损坏和系统故障。这种系统化的预防和监控方案将大大提高 SF6 断路器的可靠性和安全性，保障电力系统的稳定运行。

7 结语

SF6 断路器在现代电力系统中扮演着至关重要的角色，其高效的绝缘和灭弧性能保障了电力设备的稳定运行。然而，水分的增大对断路器的性能、寿命及安全性构成了严重威胁。通过深入分析水分增大的原因及其危害，我们可以更加精准地识别和解决相关问题。密封技术的提升、气体净化与再生技术的应用，以及智能监测与故障预防系统的引入，将为 SF6 断路器的水分管理提供有效保障，减少水分对设备造成的负面影响。未来，随着技术的不断进步和维护管理的完善，SF6 断路器的可靠性将得到更大提升，为电力系统的安全运行提供更加坚实的保障。

参考文献

- [1] 张宏伟.超高压SF6断路器瓷套管炸裂事故分析[J].河北水利电力学院学报,2025,35(04):14-21.
- [2] 李圳,罗有为.SF6断路器气体泄漏事故的故障处理与防治措施分析[J].中国高新科技,2025,(19):73-74.
- [3] 李叔麟,杨文,周平,冯宇,何强.500 kV SF6断路器操动机构辅助开关故障分析[J].水电站机电技术,2025,48(08):127-130.
- [4] 马强.500 kV断路器气室内气体分解产物异常原因分析[J].机电信息,2025,(15):6-9.