

SF₆ 高压电器 和气体介质变电站

李修斌 张节容 主编

HIGH VOLTAGE EQUIPMENT AND
GAS-INSULATED SUBSTATION

前 言

应用电能和建立公用电网已经历了近一个世纪。人类对电能依赖越来越大。城镇人口密集，寸土如金。解决提供充足、强大、可靠、连续、与日俱增的电力，保证电能供给已成为城镇的活力和生命线了。这里既有占地问题，还要对环保和安全负责，涉及的因素是广泛而多方面的，诸如防火、防污染、防噪音、防无线电干扰、美化、照度……等等。满足这一系列新的要求，传统的以绝缘油介质构成的电气装置已不能胜任，而迫使向无油、组合、小型化成套。选用SF₆和合成绝缘已成为开发这门技术的必由之路，说介质变革带来技术“质”的改变是不为过的。当今理论探索阶段已经过去，SF₆气体介质的电气设备大量应用于电网已显示出它的无可比拟的优越性。10~500千伏电压级已广泛使用，750千伏电压级在试用中，1200千伏电压级也已取得了研究成果，事实证明SF₆电气设备已成为当代电气装备的技术特征。

装备是电网建设的物质基础。面对日益发展的电网，SF₆气体和合成绝缘介质的出现和应用，掀起了装备更新换代的新浪潮。它有力地推动电网技术的进步，加快建设速度，获取有效的经济效益，促进电网生产方式的改变。

本书力图做到理论联系实践，较为系统地介绍SF₆气体介质的应用和开发前景；理化、绝缘和灭弧的基础；各类装备的原理、结构、设计计算和试验方法；介质性能的检测以及防护方法等。在已有实践应用的基础上介绍SF₆全封闭组合电器的设计、安装、运行、维护和试验。本书可供电业工作者参考、学习之用，也可作为高等院校的教学参考书。

参加本书编写工作的有张节容（第一、四、七章）、李修斌（前言、绪论）、孙煦（绪论、第四章）、王继宗（第一章）、王昌长（第二章）、王伯翰（第三章）、吴新炎（第五、六、七章）、姜虹飞（第八章），并由张节容、李修斌对全书作了审校。

限于作者水平，错误不妥之处在所难免，恳望读者指正。

目 录

前言

绪论	(1)
第一章 SF ₆ 气体的物理化学性质及气体杂质的检测方法	(10)
第一节 SF ₆ 的基本特性	(10)
第二节 SF ₆ 气体的状态参数	(13)
第三节 SF ₆ 气体的毒性问题	(16)
第四节 SF ₆ 电器设备中的水分控制	(24)
第五节 SF ₆ 断路器中应用的吸附剂	(27)
第六节 SF ₆ 气体中痕量杂质的分析检测方法	(31)
第二章 SF ₆ 气体的绝缘特性	(39)
第一节 气体击穿的基本物理过程	(39)
第二节 SF ₆ 气体的击穿特点	(45)
第三节 电场的均匀性对SF ₆ 气体击穿电压的影响	(46)
第四节 SF ₆ 气体绝缘的冲击特性	(50)
第五节 电极表面状态对SF ₆ 气体击穿的影响	(54)
第六节 SF ₆ 气体中沿固体介质表面的放电	(59)
第七节 充SF ₆ 气体的电力设备的绝缘结构	(62)
第八节 SF ₆ 混合气体	(65)
第三章 SF ₆ 的灭弧性能	(68)
第一节 电弧现象概述	(68)
第二节 SF ₆ 的分解和导电性能	(69)
第三节 电弧的散热	(71)
第四节 喷口气流中的电弧特性	(77)
第五节 SF ₆ 气体的优良灭弧性能	(82)
第四章 SF ₆ 断路器、变压器和电缆	(84)
第一节 SF ₆ 断路器的几种主要型式	(84)
第二节 压气式SF ₆ 断路器	(87)
第三节 国内使用较多的几种瓷柱式SF ₆ 断路器	(94)
第四节 国内使用较多的几种罐式SF ₆ 断路器	(127)
第五节 中压级SF ₆ 断路器	(136)
第六节 充气(SF ₆ 气体)式开关柜	(146)
第七节 SF ₆ 发电机断路器	(150)
第八节 SF ₆ /N ₂ 混合气体在断路器中的应用	(156)
第九节 SF ₆ 气体绝缘变压器	(158)
第十节 SF ₆ 气体绝缘电缆	(165)

第十一节 SF ₆ 电压、电流互感器	(169)
第五章 全封闭组合电器的特点、元件参数及其主要结构	(172)
第一节 SF ₆ 全封闭组合电器的特点	(172)
第二节 电器元件的技术参数	(174)
第三节 全封闭组合电器中各元件的主要结构	(180)
第六章 全封闭组合电器设计安装与使用	(182)
第一节 全封闭组合电器的布置设计	(182)
第二节 全封闭组合电器的伸缩节与气隔配置	(186)
第三节 全封闭组合电器的支架基础固定方式, 土建荷重的计算	(187)
第四节 全封闭组合电器变电室内的通风计算	(189)
第五节 全封闭组合电器安装处的室内装饰和防火措施	(191)
第六节 全封闭组合电器的外壳保护	(192)
第七节 全封闭组合电器外壳感应电压计算及接地方式	(197)
第八节 全封闭组合电器的过电压保护	(200)
第九节 城网变电所接地网的设计	(202)
第七章 全封闭组合电器的交接验收试验	(205)
第一节 交接试验项目	(205)
第二节 全封闭组合电器的测试仪器和辅助设备选择	(207)
第三节 现场耐压试验设备	(210)
第八章 南京西华门变电所采用110千伏 GIS 的实例介绍	(216)
第一节 变电所设计要点	(216)
第二节 施工及安装要点	(230)
第三节 SF ₆ 气体检测和设备的电气试验	(236)
第四节 结束语	(245)

绪 论

电能的应用和公用电网的建立,已经历了近一个世纪的发展过程,新型电气设备的发展是电力网发展的物质基础。社会经济的发展对电能的依赖和需求量的日益增大,促使巨型火电站、水电站和原子能电站加速建设,这些巨型电站或是为了就近取得一次能源,或是环境保护要求往往都远离负荷中心,从而使输电容量日益增大,对电气设备提出了一系列需要解决的新问题,例如:与电力远距离传输相适应的高电压等级,由电网容量增大所引起的短路电流增大需要的大开断能力,以及电压等级提高以后电力网安全运行问题等等。330千伏及以上的电网是五十年代才开始发展起来的。二次世界大战前各国电网的最高电压均不超过275千伏,1952年瑞典投运了世界上第一条400千伏等级的电力线路,使电力网的最高电压等级突破300千伏水平向更高电压等级发展,此后欧、美、苏联相继建造了330、400、500和750千伏的各级特高压电网。五十年代以来的近三十年间大电网的发展速度是惊人的,远远地超过了战前五十年,主要是得到不断革新的电气设备的支持,而新的电气设备的发展又依赖于优异的介质。新的绝缘介质和灭弧介质的引用,完满地解决了电力网高电压等级各个发展阶段的技术难题。

电气设备传统的绝缘介质和灭弧介质是绝缘油。电力变压器几乎都是用油的,这是由于绝缘油具有比空气强度高得多的绝缘特性,其比热比空气大一倍,且液态受热后具有对流特性,使它在变压器内既作绝缘介质又兼冷却介质,油断路器开断电流时,绝缘油为电弧高温所分解,形成以氢为主体的高温气体,积贮压力,达到一定值后形成气吹,由于氢的导热率极高,使弧道冷却去游离,导致电弧在电流过零时熄灭,同时使断口间获得良好的绝缘恢复特性,保证了大电流的顺利开断,因此绝缘油在断路器内既是良好的绝缘介质又是优异的灭弧介质,可见油断路器在高压断路器的发展史上长期占支配地位是有其原因的。空气经过压缩,亦是良好的绝缘和灭弧介质,但由于压缩空气断路器结构复杂,价格昂贵,且需配置空压机和管道系统,维护工作量繁重,使其除局部领域(如大容量发电机机端断路器)略占优势外,未能取代油断路器的地位。但绝缘油最大的弱点是可燃性,而电气设备一旦发生损坏短路,都有可能出现电弧,电弧高温可使绝缘油引燃形成大火,电力系统内由此而形成的火灾事故不胜枚举。这个问题在城市电网中特别突出,城市人口密集,对电力的依赖性比农村大,且供电功率大,连续性要求高,城网变电所一般都建筑在负荷中心,建筑密集人口拥挤,寸土如金,变电所所址往往是靠拆迁民房挖出来的,变电所都要与民房或工业厂房相毗连,发生火焰必然蔓延,殃及左邻右舍,造成社会损失,因此城市电网的建设一方面要满足更集中的电能供应,另一方面在供电技术上要对占地、环保、安全负责,需要考虑的问题是很广泛的,例如防火、防过电压和接地、防污和排污、环保和美化、噪音和无线电干扰、照度和闪烁……等等,要求人们改变以油介质为主的绝缘构成,使电气设备走向无油,寻求不燃烧的绝缘介质和灭弧介质。 SF_6 气体具有不燃烧的特性,并具有优异的绝缘性能和灭弧性能,在六十年代首先被应用于断路器中,接着扩大应用于变压器、电缆……等各种电器。科学技术进步,必然解放生产力,这是人类文明和进步的必然趋向。 SF_6 气体绝缘的出现使我们面临

一个介质变革的时代，介质改变必将使输电设备的面貌、技术性能大为改观，采用SF₆和合成绝缘将是、也必然是一段历史历程的介质革命，作为一代人的希望，说它是介质革命带来进步是不为过的。特别在遥感、遥控、光纤纤维（各种能量转换）和微机等等日趋成熟完善的今日，SF₆气体作为新介质将以不可阻挡之势取代其它介质而独占鳌头。SF₆断路器制造动向已证实了这一点，以国际市场为目标的制造商如一味坚持生产少油或压缩空气断路器就意味着失去市场，世界上闻名的制造公司无不转向SF₆电器，西德西门子、法国的阿尔斯通公司已停止少油断路器的生产；美国通用电气公司，一向主张发展真空断路器，在70年代甚至设想发展800千伏真空断路器，但这种尝试很快就证实行不通，只得再转向发展SF₆断路器，由于贻误了时间，从头做起起步太慢，不得不引进日本技术；瑞士BBC公司生产的空气断路器是世界名牌产品，到78年发现已销不出去，才下决心搞SF₆电器，目前已做到各级电压等级齐全，品种齐备，其转向决心之大，速度之快在开关制造业同行中是很少见的。可见发展SF₆电器已是世界趋势，各种SF₆电器设备的技术参数已达到了很高的水平。

一、SF₆断路器的发展和目前达到的水平

SF₆断路器是采用SF₆气体作为绝缘介质和灭弧介质。由于SF₆具有优异的绝缘特性和灭弧特性，使得高压断路器在尺寸小、重量轻、容量大、成套速装、不维修或少维修等方面，使传统的油和压缩空气断路器无法与之相比。但发展之初，SF₆气体断路器的设计还是沿袭了油断路器和压缩空气断路器的灭弧方式，世界上第一台SF₆断路器由美国西屋公司在1955年造成，投运于115千伏电网，断流容量仅1000兆伏安，据有关资料介绍，设计上采用了油自吹的灭弧方式，利用电弧高温使SF₆气体压力上升，利用气吹熄灭电弧。当时认为这种方式开断容量不易提高，就转而采用压缩空气断路器的灭弧方式。1958年西屋公司造出了第一台220千伏15000兆伏安的SF₆断路器，以2个表压的SF₆气体代替压缩空气充于内腔作为主绝缘。开断时，以14个表压的SF₆气体通过主气阀在喷口中形成音速气流使电弧在电流过零时熄灭。但通过喷口的SF₆气体不是向大气排放，而是排向2个表压的低压区，另以压缩机将SF₆气体从2个表压的低压区补充到14个表压的高压区的贮气桶内，以备下次开断时再用，SF₆气体在断路器内一直保持着密封循环。这种气体断路器内部具有两种气体压力，称为双压式SF₆断路器，断流容量显著增加，这就是通常所称的第一代SF₆断路器。

由于双压式结构复杂，另需配置一台密封循环中运转的压缩机，价格昂贵。同时，SF₆气体在14个表压时容易液化，温度必须经常保持在8℃以上，在运行中十分麻烦，不受用户欢迎。因而促使制造厂另找路径，以达到结构简单断流容量较大的目的，从而产生了单压式SF₆断路器，通常称之为第二代SF₆断路器，经过试验亦能达到双压式相接近的开断能力。这种断路器的额定气压为5~6个表压，开断时，利用压气缸（又称压气罩）与活塞的相对运动，把SF₆气体压缩，产生气流，在喷口中达到音速，使电弧熄灭。这就大大简化了产品结构，不但摒弃了双压式断路器复杂的控制阀、排气阀、时间限制阀……等，而且气体压缩机，气罐和其它附属设备均不需要，深受用户欢迎。单压式断路器经过不断改进，日趋完善，双压式断路器逐渐被淘汰。

由于单压式设计原理的出现，使SF₆断路器从油和压缩空气断路器的设计思想中完全解脱出来，使高压电器从介质的变革过渡到设计原理的变革而进入了一个新的发展阶段。目前的SF₆断路器其最高电压已达765千伏，开断电流可达80千安，额定载流量可达12000安，

形成高压断路器的发展，唯SF₆断路器莫属的势头。这是由于近年来在下列几个技术问题获得突破的结果：

1. 提高了断口单元的额定电压值，使串联断口减少。近年来计算机的应用，能在短时间内求出复杂几何形状各部分的电场分布并作出分析，设置了减少电场集中的电极屏蔽结构，把开断部分包围起来，使触头间的电场均匀，解决了以前SF₆气体在不均匀电场条件下绝缘性能降低的问题，从而能提高灭弧单元的断口电压，制成了300~420千伏的断口单元。这样，一台420千伏断路器只要一个断口，500千伏断路器只要二个断口，从而简化了多断口组合中的电压均匀分配问题，使结构简化，均压电容减少，成本降低。

2. 有效地利用压气缸(压气罩)的侧壁作为通导体，在定触指的外侧装有集流环，将电流引向压气缸的外壁，通过自然冷却，使通流能力可达8000~12000安，不需要特殊的冷却装置，从而简化了大额定电流断路器结构。

3. 合理利用电弧阻塞效应，大大节约了操作功。SF₆断路器在灭弧过程中，压气罩内的气体，在电弧作用的影响下压力升高，而压气缸与活塞的相对运动，亦是为了达到升高压力的目的，因而如果设计恰当，可充分利用电弧过零前某段时间内的电弧阻塞效应，使压气缸内的气体不向外吹出，既节约了气体，又能利用电弧能量加热SF₆气体提高压气缸内的压力。当交流电流由大到零过程中弧柱逐渐缩小，在某一时刻才开始气吹，从而提高了喷口的气流速度，获得较优的熄弧效果。由于单压式SF₆断路器在机械能与电弧能综合利用方面得到了发展，使灭弧室趋向小型化，操作功减小，开断电流已达到80千安的水平。

4. 找到了较为合适的操动机构

提高SF₆断路器的开断能力需要增大驱动力来快速推动压气缸。液压机构具有体积小、功率大，系列性强，因而适合于单压式SF₆断路器需要大操作功率的要求。已广泛地用作SF₆断路器的操动机构。但近年来气动机构和弹簧操动机构已开始用于SF₆电器设备中。

另一方面SF₆断路器也有一些特殊问题，需要注意：

1. 电场均匀程度对SF₆气体绝缘击穿电压的影响十分显著。SF₆气体在均匀电场的条件下具有优异的绝缘性能，当出现不均匀电场时，绝缘性能大幅度下降。SF₆在不均匀电场中只要一出现电晕，紧接着就出现击穿，而空气绝缘的击穿电压与电晕电压间则有很大差值。SF₆断路器的每个单元的电压较高，因此必须注意由于多次开断短路电流触头烧损使得电场情况变坏，从而降低开断性能。

2. SF₆气体的击穿电压受微量杂质的影响很大。制造厂在生产SF₆电器时，要求SF₆电器内部必须尽可能保持无尘埃的干净状态。尤其是GIS装置为了保证安装过程中容器内部的清洁度，要严格管理组装环境，要测定现场浮悬尘埃浓度不大于0.2毫克/米³，同时测定大于10微米的尘埃的降落量，罐内作业工作人员要穿专用工作服，并随同向罐内送入清洁空气。为检查有无金属杂质的隐患，投运前应进行工频交流耐压试验，并配用超声波检测仪检查有无局部放电情况等，这些措施都是必不可少的。

3. 应严格控制SF₆气体的含水量。

SF₆电器对水份控制要求很严格，断路器要求不大于150ppm(体积比)，GIS装置内的断路器气室要求与此相同，其它气室允许略高，但亦不应超过250ppm(体积比)。水分不仅影响SF₆气室内绝缘件表面的闪络电压，同时，水的存在使得SF₆气体受电弧分解

时生成大量有毒的有害气体。

4. 气密性要求严格: SF₆ 电器对气密性的要求, 既要防止气室内的 SF₆ 气体向外渗漏, 又要防止外面大气里的水分子向内渗透。

一般都规定年漏气量小于 1%, 气密性不好, 达不到年漏气量小于 1% 的要求, 则补气周期缩短。当电器内部的 SF₆ 向外漏气时, 内部的含水量必定升高, 因 SF₆ 气体分子如能从密封气隙中渗出, 大气中的水分子亦能由此气隙渗入, SF₆ 分子形状呈棱形, 体积较大, 水分子呈条状, 分子体积较小, SF₆ 分子能通过的缝隙, 水分子亦能通过。气室内虽然压力高于大气压力, 但由于含水量控制在 150ppm 以内, 水的分压力很低, 而大气中相对湿度高, 水分子压力比气室内腔的水分分压力高得多, 内外产生了一个水蒸汽压差, 高压区的水分子向低压区扩散, 就形成大气内水分向气室内腔渗透的现象, 因此密封的可靠性直接影响断路器本身的可靠性。

SF₆ 断路器目前还在不断发展, 各制造厂都在改进自己产品性能, 使在市场上更富有竞争力, 综合各制造厂的报导资料, 改进的重点在于:

1. 减少断路器的操作功, 降低成本使 SF₆ 断路器在 10、35 千伏中压级电网中能与真空断路器相竞争。

SF₆ 断路器对操作功的要求基本上与开断电流成正比例地增大, 这就给发展中压级 SF₆ 断路器带来困难, 如果一台开断 31.5 千安的 35 千伏 SF₆ 断路器要求配置与 110 千伏电压级开断电流相当的液压机构, 不但体积和外观均不相称, 价格上亦无法使用户接受, 于是就开始研究应用磁力驱动旋转电弧的原理, 和自能(利用电弧能量对部分 SF₆ 气体加热, 建立压差, 然后选择一适当时间打开喷口气, 吹熄电弧)相结合的第三代 SF₆ 断路器, 操作功较原先的单压式大幅度下降。例如 BBC 公司的 HB 型 SF₆ 断路器, 其操作功仅单压式断路器的五分之一, 可以使用弹簧操动机构, 这就大大地降低了造价, 并缩小了体积尺寸, 用它组装成开关柜能与真空断路器竞争。

2. 提高灭弧室的开断能力, 发展开断电流为 100 千安的断路器, 并进一步缩减全开断时间。

目前制造厂生产的单压式断路器的开断电流不超过 80 千安, 进一步提高灭弧室的开断能力成为各厂开发新产品的又一方向。据报导西门子公司对其定开距结构已完成了开断电流 100 千安灭弧室的研制工作, 他们利用石墨喷口材质逸出功大的特点, 在电弧加热下, 石墨直接由固态到气态, 而无液相状态这个性能, 因此开断大电流时喷口内径的增大变形甚微, 能成功地开断 100 千安的短路电流。

现在 SF₆ 断路器的全开断时间一般能做到 2.5 周波 (50 赫芝), 随着电网容量的增大, 电网稳定需要故障切除时间更短, 要求提供全开断时间小于 2 周波的断路器。因此, 各厂都已着手研制断口电压更高, 开断电流更大, 全开断时间更短的 SF₆ 断路器。

3. 进行混合体的研究, 使 SF₆ 断路器特别是 GIS 能在高纬度地区使用:

纯净的 SF₆ 气体的液化温度随着压力的增大而升高, 这一特性在特别寒冷地区的影响甚大, 例如在环境温度为 -40℃ 地区, SF₆ 达到 3.57 个大气压时就液化了。N₂ 价格低廉, 在保持 SF₆ 所具有的绝缘性能和灭弧性能条件下, SF₆ 与 N₂ 混合, 既可在较低环境温度下工作, 而且达到降低成本的目的。SF₆ 与 N₂ 混合气体性能当使用压力为 5 个大气压时, 混合比

各为50%似乎是最佳方案，同时发现不同的工作压力其最佳混合比是不同的，目前SF₆与其它气体混合的研究工作，正在不断发展中。

二、SF₆气体在变压器、电缆和其它高压配电装置中的应用

1. SF₆气体变压器

随着电力传输线路长度的增长，传输容量的增大，输电电压等级的不断提高，两个电压等级之间的电力变换容量迅速增加，对电力变压器的要求愈来愈高。例如：可靠性要求、安全要求、防火、防爆、控制噪音、节省能源、缩小占地面积、减少运输重量、防排油污染等等，传统的变压器结构、设计、材料……已很难适应。变压器制造业寻求了各种改革方案，经过分析研究，发现气体绝缘变压器是取代油纸绝缘变压器的最佳办法。用聚脂薄膜和SF₆气体作为绝缘介质，采用铝箔绕制线圈，采用氟碳化合物作为冷却剂，不仅具有不燃烧不爆炸的特性，并且还有重量轻、尺寸小、损耗低、噪音小等优点。在电力变压器中SF₆气体压力一般选取2个大气压，压力太高必须增强壳体的强度，还将增加壳体的重量和制造成本。由于SF₆气体的导热性不如变压器油，在大容量的变压器中可加入氟碳化合物作为冷却剂，形成单独密闭的冷却系统。小容量配电变压器为简化结构，仍采用SF₆气体作为冷却介质。

气体变压器的线圈可采用扁铜线，也可改用铝箔绕制，铝箔的宽度等于线圈整体轴向高度，这种线圈结构中的匝间电压仅是一匝电压，0.5毫米厚度的聚脂薄膜的绝缘强度已经足够，因而能使绝缘结构大为简化，结构尺寸与油纸绝缘变压器比较可大为减小。

压缩了的SF₆气体隔音性能比绝缘油好，故传导到外壳上的铁芯噪音水平要比油变压器低。

SF₆气体变压器，美国和日本已有商业产品，日本大量使用于电气铁道，三菱公司已完成了275千伏电压级的试验样机，美国已完成345千伏电压级容量40兆伏安单相变压器研制，且正在继续。研究扩大变压器容量问题，欧洲曾有一个时期主张以硅油代替矿物油，实践结果并不理想，亦在转向使用SF₆气体。我国北京变压器二厂已经生产了10千伏500千伏安的SF₆变压器，更高电压等级，更大容量的SF₆变压器正在研制中。

2. SF₆气体绝缘电力电缆

传统的高压电力电缆是采取油纸绝缘的，由于绝缘油和绝缘纸的介电常数大，充电电流较大，且随线路长度的增加成正比例地上升，到达一定长度，即使末端开路，始端的充电电流可达到满载数值。以345千伏电缆为例，其“临界长度”约为40公里，在更长距离采用电缆，必须加并联电抗器补偿。为了提高超高压电力电缆的输送容量和送电距离，必须研究新型电缆，目前以SF₆气体为绝缘的新型电缆，从145千伏至750千伏，已分别在美、加、英、西德等国投入运行。

世界上第一条实用的SF₆气体绝缘电力电缆是1969年由美国研制成功的，电压为345千伏，长度为183米，于1971年投入运行，称为GIC，四年后制造技术即推进到800千伏。

GIC可分为刚性外壳和挠性外壳两类。

刚性外壳的GIC又分单芯和三芯两种结构，单芯外壳材料一般采用非磁性铝合金，三芯GIC外壳采用钢管，工厂制造长度一般为12~18米，再到现场安装联接。外壳用焊接，导体通常用铝管，相互联接采用插入式结构，这种方式的优点是连接方便，又可补偿外壳与导体之间热膨胀的差异，导体的支撑绝缘采用环氧树脂绝缘子，绝缘子间距一般取3~6米，

SF₆气体压力取2.5~4.5个大气压，终端用出线套管引出后与其它电器设备相联。

挠性GIC的外壳采用波纹状铝合金管，导体亦使用波纹状铝管，绝缘支撑采用盘形环氧浇制绝缘件，间距仅0.6米，但工厂制造长度可达80米左右，减少了现场安装工程量，因其接头数量较刚性外壳GIC少，污染机会亦减少，使安装费用和工程造价大为降低。

与油纸电力电缆相比GIC有下列优点：

(1) SF₆气体的介电常数为1，因此电容量只有充油电缆的几分之一，充电电流小，

(2) 介质损失小，几乎可忽略不计，因此允许工作温度高，比充油电缆具有更大的传输容量；

(3) 终端套管结构简单，价格相对便宜；

(4) 水电站场地狭窄，落差大，使用GIC不存在油压电缆终端头的高低压差问题。

3. SF₆气体在其它电器上的应用

SF₆气体介质，在电流互感器及电压互感器的制造上已开始试用。美国电力研究所特高压试验基地选用的1500千伏特高压试验变压器的测量电压用的高精度电容式电压互感器就是采用SF₆气体作为绝缘，基准冲击绝缘水平为2550千伏，由美国GE公司制造。德国公司生产的电磁式电压、电流互感器也采用SF₆气体作为绝缘。

传统的高电位电压、电流测量是电磁型的，电磁能量的转换总有一暂态过程。例如高压导线对地短路，可使电压突然变零，但有铁芯的电压互感器所连接的电压表读数不是立即到零，次级响应的暂态过程约60毫秒，已超过电子式可控硅继电器动作时间（约2—3毫秒）因此易使某些快速距离保护误动作，可见电磁式互感器响应特性不佳。被测量的电压等级愈高，互感器体积相应增大，响应特性愈坏。利用波开尔效应，即电光效应，可进行无电气接触测量。其方法是把具有线性电光效应的石英晶体放在高电压的电场中，使其光轴与电场方向一致，则透过晶体的圆偏振光变成椭圆偏振光，在两个正交方向的相位差与电场强度成正比，因而通过测量相位差即可测出加在晶体上的电压，在地电位处接收此光束后再经过光电转换变成电信号，此即为光电式电压互感器原理，但光束在空间传递，易受式雾的影响。虽用大瓷套保护光导管，亦难免受环境温度变化的影响。SF₆气体的应用，为光电互感器提供了发展前景，因在导管内充SF₆气体以后，充气空间的含水率在150ppm以下，正常低温时不会凝雾结露。光电式互感器的优点是精度高，响应特性好，无暂态过程的影响。

对高电位电流的测量，亦可采用光电式电流互感器，它利用法拉第效应（磁光效应）把具有磁光效应的晶体，如重铅玻璃棒放在高压导体附近，使其光轴的方向和磁场方向一致，导体中电流变化时，磁场强度亦随之改变。如在地电位用激光束射向高电位，通过这一晶体的线性偏振面方向要产生旋转，旋转角度与磁场强度成正比，根据测量光束偏转面角度的变化就可测定磁场的大小，亦即电流的大小。光束经反射后在地电位接收，经光电变换器，差动放大器转换成电信号。传递光束的光导管亦充以SF₆气体使其免受环境影响。

光电式电流互感器和光电式电压互感器的应用，是走向电子化、弱电化的捷径，将大大改变保护、自动控制结构的现有格局，促使新技术的发展。

三、SF₆全封闭组合电器（GIS）

SF₆全封闭组合电器就是把整个变电所的电器设备，除变压器外，全部封闭在一个接地

的金属外壳内，壳内充以2.5~3.0大气压(表压)的SF₆气体。

SF₆全封闭组合电器的优点是：

1. 大大缩小了电器设备的占地面积与空间体积。由于SF₆气体有很好的绝缘性能，因此绝缘距离大为缩小。通常，电器设备的占地面积大约与绝缘距离缩小的倍数成平方倍缩减，空间体积则成立方比例缩减。随着电压等级的提高，缩小的倍数越来越大。

根据国外数据，不同电压等级采用SF₆全封闭组合电器与常规的敞开式电器的占地面积与空间体积的比较见表1。

表 1 占地面积与空间体积比较

电压 (千伏)	占 地 面 积			空 间 体 积		
	SF ₆ 全封闭组合 电器 A(米 ²)	敞开式电器 B(米 ²)	缩小率 $\frac{A}{B}$ (%)	SF ₆ 全封闭组合 电器 C(米 ³)	敞开式电器 D(米 ³)	缩小率 $\frac{C}{D}$ (%)
66	21	123	17	136	1360	10
154	37	435	7.7	331	8075	4.1
275	66	1200	3.8	414	28800	1.4
500	90	3706	2.4	900	147696	0.6

根据华北电力设计院统计：一个典型的110/35/6~10千伏系统的变电站，若按110千伏有6回线路，35千伏有8回线路，6~10千伏有20回线路计算，该变电站的占地面积约为15700米²。若采用西安高压开关厂生产的EF₁-110型110千伏SF₆全封闭组合电器，双母线每个间隔占地面积为13.5米²，6回110千伏线路所需设备的占地面积只有81米²，将来6—10千伏及35千伏若也能采取用全封闭组合电器，则变电所的占地面积还能进一步缩减。

体积的缩小为大城市、稠密地区的变电所建设以及城市电网的改造提供了有利条件，也为建设地下变电所创造了有利条件，某些水电站的变电所如果空间受到限制也可采用SF₆全封闭组合电器。

2. 全封闭组合电器运行安全可靠，维修也很方便，由于全部电器设备封闭于接地外壳之中，减少了自然环境条件对设备的影响，特别适宜用在严重污秽、盐雾地区以及高海拔地区，而且对运行人员的人身安全也大有好处。

3. SF₆断路器的开断性能好，触头烧伤轻微，加上SF₆全气体绝缘性能稳定，又无氧化问题，因此断路器的检修周期可以大为延长。

法国MG公司生产的SF₆断路器允许的累计开断电流值能达2000千安。

日本富士公司的HF60系列的SF₆断路器，其额定开断电流为50千安，能经受70次开断的考验，累计开断电流为3500千安。

西安开关厂生产的EF₁-110-D型SF₆断路器在型式试验中累计开断电流值已达1700千安，相当在额定开断电流31.5千安下开断50次。

由此可见SF₆断路器的检修周期一般可达5~8年，长者可达20~25年。

4. 安装方便。SF₆全封闭组合电器一般是以整体形式或者把它分成若干部分运往现

场。因此可大大缩减现场安装的工作量，缩短工程建设周期。

四、新介质的应用对技术进步的影响和展望

SF₆气体和合成绝缘的广泛应用，必将带来一系列的革新、变革和带动其它技术的发展，归结起来有下列特点：

1. 为电网现代化装置提供了可能和美好的前景。首先为发展特高电压等级和超特高电压等级的技术装备提供了技术基础，使建设特高电压电力网成为可能。新介质应用于中压等级的电器装备，能做到成套化、小型化，为城网改造提供安全可靠的成套装备；促使遥感、远动、弱控测量、微机等自动化装置大量引用到电网中来，推动电网技术的进步和发展。

2. 有效的技术经济效益。特大的超特高电压电力网的建立，设备的成套化和大量先进技术的采用，迫引用综合经济效益的观点去处理问题，即由以各装备的单个元件的造价成本进行核算的观点，转为以变、配电站，送、配电线路为核算效益的观点。例如采用SF₆电器设备尤其是GIS装置，就能做到占地少、适应性强、工程设计时间短、安装工作量少、建设进度快等，虽然设备价格上要比传统的常规装置高一些，但投产快、早收益，加速了投资回收，社会综合经济效益显著。

3. 变革生产方式

新介质的引用，将给制造部门，运行单位的传统生产方式带来改变，例如制造部门的产品，过去以开关、电流互感器、电压互感器等单个元件的类别的加工分工进而成为以变、配、送电为单元的成套装置，设计与制造工艺进行总体考虑。以往由专业设计院考虑各元件接口的技术问题制造厂必须承诺下来，从而改进了部件的型式和性能结构，使更合理和更便于组合。例如成套开关柜内手车式开关插头接合的引用，省略了隔离开关就是一例。

设计变配电站的任务亦随着制造厂能供应成套装置而改变，转为以模式和积木式为主的工程设计，安装、检修亦随之更加集中和专业化，促使检修管理体制改变成为可能。传统电器设备的检修任务都是电业部门自己承担的，各使用单位都配置了检修试验人员。这种检修体制很费人力，对设备检修年限往往一刀切，这种统一规定检修年限其实很不科学，同一型号的设备，不同厂家的产品质量差异很大，频发性故障的表现亦不同，但具有统计特性。因此设备的检修周期要由制造厂从出厂产品的运行情况的反馈信息进行分析确定，不能由运行部门根据个别开关的运行情况定出。年久失修当然不好，过于频繁的检修亦不一定有利，不恰当的检修不一定越修越好，有时反而会导致设备老化。SF₆电器的设备性能优于传统电器，因而可以延长检修周期，怎样长才算恰当，要由工厂根据型式试验和分散在各用户的产品的运行状况作综合判断而定出，因此GIS由制造厂保修最为合理。

对于敞开式SF₆电器，亦可改变以往的检修方式，由各单位分散检修改为专业集中，打破发供电界限，配置一定技术力量和检修设备，建立以设备型号为对象的专业检修队伍，除做好检修外还要建立制造厂的信息联系，将检修中发现问题及时反馈给制造单位，并及时了解制造厂新的改进和技术发展。在SF₆电器检修中采用提高检修质量，进一步延长检修周期，使发挥最大经济效益。在设备检修周期延长以后，就有可能有计划地实行统一检修，实行统一检修以后，亦有可能有较高的检修质量，就能较少地甚至不发生临时检修，从而使计划检修更加主动。

运行单位大量使用新SF₆电器装备后，变、配电所可以不再设置值班人员，把正常和异常的各种信息传递到值班调度中心，组成调度、运行、检测合一，实现全工况监督，即全面应用连续检测、报警、自控、远动等提高掌握运行设备和全网运行工况的能力，使电网生产起到质的变化。国外正在发展预防性维护系统的新设想，这是由于变电设备使用气体绝缘以后，其主要部分经常处于密封状态，设备受周围的影响小，由于使用材质的提高，制造过程和现场装配的严格的质量管理，使新装备具有高度的运行可靠性。考虑到设备安装场所现场检修条件比制造厂差，解体检修所带来的不利因素等等，提出了设备投入运行后不进行正常检修的设想，从而发展以外部判断内部状态和设备性能好坏的诊断技术的全工况监测，“预防性维护系统”就应运而生，这个系统由三个部分组成：

- (1) 检测部分(传感器)，鉴别运行元件有无异常并发出检测信号；
- (2) 信号传输部分，把来自检测部份的信号送到下一级信号处理部分；
- (3) 信号处理(鉴别)部分，把送来的信号进行处理判断其内容，发出适当的指令措施。

由于最近传感技术的提高，信号输送技术的进展、和微处理机的发展，已经能够制成具有高度判断能力的预防性维护装置，代替过去的巡回检查和定期检修，把维护工作的职能由“预防性维护系统”来承担。

4. 促进人才开发

人才开发技术，技术进步又促进人才开发。介质构成改变后，对新的理论、学科、应用技术均有新的要求，电网工作人员必然要提高技术水平与之适应。现代化电网要求具有高度文化技术水平的人才去掌握，给我们提出了防止知识老化，不断学习新技术的要求，进而造就大量掌握新技术知识的人才。

第一章 六氟化硫的物理化学性质

及其杂质的分析检测方法

第一节 SF₆的基本特性

SF₆是目前电器工业普遍应用的优良灭弧和绝缘介质，它在通常状态下是一种无色、无味、无毒、不燃、化学性能稳定的气态物质。

SF₆是由卤素中最活泼的氟原子(F)和硫(S)原子化合而成。其分子结构为正八面体(图1-1)。硫原子居中，氟原子则处于六个顶角的位置上。硫原子与氟原子之间以共价键联结，键距为1.58Å(1Å=10⁻¹⁰米)。SF₆分子的等值直径为4.58Å，比水蒸气的分子等值直径3.2Å要大些。

SF₆分子量较大，是氮(N₂)的5.2倍，所以它的密度约为空气的5.1倍。同样体积和压力的SF₆就比空气重得多。

SF₆于1900年首次由法国人Moisson和Lebeau合成并分离鉴定出来，三十年代以后，作为优良的绝缘介质而得到日益广泛的应用，其生产也陆续走向工业化。

当今SF₆在世界上的生产能力已上千吨级，我国目前已有百吨以上的生产能力。国外如日本的旭硝子公司，西德的Kali-chemie公司、美国的DOW化学公司，意大利的公司等都是生产SF₆气体的著名厂家，我国生产SF₆的单位有四川硫酸厂、上海致冷剂厂、江苏吴县化工厂、国营814厂和洛阳黎明化工研究院等。

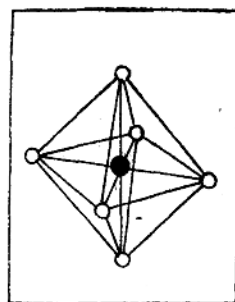


图1-1 SF₆分子结构
O—F原子；●—S原子

迄今为止，在工业上普遍采用的SF₆制备方法是单质硫磺与过量气态氟直接化合，即 $S + 3F_2 \rightarrow SF_6 + Q$ (放热反应)。合成的粗品中含有多种杂质，其组成和含量可因原材料纯度，生产设备材质、工艺条件等因素而有很大差异，杂质总含量可达5%。其组成有硫氟化合物如S₂F₂、SF₂、SF₄、S₂F₁₀等；硫氟氧化物如SOF₂、SO₂F₂、SOF₄、S₂F₁₀O等以及原料中带入的杂质如HF、OF₂、CF₄、N₂、O₂等。为了净化粗品中的杂质，合成气体需要经过水洗、碱洗、热解(主要去除剧毒的十氟化物)、吸附等一系列净化处理过程才能得到纯度在99.8%以上的产品。该产品再用气体压缩机加压充入降温至-80℃左右的钢瓶内。在钢瓶中SF₆通常以液态存在，使用时将其减压放出，呈气态充入设备内部。

除上面列举的在合成过程中可能产生的若干杂质组分外，在气体输送和充装过程中还有可能混入少量的空气、水份和矿物油等物质。

为了保证SF₆产品的纯度和质量，国际电工委员会(IEC)和许多国家或生产厂家都规定了SF₆产品的质量标准，用户可据此进行复检和验收。表1-1列举了若干SF₆产品的

质量标准, 供读者参考。

除了上述的单质直接合成的方法外, 尚有氧化硫磺法、直接电解法、氟化钴法等多种合成SF₆的方法, 但这些方法均未能实现工业化。

表 1—1 SF₆气体质量标准举例

杂质名称	IEC标准	日本旭硝子 公司标准	西德Kai- ichemie标 准	苏联MOK 标准	意大利	美 国 ASTMP 2472—71	我国暂行 标准
空气 (氟氧)	<0.05% (重量) (0.25% 体积)	<0.05%	<0.02%	<0.05%	31ppM	<0.05%	<0.05%
CF ₄	<0.05% (重量) <0.1% (体积)	<0.05%	<10ppM (重量)	<0.05~ 0.1%	0.02~ 0.04%	<0.05%	<0.05%
水	<15ppM (重量)	<8ppM	<5ppM	<0.0015%	露点 -55℃*	露点 -50℃** (-58°F)	<8ppM
游离酸 (用HF 表示)	<0.3ppM (重量)	<0.3ppM	<0.1ppM	3×10 ⁻⁶ %		<0.3ppM	<0.3ppM
可水解氟化物 (用HF表示)	<1.0ppM (重量)	<5ppM	<0.3ppM	—			<1.0ppM
矿物油	<10ppM (重量)	<5ppM	<1ppM	0.010%		<5ppM	<10ppM
SF ₆ 纯度	—	99.8%以上	99.9%以上	—	99.9864 %	99.8%	>99.8%

*相当于2.5ppM

ppM为百万分比率

**相当于4.8ppM

SF₆的基本特性参数见表1—2, 为比较起见也列入了N₂的有关参数。

表 1—2 SF₆与氮气的基本特性参数

名 称	SF ₆	N ₂
分子 量	146	28
临 界 温 度 (°C)	45.6	-146.8
临 界 压 力 (公斤/厘米 ²)	38.5	33.5
熔 点 (°C)	-50.8	-210
沸 点 (°C)	-63.8	-196
介 电 常 数 (1大气压, 25°C时)	1.002	1.0005
气 体 常 数 (公斤·米/公斤·K)	5.81(1大气压, 0°C)	30.26

表 1—2 (续)

名 称	SF ₆	N ₂
重 度		
气 态 (1大气压, 0°C, 公斤/米 ³)	6.45	1.215
液 态 (吨/米 ³)	1.57(0°C)	
固 态 (吨/米 ³)	1.85(-50°C)	
	2.51(-50°C)	
音 速 (20°C, 米/秒)	134	349
绝 热 指 数 (1大气压, 0~1000°C)	1.088~1.057	1.40—1.35
导 热 系 数 (30°C时, 焦耳/秒·米·K)	0.0141	0.0214
定 压 比 热 (1大气压, 25°C, 焦/克分子·K)	97.1	28.7

SF₆的临界压力, 临界温度都很高(38.5大气压, 45.6°C)。临界温度表示气体可以被液化的最高温度, 临界压力表示在这个温度下出现液化所需的气体压力。气体临界温度越低越好, 表明它不容易被液化, 例如氮气只有在低于-146.8°C以下才可能液化, 在工程使用环境条件下就不必考虑它的液化问题, 而SF₆则不然, 只有在温度高于45°C以上才能恒定的保持气态, 所以在通常使用条件下它是有液化可能的。因此, SF₆气体不能在过低温度和过高压下使用。关于液化问题后面再具体讨论。

SF₆在水中的溶解度很低, 只有 5.5×10^{-3} 毫升/毫升, 和氦气、氩气、氮气等惰性气体相当, 但SF₆在某些有机溶剂中的溶解度还是比较高的, 见表1—3。

表 1—3 SF₆在不同溶剂中的溶解度(t = 25°C, p = 1大气压)

溶 解	水	正庚烷	异辛烷	甲 苯	四氯 化碳	三氟三 氯乙烷	二 硫 化 碳
溶解度(摩尔 分数 $\times 10^4$)	0.05	100.55	153.5	33.95	65.54	278.6	9.25

SF₆在常温甚至较高的温度下一般不会发生自分解反应, 它的热分解温度在500°C左右, 热分解时形成的组分十分复杂, 且因温度不同而异, 这将在以后的电弧分解部分介绍。

SF₆气体的热传导性能较差, 导热系数只有空气的2/3。但是对气体介质, 它的传热效应往往不是单纯的传导作用, 分子的扩散运动携带的热量可能产生更显著影响, 影响的程度取决于气体允许流动的空间尺寸。例如气体与热固体表面接触, 紧靠表面的局部气体温度升高而膨胀向外扩散(流动), 把热量传递出去, 这种传热过程称为自然对流传热。对流传热的能力与分子比热有关, 即气体分子升高温度时吸收了热量, 随着分子扩散运动而传递到别处。SF₆分子的定压比热是氮气的3.4倍, 因此其对流散热能力比空气大得多。热物体在空气和SF₆中的表面散热效果以单位表面积在单位温差下的散热系数来表示, 见表1—4。可见, 实际散热能力比空气为好, SF₆断路器的发热与温升问题不会比空气断路器严重。

表 1—4 SF₆与空气的表面散热系数

	导热系数(焦/米秒·K)	定压比热(焦/克分子·K)	表面散热系数(瓦/米 ² ·K)
SF ₆	0.0141	97.1	15
空气	0.0214	28.7	6
比值	0.66	3.4	2.5

SF₆是负电性气体,负电性就是分子(原子)吸收自由电子形成负离子的特性。SF₆分子具有较强的负电性,捕捉自由电子形成负离子后再与正离子结合造成空间带电粒子的迅速减少。这个特性在阻碍放电的形成(高击穿电压),和使电弧间隙介质迅速恢复的过程中具有重要的意义,SF₆气体的这一特性是它成为优良的绝缘与灭弧介质的重要原因之一。SF₆的负电性主要是由氟(F)元素带来的,F在周期表上是Ⅶ族元素,最外层为七个电子,很容易吸收一个电子形成稳定的八个电子数。这是所有Ⅶ族元素(卤族元素)的共性,F居其首。其它元素如Ⅵ族的氧,硫也能吸收电子,但可能性不如Ⅶ族元素。负电性的大小以与电子结合时释放出来的能量(电子亲和能)大小为标志,结合时释放能量越多,表示结合的结果越稳定。若干元素的电子亲和能见表1—5。

表 1—5 原子的电子亲和能

元 素	氟(F)	氯(Cl)	溴(Br)	碘(I)	氧(O)	硫(S)	氮(N)
与电子结合的亲和能(电子伏)	4.10	3.78	3.43	3.20	3.80	2.06	0.04
在周期表中的位置(族)	Ⅶ	Ⅶ	Ⅶ	Ⅶ	Ⅵ	Ⅵ	Ⅴ

第二节 SF₆气体的状态参数

气体在不流动时,可以用三个参数来代表它所处的状态,即三个状态参数:压力(P)密度(γ)及温度(T)。因气体的大量分子是处在无规则的热运动之中,气体的状态参数是大量分子运动状态的平均参数。

气体的压力P,在工程上习惯用公斤/厘米²做单位,即工程大气压,近年推广国际单位制(SI),常以帕(Pa)即牛顿/米²,巴(Bar)表示,英制国家还使用磅/英寸²(psi),这些单位的换算关系列于表1—6。

表 1—6 压力单位的换算

工程大气压、公斤/厘米 ²	巴(Bar)	帕(Pa)	磅/英寸 ² (psi)
1	0.981	0.981×10 ⁵	14.2
1.02	1	10 ⁵	14.5
1.02×10 ⁻⁵	10 ⁻⁵	1	14.5×10 ⁻⁴
0.0703	0.0689	0.689×10 ⁴	1