

SF₆

高压电器设计

黎斌 著



2



SF₆ 高压电器设计

黎 斌 著



机械工业出版社

本书总结了作者 20 多年来在 SF₆ 高压电器开发工作中的研究成果与设计经验, 详尽地介绍了 SF₆ 气体的理化电气特性和 SF₆ 气体管理方面的研究成果, 总结了 SF₆ 高压电器的结构设计经验及设计计算方法。作者以超前意识对 SF₆ 金属封闭式组合电器小型化和智能化提出了许多有用的见解, 并对该产品的在线监测技术进行了有实用价值的论述。对困惑高压电器行业多年的技术难题(如日照对产品温升的影响、高寒地区产品的设计与选用等), 作者以自己的研究成果作了比较科学的回答。本书还系统地介绍了 SF₆ 电流互感器的设计计算方法, 对有暂态特性的 CT 绕组的工作特性作了深入的分析。

本书特点是: 理论分析精练, 设计计算方法适用。

本书可供高压电器研究、设计人员, 电力部门研究、设计和管理人员阅读, 也可供高等院校相关专业教师、研究生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

SF₆ 高压电器设计/黎斌著. —北京: 机械工业出版社,
2003.4

ISBN 7-111-12057-4

I. S… II. 黎… III. 高压电器—设计
IV. TM510.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2003) 第 030261 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 牛新国 刘永 版式设计: 霍永明 责任校对: 魏俊云

封面设计: 周鹏 责任印制: 闫焱

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2003 年 7 月第 1 版·第 1 次印刷

787mm×1092mm 1/16·16.25 印张·399 千字

0 001—4 000 册

定价: 39.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

本社购书热线电话 (010) 68993821、88379646

封面无防伪标均为盗版

代 序

高压电器制造业已走过了半个世纪的历程。在这 50 年中，建立起我国自己的产品系列，满足了电力系统和工业部门各个方面的需要。西安高压开关厂承担了一大部分高压和超高压电器的开发工作，近 10 多年来又与日本三菱公司合作生产 126~550kV SF₆ GCB 和 GIS，这些产品遍及全国各地，运行于各大电站之中，而 SF₆ 电器仍将是今后高压和超高压领域的主导产品和致力于开发的方向。

高压开关的设计，过去多依赖于经验和试验中的验证，于是经验的积累对于产品的开发有着极其重要的意义，随着技术的进步和大型计算机的应用，电弧物理和开断技术的研究有了广阔的前景，这是十分可喜的事。然而对于灭弧室的设计，不论对作用于其内的等离子体的物理过程掌握得如何，仍然要通过反复模拟、计算和实物验证来确定结构和尺寸。因而在实际工作中，认真总结经验教训，将感性知识理性化起来，实为不断开发新产品和提高学术水平的不二法则。

黎斌同志将毕生精力贡献在西安高压开关厂，主管过多种新产品的科研、设计和试制工作，尤其在 SF₆ 电器方面他涉足较早、经历得多、考虑尤深，所以他的著作《SF₆ 高压电器设计》一书，当能对现代电力装备的设计、制造、运行和科技管理具有启迪性和先导作用。对于产品设计，经验是具有普遍意义的，但不是全部；只有重视经验，又不囿于经验，善于学习，勇于探索，才能持续深入地把工作或事业推向前进。这些就是我所想的，也是寄希望于后来同仁的。

黎斌
31/IV-2002

符号说明

A	振幅	$E_{50\%}$	雷电冲击负极性电压 50% 击穿场强
A_e	喷嘴上游区环形截面积	E_c	SF ₆ 中固体绝缘件沿面切向允许场强
A_h	喷嘴下游区气流通道截面积	F_d	地震力
A_k	喷嘴喉颈截面积	F_D	电动力
A_r	喷嘴与动弧触头间的气流侧面通道截面积	F_f	风力
A_t	喷嘴下游出口处截面积	F_k	接触压力
a	加速度	F_n	端子拉力
B	磁通密度	F_w	弯曲破坏力
B_{bh}	饱和磁通密度	F_{jy}	挤压力
b	铁心宽度	F_q	剪切力
c	线圈包扎厚度	FS	仪表保安系数
D	壳体直径	f	变比误差, 震动位移
D_1	套管受压体外径	f_{d1}	转动密封圈压紧力系数
D_2	套管密封圈外径	f_{d2}	直动密封圈压紧力系数
D_3	套管伞径	G	喷口 SF ₆ 流量
D_{am}	电弧直径	H	磁场强度
D_{ap}	电弧平均直径	H_1	套管高度
D_c	气缸直径	H_f	套管风力作用重心高
D_e	动弧触头孔径	H_d	地震力作用重心高
D_k	喷嘴喉颈直径	H_n	端子力作用力臂
D_o	法兰孔中心圆直径	I	转动惯量
D_t	喷嘴下游出口直径	I_1	一次电流
D_{cp}	套管平均直径	I_{1n}	额定一次电流
d_0	嵌件直径	I_{1SC}	额定一次对称短路电流
d_1	套管受压体内径	I_{1ZC}	额定准确限值一次电流
d_2	绝缘杆直径	I_2	二次电流
d_e	动弧触头外径	I_{2n}	二次额定电流
d_k	静弧触头外径	I_O	励磁电流
d_p	屏蔽直径	I_{ON}	励磁安匝
E	材料弹性模量	I_n	额定电流
E_1	SF ₆ 中雷电冲击允许场强, 一次电动势	I_l	临界电流
E_2	大气中瓷件允许工作场强, 二次电动势	I_{OP}	反相故障开断电流
E_3	大气中瓷件局部放电起始场强	I_L	近区故障开断电流
E_4	环氧树脂绝缘件内部 (嵌件) 允许工作场强	I_{PO}	额定仪表保安一次限值电流
E_b	耐受场强	I_{AC}	短路电流交流分量

I_{DC}	短路电流直流分量	L_0	CT励磁回路电感
I_s	开断电流	L_1	CT一次回路电感
I_{sn}	额定短路开断电流	L_2	CT二次回路电感
I_{Σ}	累积开断电流	L_{CT}	CT二次线圈电感
j	母线许用电流密度	L_d	喷嘴下游长度
j_b	触片许用电流密度	L_g	瓷套外部干闪距离
j_k	短时耐受电流密度	L_h	喷嘴喉颈部长度
K	弹簧刚度系数, 抗弯刚度	L_n	二次负荷电感
K_0	耐电压裕度	L_u	喷嘴与动弧触头端部的间隙
K_1	E_1 计算经验数据	L_x	套管外绝缘爬电距离
K_2	中间屏蔽电位系数	l	距离
K_3	绝缘件电场分布不均匀系数	l_0	全行程
K_4	绝缘件沿面距离设计裕度	l_c	超行程
K_5	长杆绝缘件刚度设计系数	l_{cp}	铁心平均磁路长
K_6	平均分闸速度计算裕度	l_k	开距
K_7	CB断口电压分布不均匀系数	N_1	一次绕组匝数
K_8	气缸余气密度系数	N_2	二次绕组匝数
K_9	气缸平均密度系数	N_s	等效开断次数
K_{10}	壳体计算直径设计裕度	N_{sn}	额定短路开断电流开断次数
K_{11}	DS断口电压分布不均匀系数	p_b	破坏水压
K_{12}	壳体厚度设计裕度	p_n	额定工作气压
K_{13}	壳体法兰结构系数	p_f	风压
K_{14}	产气系数	Q	漏气量, 吸附剂重量
K_{15}	吸附系数	Q_g	SF ₆ 充气量
K_{16}	日照温升修正系数	Q_s	SF ₆ 水分含量
K_a	海拔修正系数	R_0	CT励磁回路电阻
K_b	触头电动力计算系数	R_1	CT一次回路电阻
K_{bh}	磁通饱和系数	R_2	CT二次回路电阻
K_c	触头材料系数	R_{CT}	CT二次绕组电阻
K_d	低温时电强度下降系数	R_n	二次负荷电阻
K_{Fe}	铁心叠片填充因数	r	半径, 震动阻尼系数
K_h	中间电位屏蔽高度比	S	铁心截面积
K_i	低温时开断能力下降系数, 漏气速率	S_1	套管受压体截面积
K_n	CT变比	S_2	承压面积
K_r	加热器传热系数	S_f	受风压面积
K_s	加热套保温面积与开关散热面积比	S_q	受剪切截面积
K_{sc}	额定对称短路电流倍数	S_{iy}	受挤压截面积
K_{sc}	剩磁系数	T_1	电网一次系统时间常数, 温度
K_{st}	额定瞬态面积系数	T_2	CT二次系统时间常数, 温度
K_{γ}	SF ₆ 低温密度下降系数	T_r	触头熔点

t	电阻投入时间	Y	年漏气率
t_a	平均燃弧时间	Z_0	励磁阻抗
t_{ac}	长燃弧时间	Z_1	CT 一次回路阻抗
t_{ad}	短燃弧时间	Z_2	CT 二次回路阻抗
t_{ak}	切长线起弧点至恢复电压峰值点间隔时间	Z_{CT}	CT 绕组阻抗
t_d	喷嘴堵塞时间	α	应力集中系数
t_{fr}	故障重复时间	α_1	雷电冲击闪络电压计算裕度
t'	第一次开断时间	α_2	CT 二次回路阻抗角
t''	第二次开断时间	α_b	短路电流偏移度
U_{01}	电阻片工频耐压能力	β	加速度放大倍数
U_2	二次绕组端电压	γ	SF ₆ /N ₂ 混合比
U_6	电容器元件耐受电压	θ	时间常数
U_a	电弧压降	φ	阻抗角
U_b	击穿电压, 介质恢复强度	φ_0	焊接系数
U_g	工频耐受电压	ψ	铁心损耗角
U_n	额定电压	δ	CT 相位差
U_{nl}	额定线电压	δ_1	壳体壁厚
U_{np}	额定相电压	δ_2	法兰厚度
U_R	恢复电压	ρ	SF ₆ 密度, 电阻率
U_s	工频湿闪耐受电压	ρ_0	SF ₆ 额定气压时密度
U_{th}	雷电冲击耐受电压	ρ_h	喉部气流平均密度
U_{150}	50% 雷电冲击闪络电压	ε_a	复合误差
V	体 积	ε	暂态误差
V_g	SF ₆ 电弧分解物产气量	σ	电导率
v_f	平均分闸速度	$[\sigma_n]$	瓷件内压允许应力
v_h	平均合闸速度	$[\sigma_w]$	瓷件弯曲允许应力
X	水分浓度	ξ	振动阻尼比

目 录

代序

符号说明

第 1 章 SF ₆ 的基本特性	1
1.1 SF ₆ 的物理性能	1
1.2 SF ₆ 的气体状态参数	2
1.3 SF ₆ 的化学性能	3
1.3.1 SF ₆ 具有良好的热稳定性	3
1.3.2 SF ₆ 电弧分解过程	4
1.3.3 SF ₆ 与开关灭弧室材料的化学反应	4
1.3.4 水和氧等杂质产生酸性有害物质	4
1.3.5 SF ₆ 电弧分解物中有剧毒的 S ₂ F ₁₀ 吗?	5
1.4 SF ₆ 的绝缘特性	5
1.4.1 SF ₆ 气体间隙的绝缘特性	5
1.4.2 SF ₆ 中绝缘子的沿面放电特性	11
1.5 SF ₆ 气体的熄弧特性	14
1.5.1 SF ₆ 气体特性创造了良好的熄弧条件	14
1.5.2 SF ₆ 中的气流特性	16
第 2 章 SF ₆ 电器的气体管理	19
2.1 SF ₆ 气体的杂质管理	19
2.1.1 SF ₆ 气体的毒性	19
2.1.2 生物试验方法	19
2.1.3 电弧分解气体的毒性及处理	20
2.2 SF ₆ 气体的水分管理	21
2.2.1 水分进入开关的途径	21
2.2.2 水分对开关性能的影响	22
2.2.3 水分的控制值	23
2.2.4 水分的检测方法	24
2.2.5 控制水分的方法	24
2.2.6 运行开关的水分处理	25
2.3 SF ₆ 气体的密封管理	25
2.3.1 SF ₆ 开关设备的密封结构	25
2.3.2 密封环节的清擦与装配	25
2.3.3 检漏方法	26

2.3.4 SF₆ 密度的监控

第 3 章 GCB/GIS 总体设计

3.1 设计思想的更新	30
3.2 GCB/GIS 总体设计的核心	30
3.3 GCB/GIS 总体结构设计要求	31
3.3.1 GCB 灭弧室及操动机构的选择	31
3.3.2 罐式与瓷柱式 GCB 的合理分工	32
3.3.3 高低档参数有机搭配	32
3.3.4 结构整体化设计	32
3.3.5 环境因素的影响	32
3.4 GCB/GIS 可靠性的验证试验	33
3.4.1 电寿命试验	33
3.4.2 机械强度试验	33
3.4.3 高低温环境下的操作试验	33
3.4.4 耐风沙、暴雨、冰雪及污秽试验	34

第 4 章 T·GCB/GIS 出

线套管设计

4.1 40.5~145kV 出线套管内绝缘设计	35
4.1.1 中心导体设计	35
4.1.2 允许雷电冲击场强值 E ₁ 的选择	36
4.2 252~363kV 出线套管内绝缘设计	37
4.3 550~1100kV 出线套管内绝缘设计	38
4.3.1 中间电位内屏蔽的作用	38
4.3.2 中间电位内屏蔽的设计	39
4.3.3 中间电位及接地屏蔽设计尺寸的验算	39
4.3.4 中间屏蔽支持绝缘子设计	40
4.4 套管外绝缘设计	40
4.4.1 瓷件基本尺寸及耐受电压的计算	40
4.4.2 高海拔、防污秽型瓷套设计	42
4.4.3 瓷套外屏蔽设计	42

4.5 瓷套机械强度设计	43	6.4.1 盆式绝缘子各部位允许场强	61
4.5.1 瓷套法兰胶装比	43	6.4.2 消除楔形气隙的不良影响	62
4.5.2 瓷质与工艺	43	6.4.3 利用屏蔽坑减小三交区场强	62
4.5.3 瓷套内水压与弯曲强度设计	44	6.5 P·GCB 绝缘操作杆设计	63
4.6 550kV SF ₆ 电流互感器支持套管 中间电位屏蔽设计实例	45	第 7 章 合闸电阻及并联 电容器设计	64
第 5 章 硅橡胶复合绝缘子 的特点和设计	47	7.1 合闸电阻额定参数的选择	64
5.1 复合绝缘子的特点和应用	47	7.1.1 电阻值 R	64
5.2 伞裙材料的选用	48	7.1.2 电阻投入时间 t	64
5.3 绝缘子芯体(筒、棒)材料的选择	49	7.1.3 电压负荷	65
5.4 复合绝缘子设计的四点要求	50	7.1.4 电阻两次投入的时差 Δt	65
5.4.1 机械强度设计要求	51	7.2 电阻片的特性参数	65
5.4.2 刚度设计要求	52	7.3 合闸电阻设计计算	66
5.4.3 电气性能设计要求	52	7.3.1 设计步骤	66
5.4.4 胶装及密封设计要求	53	7.3.2 计算实例(一)	66
5.5 复合绝缘子长期运行的可靠性	54	7.3.3 计算实例(二)	69
5.5.1 绝缘子表面亲(疏)水性 与污闪	54	7.4 合闸电阻的触头及传动装置设计	70
5.5.2 硅橡胶疏水性的迁移与运行 可靠性	54	7.5 并联电容器设计	71
5.5.3 HTV 硅橡胶的高能硅氧 键与运行可靠性	54	第 8 章 GCB/GIS 的电接触设计	73
5.5.4 抗电蚀能力与运行可靠性	55	8.1 接触电阻	73
5.5.5 硅橡胶护套及伞裙组装工艺 设计与运行可靠性	55	8.2 梅花触头设计	74
5.5.6 水分入侵芯体对复合绝缘子 机械强度的影响	55	8.2.1 动触头设计	74
第 6 章 SF₆ 电器用环氧树脂 浇注绝缘件设计	57	8.2.2 触头弹簧圈向心力计算	74
6.1 设计基准	57	8.2.3 触片设计	75
6.2 典型的绝缘筒、棒设计	58	8.2.4 触指电动稳定性设计	75
6.2.1 沿面放电距离的确定	58	8.2.5 触指热稳定性设计	76
6.2.2 绝缘筒(棒)直径 $D(d)$ 的设计	59	8.3 自力型触头设计	77
6.2.3 屏蔽罩设计	59	8.3.1 导电截面及触指数设计	77
6.3 绝缘筒(棒)机械强度设计	59	8.3.2 接触压力计算	77
6.3.1 许用应力	59	8.3.3 触头材料及许用变形应力	77
6.3.2 抗拉强度设计	59	8.3.4 锻压成形插入式触头 (自力型触头的进化)	78
6.3.3 抗弯、抗扭强度设计	60	8.4 表带触头的设计与制造工艺	78
6.3.4 抗剪与抗压强度设计	61	8.4.1 表带触头的特点	78
6.3.5 嵌件的处理	61	8.4.2 表带触头设计	78
6.4 盆式绝缘子设计	61	8.4.3 表带触头的材料、制作 工艺及表面处理	79
		8.4.4 电动稳定性与热稳定性核算	79
		8.5 螺旋弹簧滑动触头设计	80
		8.5.1 螺旋弹簧滑动触头的特点	80
		8.5.2 螺旋弹簧滑动触头设计要点	80
		第 9 章 GCB 灭弧室数学计算模型的	

设计与估算	82	12.1 壳体电气性能要求	109
9.1 平均分闸速度 v_f 的设计	82	12.2 壳体材质及加工工艺选择	109
9.2 触头开距 l_k 及全程 l_0 设计	84	12.3 壳体强度计算	110
9.3 喷嘴设计	84	12.4 壳体加工质量监控设计	110
9.3.1 上游区设计	84	12.4.1 壳体强度监控	110
9.3.2 喉颈部设计	85	12.4.2 焊缝气密性监控	110
9.3.3 下游区设计	87	12.4.3 铸件壳体气密性监控	111
9.3.4 喷嘴材料	88	第 13 章 吸附剂及爆破片设计	112
9.4 气缸直径的初步设计	89	13.1 吸附剂设计	112
9.4.1 气缸直径 D_c 与机构操作力 F	89	13.1.1 F—03 吸附剂性能简介	112
9.4.2 按短路开断电流设计		13.1.2 F—03 吸附剂活化处理	112
气缸直径 D_c	89	13.1.3 吸附剂用量设计	113
9.5 分闸特性及其与喷嘴的配合	92	13.2 爆破片设计	114
9.5.1 分闸初期应有较大的加速度	92	13.2.1 爆破片的选型与安装	114
9.5.2 分闸速度对自能式灭弧室		13.2.2 爆破压力设计	114
开断性能的影响	93	13.2.3 压力泄放口径设计	114
9.5.3 分闸后期应有平缓		第 14 章 环温对 SF₆ 电器设计	
的缓冲特性	93	的影响	115
9.5.4 分闸特性与喷嘴的配合	94	14.1 日照对 SF ₆ 电器及户外隔离	
9.6 罐式断路器外壳直径设计	94	开关温升的影响	115
9.7 机构操作功估算	94	14.1.1 考虑方法	115
9.7.1 确定分闸弹簧功	94	14.1.2 日照温升试验	115
9.7.2 合闸弹簧设计	95	14.1.3 试验值分析	115
9.7.3 调整分、合闸速度		14.1.4 结论	116
特性的方法	97	14.2 高寒地区产品的设计与应用	117
9.7.4 近似量化类比分析法在灭弧室		14.2.1 降低额定参数使用	117
设计中的应用	98	14.2.2 开关充 SF ₆ +N ₂ 混合气体	118
第 10 章 密封结构设计	99	14.2.3 经济实用的低温产品设计方案	
10.1 密封机理	99	——加热保温套设计	120
10.2 影响 SF ₆ 电器泄漏量的因素	99	第 15 章 SF₆ 电流互	
10.3 O 形密封圈和密封槽的设计	102	感器绕组设计	123
10.4 SF ₆ 动密封设计	103	15.1 CT 误差及准确级	123
10.4.1 转动密封设计	103	15.1.1 CT 误差的产生	123
10.4.2 直动密封设计	104	15.1.2 CT 准确级	125
第 11 章 GIS 中的 DS 和 ES 设计	105	15.2 影响 CT 电流误差的因素	126
11.1 DS 及 ES 断口开距设计	105	15.2.1 一次电流的影响	126
11.2 DS 断口触头屏蔽设计	105	15.2.2 二次绕组匝数 N_2 的影响	126
11.3 DS 分合闸速度设计	106	15.2.3 平均磁路长度 l_m 的影响	126
11.4 快速接地开关合闸速度设计	107	15.2.4 铁心截面积 S 的影响	126
11.5 1100kV GIS—DS、ES 设计		15.2.5 铁心材料的影响	126
的特殊问题	107	15.2.6 二次负荷的影响	127
第 12 章 SF₆ 电器壳体设计	109	15.2.7 绕组阻抗 Z_{CT} 的影响	127

15.3 测量级和保护级绕组设计 及误差计算步骤	127	附录 SMC101 等合金磁化曲线图	147
15.3.1 绕组及铁心内径设计	127	第 16 章 GIS 设计标准化	154
15.3.2 铁心设计	127	16.1 CIS 设计非标准化的弊病	154
15.3.3 确定绕组结构及阻抗	128	16.2 GIS 设计标准化的重要意义	154
15.3.4 测量级绕组误差计算步骤	129	16.3 GIS 结构设计标准化	155
15.3.5 稳态保护级 (5P、10P) 绕组误差计算步骤	130	16.3.1 GIS 基本元件标准化	155
15.4 0.2 级和 5P 级 CT 绕组设计及 误差计算示例	130	16.3.2 GIS 基本接线间隔标准化的 主要要求	155
15.4.1 0.2 级, FS5, 126kV, 2× 300/5A, 30VA 绕组设计及 误差计算 (第一方案)	130	16.3.3 126kV GIS 标准化的 基本接线间隔	155
15.4.2 0.2 级, FS5, 126kV, 2×300/ 5A, 30VA 绕组改进设计 与计算 (第二方案)	132	16.3.4 252kV GIS 标准化的 基本接线间隔	159
15.4.3 252kV, 5P25, 2×300/5A, 50VA 绕组设计计算	133	16.3.5 与各标准间隔对应的 GIS 主回路 联结件及其内导标准化	164
15.5 暂态保护绕组的基本特性参数	135	16.3.6 与各标准间隔对应的辅件 标准化	164
15.5.1 设计暂态保护特性绕组的 原始数据	135	16.3.7 与各标准间隔对应的就地控制 柜及气体监控柜的标准化	164
15.5.2 额定二次回路时间 常数 T_2	136	16.3.8 GIS 与电缆接口件标准化	164
15.5.3 额定瞬变面积系数 K_{df}	136	16.3.9 GIS 与变压器接口件 标准化	167
15.5.4 铁心剩磁系数 K_{sc}	136	16.4 GIS 图样和设计文件 的标准化及分类管理	169
15.5.5 暂态特性 CT 绕组的分级	136	16.4.1 GIS 图样的标准化设计 及管理	169
15.6 暂态磁通密度增大系数 K_{td} 与 暂态误差 ϵ	137	16.4.2 GIS 基本间隔气体系统图 的标准化设计	170
15.6.1 CT 铁心未饱和时的暂态 过程	137	16.4.3 GIS 基本单元的配套表 (MX 表) 及各种汇总表的标准化的	170
15.6.2 CT 暂态面积系数 K_{td}	138	16.4.4 GIS 间隔的配套表及各种 汇总表的标准化的	170
15.6.3 暂态误差计算式	139	16.4.5 GIS 工程设计通知书	171
15.7 暂态特性绕组设计计算步骤 和计算示例	140	16.4.6 GIS 通用设计文件 的标准化	171
15.7.1 TPY 绕组计算步骤	140	第 17 章 GIS 小型化和智能化设计 (在线监测技术及应用)	172
15.7.2 550kV, 1250/1A, 10VA, TPY 绕组计算示例	141	17.1 一次元件小型化	172
15.7.3 550kV, 2500/1A, 15VA, TPY 绕组计算示例	143	17.2 二次监控智能化	174
15.8 铁心饱和及其对暂态绕组 工作特性的影响	144	17.2.1 开发可靠性高、寿命长 的信息传感器	174
15.9 影响 CT 暂态特性的因素 及其改善措施	145	17.2.2 PISA 和光纤传输技术	182
		17.2.3 智能化就地控制柜和	

保护单元	182	20.1.1 BTF 开断	210
17.2.4 GIS 运行状态分析及 按运行状态维修 GIS	183	20.1.2 SLF 开断	212
17.2.5 GCB 智能操作	190	20.1.3 反相开断	214
第 18 章 GIS 的派生产品		20.1.4 并联开断	215
——H·GIS 的设计	191	20.1.5 空载变压器开断	216
18.1 H·GIS 及 PASS 的定义和结构		20.1.6 切合电容器组及空载长线	216
特征	191	20.1.7 切电抗器	220
18.1.1 H·GIS	191	20.1.8 发展性故障开断	221
18.1.2 PASS	194	20.2 GIS-DS 的典型切合操作	221
18.2 AIS、GIS、H·GIS 及 PASS 的 特点分析	197	20.2.1 切合母线转换电流(环流)	221
18.2.1 结构和功能对比	197	20.2.2 切小电容电流	222
18.2.2 对 H·GIS 和 PASS 的评议	197	20.3 GIS-FES 的分合操作	223
18.3 选用 H·GIS 的技术经济分析	199	20.3.1 FES 短路关合	223
18.4 550kV H·GIS 使用示例	199	20.3.2 FES 切合感应电流	223
第 19 章 高压 SF₆ 电器的抗震设计 ..	200	20.4 电网不同工况对 CT 的不同要求 ..	223
19.1 地震特性参数	200	20.4.1 测量级绕组	224
19.1.1 地震裂度	200	20.4.2 5P 及 10P 稳态保护级绕组	224
19.1.2 地震频率与地震周期	200	20.4.3 暂态保护用绕组 (TP)	225
19.1.3 地震波形	200	20.4.4 10% 误差曲线	225
19.1.4 地震加速度	201	20.4.5 CT 参数要求对 CT 结构 设计的影响	226
19.2 产品动力特性参数	202	20.4.6 CT 使用注意事项	227
19.2.1 产品自振频率 f_g	202	20.5 两种电压互感器的特征及运行 中应处理好的主要问题	227
19.2.2 振动阻尼与阻尼比 ξ	202	20.5.1 电压互感器的误差	227
19.2.3 弹性元件的刚度及弹性 模量	202	20.5.2 电磁式电压互感器运行 注意事项	228
19.2.4 共振时的加速度(振幅) 放大系数 β	203	20.5.3 电容式电压互感器的特点	228
19.3 高压电器设备抗震设计	205	第 21 章 计算机辅助设计	229
19.3.1 自振频率 f_g 和阻尼比 ξ	205	21.1 高压电场数值计算	229
19.3.2 加速度的放大系数 β	205	21.1.1 电场计算方法	229
19.3.3 强度估算	206	21.1.2 LVQB-252 SF ₆ 电流互感器 三维电场计算(示例)	229
19.3.4 位移估算	206	21.1.3 GCB 灭弧室电场计算及电场 优化设计	233
19.3.5 提高高压电器设备抗震能力 的措施	206	21.2 应力与变形分析	233
19.4 高压电器设备抗震能力的验证	207	21.3 抗震计算	235
19.4.1 计算机进行抗震能力计算	207	21.4 灭弧室开断能力计算	236
19.4.2 抗地震性能试验	208	附录 A 近似量化类比分析法在灭弧室 设计中的应用	240
第 20 章 GCB/GIS 的典型开断、CT/VT 的运行及设计注意事项	210	参考文献	245
20.1 断路器的典型开断	210	后记	247

第 1 章 SF₆ 的基本特性

1.1 SF₆ 的物理性能

六氟化硫 (SF₆) 气体在高压电器行业已得到广泛的应用, 它的基本物理性能以及与空气的比较列于表 1-1。

表 1-1 SF₆ 与空气的物理性能参数

项 目	SF ₆	空气
相对分子质量 m	146	28.8
气态密度 γ (kg/m ³) / (20°C, 0.1MPa 时)	6.07	1.19
热导率 λ [W/(m·K)] (20°C 时)	0.0130	0.0257
比定压热容 c_p [J/(kg·K)] (20°C, 0.1MPa 时)	0.66×10^3	1.01×10^3
绝热指数 K (20°C)	1.08	1.40
游离温度 θ_f / °C	2000	7000
声速 c / (m/s) (20°C 时)	134	343
熔点 θ_r / °C (0.23MPa 时凝点)	-50.8	
沸点 θ_f / °C (0.1MPa 时液化点)	-63.8	-194
临界温度 θ_k / °C	45.6	-146.8(N ₂) -118.8(O ₂)
临界压力 p_k / MPa	3.77	N ₂ (3.39) O ₂ (5.06)
相对介电系数 ϵ (20°C, 0.1MPa 气态)	1.0021	1.0005
气体常数 [J/(kg·K)]	56.2	287
临界压力比 $p_0/p_k = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$	0.59	0.53

在 SF₆ 所有的物理性能中, 我们最感兴趣的是由分子结构形成的负电性和较低的游离温度形成的高导热性。

SF₆ 分子结构是对称的八面体, 见图 1-1, 硫 (S) 原子居其中, 六个角上是氟 (F) 原子, S 与 F 原子间以共价键连接。SF₆ 等效直径为 4.58Å (Å 为非法定计量单位, 1Å = 0.1nm) 比水分子的等效直径 (3.2Å) 要大, 同容积同气压的 SF₆ 比空气重 5.1 倍。

六个顶向上的 F 原子是非常活泼的原子, 在原子核外, 内层电子数为 2, 外层电子数为 7, 仅缺一个电子便达到稳定的电子层分布。原子核最外层电子数超过 4 时, 便有吸附外部电子的能力, 随外层电子数增加, 其吸附电子的能力也增加, 外层电子数为 7 的氟原子在卤族元素中具有最大的电子亲和能 (4.1eV), 因此, 具有很强的吸附电子的能力。SF₆ 特有的强力吸附电子的能力, 称为负电性。SF₆ 的负电性比空气高

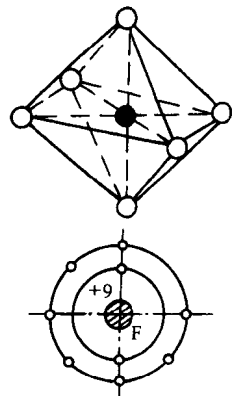


图 1-1 SF₆ 分子结构及 F 原子结构

几十倍，极强的负电性使 SF_6 气体具有优良的绝缘性能，电极间在一定的场强下发生电子发射时，极间自由电子很快被 SF_6 吸附，大大阻碍了碰撞电离过程的发展，使极间电离度下降而耐受电压能力增强。这一负电性对于开断电弧电流过零后触头间的绝缘恢复也十分有利。因此， SF_6 气体被用于高压开关设备作为绝缘和熄弧介质，而使开关性能大大提高。

SF_6 气体另一个特性是较低温时的高导热性。电弧弧套（弧心外围区）的平均温度常在 $1000\sim 3000\text{K}$ ， SF_6 气体在这个较低的温度范围内在 $2000\sim 2500\text{K}$ 时就急剧分解， 4000K 附近全分解成 F 和 S 的单原子。 SF_6 在弧套区分解时，要从电弧吸取大量的热能，因此 SF_6 在 2000K 附近其比定压热容 c_p 就急剧增长，出现导热尖峰，见图 1-2。而空气在弧套温度区没有热游离过程，因此 c_p 变化很小， N_2 的游离温度为 7000K ，只有很接近弧心的少数空气才会产生游离。由此可知，在电弧弧套温度区内， SF_6 比空气具有高得多的导热能力。

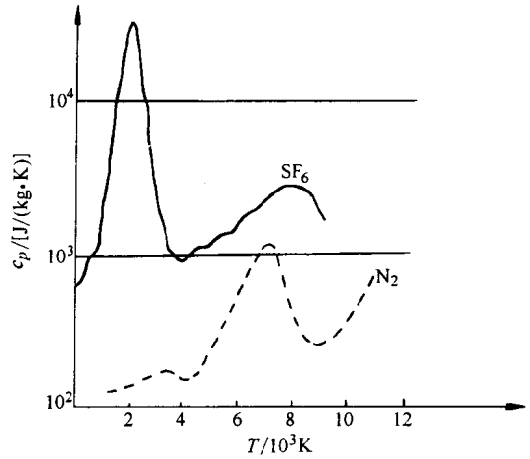


图 1-2 SF_6 和 N_2 (空气) 在高温时的比定压热容 c_p

从能量平衡观点看，熄弧过程是电弧的电能转换成热能被熄弧介质吸收带走的过程。利用 SF_6 作熄弧介质，不仅靠气吹的作用从弧区排除能量，而且还利用 SF_6 分解过程中发生的能量转换从弧区吸收大量热能，因此使 SF_6 气体具有优良的熄弧能力。

1.2 SF_6 的气体状态参数

理想气体的状态方程为

$$p = \gamma RT \quad (1-1)$$

式中 p ——气压 (MPa) (工程中也有用非法定单位 kgf/cm^2)；

γ ——气体密度 (kg/m^3)；

R ——气体常数 ($\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$)， SF_6 为 $56.2\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ ；

T ——气体的热力学温度 (K)。

SF_6 气体分子质量大，分子间相互吸力较大，尤其是当气体压力达到 0.3MPa 以上时，由于分子间距离被压缩、密度增大而使分子间吸力进一步增大（分子与容器壁间的碰撞力减弱），导致气体压力不再符合理想气体状态方程 (1-1)，随密度的增加，实际压力的增长要比理想值低。

比较准确而实用的 SF_6 气体状态参数计算式可用 Beattie - Bridgman 公式表达

$$p = 56.2\gamma T(1 + B) - \gamma^2 A \quad (1-2)$$

$$A = 74.9(1 - 0.727 \times 10^{-3}\gamma)$$

$$B = 2.51 \times 10^{-3}\gamma(1 - 0.846 \times 10^{-3}\gamma)$$

式中 p ——压力 (Pa);
 γ ——气体密度 (kg/m^3);
 T ——气体的热力学温度 (K)。

根据式 (1-2), 当气体密度 γ 不同时, 可得到 SF_6 气体压力与温度按不同的斜率成线性变化的关系, 算出的气体压力-温度曲线族见图 1-3。

SF_6 气体的临界温度 (即可能被液化的最高温度) 为 45.6°C , 在常温时有足够的压力就可液化。

SF_6 气体压力等于和高于其饱和和蒸气压力时, SF_6 气体就液化。不同温度下, SF_6 饱和蒸气压也不同 (见表 1-2)。

从图 1-3 和表 1-2 可得到 SF_6 电器在不同气压下允许的最低工作温度及 SF_6 气压随温度的变化关系。

例如, 某产品在 20°C 时的操作闭锁压力 (即开关允许的最低工作气压) 为 0.5 (或 0.4) MPa (表计压力)。从图 1-3 上 t 轴 $+20^\circ\text{C}$ 处向上作垂直虚线, 对应产品最低工作绝对气压 0.6 (或 0.5) MPa 处点两点 B_1 (或 B_2), 过 B_1 (或 B_2) 点参考相邻密度 $40\text{kg}/\text{m}^3$ (或 $30\text{kg}/\text{m}^3$) 线作斜线 $T_1B_1C_1$ (或 $T_2B_2C_2$), 从饱和蒸气压曲线 AA' 上的交点 C_1 (或 C_2) 向下作垂直虚线与 t 轴交于 -30°C (或 -37°C)。得到: 开关 SF_6 操作闭锁表计气压为 0.5 (或 0.4) MPa (20°C 时), 对应的最低工作温度为 -30°C (或 -37°C)。 -40°C 时对应的最低允许工作表计气压为 0.33MPa (20°C 时)。

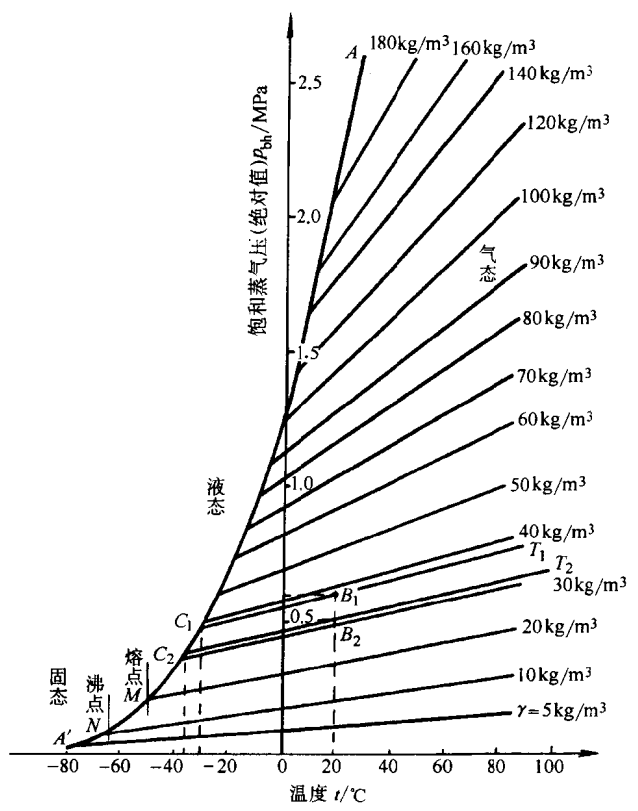


图 1-3 SF_6 气体的状态参数

表 1-2 SF_6 气体的饱和蒸气压 p_b (绝对气压值)

温度 / °C	-70	-60	-50	-40	-35	-30	-20	-10	0	10	20	30
饱和蒸气压 p_b / MPa	0.07	0.11	0.23	0.34	0.40	0.49	0.68	0.93	1.24	1.61	2.06	2.59

1.3 SF_6 的化学性能

1.3.1 SF_6 具有良好的热稳定性

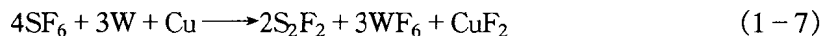
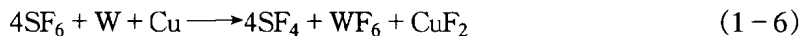
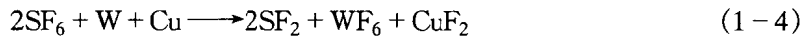
单纯的 SF_6 气体, 热稳定性高, 加热至 500°C 时不会分解。 SF_6 与某些绝缘物 (如硅树脂层压板) 接触时, 加热到 $160\sim 200^\circ\text{C}$ 就分解, 水分存在时, 能加速分解。因此国际电工委员会 (IEC) 推荐 SF_6 产品最高使用温度为 180°C 。

1.3.2 SF₆ 电弧分解过程

SF₆ 气体在开断电弧高温作用下, 800~1000K 时就开始分解出 SF₄ 和 F, 在 3000K 附近就分解成带电离子 S⁺、F⁺、S⁻、F⁻, 7500K 时产生原子或离子态的 S 和 F, 还有自由电子, 构成高温带电的等离子体, 完成 SF₆ 被电弧加热分解的反应过程。这些被电弧加热分解出的 S 和 F 的单原子、正负离子和电子其大部分很快 (10⁻⁵s 之内) 复合再生成 SF₆, 只有少数与金属蒸气、喷嘴材料蒸气和可能被电弧灼伤的灭弧室绝缘件蒸气发生化学反应。

1.3.3 SF₆ 与开关灭弧室材料的化学反应

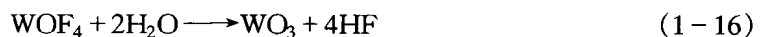
在开断电弧高温条件下, SF₆ 气体与开关灭弧室内的绝缘材料 C_K H_Y、石墨 C、聚四氟乙烯 CF₄、触头材料铜 Cu 和钨 W 以及灭弧室结构体料铝 Al 等都会发生化学反应, 主要反应如下:



以上反应生成物有些 (如 CF₄、AlF₃、CuF₂) 将以稳定的固体粉末存在于开关灭弧室内, 其他生成物如遇到化学性能活泼的水或氧还会继续新的化学反应。

1.3.4 水和氧等杂质产生酸性有害物质

SF₆ 气体在制造过程中不可避免地存在水分和氧气等杂质。化学性能活泼的 H₂O 和 O₂ 遇到活动性强的 SF₄ 和 WF₆ 很容易发生新的化学反应而产生酸性有害物质, 如



HF 与水结合生成腐蚀性极强的氢氟酸, 加上 H₂SO₃ 对开关灭弧室零部件都会产生侵蚀破坏, 尤其是对含硅 (Si) 物质的侵蚀最严重, 如



因此在有电弧存在的 SF₆ 电器的气室不能使用含硅的绝缘件, 如填充玻璃丝纤维的环氧树脂绝缘材料、硅橡胶、硅玻璃、含石英砂 (SiO₂) 的环氧树脂浇注绝缘件等。

此外, 这些酸性电弧分解物对镀锌件有腐蚀作用, 使镀锌层发毛、起皮、脱落。因此,

在 SF₆ 断路器灭弧室内使用镀锌件是不合适的。

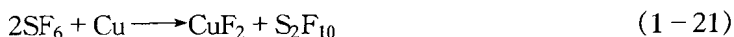
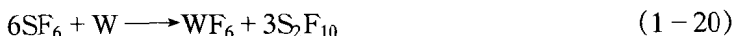
常用耐 SF₆ 电弧分解腐蚀的材料有：填充 Al₂O₃ 的环氧树脂，聚四氟乙烯，聚乙烯、聚丙烯、上釉氧化铝陶瓷、涤纶纤维环氧树脂、填充石墨的聚四氟乙烯、填充二硫化钼的聚四氟乙烯等绝缘材料；此外还有不锈钢、铸铁、脱锌铝合金、铝及铝铸件、铜及铜合金、铬及镉镀层。

从上面分析可见：水分促成电弧分解的低氟化物转为酸性物质，对人体对产品都有不良影响；水分也会使电弧分解出的 F 和 S 原子（离子）再结合（S + 6F → SF₆）反应受阻，会影响产品性能。

因此，对于 SF₆ 电器消除水分是一个重要课题（参见第 2 章 SF₆ 开关设备的气体管理）。

1.3.5 SF₆ 电弧分解物中有剧毒的 S₂F₁₀ 吗？

从理论上讲，SF₆ 与 Cu 与 W 反应都可能生成 S₂F₁₀：



但是数十年来，国内在对 SF₆ 电弧分解物的分析中还没有见到过 S₂F₁₀。国外曾有报导确认在 SF₆ 电弧分解物中有 S₂F₁₀ 存在。

在 SF₆ 电弧分解物中，有电弧高温下生成的 SF₅ 基团，在迅速冷却时也能生成 S₂F₁₀：



但是在高于 150~300°C 时，S₂F₁₀ 又易受热分解，且不可逆



S₂F₁₀ 这种冷却聚合而受热分解的特性，就决定了在断路器开断过程中（即灭弧室高温环境下）很难出现 S₂F₁₀，因此国内外在 SF₆ 产品的研究试验和运行检修时都很难见到 S₂F₁₀。

对 S₂F₁₀ 剧毒气体的紧张是没有必要的；但是对它存在的可能性不容否定，对它可能产生的危害应警惕，要重视 SF₆ 电弧分解物的化学毒性（参见第 2 章 SF₆ 开关设备的气体管理）。

1.4 SF₆ 的绝缘特性

对 SF₆ 电器所关心的 SF₆ 的绝缘特性有两个问题：一是 SF₆ 气体间隙的绝缘特性；二是 SF₆ 气体中固体绝缘件沿面放电的特点。这两点对 SF₆ 电器绝缘结构的设计很重要。

1.4.1 SF₆ 气体间隙的绝缘特性

1.4.1.1 影响 SF₆ 气体间隙绝缘的最重要因素是电场的均匀性

在均匀电场中，SF₆ 气体的绝缘性能十分优良，气体间隙 d 的增大、气体压力 p 的增加都能显著地提高间隙的绝缘能力，在一定的 p 值范围内，SF₆ 气体间隙的放电特性符合巴申定律，见图 1-4。在均匀电场中，SF₆ 间隙的击穿场强大约是同等空气间隙的三倍，从图 1-5 中可以看出这一关系，图中给出了气隙击穿时的场强 E 与气压 p 的临界比值 E/p ，SF₆ 中为 885kV·cm⁻¹·MPa⁻¹ 空气中为 294kV·cm⁻¹·MPa⁻¹。