

SF₆ 全封闭式
组合电器专题资料

第 二 集

科学技术文献出版社重庆分社

內容簡介

目 录

1、高压全封闭组合电器的调查.....	(1)
2、SF ₆ 封闭式组合电器的发展趋势.....	(6)
3、SF ₆ 用作灭弧介质.....	(7)
4、SF ₆ 气体中的灭弧现象.....	(11)
5、气吹(空气和SF ₆)电弧开断的特性.....	(20)
6、SF ₆ 中击穿电压的伏-秒特性.....	(29)
7、长间隙中不同冲击波形下SF ₆ 气体闪络的特性.....	(33)
8、压气式SF ₆ 灭弧装置气体动力特性的计算.....	(39)
9、SF ₆ 螺旋电弧能量的特性.....	(43)
10、断路器喷咀内超音速空气和SF ₆ 的气流特性.....	(45)
11、SF ₆ 气体中大电流电弧的堵塞现象.....	(51)
12、SF ₆ 气体喷咀内的速度.....	(56)
13、大电流SF ₆ 电弧在喷咀内的温度.....	(57)
14、大电流SF ₆ 游离电弧的电位梯度.....	(59)
15、户外和户内开关站用的SF ₆ 开关设备.....	(60)
16、FA ₂ 型SF ₆ 单压式断路器.....	(63)
17、300千伏SF ₆ 全封闭组合电器及绝缘结构的研究.....	(72)
18、大容量单压式SF ₆ 断路器(日本日立公司).....	(76)
19、SF ₆ 全封闭组合电器的设计、运行和可靠性.....	(86)
20、旋弧式SF ₆ 断路器的密封技术.....	(92)
21、防止在全封闭开关设备中气体和油的密封部位上气体渗入高 电场范围的方法.....	(98)
22、SF ₆ 在大电流电弧作用下分解产生的物质及其反应机理.....	(101)
23、SF ₆ 分解气体的主要成份及其分析法.....	(106)
24、SF ₆ 中绝缘材料的电弧分解与断路器性能的关系.....	(107)
25、SF ₆ 分解气体吸附剂的一些特性.....	(109)
26、SF ₆ 气体断路器用气体的精制——吸附净化速度的探讨.....	(110)

高压全封闭组合电器的调查

由于要将高压变电站布置得接近负荷中心的要求对电力部门的压力愈来愈大,且负荷中心地价昂贵,因而封闭式组合电器的优点就显得更为突出。典型的封闭式变电站所占的空间仅为敞开式变电站的百分之十左右。

几个主要制造厂家目前都认为:许多国家近年内新建的全部变电站均将采用封闭式组合电器。

下列的调查资料对世界上各主要开关制造公司生产的高压封闭式组合电器的参数做了对比,所用资料是由各公司一九七四年底提供的。

下述定义适用于大多数调查资料:

额定电压:符合IEC标准规定的电力系统标称电压。

西德AEG—Telefunken公司

VIs系列SF₆全封闭组合电器

电压(千伏)	110	132	150	220	275
额定试验电压*(千伏)	550	650	750	950	1050
额定电流:支路(安)	1250/2000	1250/200	1250/2500	1250/2500	1250/2500
母线(安)	2500	2500	2500	2500	2500
断路器开断电流(千安)	24	24	24	35.4	34.6
20℃时绝缘压力(巴)	2.5	3	4.5	4.5	4.5
断路器气压(巴)	(压气式)				

说明:

1.安全接地开关可装在回路的任何部分。高速接地开关是按闭合短路设计的。根据需要,任何开关均可采用电气和机械闭锁。设有作开关触头位置指示和闭锁用的辅助触点。

2.检修周期5~10年,视开断次数而定。可通过组件端部和侧面的孔道检修触头。

3.525千伏全封闭组合电器正在研制中。300千伏及以下电压的组合电器,采用同样的组件,只是随着电压的提高,绝缘气体的压力亦增高,这样,零部件的更换即可简化。气体压力可连续监视。年漏气量低于总气量的5%。

瑞典通用电器公司(ASEA)

正在研制的SF₆封闭电器系列。

电压(千伏)	245	362	420	550	800
基本冲击水平(千伏)	950	1050	1300	1550	1800
额定电流(安)	2500/4000	2500/4000	2500/4000	2500/4000	2500/4000
断路器的开断电流(千安)	50	50	50	50	50
绝缘气体压力(巴)	4~5	4~5	4~5	4~5	4~5

说明:

1. 断路器分单压式和双压式两种, 可根据使用场合来选择。隔离开关和断路器带有电气和机械闭锁。高速接地开关可在系统全电压下关合。

2. 组件采用标准设计, 故便于各种不同的组合。

瑞士BBC公司

SF₆全封闭组合电器 (断路器分单压式和双压式)

型式	EBK	EBK	EBK	ELK	EBK	ELK	ELK	ELK	ELK	ELK	ELK	ELK
额定电压 (千伏)	72.5	123	145	145	170	170	245	300	362	420	525	765
额定试验电压* (千伏)	350	550	650	750	750	750	1050	1050	1550	1550	1550	1800
额定电流 (安)												
支路	2000	2000	2000	4000	2000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000
母线	3150	3150	3150	4000	3150	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000
断路器开断电流 (千安)	31.5	31.5	31.5	40~70	40	40~70	40~70	40~70	40~70	40~70	40~70	40~70
SF ₆ 绝缘气体压力 (巴)	2.3	2.7	3.7	3.5	3.7	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5	3.5
断路器压力 (巴)	14.2	15.1	16.1	7	16.7	7	7	7	7	7	7	7

说明:

1. EBK型为双压式, ELK型为单压式 (压气式)。配有切负荷和不切负荷的隔离开关。配有快速接地开关 (弹簧操动); 配有能限制内部电弧故障的保护接地开关。全部保护开关上均装有位置指示器, 具有电气闭锁用的辅助触点。隔离开关可以联锁。

2. 断路器在开断10次短路电流或开断2000次额定电流之后才需检修。有抽气小车供抽气时使用。可从每个灭弧室的端部进行操作部件的检修。

3. 特点: 标准组件布置灵活。断路器可立式或卧式布置。年漏气量保证低于3%。电压互感器和支持绝缘子等均用环氧树脂绝缘。母线为单相式或三相共筒式。

法国COQ公司

CP型压缩空气封闭式组合电器

电压 (千伏)	72.5	170	245
基本冲击水平 (千伏)	325	650	1050
额定电流 (安)	2000	2000	2000
断路器额定			
开断电流 (千安)	40	40	40
绝缘气体压力 (巴)	10/20	10/20	10/20
断路器气压 (巴)	20	20	20

说明1. 每个间隔内装有快速接地开关。该接地开关由电流互感器和继电器控制, 可在0.04秒内或在内部电弧故障时动作。外壳用10毫米厚的铝合金制成, 能完全承受内部电弧的作用。无因漏气而使人发生窒息的危险。

2. 检修: 断路器易于拆装。全部组件均能拆卸。

3. 标准组件的增添简便。运行或漏气的维修费用低。无需专门的气体处理设备。

西德Calor-Emag公司

配少油断路器的SF₆全封闭组合电器

额定电压 (千伏)	72.5	123	14.5
额定试验电压* (千伏)	350	550	550
额定电流 (安)	1250/1600/2000/2500		
断路器开断电流 (千安)	31.5	31.5	31.5
绝缘气体压力 (巴)	0.05	0.5	0.5

说明:

1. 少油断路器系拉出式结构, 故在检修时无需抽掉其它组件内的SF₆, 并能保证与带电部分可靠的隔离。

2. 接地开关每相都带有一个机械指示器, 以示出“接地”和“未接地”位置。三相可机械联动, 也可手动控制或用一台公用的电动机驱动。辅助开关作为电气联锁和指示用。接地开关, 隔离开关和断路器采用电气——机械联锁。也可用锁扣来联锁。

3. 断路器的设计中已考虑触头和灭弧系统不致影响气体的绝缘。因燃弧时间短, 故触头烧损和灭弧介

质污染的程度很低。检修周期约为五年。用专门的检修架易于对各个部件进行检修。能保持足够的绝缘强度。组件系标准设计。隔离开关和负荷开关有观察窗，可直接观察开关的触头位置。

4. SF₆绝缘气体的压力低。即使在大气压下，仍

荷兰COQ公司

Bisep系列压缩空气和SF₆绝缘封闭式组合电器

型 式	110	150	220	380
额定电压 (千伏)	110~123	150~170	220~245	380~420
基本冲击水平 (千伏)	550	750	1050	1450
额定电流:				
支路 (安)	1600	2500	2500	2500~4000
母线 (安)	1600~2500	2500~4000	2500~4000	2500~5000
断路器的对称开断				
电流 (千安)	26	50	50	53
绝缘气体压力 (巴)	15 (空气)	20 (空气)	20 (空气)	8 (SF ₆)
断路器的气压 (巴)	25 (空气)	25 (空气)	25 (空气)	21 (SF ₆)

说明:

1. 用压缩空气作绝缘是指245千伏及以下和非对称开断电流小于63千安的封闭电器而言。
2. 接地开关是按电缆和主母线的最大额定短路电流设计的。它与断路器在电气上联锁。
3. 断路器可从气罐中垂直吊出。此时，双断口隔离开关则处于“分开”位置，中间电极便自动接地。断路器约每隔五年检修一次。
4. 特点: Bisep型隔离开关由密封的套管式绝缘子组成。其内浇装有管形电极，有两个机械联动的触杆能在其中运动，故形成两个断口。在隔离开关打开时，两个触杆可拉入管形电极内。运动停止时，靠电极上的接地刀与金属壳体上的接地点点相闭合，隔离开关用马达驱动。但在紧急情况下也可进行手动操作。

法国Delle-Alsthom公司

SF₆封闭式组合电器

电压 (千伏)	72.5	145	245	550	800
额定试验电压* (千伏)	350	650	1050	1550	1800
额定电流: 支路 (安)	2000	3000	4000	8000	8000
断路器开断电流 (千安)	63	63	63	63	63
绝缘气体压力 (巴)	3.4	3.4	3.4	3.4	3.4
断路器	压 气 式				

说明:

1. 安全: 电动接地开关是按闭合短路设计的。为适应用户需要，接地开关与断路器可以联锁。用压力计可连续监视漏气。每个间隔均装有安全阀。
2. 检修: 备有气体处理设备，供每个气隔单元抽气、净化和重新充气之用。
3. 母线为单相式或三相共箱式。切变变压器励磁电流的开关，是按闭合短路设计的，断路器瞬时开断电流可提高到80千安。

英国GEC和Reyrolle公司

SF₆全封闭组合电器 (由两公司联合制作, 断路器由GEC制作, 其他部份 由Reyrolle公司 制作)

电压 (千伏)	300	420
额定试验电压* (千伏)	1050	1425
额定电流 (安)	2500	4000
断路器的开断电流 (千安)	40	60
绝缘气体压力 (巴)	3	6
断路器的气压 (巴)	16	压气式

说明:

1. 老式的300千伏断路器为双压式, 新式的420千伏断路器为压气式。
2. 接地回路即可由断路器在出线回路上, 又可在母线上闭合。接地开关和隔离开关等之间的接地和联锁可通过机械的和电气的指示, 也可直接观察到。全部采用分相式, 并装有气压表和防爆膜片。
3. 检修断路器时, 可将整套灭弧室部分沿水平轨道拉出, 不需起吊设备。组合电器因用标准组件, 故 可单件进行拆卸。组合电器的上部设有平台, 便于检修工作。

Merlin & Gerin公司

SF₆封闭式组合电器 (断路器分为单压式和双压式)

电压 (千伏)	60/72.5	110/123	132/145	150/170	220/245	275/300	380/420
基本冲击水平 (千伏)	325	490	550	690	900/1050	1050	1425
额定电流 (安)	1250/2000	2000	2000	2000	2000/3150	2000/3150	2000/3150
断路器开断电流 (千安)	20/33.6	24/52.5	20/44	17/38.7	28.4/52.5	29/52.5	27/45
绝缘气体压力 (巴)	2.5/3.5	2.5/3.5	2.5/3.5	2.5/3.5	2.5/3.5	2.5/3.5	2.5/3.5
断路器的气压 (巴)	14	14	14	14	14	14	14

说明:

1. 开断容量较小, 电压较低时, 采用压气式断路器。
2. 年漏气量保证低于SF₆总气量的3%。每个气隔单元用石英砂作填料的环氧树脂绝缘子密封, 其破裂压力比壳体的爆裂压力大, 因而可防止内部故障蔓延。在每个气隔单元内装有碳质防爆膜片。在每个气隔单元内还装有压力监视装置, 配有快速动作的接地开关。用接地棒使母线接地用的孔设在母线连接处。
3. 检修: 在操作3000次, 或三年, 或累计开断300千安电流之后, 才需要检修触头。检修时, 更换 活性碳和分子筛过滤器, 备有气体处理设备。
4. 为进行电缆和变压器充电电流的切断, 隔离开关可配快速分合闸机构。装有电感式 和电容式电压 互感器。

西门子 (Siemens) 公司

SF₆封闭式组合电器 (配单压式断路器)

额定电压 (千伏)	123	145	170	245	420	525	765
额定试验电压* (千伏)	550	650	750	1050	1425	1550	1950
额定电流: 支路 (安)	1250/2000	1250/2000	1250/2000	1600/2500	1600/2500	1600/2500	1600/2500
母线 (安)	1600/2500	1600/2500	1600/2500	2500/4000	2500/4000	2500/4000	2500/4000
断路器开断电流 (对称值) (千安)	31.5	31.5/40	31.5/40	40/63	50/63	50	50
绝缘气体压力 (巴)	2.3	3.0	3.5	3.5	4.5	5.5	4.0
断路器的气压	压 气 式						

说明:

1. 每台断路器配二台电动或手动操作的接地开关, 而电缆(或线路)只配一台。断路器两侧的隔离开关和每一母线段内均装有工作接地开关。每段母线内装有定向爆破口, 可防止气体喷向工作地点。

2. 备有检修设备, 可供SF₆抽气和充气用。

3. 特点: 也可装负荷开关。全部采用钢外壳, 同时采用精加工, 故年漏气量小于0.5%。抗内部电弧能力强。

瑞士 Sprecler & Schuh公司

双压式SF₆断路器和SF₆封闭式组合电器

额定电压(千伏)	123~245	245~420
额定试验电压*(千伏)	550~950	1050~1425
额定电流(安)	2500~4000	2500~4000
断路器的开断电流(千安)	50~150	50~150
绝缘气体压力(巴)	2.5~4.25	2.5~4.25
断路器气压(巴)	19~19	19~19

说明:

1. 安全: 快速接地开关按闭合短路故障设计, 装有供检修用接地开关(电动或手动)。有供观察隔离开关和接地开关触头位置用的观察窗。负荷开关额定电流为1000安。母线为单相封闭式。

2. 检修: 每个气隔单元装有气体监视装置。断路器配电动贮能的弹簧机构(亦作为接地开关的机构), 装壳体的外面, 负荷开关可在设备带电的情况下检修。有供检修动、静触头的检修孔, 备有气体处理设备。

3. 标准组件: 可作不同方式的布置。有可能在以后进行改装或扩建。电压互感器可以是电磁式或电容式。

美国西屋公司

SF₆封闭式组合电器

额定电压(最大值)(千伏)	121	145	169	242	362~765
基本冲击水平(千伏)	550	650	750	900	
额定电流(60赫芝): 支路(安)	2000/3000	2000/3000	2000/3000	2000/3000	具体商定
母线(安)	4000	4000	4000	4000	
断路器开断电流(千安)	63	63	63	63	
绝缘气体压力(巴)	3	3	3	3	
断路器气压(巴)	16.5	16.5	16.5	16.5	

说明:

1. 接地开关能承受电力系统1秒热稳定电流, 与断路器或隔离开关没有联锁; 在打开或关合时, 可以锁住, 外部有供观察触头位置的机械指示器。

2. 检修: 每个断路器的两侧备有接地棒, 可在不抽掉SF₆或不移开接地围栏的情况下, 作例行检查。检修前应放掉断路器上的残余电荷, 当需要放掉母线上的电荷时, 可将轻便的接地棒接到母线连接处。

3. 特点: 隔离开关为双断口, 电动机操动。有防止运行时接地的装置和触头位置观察孔。在接头处可迅速接上各种组件, 断路器组件在制造厂整体试验后, 单独装运。装有切空载变压器励磁电流的开关。该开关是按变压器原边短路故障设计的。负荷开关适用于简易的变电站。

日本东芝公司

户外SF₆封闭电器和断路器

日本东芝公司封闭电器举例: 第一台275千伏SF₆封闭式组合电器装于东京电力公司的北八王子(Kitahachioji)变电站。双母线带母联开关。有两回275千伏架空进线。有两个变压器馈电回路, 额定电流: 2000安, 额定开断电流50千安。SF₆绝缘气体压力2.75巴, 灭弧气压15巴。

断路器立式布置, 由断路器或隔离开关将组合电器分成若干气隔单元。接地开关配弹簧机构。接到每个进线支路上的避雷器系SF₆绝缘封闭式。每个母线上的电压互感器为电容耦合式, 带有功率放大器, 该公司目前正对500千伏(基本冲击水平1800千伏), 4000安, 50千安封闭式组合电器作现场试验。(译者注: 本文插图请参阅原文)。

(译自《Electrical Review》, 1975, №5, 152~158) [李建基译 余善为校]

SF₆ 封闭式组合电器的发展趋势

根据西德西门子公司西柏林开关厂的意见,在与敞开式电器的竞争中,SF₆封闭式组合电器终究要用于所有的变电站(尽管节省地皮费,这一优点是其早期发展的主要刺激因素之一)。在西德的一些城镇现正在或将全部使用SF₆封闭式组合电器。这些城市包括西柏林、科隆、慕尼黑和法兰克福。在西德现有450个以上的SF₆封闭式组合电压间隔在运行(装在100个变电站内)。在上一个财政年内,仅西门子公司SF₆设备的销售额达几千万西德马克。该公司拿出高压开关设备生产劳动力和作业面积的三分之一左右全部投入这种设备的生产。

西门子公司产量的百分之四十左右出口,据该公司称,占国际市场上销售量的百分之三十到四十。提供的成套封闭电器的额定电压高达765千伏。

促使SF₆封闭式组合电器发展的原因是需要提高位于建筑物多、地皮昂贵的负荷中心变电站的输电电压。同时,因为变电站靠近建筑物需要减少开关操作时的噪音。

在西柏林,由于电力发展而面积受到严格限制,这个问题就显得更为尖锐。

采用SF₆封闭式组合电器,不仅能大大缩小绝缘距离,而且SF₆断路器内的灭弧介质完全是封闭的,这不仅缩小了封闭电器的尺寸,而且减小了噪音和免受污秽的影响。

后一条优点使SF₆封闭电器在那些地皮不成问题的国家(如中东)亦提供了良好的销路,在那里,环境条件对敞开式设备的影响极为不利。

SF₆断路器的发展能满足开断容量日益增长的需要。525千伏的封闭电器现一般可做到开断电流63千安。

245/300千伏的SF₆设备,母线载流值高达4000安,支路载流值为1600安和2500安。

这些设备组装在3米宽,而最小长度8.8米的间隔里,最小间隔高度为8.4米。双母线组合电器间隔重18吨。但绝不是到此为止,而且还有进一步发展的余地。

设计的发展

西门子的第一台SF₆封闭式组合电器于1968年装在柏林。当时决定采用钢外壳,而其他公司则用

铝合金外壳。由于采用钢外壳而且采用现代化的数控机床加工,壳体连接处法兰面的加工精度超过10微米。这样在设备整个使用过程中漏气量很低。穿过密封圈的传动轴加工到3微米公差以内。

钢壳加工的另一个特点是两管以T形方式相连时,采用下列方法加工:先在T形接头的横向外壳上开个洞,然后用热成形法翻边,形成一个平整的圆形截面,另一钢管就可以焊于其上。

如为大电流时,在钢壳的适当部位嵌入不锈钢,割断磁路,否则,在壳体内会产生热损耗。

钢壳具有较高的内部耐弧能力。即使在发生内部故障电弧情况下,在一般的网路继电保护动作之前的一段故障时间内,它将保持完整无损。每个气隔单元都装有防爆膜片,当到达破坏压力时,此膜即破裂,作为免受内部故障危害的附加保护。

每一段钢壳都要用五倍于工作压力的超强度进行试验。试验时,七个双母线间隔最高曾达到1%的年漏气量,这实际上可不予理睬,何况正常漏气率低于0.1%。钢壳具有最大的抗内部电弧作用的能力,这就减少了由于内部故障造成的损害和检修工作量。

170千伏以下设备的带电部份,由树脂浇注绝缘子支承,绝缘子作成盘形或支柱式,支柱式绝缘子是按标准的11千伏瓷件的形状设计的。170千伏以上设备的三相母线都装在形状大致为三角形的同一支架上,此支架也是用树脂浇注成型,并且采用了相当轻巧的结构。此种结构还增大了内部爬电距离。

用适当的裙边以获得要求的爬电距离的锥形套管,使每个气隔单元得到密封。这样在气隔单元拆开进行大修时,SF₆气体不会从相邻的气隔单元中漏掉。典型的组合电器的基本布置是将开关装置在三相共箱的母线外壳上。母线隔离开关直接装在与断路器外壳连在一起的出线母线上。进线电缆通常装在上部,它通过一只隔离开关与断路器相连。上部还装有仪用互感器和接地开关。

电压互感器可装在隔离开关的任一侧。三相隔离开关和工作接地开关用连杆联接,由一共用马达机构操动,每相快速接地开关既可手动又可电动。

控制箱内装有断路器液压控制系统、维护用的装

置以及SF₆的监视器件和维护用的接头。

断路器的单断口电压可达170千伏(开断容量可达8000兆伏安),两只断口串联组成245千伏(断流容量20000兆伏安),四只断口组成420千伏(40000兆伏安)。

整个设备通过分子筛过滤,以便使绝缘介质处于干燥状态。这种分子筛可吸收本身重量约20%的水份,而硅胶仅吸收5%。据西门子公司称,在不需对过滤器作任何处理的情况下,设备内的湿度在十年左右仍可保持在所要求的限度之内。仅仅是因为采用钢外壳方达到低的漏气率。供气系统在设备运行五年之后才需检修。

西柏林密封闭式变电站

西门子公司现在正在制造的SF₆封闭式组合电器的典型例子是为Bewag电力照明公司的Reuter和Mitte变电站设计的420千伏封闭式组合电器,将于1976年初交货。这些设备总共有16个间隔,是西德第一批采用这种电压等级的设备。

420千伏断路器的四个断口由电动一液压操动。断路器中SF₆的额定压力为6巴。Reuter变电站初期工程有四条架空出线间隔,供变压器间隔和母线连接之用。预计在后期工程竣工后总共15个间隔。Mitte电站初期工程有两个电缆进线间隔,四个变压器间隔和一个母线间隔。以后将扩建成15个间隔。

变压器的420千伏侧和为电缆用的420千伏补偿线

(译自《Electrical Review》,1975, №5, 149—151)

[李建基摘译 吴鸿寿,余善为校]

SF₆用作灭弧介质

摘要:断路器的开断容量不断提高。近十年来的增长率每年约10%。目前,高压断路器的开断电流已达50和63千安。

SF₆灭弧介质在近十年来,对提高开断容量,制造优质断路器和高压封闭式电器,起了重要的作用。

1. 引言

十多年以来,六氟化硫(SF₆)正日益广泛地用作断路器,电气设备以及高压全封闭式组合的绝缘和灭弧介质。SF₆能满足对良好灭弧介质所提出的

图将直接用SF₆封闭式管道连接。这种连接占用的空间最小。

Reuter和Mitte变电站是Bewag供电公司规划的420千伏系统的第一期工程。Reuter变电站通过420千伏两回平行线路与Mitte变电站连接,两回2.3公里长的架空线与8.2公里长的两回强制水冷的电缆连接。为这两个变电站提供的SF₆封闭式组合电器的基本参数为:根据IEC推荐的标准,SF₆封闭式组合电器是按525千伏的额定电压设计的,工频一分钟耐压为680千伏,冲击耐压为1425千伏。支路额定电流为1600安和2500安。母线额定电流为4000安。一秒钟热稳定电流和对称开断电流为50千安,额定关合电流为125千安。绝缘气体的额定压力将为3.5巴。

SF₆封闭式组合电器的装配是在西柏林西门子公司150000平方米主开关厂房进行的。各种组合按用户的要求设计,但大部份是由标准组件组合而成,因此,工厂在相当程度上可采用大量生产工艺。

设备的制造按两条生产线进行:一条是断路器装配线,另一条是其他元件的装配线。最大运输间隔是包括隔离开关和电流互感器在内的双母线组件,重4.5吨。

每个断路器元件先作300次的机械操作试验,然后作额定标准交流耐压试验。每只绝缘件在装配过程中逐个作电晕放电试验,每个部件要在装有SF₆检漏仪的专门房间内逐个作密封试验。总装后还要在塑料棚内作密封试验。

一切要求,如快速冷却电弧,在电流过零的瞬间去分离。

作为灭弧介质,首先要求在对灭弧具有决定作用的温度范围内,具有良好的导热性。灭弧气体的热时间常数要小。而且还必须能迅速恢复其介电强度。

2. SF₆的物理和化学特性

在常温下,SF₆呈惰性,具于最稳定的化学结构。当温度 $\theta=20^{\circ}\text{C}$,和压力 $P=1$ 巴时,其密度 $\rho=6.14\cdot 10^{-3}\text{g/cm}^3$,而空气的密度则为 $1.29\cdot 10^{-3}\text{g/}$

cm³。用SF₆作灭弧介质，应用压力—温度曲线图（图1），就能确定在某一压力和温度范围内还需附加电热。

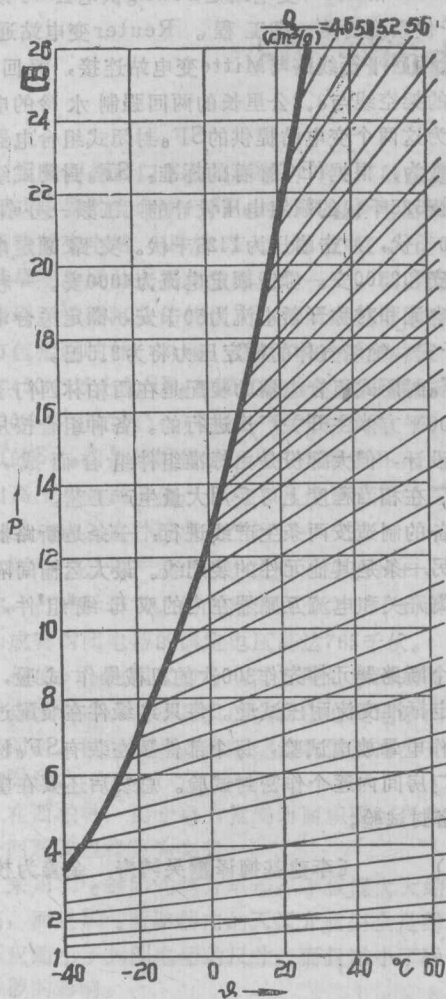


图1 六氟化硫 (SF₆) 的压力—温度曲线图

SF₆是负电性的，与氮相比，具有较高的介电强度。（图2）

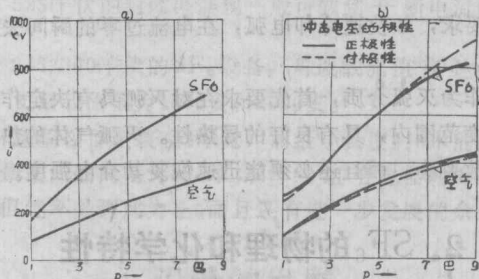


图2 在一单元断口上SF₆和空气的耐受电压与气体压力P的关系，极间距离

5 厘米

a) 50周交流电 $\bar{u}$

b) 雷电冲击电压波形1.2/50

在高温和电弧的作用下，SF₆分子分解。分子密度曲线（图3）表明，SF₆由于电离能小，仅6.6电子伏，约在2000°K时就已全面分解。与此相反，氮为9电子伏和7000°K左右。SF₆虽在温度不高，甚至在1000°K时，其密度就下降（图4），但其分解物（如SF₄，SF₂，F）也是负电性的，故SF₆及分解物的击穿强度仍远高于空气。（图5）

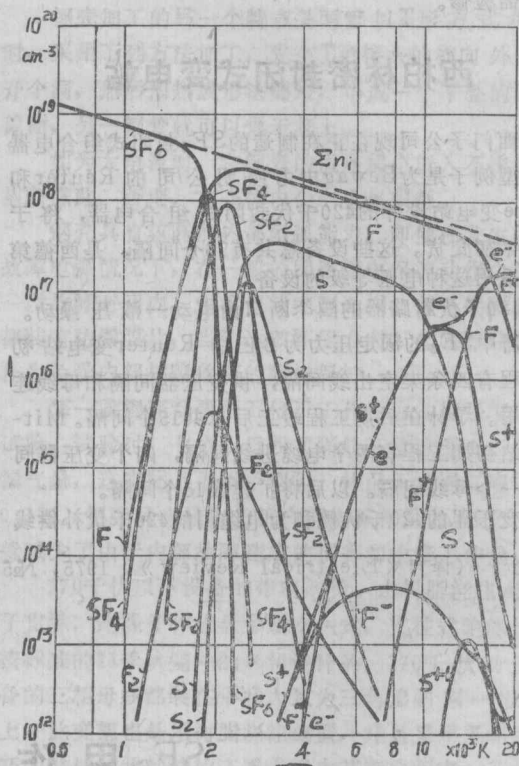


图3 气压为一巴时，SF₆的分子密度与T的关系

约自2000°K起，SF₆就有高的热焓 $h = \int_0^T c_p dt$

（图6）。约在2000~3000°K的范围内，由于反应能的迁移，其导热率λ大大提高（图7），高导热率λ的范围一直向下延伸至导电率开始急剧下降的温度区域（图8）。与此相反，氮约在7000°K时，导热率为最大值，因此其高导热率不像SF₆那样，伸展到温度较低的区域。

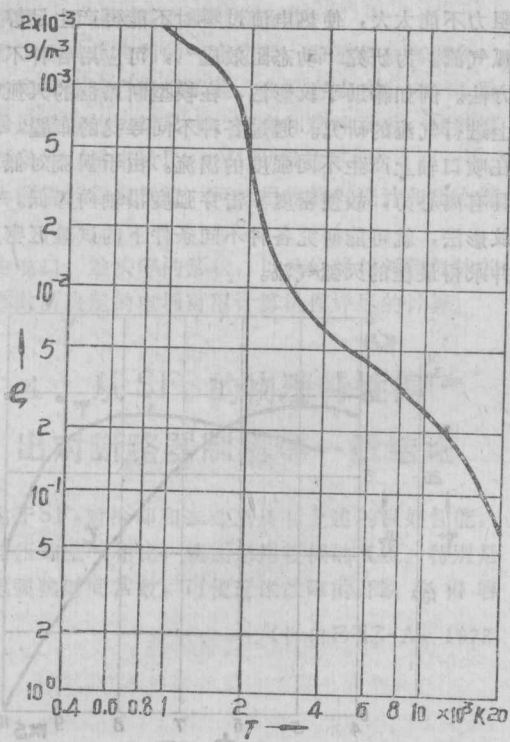


图4 气压为一巴时, SF_6 的密度 ρ 与 T 的关系

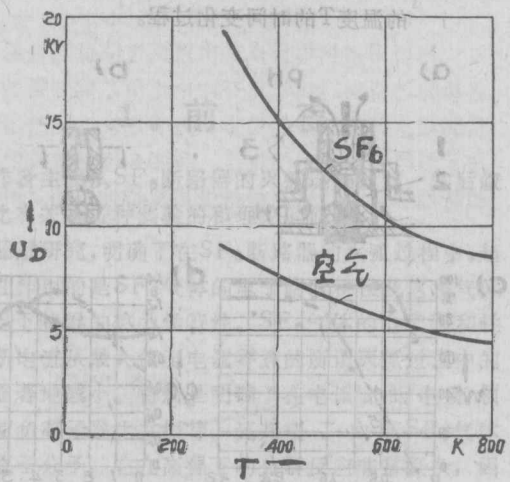


图5 气压为一巴时, SF_6 和空气的击穿电压 U_0 与温度 T 的关系 (球间隙, 球半径 1 厘米极间距离 $S=0.2$ 厘米)

图中所示的特性, 是通过计算和电弧温度变化过程中的分光镜面测得的。由此可得出结论: 非吹弧, 即未通过气流冷却的 SF_6 电弧例如在触头后的“气流死区”一亦比氮气中的电弧冷却和去游离为快。而且,

由于 SF_6 及其分解物的负电性, SF_6 的介电强度, 比空气升高得快。

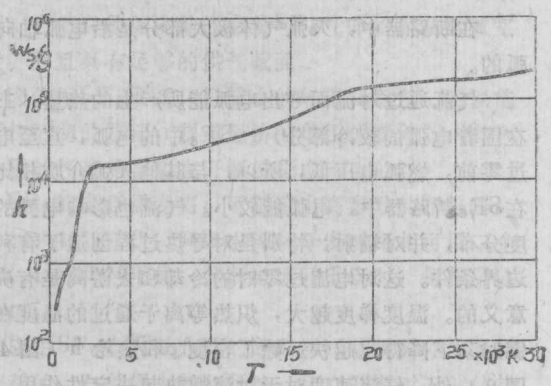


图6 气压为一巴时, SF_6 的比热和温度 T 的关系

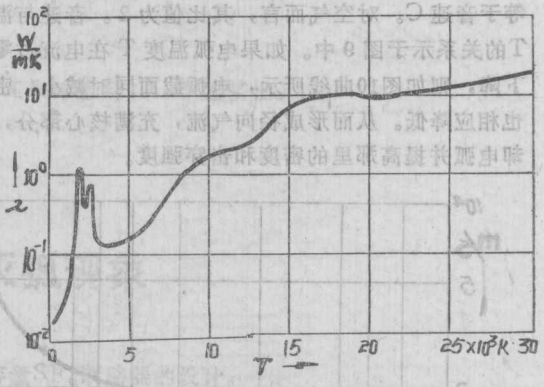


图7 气压为一巴时, SF_6 的导热率与温度 T 的关系

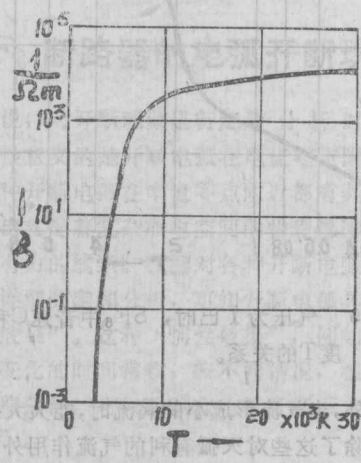


图8 气压为一巴时, SF_6 的导电率 σ 与温度 T 的关系

3. 技术上的应用

在断路器中,灭弧气体极大部分是沿电弧轴向吹弧的。

气流通过对流而导出电弧能所产生的热量(主要在围着电弧的较冷部分)。SF₆中的电弧,直至电流过零前,燃弧电压低,所以,与其他灭弧介质相比,在SF₆断路器中,电弧能较小。气流也影响电弧的温度分布,并对辐射,特别是对导热过程创造了有利的边界条件。这对电流过零时的冷却和去游离是有决定意义的。温度梯度越大,炽热等离子通过的温度在关键时刻下降得也越快。除了密度 ρ 和热焓 h (图4和图6)外,气流速度对于对流散热起决定性作用。气流速度与灭弧室前后的压力 P_H/P_N 之比有关,并当 $P_H/P_N \geq [(k+1)/2]^{k/(k-1)}$ 时,(对SF₆ ≈ 1.7)等于音速 C 。对空气而言,其比值为2。音速与温度 T 的关系示于图9中。如果电弧温度 T 在电流过零前下降,则如图10曲线所示,电弧截面同时减小,密度也相应降低。从而形成径向气流,充满核心部分,冷却电弧并提高那里的密度和击穿强度。

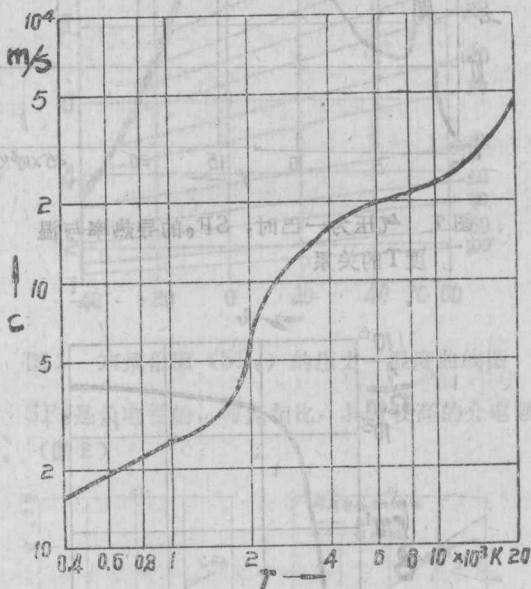


图9 气压为1巴时, SF₆中音速 C 和温度 T 的关系。

此外,当气流形成小的涡流时,能大大提高其导热能力。除了这些对灭弧有利的气流作用外,也有一些气流流动过程中的不利作用,如有害的分离现象——“死区”,或者大的涡流‘需采取适当的结构形状予以避免,否则就会降低灭弧能力。而且,喷口尺寸的

决定,还应考虑在大电流下气流因受热而形成的局部阻力不能太大,使热电流过零时不能再产生足够的灭弧气流。为研究“动态阻效应”,可应用各种不同的方法。例如借助于纹影法,在模型断路器的灭弧喷口上进行气流的研究。通过各种不同导孔的布置,就能在喷口轴上产生不同强度的涡流。由于涡流对低压区具有离心力,故使密度和击穿强度沿轴向降低。使用纹影法,就可能研究各种不同条件下的试验区密度,并求得最佳的灭弧气流。

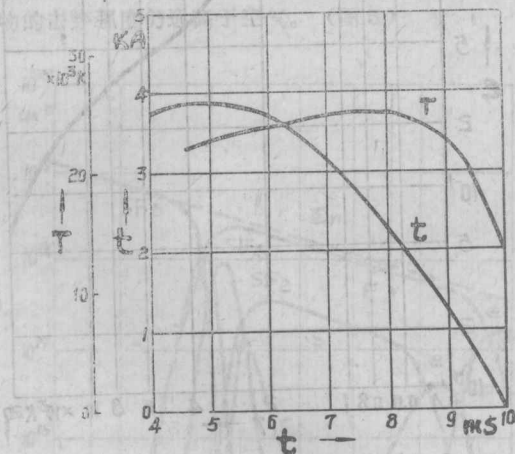


图10 气压 $P=3$ 巴时, SF₆交流电弧中电流的时间变化过程和分光镜测得的温度 T 的时间变化过程。

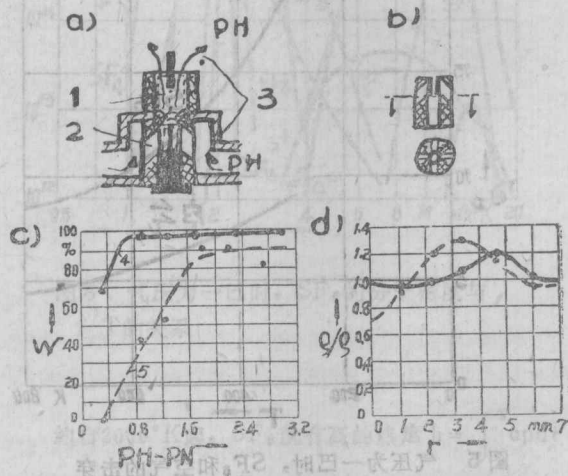


图11 用纹影法在模型断路器上对喷口气流的研究。

- a) 带有可变导孔的模型断路器
 - b) 径向导孔布置的纹影图
 - c) 灭弧效率 $w = f(P_H - P_N)$
 - d) 相对密度 $S/S_0 = f(r)$, r 为离喷口轴的距离。
1. 孔腔 2. 导孔 3. 气流 4. 有径向导孔 5. 无径向导孔

人们发现,如用那些能限制喷口轴向涡流形成的导孔布置,可使灭弧性能得到改善。

为了探索最有利的气流路径,即避免分离现象,用气体和液体进行模拟试验,会更有成效。在试验中,通过适当的选擇尺寸、宽度和粘性系数,使其遵循相似条件(雷诺数 $Re=Vl/\nu$ 保持不变)。

为测量非稳定气流,可使用热线气流计和压力探测器。

由喷口、触头等形状,以及绝缘材料和气体的介电常数所决定的电场可用计算机作详尽的计算。

4. 从SF₆的物理特性得出对断路器制造的一般结论

由于SF₆对冷却和去游离具有上述的良好性能,例如与压缩空气相比,就能采用较低的气压。特别是小的电弧热时间常数,可使近区故障的开断变得容

(译自ETZ-A, 1973, 7) [朱树德译, 李建基校]

SF₆气体中的灭弧现象

1. 前言

作者主要从SF₆断路器的灭弧现象谈起,然后叙述与此有关的各种实验的和理论的研究。

通过研究,明确了在SF₆断路器的灭弧过程中,起决定性作用的是SF₆气体的电子附着特性及这种气体在高温下特异的热力学特性。SF₆气体的电子亲和性使开断电流从最大值至电流零点的所谓灭弧过程中的电导显著地减小。特别是明确了在电弧的低电流领域促使负离子发生共振等。还判明了由于SF₆气体是多原子分子,它在高温下的分解反应非常复杂,因此在包括热传导在内的热力学特性方面呈现了其他一般气体所没有的特异的特性等等。由于SF₆气体的这些特有现象,就是在小电流区域也能维持细的电弧,同时电弧时间常数随着电弧电流的减小而急剧减小,从而就可明瞭, SF₆断路器不会截断电流,能进行理想的大容量开断。还判明了这种气体所特有的那种灭弧力与断路器的灭弧室形状或者说与气流的过渡特性有密切的关系。所获得的研究成果有助于最近试制的

易。

和在空气中330米/秒的音速相比,在SF₆中140米/秒的音速是比较小的(图9),所以,对SF₆断路器,当然必须更多地注意使SF₆气体贮存在灭弧室附近,并且具有足够的供气截面。

因使用SF₆灭弧,只需小的气压和压差,所以能按气压活塞的原理,制造经济的单压式断路器,其灭弧介质的气流是直接开断过程中产生的。

SF₆的击穿强度高,可制造出高参数的断路器,如:245和300千伏,开断电流40千安时每相可用二个断口。420和500千伏,开断电流50千安时,每相用4个断口。

应用SF₆作灭弧介质的断路器,对周围环境是特别有利的。与外界大气相隔绝,即在开断时无气体排出。因此断路器噪音很低。近几年来, SF₆也应用于高压封闭电器作灭弧和绝缘介质,使设备的体积大大缩小。

大容量SF₆断路器的设计。

本文打算概要说明SF₆断路器的灭弧现象,对SF₆断路器所表现出的优越的开断性能给出物理方面的论据。

2. SF₆ 断路器的电弧开断现象

一般来说,对开断现象进行定量分析时,具有重要的决定性意义的是开断电弧在电流零点附近的一些特性。各种开断电弧在电流零点附近都有其固有的特性,而找出支配着复杂放电空间的物理规律为这些研究提供了有力的线索。根据对各种开断电弧在电流过零附近的详细测定和分析,可知开断电弧具有其固有的“惯性效果”。这种“惯性效果”,例如,表现为空间电导变化的时间常数;按不同情况,根据断路器使用的回路条件,可以看到在电流开断后的所谓“残余电流”。

通过对这些放电空间惯性效果的详细测定,找出支配各种开断电弧的主要因素,就可能定量地掌握开断现象。

作者利用 SF_6 气体简单开断和 SF_6 吹弧两种模型断路器测定 SF_6 气体中的开断特性。特别是对于电弧的电流零点附近的各特性进行了电气的和光学 的测定。结果在 SF_6 气体的电弧中发现了一些特有现象,明确了由此而造成的 SF_6 断路器灭弧过程的特点。以下各节叙述实验装置、回路和 SF_6 断路器灭弧过程的特异现象。

2.1 开断实验用的模型和试验回路

在图1中示出 SF_6 模型断路器,用银钨触头,行程为20毫米, SF_6 压力能试到30公斤/厘米²。灭弧室外筒用丙稀酸树脂制成,以便对所有模型都能进行光学测定。其简单开断的动触头用波纹管密封,由空气操作开断过程。

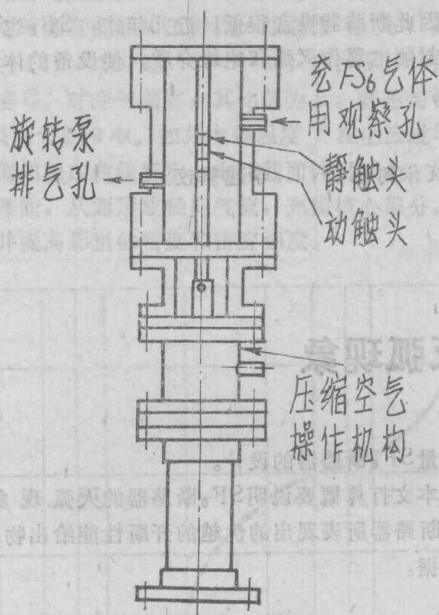


图1 简单开断断路器

图2系试验回路, M-G 系普通的直流发电机, L_0 为大电感(25毫亨)线圈。合闸开关合闸后,保护断路器 B_1 和 S_1 开断直流电流。检出此开断电流的零点,接着由无线电操作的触发装置使间隙在电流零点动作,由 L_0 、 C_0 决定的振荡大电流流过被试断口。这是一种合成的等价试验回路。100~120安的直流电流仅完成在所需开距之前维持电弧的任务。 C_0 用到120微法, L_0 采用小于60毫亨的种种数值,试验采用 C_0 充电电压5~30千伏,电流幅值0.3~5千安,频率50~500周/秒。 C_0 、 L_0 分别为调整恢复电压的电容和电感。电弧电流、电压由同轴分流器Sh、CR和分压器D₁测定,

此外,把 SF_6 和空气,或者 SF_6 和其他负电性气

体在贮气筒内混合,以研究气体的成份和电弧现象的关系,混合气体的成份由质谱仪进行定量分析。确认气体已由扩散而充分混合后再进行试验。在 SF_6 电弧的光学测定中使用了连续式摄影机及高速狭缝摄影机。

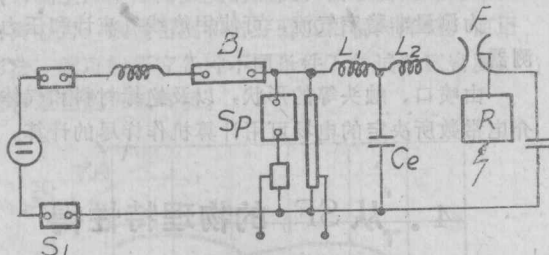


图2 试验回路

S_1 : 合闸开关 B_1 : 辅助开关
M-G: 直流发电机 L_0 : 大电感线圈
 L_0 、 C_0 : 恢复电压调整用C、L,

2.2 SF_6 气体中的灭弧特性

与开断现象研究有关的感兴趣的问题是,研究清楚由于气体种类不同造成开断性能的差异,或是由于不同气体的混合而使灭弧性能变化等基本灭弧特性。根据吹弧模型断路器获得的实验结果,有关 SF_6 气体的基本灭弧特性叙述如下:

(a) 对于开断近区故障的特性

作者用多频等价试验回路测定模型断路器开断近区故障的特性。图3示出开断电流值和能开断的恢复电压起始上升率极限的关系。为了比较,也给出同一条条件下用氮气吹弧时的特性。和图3特性有关的感兴趣的特性是电弧开断后的绝缘恢复特性,图4给出 SF_6 。

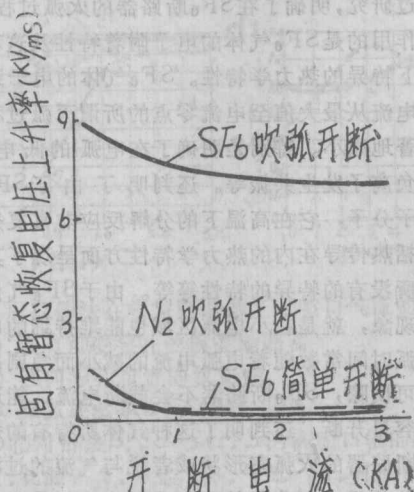


图3 SF_6 吹弧模型断路器开断近区故障性能

吹弧时的代表性的特性与N₂吹弧的比较。图8、4共同证明了SF₆气体优越的灭弧性能，说明SF₆和N₂等一般气体相比有很大的差异。

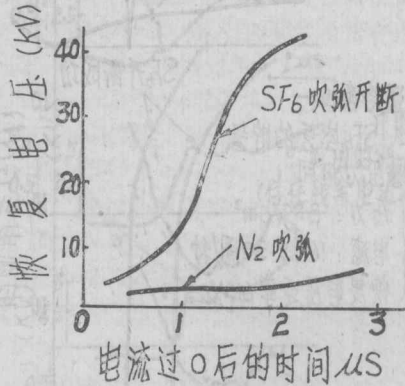


图4 SF₆吹弧模型断路器的绝缘恢复特性

(b) 气体混合的效果

SF₆和N₂混合气体的灭弧特性在理论上和实用上都是感兴趣的事。图5示出SF₆气体中慢慢混入N₂时开断特性的变化，画出了近区故障的开断界限。根据图5 N₂的混合比例不大于20%时，开断性能大体不变，但是超过20%时，性能就急剧地变坏。对于SF₆气体的纯度控制基准给出了20%这一大致标准。

如上所述，SF₆气体的开断性能十分优良，为了搞清如此优越的特性与SF₆的哪种因素有关，下面叙述电流零点附近的电弧过渡现象。

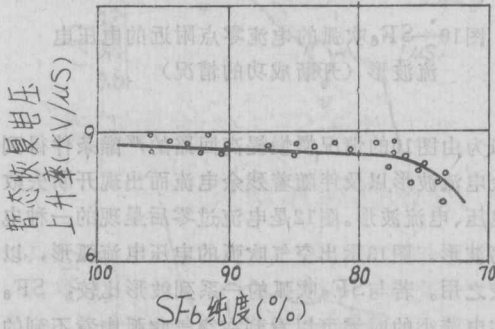


图5 SF₆—空气混合气体对恢复电压上升的开断极限的影响

2.3 SF₆断路器的灭弧过程

(a) 电弧时间常数

一般断路器的灭弧过程被认为是放电空间电导减小，最终在断路器断口间恢复绝缘的过程。这种电导的变化过程呈普通指数函数减小的特性，这个时间常数称之为电弧时间常数。

各种开断电弧有其固有的电弧时间常数，可以认为它给各种断路器的灭弧速度提供了一个大致的标准。例如，大气中的静止电弧，其电弧时间常数约为100~150微秒，在高速气流吹弧的空气断路器中，电弧时间常数减小到1微秒的数量级。由于气流吹弧，开断性能显著提高，这是众所周知的，而毋需引用空气断路器的例子来说明。时间常数的变化表示性能的提高。因为时间常数是灭弧性能的重要标志量，因而许多研究者早已对时间常数进行了精密的测定。作者也对各种开断电弧的时间常数进行了测定，图6是所得结果的一部份，示出没有气吹的静止SF₆中电弧的时间常数。由图6可以看出，即使静止的SF₆，它的电弧时间常数也显著变小，比起空气等性能优越二个数量级以上。对于空气吹弧的情况，其时间常数大体上不随电流大小而变，而对SF₆电弧，其电弧时间常数随电流大小而变化。图7给出SF₆及空气中静止电弧的时间常数和电流大小的关系。SF₆电弧中，0.1 A以下的电流时它的电弧时间常数非常小。图6中给出的SF₆电弧时间常数也是在这样小电流情况下测定的，这暗示了在SF₆气体中，电流变小之后，才能发挥显著的灭弧性能。

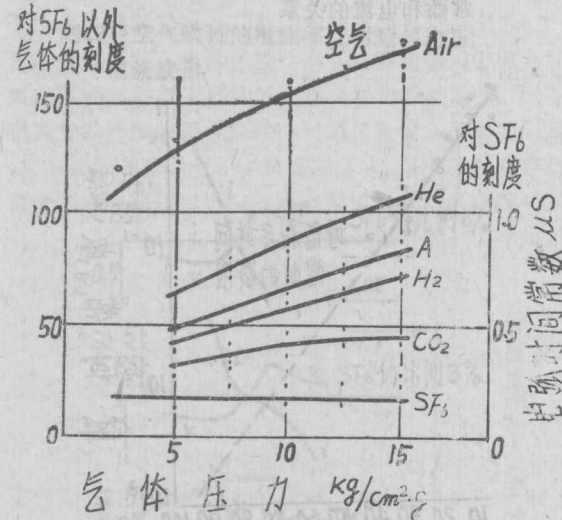


图6 包括SF₆在内的各种简单开断的电弧时间常数和压力的关系

图8系在吹弧模型断路器的贮气罐内把SF₆和N₂，按已知分压百分比混合成一定气压，用这种气体吹弧时所求得的时间常数。N₂中的SF₆的混合比达45~50%时，电弧时间常数减小到用现有测定器不能测定的程度。

图9是SF₆断路器电弧电导变化曲线，可看出在极近电流零点处的电导急剧地变化。为了比较，在图9

也示出同一条件下测定的空气断路器的特性，明确了SF₆气体和空气的差别。图8、9的时间常数或电导的变化都是在0.1A以下的电流值时测定的，因为在SF₆气体中，到了小电流区域才显示决定性的灭弧能力。

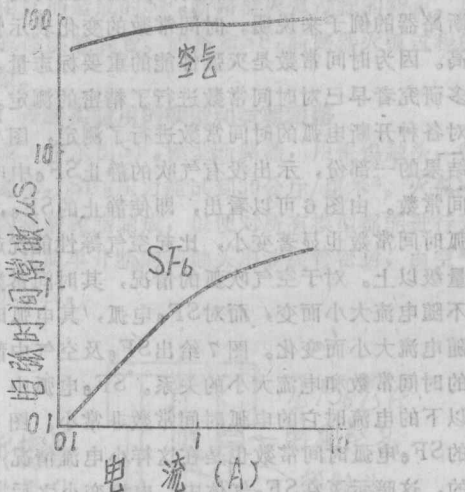


图7 SF₆和空气中简单开断的电弧时间常数和电流的关系

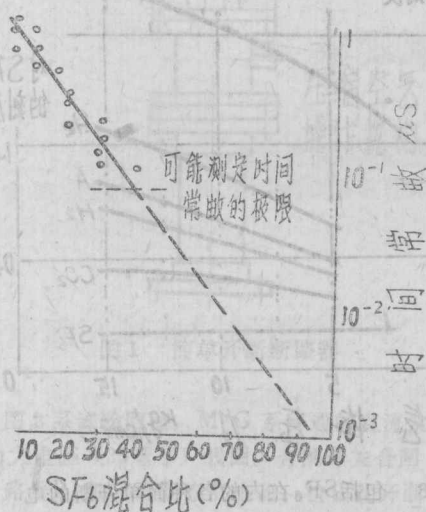


图8 空气吹弧的电弧时间常数和SF₆混合比的关系

(b) SF₆断路器灭弧过程中的特异现象

在(a)中所提到的时间常数是从小电流附近开断电导变化的电导求得的，但是通过在电流零点前后相当广的范围内观察电弧电压和电流的过渡变化，就能够得到SF₆电弧中特有的感兴趣的现象。图10~13是SF₆吹弧典型的电流零点附近的示波图，V为电弧电

压，i为电弧电流。图11是SF₆吹弧开断成功的例子。

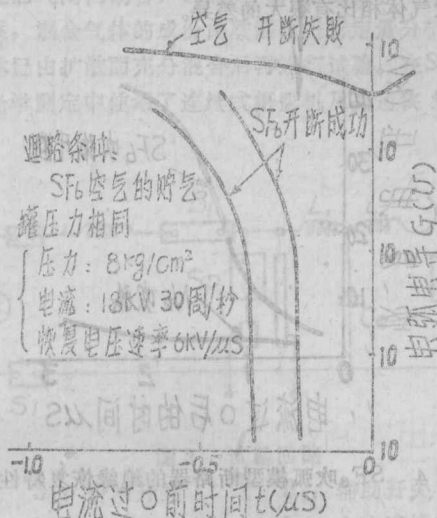


图9 电流零点附近电弧电导的变化

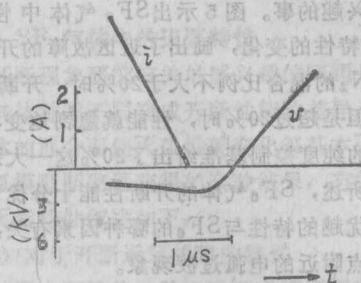


图10 SF₆吹弧的电流零点附近的电压电流波形(开断成功的情况)

图11为由图10的情况慢慢提高回路的严酷条件得到的残余电流波形以及伴随着残余电流而出现开断失败时的电压、电流波形。图12是电流过零后呈现的一种电弧振荡波形。图13示出空气吹弧的电压电流波形，以作比较之用。若与SF₆吹弧的一系列波形比较，SF₆吹弧在电流小的时候可以看到在空气吹弧中看不到的电流波形的突变点。在一系列示波图中a~e箭头所指处就是突变点，在开断成功的SF₆吹弧的电流终端必能看出这个突变点。由于在(a)项中的时间常数系在开断成功的电流波形终端的测定值，在SF₆电弧的情况下，时间常数和SF₆电弧中才有的电流突变现象间存在某些关系。如同上面a~e箭头所示，不仅在电流的终点，而且在波形的中间也出现电流波形的突变现象。可以看出电流突变的范围几乎都在0.5~0.7安以下。在静止的SF₆气体中的电弧，也可发现同样的现象，不管怎么样的开断方式，这种特异现象似乎是气