第 28 卷 第 13 期	中国电机工程学报	Vol.28 No.13 May 5, 2008
2008年5月5日	Proceedings of the CSEE	©2008 Chin.Soc.for Elec.Eng.

文章编号: 0258-8013 (2008) 13-0001-07 中图分类号: TM 216 文献标识码: A 学科分类号: 470-40

±800 kV 特高压直流 GIL 关键技术研究

范建斌¹,李 鹏¹,李金忠¹,汤 浩²,张乔根³,吴广宁² (1. 中国电力科学研究院,北京市 海淀区 100192; 2. 西南交通大学电气工程学院,四川省 成都市 610031; 3. 西安交通大学电气工程学院,陕西省 西安市 710049)

Study on Key Technology of ±800 kV UHVDC GIL

FAN Jian-bin¹, LI Peng¹, LI Jin-zhong¹, TANG Hao², ZHANG Qiao-gen³, WU Guang-ning²

(1. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China;

2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan Province, China;

3. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

ABSTRACT: In order to improve the flexibility of transmission corridor right of way in ultra-high voltage DC system, it is necessary to study DC gas insulated metal enclosed transmission line (GIL) which can replace sections of overhead lines. Based on international test results of small-scale electrode and considering the surface roughness, the equation which can be used for estimating the critical breakdown field is deduced by using Levenberg-Marquart method. During these tests related insulator of DC GIL, the test method using the cylinder-flat electrode instead of the coaxial cylinder electrode, is presented. The DC GIL electrode which includes particle trap, particle driver and field-well ring is designed. Electric field distribution of this electrode is also emulated. The results indicate the triple structure can limit the activity of the metal conducting particle.

KEY WORDS: ultra-high voltage DC; gas insulated metal enclosed transmission line; Levenberg-Marquart method; coaxial cylinder electrode; metal conducting particle

摘要:为了提高特高压直流输电线路走廊选择的灵活性, 研究可以替代部分架空输电线路的直流气体绝缘金属封 闭输电线路(gas insulated metal enclosed transmission line, GIL)具有重要意义。提出了在进行直流 GIL 绝缘子相关试 验时,以带绝缘子的圆柱平板电极替代带绝缘子的同轴圆 柱电极的试验方法。结合国外小尺寸电极试验结果,采用 麦夸特法拟合得到了考虑表面粗糙度的同轴圆柱电极 SFs 气体间隙下临界击穿场强估算公式。设计了包含微粒陷 阱、微粒驱赶电极和屏蔽环的直流 GIL 电极结构,并对此 进行了电场分布的仿真,结果表明此结构具有抑制金属导 电微粒运动的作用。

关键词: 特高压直流; 气体绝缘金属封闭输电线路; 麦夸特

法; 同轴圆柱电极; 金属导电微粒

0 引言

气体绝缘金属封闭输电线路以其输送容量大、 无绝缘老化问题、损耗低、电磁辐射低等优点成为 特殊环境下替代架空输电线路的首选方案,而且也 是解决大城市市区负荷不断增长而导致走廊紧张 问题的可选方案^[1]。截止目前为止,73~1200 kV 电 压等级的交流 GIL 在全世界范围内总长度近 200 km^[2]。由于特高压直流输电在西电东送途经垂 直落差大、电磁干扰需要严格限制、自然或人文景 观要求受到保护的区域,因此传统的架空输电线或 高压电缆将难以满足设计要求。为妥善解决这类问 题,开展可以隧道或直埋安装的直流 GIL 的研究具 有十分重要的意义^[3]。

国内外研究人员于 20 世纪 80 年代才开始对直 流气体绝缘开关装置母线(gas insulated switchgear bus)中绝缘子表面电荷积聚和金属导电微粒对设备 整体绝缘性能的影响进行研究,该研究内容是直流 GIS 的关键问题。研究结果表明长时间直流电压作 用下绝缘子会出现电荷积聚现象,积聚的电荷能使 电场分布发生畸变,并降低绝缘子的闪络电压;同 时金属导电微粒在直流电压作用下变得更为活跃, 在电极附近引发的微放电和堆积在绝缘子表面形 成的放电通道也能降低气体间隙击穿电压和绝缘 子闪络电压^[4-5],但国内外关于直流 GIL 的研究尚 未见报道。

本文借鉴国外已有直流气体绝缘开关装置(gas insulated switchgear, GIS)研究成果, 推导出大尺寸

同轴圆柱电极的临界击穿场强估算公式;通过仿真 计算,提出 SF₆ 气体间隙绝缘特性的试验方案,以 及基于圆柱平板电极的直流 GIL 的绝缘子外形结构 优化方案和金属导电微粒的抑制措施;同时设计了 ±800 kV 特高压直流 GIL 直线单元的整体绝缘结构。

1 特高压直流 GIL 的绝缘试验

1.1 试验电极设计

2

国外对于交流 GIL 和直流 GIS 的气体间隙绝缘 特性和绝缘子相关试验项目的研究,多采用同轴圆 柱电极和带绝缘子的同轴圆柱电极。然而在加工带 绝缘子的同轴圆柱电极时,容易在绝缘子与电极的 连接处出现气体间隙而引起局部放电,同时两端开 口的电极形式不便于进行试验过程中金属导电微 粒的撒放和微粒抑制结构的布置等操作。为此,本 研究小组在进行直流 GIL 绝缘子的外形结构优化 和直流 GIL 绝缘子处自由金属导电微粒的相关试 验项目时,采用带绝缘子的圆柱平板电极替代带绝 缘子的同轴圆柱电极。国外直流 GIS 研究和本研究 小组直流 GIL 研究所采用的电极结构分别如图1和 图 2 所示。

图 1 中的电极(a)和电极(b)分别为国外在进行 直流 GIS 气体间隙绝缘特性试验和绝缘子相关试验 时所采用的电极结构,其中电极(b)内嵌了一个盆式 绝缘子。图 2 中的电极(a)与图 1 中的电极(a)相同, 均为不带绝缘子的同轴圆柱电极,用于直流 GIL 气 体间隙绝缘特性试验;图 2 中的电极(b)为带绝缘子 的圆柱平板电极,用于直流 GIL 绝缘子相关试验。

圆柱平板电极与同轴圆柱电极在结构和电场分 布上的相似性,表明在进行直流 GIL 绝缘子相关试



(b) 用于直流 GIS 绝缘子相关试验的同轴圆柱电极





图 2 本直流 GIL 绝缘试验电极结构

Fig. 2 Electrode structures used for our DC GIL insulation test

验时,可以用圆柱平板电极替代同轴圆柱电极。这 两类电极结构的最大场强分别如式(1)和式(2)所示。

同轴圆柱电极最大场强 Emax 为

$$E_{\max} = \frac{U}{r\ln(R/r)} \tag{1}$$

圆柱平板电极最大场强为

$$E_{\max} = \frac{0.9U}{r\ln(R/r)} \tag{2}$$

式中: *R* 为外壳的内半径(或平板到导体中心的距 离); *r* 为内导体的半径,单位都为 cm。当 *R* 与 *r* 取相同值时,同轴圆柱电极的最大场强比圆柱平板 电极的最大电场强度仅大 10%。

在气体间隙绝缘试验和绝缘子闪络试验中,为 消除电极电场的边缘效应,使放电发生在电极的中 间,而不是电极的两端。本文利用有限元法进行了 仿真计算,选择 R 和 r 分别为 22.5 cm 和 7 cm 的同 轴圆柱电极作为仿真模型,将电极边缘取成曲率半 径为 3 cm 圆心角为 270°的弧形结构,中间导体两 端为半径为 10 cm 的球形,且切面的圆心角 270°, 在施加 3 361 kV 的直流电压时,可以得到它的电场 分布情况如图 3 所示。

在图 3(b)中曲线为同轴电极 A 点和 B 点间的 表面电场强度,横坐标为距 A 点的距离。由图 3 可以看出在中间导体表面和两端的球型表面上为 电场强度较大的区域,但最大场强位于导体的中 央段的表面,此时的最大场强值为 404.03 kV/cm, 而在 A 处和 B 处附近导体表面的电场强度被球型端 削弱,因此,电极的击穿将发生在同轴圆柱的中间 段,球型端将发生局部放电但不会击穿,消除了电 场边缘效应,此种电极能较好地模拟大尺寸 GIL 的 SF₆ 气体间隙放电。圆柱平板电极电场分布的仿真



结果与同轴圆柱电极类似,因此试验项目中使用的 同轴圆柱电极和圆柱平板电极都采用与此仿真模 型相同的边缘结构设计。

- 1.2 气体间隙的绝缘特性试验
- 1.2.1 同轴圆柱试验电极的选择条件

同轴圆柱电极和其它稍不均匀电场下空气的 击穿特点是:击穿前无电晕,极性效应不很明显, 直流击穿电压、工频击穿电压峰值及 50%冲击电压 几乎一致,且都有试验数据可供查询,而 SF₆气体 的自屏蔽效应不如空气好,使得 SF₆气体绝缘特性 对电场不均匀程度非常敏感,稍不均匀电场气体间 隙绝缘特性的规律与空气有所不同^[6],因此在选择 特高压直流电压试验电极尺寸时需要通过公式进 行推导。

1.2.2 同轴圆柱试验电极直流临界击穿场强的估算

图 4 为日本东京芝浦电器公司的 S. Menju, K. Takahashi 研究得出的外壳及中间导体直径分别为 20、8 cm 的同轴圆柱电极下 SF₆ 气体间隙的临界击 穿场强同气体压力的关系^[7]。由图 4 可知:直流电 压下的临界击穿场强具有极性效应,并随着气压的 增大而变得更加明显;交流电压下的临界击穿场强 略高于负极性直流电压下的临界击穿场强高,但比 正极性直流电压情况下的低,因此直流 GIL 的绝缘



3

图 4 不同气体压力下同轴圆柱电极临界击穿场强 Fig. 4 Critical breakdown voltage of coaxial cylinder electrode in different pressure

水平决定于负极性直流电压。

对于理想的同轴圆柱电极,击穿场强可用式(3) 表示^[8]:

$$E_0 = 88.5 \times 10 p_{\rm SF_6} \left(1 + 0.092 / \sqrt{10r p_{\rm SF_6}} \right) \tag{3}$$

式中 p_{SF_4} 为 SF₆气体的压力,单位为 MPa。

而在实际情况下,受电极表面粗糙度的影响, 击穿场强将会随之降低,因此需要对式(3)进行修 正。为此,本文给出了在考虑电极表面粗糙度的情 况下同轴圆柱电极 SF₆间隙的临界击穿场强公式, 如式(4)所示:

$$E_0 = 10K_1 p_{\rm SF_6} \left(1 + K_2 / \sqrt{10r p_{\rm SF_6}}\right) \tag{4}$$

式中 K_1 和 K_2 为待校正因数,式(4)更适合实际情况。

当同轴圆柱电极最大场强接近临界击穿场强时,电极上施加的电压 U 也就等于间隙击穿电压 U_b,即

$$U_b = E_0 r \ln(\frac{R}{r}) \tag{5}$$

根据图 4 所给试验数据及式(4),本文利用麦夸特法(Levenberg-Marquart Method)推出了考虑表面 粗糙度的同轴圆柱电极 SF₆间隙的临界击穿场强公 式,如式(6)和式(7)所示。

负极性直流电压下的临界击穿场强为

$$E_n = 35.7 \times 10 p_{\text{SF}_6} (1 + 1/\sqrt{10rp_{\text{SF}_6}}) \tag{6}$$

正极性直流电压下的临界击穿场强为

$$E_{p} = 80.4 \times 10 p_{SF_{6}} (1 + 0.137 / \sqrt{10 r p_{SF_{6}}})$$
(7)

式(6)、(7)与图 4 对应的曲线的相关系数分别为 0.989 和 0.999;均方差分别为 19.4 和 1.1。因此,根 据式(5)~(7)可以较准确地估算实际情况下大尺寸同 轴圆柱电极 SF₆间隙的击穿电压。对比式(3)和式(6)、 (7)可以看出在相同条件下受电极表面微观缺陷影 响,正极性直流电压下的临界击穿电压略低于理论 值,而在负极性直流电压下与理论值的偏差较大。 1.2.3 同轴圆柱电极参数的选择

目前现场投运的紧凑型交流 GIL 的电场不均 匀系数的范围为: 1.6~2.0。为选择适合±800 kV 的 特高压直流 GIL 同轴圆柱电极的尺寸,选用表 1 所 示的试验电极结构,其电场不均匀系数范围为 1.637、1.820 和 1.896,电极表面粗糙度选为 6.3 μm。

表1 同轴圆柱电极的参数及其直流击穿电压 Tab.1 Parameters of coaxial cylinder electrodes and their breakdown voltage in DC

	0					
组 别	外壳内半 径 <i>R</i> /cm	导体半 径 r/cm	电场不均 勾系数	正极性 直流击穿 电压/kV	负极性 直流击穿 电压/kV	理论 直流击穿 电压/kV
1	7.5	3	1.637	1 144	617	1 245
2	10	4	1.637	1 518	800	1 596
3	15	5	1.820	2 269	1 177	2 474
4	18	6	1.820	2715	1 390	2 966
5	22.5	7	1.896	3 361	1 700	3 673

利用式(3)、(5)~(7)可以估算出 0.5MPa 气体压 力下的正负极性直流击穿电压及理论直流击穿电 压,如表1所示。由表1数据可知,额定电压±1800 kV 的直流电压发生器和额定电压 6 000 kV 的冲击 电压发生器具备对以上尺寸的同轴圆柱电极结构 进行气体压力为 0~0.5 MPa 的 SF₆气体间隙击穿试 验的能力。以上电极计算得到的正极性直流击穿电 压与理论值差额不超过 10%。

各同轴圆柱电极下 SF₆气体间隙绝缘特性的试验内容如表 2 所示,其中气体压力为绝对压力。

表 2	试验电极 SF ₆ 气体间隙的耐压试验
Tab. 2	Withstand voltage test of electrode
	gap filled with SF ₆

气体压力 p/MPa		试验项目	•
0.1 0.2 0.3 0.4	各电极下的 直流击穿电压 (正极性和 负极性)	各电极下的雷 电击穿电压(正 极性和负极性)	各个电极下直流 叠加雷电冲击、 叠加操作冲击时 的击穿电压
0.5			

1.3 绝缘子外形结构的优化

对于直流 SF₆气体绝缘设备,在同轴圆柱气体 间隙部分为稍不均匀电场,而在绝缘件附近,表面 电荷积聚、绝缘子电阻分布和固体接触不良使电场 产生了畸变,使之成为 GIL 绝缘的薄弱环节^[9-11]。 日本 K. Nakanishi, A. Yoshioka 通过研究圆柱型环 氧树脂绝缘子表面电荷积聚对放电的影响得出,当 绝缘子表面电荷密度达到 400 μC/m²,直流电压下 的沿面击穿电压下降到初始值的一半^[12]。因此需要 对直流绝缘子进行外形结构优化,使绝缘子表面的 电场分布变得合理,从而使绝缘子的绝缘强度接近 气体间隙的水平。

GIL 的绝缘子内嵌于半封闭的同轴圆柱电极 内,由于在制造和安装此种结构时,绝缘子与金属 电极容易出现气体间隙,引起局部放电。若采用敞 开式的圆柱平板,在加工过程中容易避免这一问 题,也可以节省电极和绝缘子的原材料。因此与国 外研究人员在研究直流GIS绝缘子相关特性时所使 用的带绝缘子的同轴圆柱电极(图 1 中的电极 b)不 同,在进行直流GIL 绝缘子外形结构优化时,本文 采用带绝缘子的圆柱平板电极(图 2 中的电极 b)。选 用的试验绝缘子采用含有氧化铝填料的环氧树脂绝 缘子,绝缘子的横截面边缘为圆弧型。如图 5 所示, 两种类型的基本绝缘子,一类用于半圆锥盆式绝缘 子外形结构的优化,另一类用于支持绝缘子外形结 构的优化。电极尺寸为: R 为 15 cm, r 为 5 cm。



图 5 用于外形结构优化的基本绝缘子的外形 Fig. 5 Appearance of basic insulator used for outline structure optimization

直流 GIL 绝缘子需要进行外形结构优化的原 因一是因为直流电压下绝缘子的表面电场按电导 分布, 雷电和操作冲击下绝缘子的表面电场按电容 分布, 二是由于绝缘子表面电场法向分量越大, 电 荷越容易积聚, 切向分量越大, 绝缘子表面击穿电 压越低。因此特高压直流 GIL 绝缘子外形结构优化 的原则是应该保证绝缘子在直流电压和冲击电压 下电场在电极间的分布比较均匀, 法向分量和切向 分量折中选取^[13]。

绝缘子外形结构优化设计时的步骤为:①对选 定绝缘子的基本外形通过有限元分析法计算得到 绝缘子表面电场的法向和切向分量;②调整绝缘子 的外形及结构(例如加棱)使电场分布及分量分配合 理;③根据优化结果制作实际绝缘子并进行试验, 检验其直流电压和冲击电压下的绝缘特性。若发现 绝缘缺陷重复上述步骤再次进行优化,以使结果达 到最佳。

1.4 绝缘子附近自由金属导电微粒抑制

1.4.1 直流 GIL 微粒的抑制原因

在气体绝缘输电线路(GIL)中,金属导电微粒附 着在电极表面的现象是普遍存在的。金属微粒可能 是机械部件的摩擦或损伤造成的,也可能是现场组 装或工厂装备时遗留的。这些金属自由微粒带电后 在垂直向上的静电力和电场力的作用下将向绝缘 子方向移动^[14-15]。长期的直流电压作用下,导电微 粒将在绝缘子表面停留和堆积并缩短绝缘子表面 的绝缘距离,从而降低绝缘子的沿面放电电压。因 此在设计特高压直流 GIL 时绝缘子附近的自由金 属导电微粒需要进行限制。

1.4.2 直流 GIL 微粒抑制措施的布置

在交流 GIL 中仅采用了微粒陷阱来捕捉绝缘 子附近的金属导电微粒,但在直流电压下由于电场 力方向恒定, 微粒将可能直接运动到高压导体附近. 甚至绝缘子表面,因此直流 GIL 必须采用更有效的 微粒抑制措施。为专门设计出适合直流 GIL 的微粒 抑制措施,本研究小组在圆柱平板电极上设计了微 粒陷阱、屏蔽环和微粒驱赶电极结构,如图6所示。 其中将开有凹槽的金属铝板紧贴于外壳接地电极 的内表面,使电场局部削弱从而形成微粒陷阱。微 粒驱赶电极和屏蔽环分别由紧扣于高压导体电极 上空心圆台和环行铝制结构构成。在这种结构下当 金属微粒与圆台发生碰撞时,将有一水平方向的弹 力使金属微粒远离绝缘子落入微粒陷阱,另外在负 极性电压作用下出现于高压导体表面的"萤火 (Firefly)"^[16-17]现象也可以被金属屏蔽环抑制掉,其 原因在1.4.3节中给予了解释。

为将自由金属导体微粒组合抑制结构用于特 高压直流 GIL,需要对其微粒抑制效果进行试验验 证,试验方法为(选择的电极尺寸为: *R* 为 15 cm, *r* 为 5 cm):①在图 6 的环氧树脂绝缘子上涂上粘胶, 将一定量的直径 0.25 mm 的铝制颗粒置于电极结构 的平板上;②改变微粒陷阱、驱赶电极、屏蔽环的 位置,在不同的情况下给电极施加能使微粒发生运 动的相同的直流电压,加压一段时间后,比较各电 极结构中微粒在绝缘子和微粒陷阱中的分布情况; ③重复步骤②中试验,直至全部微粒能被微粒陷阱 捕捉,从而得出组合措施的最佳布置方案。因为圆 柱平板电极与同轴圆柱电极结构和电场分布上的



图 6 带金属导电微粒抑制措施的电极结构 Fig. 6 Electrode structure with suppression of metal conducting particle

相似性,圆柱平板电极上的这种金属导电微粒抑制 措施在应用于同轴结构的直流 GIL 中时,具有等同 的效果。

1.4.3 金属导电微粒抑制结构的仿真

为验证屏蔽环的具有去"萤火(Firefly)"功能, 以及微粒陷阱对金属导电微粒活性的抑制作用,选 用便于仿真计算的同轴圆柱电极模型进行有限元 电场分布的仿真,模型尺寸为:R为15 cm,r为5 cm; 微粒陷阱大小为:1 cm×1 cm; 微粒驱赶电极凸起处 为:1 cm; 屏蔽环凸起处为:0.8 cm,如图7 所示。 在施加2269 kV 的直流电压时,得到由 P 点到 S 点 高压导体电极表面的电场强度分布和由 Q 点到 T 点 接地外壳电极表面的电场强度分布如图 8 所示。

由图 7 和图 8 可知在 3 个微粒陷阱、和微粒驱 赶电极与屏蔽环的结合处,电场强度都被削弱了, 形成了一个凹陷的低电场区。由于微粒向上运动需 要满足电场大于临界浮起场强的条件,而微粒陷阱 所形成的低电场区将使此条件无法满足,因此金属 导电微粒一旦被微粒陷阱捕捉,微粒很难再次跃出 陷阱。在施加负极性的直流电压时,金属导电微粒 形成的"萤火(Firefly)"再次被微粒驱赶电极引导至 屏蔽环附近时,由于电场突然减弱,金属导电微粒 将在重力的作用下落入到其下的微粒陷阱当中,微 粒也将丧失再次运动能力。因此,仿真的结果表明









由微粒陷阱、屏蔽环和微粒驱赶电极组成的直流 GIL 结构,具有捕捉金属导电微粒和去"萤火 (Firefly)"现象的作用。

2 特高压直流 GIL 试验系统

在直流输变电系统中, 直流 GIL 除承受额定的 直流电压外, 通常还会受到雷电波和操作波的侵 袭, 因此需要在直流叠加冲击电压形式下对 SF₆气 体的绝缘特性进行研究^[18-19]。为研究特高压直流 GIL 在直流电压、冲击电压和直流叠加冲击电压下 SF₆ 气体间隙的绝缘性能,需要高电压等级直流和 冲击电压发生器,同时需要对试验回路进行特殊布 置, 如图 9 所示。

图9试验系统中的直流电压发生器的额定电压



图 9 特高压直流 GIL 试验系统及其试验回路 Fig. 9 Test system of UHVDC GIL and its test loop

为±1 800 kV, 额定电流为 0.2 A; 冲击电压发生器 额定电压为 6000 kV, 额定容量为 4.5 kJ。在进行直 流叠加冲击电压试验时,为使冲击回路和直流回路 互不影响,采用了隔离间隙。特殊研制的试验装置 可以容纳表1中所有尺寸的电极,并开有透紫外线 的石英玻璃观察窗口,通过高速相机可以观察放电 的发展过程和金属导电微粒的运动情况。

3 特高压直流下 GIL 的整体绝缘设计

直流 GIL 绝缘的设计目标是将沿面闪络电压 提高到尽量接近纯气体间隙击穿电压的水平,以使 绝缘的击穿在气体介质中发生,而不是沿着固体介 质表面。通过上述的试验及计算得到了特高压直流 下大尺寸同轴圆柱电极 SF₆气体间隙的放电电压, 优化了绝缘子的外形结构,改善了绝缘子附近的金 属导电微粒的抑制措施。综合这些试验研究结果可 以得到直流 GIL 直线单元模块如图 10 所示。

影响直流 GIL 的绝缘性能的重要因素是绝缘 •子表面电场不均匀分布和金属导电微粒在绝缘子 表面的附着,在图 10 结构中可以得到有效控制。 绝缘子表面的放电电压将得到提高,并接近于 SF₆ 气体间隙的绝缘水平,因此,直流 GIL 的综合绝缘 性能得到提高。



为保证研制的±800 kV 直流 GIL 在投入电网后 能安全、可靠地运行,将研制±800 kV 直流 GIL 实 体进行长期带电考核试验。特高压直流试验基地已 带电投运的±1 200 kV 试验线段,可以用于±800 kV 特高压直流 GIL 进行长期带电考核。一定时间内带 电考核可以验证设计、制造的质量,以便批量生产, 投入工程使用^[20]。

4 结论

直流 GIL 由于具有输送容量大、损耗小、无电 磁干扰、可地下传输等优点在我国的特高压直流输 电领域具有很大的应用空间。本文通过对直流 GIL 关键技术的研究得出结论如下:

(1)同轴圆柱电极与圆柱平板电极的外形结 构和电场分布相似,同轴圆柱电极的最大场强比圆 柱平板电极的最大电场强度仅大 10%,为提高防止 绝缘子与电极间出现气体间隙和便于试验操作,在 绝缘子外形结构优化和金属导电微粒抑制的相关 试验中,可用带绝缘子的圆柱平板电极替代带绝缘 子的同轴圆柱电极。

(2)当同轴圆柱电极在 *R* >22.5 cm, *r*>7 cm 时, 0.5 MPa 下 SF₆ 气体间隙的负极性直流击穿电压将 接近直流发生器的额定电压,因此特高压直流 GIL 相关试验只能选择在小尺寸的电极上进行。

(3) 通过仿真研究得出,将微粒陷阱、微粒 驱赶电极和屏蔽环三种结构同时布置在特高压直 流 GIL 同轴圆柱电极上,形成的低电场区能起到捕... 获金属导电微粒并抑制其运动的作用。

参考文献

- Benato B, Mario C D, Koch H. High-capability applications of long gas-insulated lines in structures[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 2007, 22(1):: 619-626.
- [2] 高凯,李莉华. 气体绝缘输电线路技术及应用[J]. 中国电力, 2007, 40(1): 84-88.
 Gao Kai, Li Lihua. Technology and application of gas-insulated

transmission lines[J]. Electric Power, 2007, 40(1): 84-88(in Chinese).

- [3] Schoeffner G, Graf R. Suitability of N₂-SF₆ gas mixtures for the application at gas insulated transmission lines GIL[C]. IEEE Bologna Power Tech Conference, Bologna, 2003: 6-11.
- [4] Cooke C M. Charging of insulator surfaces by ionization and transport in gases[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1988, EI-17(2): 172-178.
- [5] Anis H, Srivastava K D. Particle-initiated breakdown in compressed gas insulation under time-varying voltages[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and System, 1981, PAS-100(8): 3694-3702.
- [6] Okubo H, Yoshida M, Takahashi T, et al. Partial discharge measurement in a long distance SF₆ gas insulated transmission line (GIL)[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(3): 683-690.
- [7] Menju S, Takahashi K. DC dielectric strength of a SF₆ gas insulated system[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1978, PAS-97(1): 217-224.
- [8] 邱毓昌. GIS 装置及其绝缘技术[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994.
- [9] Nitta T, Nakanishi K. Charge accumulation on insulating spacers for HVDC GIS[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1991, 26(3): 418-427.
- [10] 孙昭英,李庆峰,宿志一,等.±800 kV 直流输电空气间隙外绝缘
 特性研究[J].中国电力,2006,39(10):47-51.
 Sun Zhaoying, Li Qingfeng, Su Zhiyi, et al. Study on external insulation of air gap of ±800 kV DC system[J]. Electric Power, 2006, 39(10):47-51(in Chinese).
- [11] Cooke C M. Bulk charging of epoxy insulation under DC stress [C]. IEEE Intern. Sympos. Electr. Insul., Boston, USA, 1980,

Pages(s): 220-227.

- [12] Nakanishi K, Yoshioka A, Arahata Y, et al. Surface charging on epoxy spacer at dc stress in compressed SF₆ gas[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and System, 1983, PAS-102(12): 3919-3927.
- [13] Hasegawa T, Yamaji K, Hatano M. Development of insulation structure and enhancement of insulation reliability of 500kV DC GIS[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(1): 194-202.
- [14] 汪沨,邱毓昌.直流气体绝缘开关装置绝缘设计的探讨[J].中国 电力,2002,35(11):47-50.
 Wang Feng, Qiu Yuchang. Discussion on the electrical insulation design of the HVDC Gas Insulated Switchgear[J]. Electric Power, 2002,35(11):47-50(in Chinese).
- [15] 余存仪.直流 SF。装置中支撑绝缘子冲击闪络特性的研究——导电 微粒的影响[J]. 高压电器, 1984, 5(4): 21-25.
 Yu Cunyi. Study of flashover on support insulator in DC SF₆ equipment[J]. High Voltage Apparatus, 1984, 5(4): 21-25(in Chinese).
- [16] Khan Y, Sakai K, Hara M, et al. Motion behavior and deactivation method of free-conduction particle around spacer between diverging conducting plates under DC voltage in atmospheric air[J]. IEEE Transactions on DEI, 2003, 10(3): 444-457.
- [17] Gaenger E B. Motion and effects of foreign particles in SF₆-insulated systems at high direct voltage[C]. Annual Report of CEIDP, Washington D.C., USA, 1979: 456-469.
- [18] Hasegawa T, Yamaji K, Hatano M, et al. DC dielectric characteristics and conception of insulation design for DC GIS[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(4): 1776-1782.
- [19] Evgeni Volpov, HVDC gas insulated apparatus: electric field specificity and insulation design concept[J]. IEEE Trans.on Electrical Insulation Magazine, 2002, 18(2): 7-14.
- [20] 范建斌,于永清,刘泽洪,等. ±800 kV 特高压直流输电标准体系的建立[J]. 电网技术,2006,30(7): 1-6.
 Fan Jianbin, Yu Yongqing, Liu Zehong, et al. Introduction of ±800 kV HVDC transmission standards system[J]. Power System Technology, 2006, 30(7): 1-6(in Chinese).

收稿日期: 2008-01-03。

作者简介:

范建斌(1967—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事输变电设备绝 缘及高压试验技术方面的研究工作, fanjb@epri.ac.cn;

李 鹏(1975—),男,高级工程师,主要从事输变电设备绝缘及高 压试验技术方面的研究工作,lipeng@epri.ac.cn:

李金忠(1974—),男,高级工程师,主要从事输变电设备绝缘及高 压试验技术方面的研究工作,lijz@epri.ac.cn;

汤 浩(1982—),男,硕士研究生,主要从事输变电设备绝缘及高 压试验技术方面的研究工作,tanghao@epri.ac.cn;

张乔根(1965—),男,教授,博士生导师,主要从事气体绝缘与放 电等离子体技术方面的研究工作;

吴广宁(1969—),男,教授,博士生导师,主要从事高电压与绝缘 技术方面的教学和研究工作。

(责任编辑 韩 蕾)

±800 kV特高压直流GIL关键技术研究



作者:	范建斌, 李鹏, 李金忠, 汤浩, 张乔根, 吴厂宁, <u>FAN</u> Jian-bin, LI Peng, <u>LI</u>
	Jin-zhong, TANG Hao, ZHANG Qiao-gen, WU Guang-ning
作者单位:	范建斌,李鹏,李金忠,FAN Jian-bin,LI Peng,LI Jin-zhong(中国电力科学研究院,北京市
	,海淀区,100192), 汤浩,吴广宁,TANG Hao,WU Guang-ning(西南交通大学电气工程学院,四
	川省,成都市,610031), 张乔根, ZHANG Qiao-gen (西安交通大学电气工程学院,陕西省,西安
	市,710049)
刊名:	中国电机工程学报ISTIC EI PKU
英文刊名:	PROCEEDINGS OF THE CHINESE SOCIETY FOR ELECTRICAL ENGINEERING
年,卷(期):	2008, 28(13)
被引用次数:	1次

参考文献(20条)

- 1. <u>Benato B. Mario C D. Koch H</u> <u>High-capability applications of long gas-insulated lines in structures</u> 2007(01)
- 2. 高凯. 李莉华 气体绝缘输电线路技术及应用[期刊论文]-中国电力 2007(01)
- $3.\,Schoeffner$ G.Graf R Suitability of N2-SF6 gas mixtures for the application at gas insulated

transmission lines GIL 2003

- 4. Cooke C M Charging of insulator surfaces by ionization and transport in gases 1988(02)
- 5. <u>Auls H. Srivastava K D</u> <u>Particle-initiated breakdown in compressed gas insulation under time-varying</u> voltages 1981(08)
- 6. <u>Okubo H. Yoshida M. Takahashi T</u> Partial discharge measurement in a long distance SF6 gas insulated transmission line(GIL) 1998(03)
- 7. Menju S. Takahashi K DC dielectric strength of a SF6 gas insulated system 1978(01)

8. 邱毓昌 GIS装置及其绝缘技术 1994

9. Nitta T. Nakanishi K Charge accumulation on insulating spacers for HVDC GIS 1991(03)

10. <u>孙昭英. 李庆峰. 宿志一</u> <u>±800</u> kV直流输电空气间隙外绝缘特性研究[期刊论文]-中国电力 2006(10)

- 11. Cooke C M Bulk charging of epoxy insulation under DC stress 1980
- 12. <u>Nakanishi K. Yoshioka A. Arahata Y</u> <u>Surface charging on epoxy spacer at de stress in compressed SF6</u> gas 1983(12)
- 13. <u>Hasegawa T. Yamaji K. Hatano M</u> <u>Development of insulation structure and enhancement of insulation</u> reliability of 500kV DC GIS 1997(01)
- 14. 汪讽. 邱毓昌 直流气体绝缘开关装置绝缘设计的探讨[期刊论文]-中国电力 2002(11)
- 15. 余存仪 直流SF6装置中支撑绝缘子冲击闪络特性的研究一导电微粒的影响[期刊论文]-高压电器 1984(04)
- 16. <u>KhnnY. SakaiK. HaraM</u> <u>Motion behavior and deactivation method of free-conduction particle around</u> spacer between diverging conducting plates under DC voltage in atmospheric air 2003(03)
- 17. <u>Gaenger E B</u> <u>Motion and effects of foreign particles in SF6-insulated systems at high direct</u> voltage 1979
- 18. <u>Hasegawa T. Yamaji K. Hatano M</u> <u>DC dielectric characteristics and conception of insulation design</u> for DC GIS 1996(04)
- 19. Evgeni Volpov HVDC gas insulated apparatus:electric field specificity and insulation design

20. 范建斌. 于永清. 刘泽洪 ±800 kV特高压直流输电标准体系的建立[期刊论文]-电网技术 2006(07)

引证文献(1条)

1. 贾志杰. 张乔根. 张斌. 范建斌. 李金忠. 李鹏 直流下SF_6中绝缘子的闪络特性[期刊论文]-高电压技术 2009(8)

本文链接: http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_zgdjgcxb200813001.aspx

授权使用: 西南交通大学(wfxnjtdx), 授权号: 39037b22-cbce-4b68-8eee-9e1a015e05b4

下载时间: 2010年10月25日