

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.06.032

复杂地形条件下的 GIL 工程设计

南振乐, 李振军, 刘朋飞

(西安西电开关电气有限公司, 西安 710077)

摘要: 气体绝缘金属封闭输电线路(GIL)因其传输容量大、可靠性高、电磁兼容性好等优点,正在广泛地应用于核电站、城市输电和大型水电站等场合。文中结合某个 GIL 工程的具体地形、布置情况,从总体布置、热胀冷缩变形补偿、支架布置和结构、转弯结构设计、气室划分、现场安装及试验等方面详尽阐述了 GIL 工程设计中的思路及重点考虑因素等,为工程技术人员进行 GIL 工程设计提供参考。

关键词: 复杂地形; 工程设计; GIL; 热胀冷缩

Engineering Design of GIL Used at Complex Terrain

NAN Zhenle, LI Zhenjun, LIU Pengfei

(Xi'an XD Switchgear Electric Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: Due to high reliability, high power transfer capacity and good EMC performance, gas insulated transmission lines (GIL) are now widely used in nuclear power stations, city center substations and underground transmission lines, as well as large hydropower stations. Taking example for a GIL project, this paper introduces the ideas and aspects that need to focus on during the design of a GIL project including the GIL layout, compensation for the thermal expansion of the tube, supports arrangement and structure, the structural design of turning, gas division, the installation on site and dielectric test on site etc. This paper may be references for GIL engineering design.

Key words: complex terrain; engineering design; gas insulated transmission(GIL); thermal expansion

0 引言

气体绝缘金属封闭输电线路(简称 GIL 或管道母线)具有输送容量大、损耗小、安全可靠、外界电磁干扰小、维护工作量小、适于地形大落差安装等优点^[1-2]。自 20 世纪 70 年代问世以来,使用量逐年增加,特别是本世纪初以来,随着电力工业发展迅速,发电站的装机容量越来越大,GIL 凭借自身的特点,在水电站、核电站以及直流换流站中的应用也越来越多。西安西电开关电气有限公司自 2010 年研制成功额定电压 550 kV GIL 以后,先后已有数千米的工程供货。文中结合某个 GIL 工程设计,探讨 GIL 的工程设计思路。

1 工程简介

文中所述的额定电压 550 kV GIL 工程,是采用

额定电压 550 kV 的 GIL 将 A、B 两个变电站的母线连接起来。由于两个变电站位于不同的海拔高度,并且相距数百米,GIL 将由处于海拔高度较低的 A 变电站的屋顶沿山坡爬升到海拔高度较高的 B 变电站,见图 1。

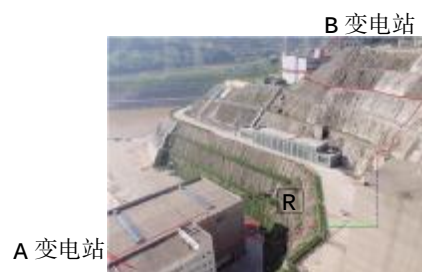


图 1 GIL 工程地形实景

Fig. 1 Terrain live action of the GIL programme

从图 1 中可以看出,由地势较低的 A 电站的房顶出线到地势较高的 B 电站,必须要跨过夹道、爬

收稿日期:2016-02-21; 修回日期:2016-04-22

上山坡。通过与工程设计单位联合对现场地形的多次考察,制定了多种 GIL 布置方案,GIL 的另一种布置方案见图 2。综合考虑工程整体造价、GIL 对整个厂区的景观及厂区内货物运输等方面的影响因素,最终确定了如图 1 中折线所示的敷设线路。

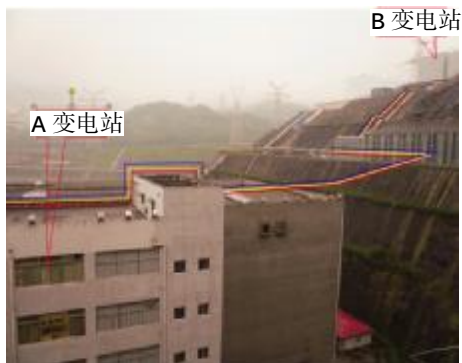


图 2 GIL 的另一种布置方案

Fig.2 Another arrangement of the plan for GIL

针对最终确定的图 1 所示的布置方案,为了不响应道路 R 的运输限高及美观,GIL 跨越标高 120 m 的路面 R 时采用沟道敷设;在由山坡跨过夹道到达 A 电站的房顶时,因跨度较大,距地面高度较高,并且考虑巡视和维护的方便,采用架设简易钢桥梁的形式支撑 GIL。GIL 从路面下的沟道中出来后,沿山坡进一步延伸降低高度,沿桥梁到达 A 电站的厂房后,沿厂房的外墙壁垂直爬升至厂房顶部。该设计使得 GIL 沿山坡降到更低处,然后再向上升高,虽然增加了 GIL 的长度,但由于钢桥梁的造价会随着架设的高度和跨度大幅增加,采用该设计后,钢桥梁架设简单、造价显著降低,工程总体造价也相对较低。

2 设计思路

对于确定的布置方案,现场测量后绘制了沿 GIL 线路展开与地势高度变化图和平面布置图,见图 3、4。图 3 中横向代表展开长度,纵向代表垂直高度,左侧从 A 电站起始,右侧终止于 B 电站;图 4 中仍然左侧从 A 电站起始,右侧终止于 B 电站,大写字母代表的各点与图 3 中的点对应一致。从图 3 中可以看出,整个 GIL 线路中有水平走向布置、倾斜爬坡走向布置和垂直走向布置等多种形式;同时从图 4 中可以看出,在同一水平面上,GIL 有不同角度的转弯形式。另外,根据现场的具体情况,即使水平走向布置的 GIL,也有固定安装于建筑物墙壁外侧的、固定于半山腰的小道边侧的、安装于沟道中的等不同要求。

针对该工程的特点,在 GIL 的设计中逐一考虑解决。

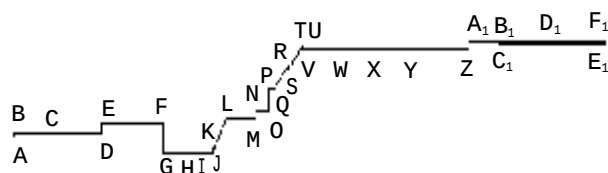


图 3 GIL 线路展开单线图

Fig.3 Monoline figure of the GIL line is unfolded

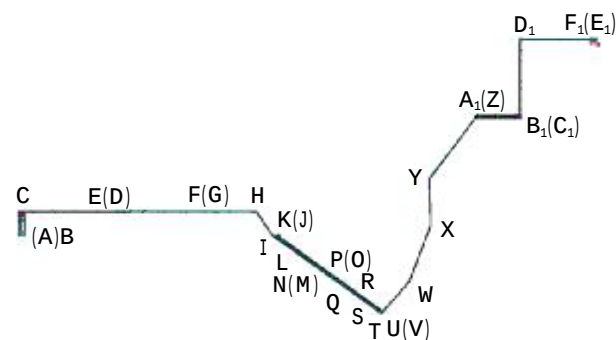


图 4 GIL 俯瞰布置图

Fig.4 Vertical view of the GIL

2.1 热胀冷缩补偿设计

GIL 在相关国家标准中称做刚性气体绝缘输电线路,其外壳和导体均为金属材质(通常为铝合金材质),因此其刚性较大。较长 GIL 固定安装于地面或混凝土墙面上,当温度发生变化时,因金属管线的线膨胀系数大于地面基础的线胀系数,GIL 金属管线必将产生更大的变形量,这样的变形量如果不能被吸收或补偿,巨大的变形应力将使管线损坏或支架变形,从而使 GIL 产品失效^[3]。因此,GIL 设计首先要考虑热胀冷缩的吸收和补偿问题。

该工程进行热胀冷缩补偿设计时,采用了角度调节型线性补偿装置——补偿单元。该补偿单元中间部分采用刚性外壳,两侧采用柔性单元见图 5。调节原理见图 6。假设将一端固定,另一端最大可转动角为 3° ,如果补偿单元的长度为 L ,则为其最大可调节量,可见 S 与 L 成线性关系。



图 5 补偿单元实物照片

Fig.5 Compensation unit photos

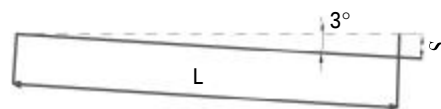


图 6 补偿单元工作原理示意图

Fig.6 Operating principle of the compensation unit

补偿单元在线路中的布置可采用“L”型、“n”

型、“Z”型等方式,主要是通过在线路转角处设置补偿单元并配合不同的支撑形式实现对线路热胀冷缩变形的变形方向控制及补偿;“L”型、“Z”型适合于 GIL 线路设计中有拐角部位时布置,工程设计中通常会将其布置在线路拐角处;“n”型布置适合于长距离直线设计的 GIL 线路,工程设计中根据线路热胀冷缩计算的结果确定其补偿的范围及布置部位。

该工程设计时依据 GIL 线路走势,选择“Z”型布置的补偿单元。在该工程线路展开单线图(图 3)中的 D-E 处设置“Z”型布置的补偿单元,其工作原理见图 7。当温度升高(或降低)时,由于在 C、E 两点处设有固定支撑,伸长(或收缩)只能向转角位置部位 D 处集中。由于这种补偿装置可以产生不大于 3° 的摆角变形,这样 D 处就可以发生双点划线所示的变形,从而吸收(或补偿)C-E 段线路温度变化引起的变形,避免了因变形无法释放而在母线段内部产生过大的应力,从而避免母线段损坏的情况发生,工程实例见图 8。

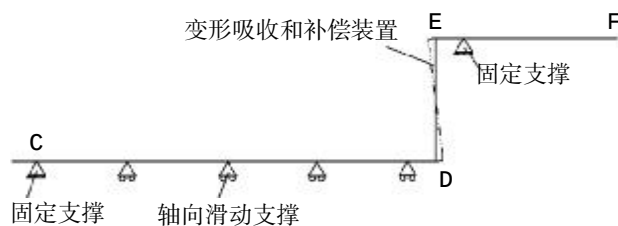


图 7 补偿单元的“Z”字型应用原理示例

Fig. 7 A “Z”font application principle of the compensation unit



图 8 补偿单元的“Z”字型工程应用

Fig. 8 A “Z”font engineering application of the compensation unit

热胀冷缩可能产生的变形量 S 的计算见文[3],通过设置合适的固定支撑位置以及选择合适的补偿装置的长度 L 即可实现不同温度变化要求的变形补偿。

2.2 转弯结构设计

GIL 为了适应各种复杂地形,在设计管线的布置走向时不尽是直线布置,也需要各种角度的弯角段形式,转弯结构设计可实现从 $90^\circ \sim 180^\circ$ 之间任意

角度。根据现场地形选择合适的转弯结构设计,使 GIL 管线布置更加具有灵活性^[4-9]。

该工程从 A 电站到 B 电站之间地形复杂,为了使管线布置在安全可靠的前提下经济性最好,在进行管线弯角段设计时,设计了从 $90^\circ \sim 165^\circ$ 之间共 8 种角度的转弯结构,见图 9。



图 9 不同角度的转弯布置

Fig. 9 Different angles of the turning of the arrangement

对于外壳转弯结构主要采用焊接形式,管材的端头切割成所需角度的 $1/2$ 的角度,然后直接拼焊即可实现,见图 10(a);导体的转弯主要采用拼焊转弯导体的结构形式,见图 10(b)。

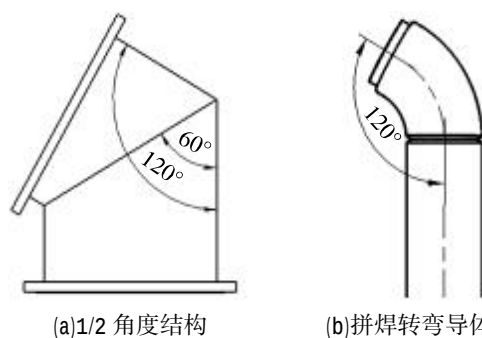


图 10 转弯结构设计示

Fig. 10 A sign for turning of the structure design

2.3 支撑结构设计

GIL 外壳支撑方式分为固定式和滑动式。固定支撑采用螺栓将管线与支撑构架连接成一体,限制管线相对支架发生位移。而滑动支撑则采用特殊结构,既保证支架对管线的支撑作用,同时又保证管线沿轴线方向可以与支架产生相对位移,即管线可以在支架上滑动。通常固定支架不仅承受所支撑的 GIL 管线的重力,还要承受 GIL 热胀冷缩变形时的滑动阻力所产生的弯矩,因此设计时要保证它具有足够的强度和刚性;而滑动支撑主要承受所支撑的 GIL 管线的重力,强度及刚性要求较低,但是结构上要考虑尽可能减小管线在支架上滑动时的阻力,从而减小 GIL 管线滑动时对支架产生的弯矩,降低对支架的刚性要求。

支架的设计除考虑刚性及强度要求外,还要结合工程的具体情况,设计不同的结构形式^[10-13]。该工

程的支架安装位置非常复杂,有的厂房墙壁立面上水平走向支撑、有的厂房墙壁立面上垂直走向支撑、有的在狭窄的道路边上支撑、还有在斜坡支撑等。因此,依据不同的支撑需求设计相应支撑结构,如在厂房墙壁上水平走向的滑动式支撑采用“一”字型支架,见图 11(a),结构简单、安装方便;在厂房墙壁上水平走向的固定式支撑采用“木”字型支架,见图 11(b);强度、刚性好,水平方向可承受较大的弯矩;狭窄道路边上的支撑采用“F”型支架,见图 11(c);节约水平面的空间,减少对狭窄路面的占用;当空间布置不受限制时,采用“π”型支架,便于施工和后续的巡视维护,见图 11(d)。

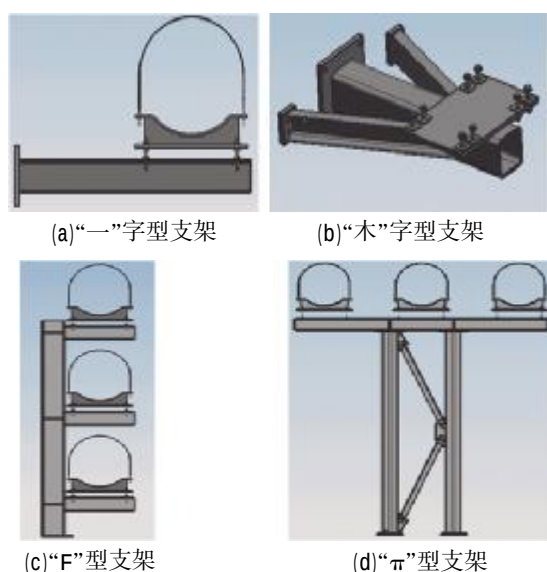


图 11 不同形式的支架

Fig. 11 Different forms of support

2.4 气室划分

由于 GIL 的特点,其气室划分应尽可能大一些,但单个气室的长度通常不超过 120 m。这样划分原则主要是考虑 GIL 的高可靠性、设备的总体造价以及气体注入、回收所需的时间等。但结合具体工程设计,每个气室的划分还需要考虑安装的方便性, GIL 内部气体注入、检查的方便性,现场试验的可实施性及方便性等因素。具体来讲,气室的充气阀门应设置在人员及充、放气设备方便到达的地方;现场试验的施压位置应设在人员及试验设备容易到达的地方等^[14-17]。

该工程的气室划分见图 12。10 个气隔绝缘子将整条 GIL 线路分隔成 11 个气室,从图 12 中的左侧至右侧,分别编号为 1-11。

编号为 1、11 的两个气室只有 1 m 多长,主要是考虑 GIL 单独完成现场工频耐压试验后再与两端电站内的 GIS 设备连接时的方便,从而避免因

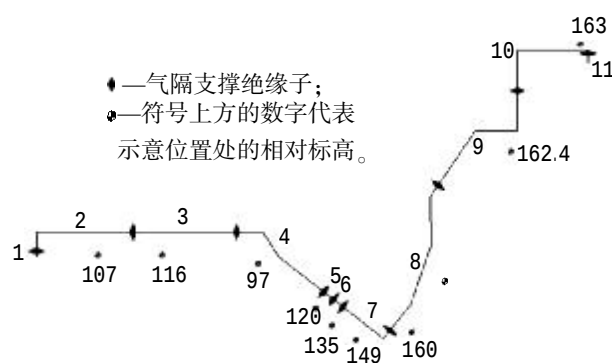


图 12 气室的分隔示意图

Fig. 12 Gas cell separated sketch

GIL 施工而影响 GIS 的正常运行;编号为 5、6 的两个气室也只有 1 m 多长,主要是考虑现场耐压试验从该处(标高 120 m 的宽阔道路 R,便于试验设备安置)施加电压,试验完成后拆除试验套管时对已通过试验的设备影响最小。

另外,这些气室的划分也充分考虑了气体注入及检测的方便。编号 1-3 的 GIL 气室可以在 A 电站的 GIS 厂房顶上完成气体注入及检测;编号 4-8 的 GIL 气室可以在标高 120 m 的宽阔道路 R 上完成气体注入及检测;编号 9-11 的 GIL 气室可以在 B 电站的 GIS 厂房内部完成气体注入及检测。

3 现场安装及试验

3.1 现场安装

该 550 kV GIL 工程的安装位置包括厂房屋顶、厂房侧墙、空中钢桥梁、地沟、斜坡、弯曲窄道等多种地形,有些地方汽车无法将 GIL 管线直接运输到位,有些地方无法使用通用的起吊设备^[18-19]。针对这些特殊的情况,有些部位单个运输单独吊装,有些部位多个运输单元预先装配在一起后组合吊装,见图 13(a);并设计了许多专用的工装、工具等,以完成现场的安装工作,见图 13(b)、(c)。



图 13 不同的吊装形式及专用工装

Fig. 13 Different hoisting form and dedicated tooling

3.2 现场试验

GIL 主体的现场试验主要包括主回路电阻测量、气密性检查、内部 SF₆ 水分质量分数测量、控制

和检测设备的校验、耐压试验等。其他现场试验都没有过多的特别要求,也相对容易完成,唯有耐压试验需要大型的变压器设备。因此,在设计时必须重点考虑。

对于现场耐压试验,首先要考虑 GIL 的长度,计算其电容量,并根据其电容量选择合适容量的试验变压器;若 GIL 线路太长、电容量太大,选取试验变压器时要与用户和设计院提前协商,或者考虑分段进行 GIL 的耐压试验^[20-21];其次,试验电压的施加位置(即试验套管的安装位置)也要充分考虑,尽量选择地势平坦且宽阔的地方,方便放置试验设备,同时还要考虑试验套管距离周围的物体有足够的安全距离等。

针对此工程地势一端是山体而另一端是厂房的具体情况,将电压施加位置设置在标高 120 m 的宽阔道路上,见图 14。



(a)电压施加位置(圆圈内)

(b)准备进行耐压试验

图 14 现场工频耐压试验

Fig. 14 Power-frequency voltage withstand test of the scene

4 结语

由于精心的现场勘测、多个布置方案的比较论证以及设计中各个环节的周全、细致的考虑,文中所述的 GIL 工程已顺利完成了安装和各项现场试验。整个工程的设计、建设取得了用户的好评。至今,该工程已安全投入运行近一年时间,再次说明工程设计的成功,图 15 为该工程投运后的全景。



图 15 工程全景

Fig. 15 Engineering panorama

参考文献:

- [1] 王晋根. 刚性气体绝缘输电线路(GIL)市场与技术探讨[J]. 电器工业 2009(9): 33-36.
WANG Jingen. Discussion on market and technology of

- rigid gas-insulated transmission lines[J]. China Electrical Equipment Industry, 2009(9): 33-36.
- [2] KOCH H. 世界上第一条新型气体绝缘高压输电线路[J]. 国际电力, 2001, 5(2): 29-32.
Koch H. The world's first high-voltage gas-insulated transmission line of the second generation[J]. International Electric Power for China, 2001, 5(2): 29-32.
- [3] 朱雷鹤, 李 祥. 浅析 500 kV 瓶变旁 GIL 管道母线热伸缩问题及处理[J]. 浙江电力, 2006(5): 49-51.
ZHU Leihe, LI Xiang. Disposal method of GIL pipe bus thermal stretching in 500 kV Pingyao substation[J]. Zhejiang Electric Power, 2006(5): 49-51.
- [4] 范建斌. 气体绝缘金属封闭输电线路及其应用[J]. 中国电力, 2008, 41(8): 38-43.
FAN Jianbin. Gas insulated metal enclosed transmission line (GIL) and its application[J]. Electric Power, 2008, 41(8): 38-43.
- [5] 高 凯, 李莉华. 气体绝缘输电线路技术及其应用[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.
- [6] 马仲鸣, 李六零, BOWMAN G, 等. 800 kV 气体绝缘金属封闭输电线路及竖井安装[J]. 中国电力, 2008, 41(8): 44-47.
MA Zhongming, LI Liuling, BOWMAN G, et al. 800 kV gas insulated transmission lines and shaft installation[J]. Electric Power, 2008, 41(8): 44-47.
- [7] 杨佰军. CGIT 在岭澳核电站的应用[J]. 水电电气, 2002 (1-2): 118-124.
YANG Baijun. CGIT applied in Ling'ao nuclear power stations[J]. Hydro Electric, 2002(1-2): 118-124.
- [8] 刘兆林. 500 kV 气体绝缘金属封闭输电线路在华东电网的应用[J]. 华东电力, 2005, 33(12): 81-83.
LIU Zhaolin. 500 kV gas insulated transmission lines applied in east China power system[J]. East China Electricity, 2005, 33(12): 81-83.
- [9] RIEDL J, HILLERS T. Gas insulated transmission lines[J]. IEEE Power Engineering Review, 2000, 20(9): 15-16.
- [10] DL/T 978—2005 气体绝缘金属封闭输电线路技术条件[S]. 2005.
DL/T 978—2005 Specification for gas-insulated metal-enclosed transmission line[S]. 2005.
- [11] WAIANAE Y, MORI S, NINOMIYA K. et al. Construction of first gas insulated transmission line in Japan[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, PAS-100(10): 4319-4329.
- [12] GB/T 22383—2008 额定电压 72.5 kV 及以上刚性气体绝缘输电线路[S]. 2008.
GB/T 22383—2008 Rigid gas-insulated transmission lines for rated voltage of 72.5 kV and above[S]. 2008.

- [13] 黎 斌.SF₆ 高压电器设计[M]. 北京:机械工业出版社, 2003.
LI Bin. The design of SF₆ high voltage apparatus[M]. Beijing:China Machine Press, 2003.
- [14] 王湘汉,汪 枫,邱毓昌.气体绝缘传输线的近期发展动向[J]. 高压电器, 2008, 44(1): 69-72.
WANG Xianghan, WANG Feng, QIU Yuchang. Recent development trend of gas insulated line[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(1): 69-72.
- [15] 阮全荣,施 围,桑志强. 750 kV GIL 在拉西瓦水电站应用需要考虑的问题[J]. 高压电器, 2003, 39(4): 66-69.
RUAN Quanrong, SHI Wei, SANG Zhiqiang. Questions to be considered for using 750 kV GIL at Laxiwa hydro-electric power station[J]. High Voltage Apparatus, 2003, 39(4): 66-69.
- [16] 阮全荣,李 晖,刘国锋,等. 高落差垂直竖井 GIL 隔室设置的研究[J]. 高压电器, 2010, 46(8): 52-55.
RUAN Quanrong, LI Hui, LIU Guofeng et al. High head vertical shaft GIL compartment set research[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(8): 52-55.
- [17] 桑志强,康本贤,柳晓林,等. 800 kV GIL 工程设计研究[J]. 水电电气, 2008, 144(2): 10-14.
SANG Zhiqiang, KANG Benxian, LIU Xiaolin, et al. Engineering design and research of 800 kV GIL[J]. Hydro Electric, 2008, 144(2): 10-14.
- [18] BENATO R, DI MARIO C, KOCH H. High-capability applications of long gas-insulated lines in structures[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1): 619-626.
- [19] KUNZE D, KNIERIM V, 王学刚. 用于发电中心大规模电力输送的气体绝缘输电线路[J]. 中国电力, 2007, 40(9): 87-90.
KUNZE D, KNIERIM V, WANG Xuegang. Gas insulated transmission line: bulk power transmission in power generation centers[J]. Electric Power, 2007, 40(9): 87-90.
- [20] OKUBO H, HOSHINO T. Institute of electric and electronic engineer. insulation design and on-site testing method for a long distance, gas insulated transmission line (GIL)[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1998(14): 6.
- [21] BAER G P, DIESSNER A, LUXA G F. 420 kV SF₆ insulated tubular bus for the wehr pumped storage plant, electric tests[J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1976, 95(2): 469-477.

南振乐(1971—),男,高级主任工程师,主要从事断路器、GIS及GIL的新产品研发工作。

李振军(1975—),男,工程师,现从事GIS与GIL结构设计研究工作。

刘朋飞(1985—),男,工程师,现从事GIL结构设计研究及工程设计工作。