

DOI: 10.7652/xjtub201805018

节点解析法研究特高压廊管气体绝缘 输电线路的热特性

徐亮, 龙艳, 张高爽, 高建民, 李云龙

(西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 根据能量守恒定理发展了一种求解廊管特高压气体绝缘输电线路(GIL)热特性的节点解析法,并基于已有文献中的实验数据验证了该方法具有较高的准确性。利用该方法,结合苏通 GIL 廊管工程运行工况特点,以国产 1 100 kV 的 GIL 为研究对象,研究了 GIL 材质、环境温度(15~40℃)、负载电流(2~8 kA)、管道内压(0.1~1 MPa)等参数对 GIL 热特性的影响。结果表明:A 类材料 GIL 传热性能优于 B 类材料 GIL;环境温度与 GIL 温度呈线性正比关系;负载电流越大,GIL 的温度越高,GIL 温度与负载电流间的关系近似呈指数函数形式;管道内压只对导体温度有影响,对外壳温度无影响,同时随管道内压的增大导体温度降低,但是导体温降较小。该方法和计算结果为 GIL 热可靠性设计与温度监测系统设计提供了理论依据。

关键词: 气体绝缘输电线路;热特性;解析法;电热耦合

中图分类号: TM247 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)05-0125-08

Thermal Characteristics Study of EHV Gas Insulated Transmission Lines in Pipe Gallery Using Node Analysis Method

XU Liang, LONG Yan, ZHANG Gaoshuang, GAO Jianmin, LI Yunlong

(State Key Laboratory of Mechanical Manufacturing Systems Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Based on the energy conservation theorem, a nodal analysis method for solving the thermal characteristics of EHV gas insulated transmission line (GIL) in pipe gallery is presented. According to the experimental data in the literature, it has been proved that this method has high accuracy. Using this method and combining with the characteristics of Sutong GIL pipe rack project running condition, the effects of environment temperature (15-40℃), load current (2-8 kA), pipe pressure (0.1-1 MPa) and other parameters on the thermal characteristics of GIL are studied with the domestic 1 100 kV GIL as the research object. The results show that the GIL heat transfer performance of A-type materials is better than B-type materials. The ambient temperature is linear with the conductor and enclosure temperature. The higher the load current, the higher the temperature of the conductor and the enclosure, and the relationship between GIL temperature and load current approximates an exponential function. The internal pressure inside the pipe only affects the conductor temperature and has no effect on the enclosure temperature. The conductor temperature decreases with the internal pressure, but the temperature drop is relatively small. The proposed method and calculation results may provide a theoretical basis for

收稿日期: 2017-07-21。 作者简介: 徐亮(1980—),男,副教授,硕士生导师。 基金项目: 国家电网长距离特高压 GIL 设备可靠性分析研究项目(SGTYHT/15-JS-191)。

网络出版时间: 2018-03-01 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20180301.1002.004.html>

the design of GIL thermal reliability and temperature monitoring system.

Keywords: gas-insulated transmission line; thermal characteristics; analytical method; electrothermal coupling

淮南—南京—上海 1 100 kV 特高压交流输电工程是继苏通大桥、沪崇苏大通道、沪通长江大桥后,第4个在长江南通段实施的“国字号”重大越江工程。该项工程采用特高压气体绝缘输电线路(GIL)技术,是世界上电压等级最高、输送容量最大、技术水平最高的超长距离 GIL 创新工程,也是特高压输电线路第一次通过江底隧道穿越长江,是华东特高压交流环网合环运行的“咽喉要道”和控制性工程。苏通 GIL 综合管廊工程管廊上层敷设两回 1 100 kV GIL,单相长度 5.8 km,同时还可布置通信、有线电视等市政通用管线,下层预留两回 500 kV 电缆区^[1-2]。GIL 是一种长距离大功率输电装置,与传统电缆输电相比,具有容量大、损耗低、使用寿命长等优点^[3-4]。常见的 GIL 故障如放电、绝缘子击穿等发生时都伴随有导体或外壳温度异常等现象^[5-7]。不仅如此,GIL 母线温度过高还会发生母线拱顶,甚至盆式绝缘子破裂、盆子防水胶开裂等故障^[8-9]。GIL 热特性的研究对提高其热可靠性和保障安全稳定运行具有重要意义。

在实验研究方面,Chakir 等对单相直埋式 GIL 进行了长期的观测研究,得到 GIL 外壳温度和位移随时间的变化关系,并对直埋 GIL 进行建模和仿真,仿真结果与实验结果一致性很高^[10]。Cookson 等在绝缘气体分别为纯 SF₆ 气体和体积比为 1:1 的 N₂ 和 SF₆ 气体时,对长为 6.1 m 的 1 200 kV 气体绝缘输电线路的热特性进行了研究,还对 GIL 母线不同截面导体、外壳顶端和底端温差进行了研究,结果表明导体和外壳顶端的温度稍高于底端温度^[11]。Mizukami 等克服了传统 GIL 系统的问题,设计制造了气体绝缘输电母线单元,在 SF₆ 气压分别为 0.1 和 0.35 MPa,负载电流分别为 1.8、2.5、3 kA 等工况下对该气体绝缘输电单元的热特性进行了实验研究,并在上述工况下对温升结果进行了计算,计算结果与实验结果吻合^[12]。

在数值有限元计算方法方面,Ham 等针对单相和三相 GIL,利用五阶龙格库塔法预测了负载电流为 2~8 kA 时 GIL 导体和外壳的温度,对负载电流为 8 kA 时的 GIL 进行了实验,并对 8 kA GIL 建立模型进行仿真计算,研究发现解析计算结果、仿真结果与实验结果相比误差很小^[13]。Sun 等建立了一

种解析方法用于研究 GIL 的电热耦合问题,该方法通过计算功率损耗和热量,考虑对流和辐射传热对 GIL 进行热分析,还将解析计算结果与有限元仿真结果进行了比较,两者间具有一致性^[14]。

综上所述,国内有关特高压 GIL 热特性的研究相对来说还不够完善。通过实验方法进行 GIL 热特性的研究成本非常高,有限元仿真方法计算量大,一般不能作为子程序嵌入到 GIL 温度监测系统中。本文发展了一种计算快捷、可嵌入系统程序的节点解析法。基于文献[13]中的实验数据,对该方法的计算准确性进行了验证。利用该方法,根据苏通 GIL 管廊工程的运行工况特点,以某国产 1 100 kV 的 GIL 产品为研究对象,分析了 GIL 材质、环境温度、负载电流、不同管道内压等对其热特性的影响。

1 基于能量守恒的节点解析法

1.1 GIL 传热模型

由于焦耳热损,GIL 在运行的过程中一直处于发热状态,其中导体和外壳为热源,导体和外壳的功率损耗产生的热量使其温度升高,并向周围环境散热。当发热量与散热量相等时,GIL 处于热稳定状态,这时导体和外壳的温度不再发生变化,即稳定温度场^[13]。

处于热稳定状态时,导体的损耗以辐射方式和自然对流方式传递给外壳,GIL 总体损耗以辐射和自然对流方式传递给周围空气,二者处于平衡状态,其热量传递模型如图 1 所示,满足以下热平衡方程

$$P_c + P_t = Q_{tc} + Q_{tr} \quad (1)$$

$$P_c = Q_{cc} + Q_{cr} \quad (2)$$

式中: P_c 和 P_t 分别为导体和外壳每米的功率损耗; Q_{tc} 为外壳与空气的自然对流换热量; Q_{tr} 为外壳外表面的辐射散热量; Q_{cc} 为导体和外壳间的对流换热量; Q_{cr} 为导体外表面的辐射散热量。

图 2 给出了热量传递等效节点图。导体作为热源,所产生的功率损耗引起导体温度 T_c 升高,导体和外壳间 SF₆ 气体受 T_c 升高的影响,要进行热量 Q_c 传递, T_c 稳定时产生热平衡,即 $P_c = Q_c$ 。受感应电场的影响,外壳也将产生功率损耗, Q_c 与 P_t 共同作用于环境空气,使环境空气进行散热,此热量 Q_c 传递过程最终也将达到平衡,即 $P_c + P_t = Q_t$ 。

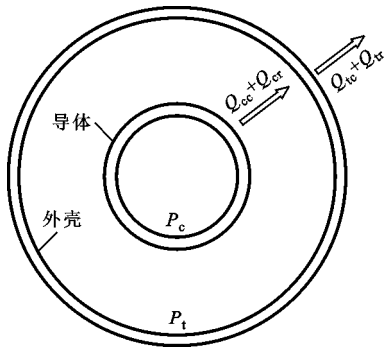
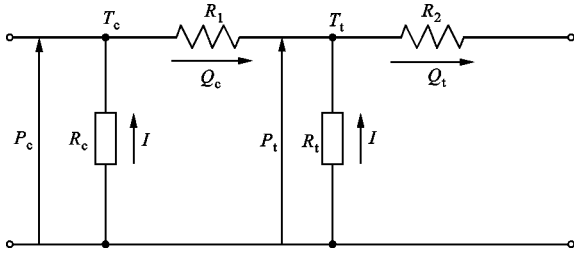


图1 热量传递模型图



R_1 表示导体和外壳间的热阻; R_2 表示 SF_6 气体和环境空气间的热阻; I 为额定电流; R_c 和 R_t 分别为单相导体和外壳的电阻; T_t 为外壳的温度

图2 热量传递等效节点图

1.2 GIL 的功率损耗

GIL 的损耗是导体和外壳损耗之和。计算导体功率损耗时,因其邻近效应系数为 1 且阻抗较小,故不考虑不平衡电流的影响。计算外壳功率损耗时,因 GIL 采用全连式结构,涡流损耗很小,可忽略不计。由电磁感应引起的 GIL 外壳接地线、外壳、大地间的环流损耗量与具体的施工工程有关,一般来说该耗散量也很小,本文按照严酷工况对 GIL 功率损耗进行计算,外壳的电磁感应电流应取为导体通入电流的有效值,又因为本文研究的苏通 1 100 kV GIL 的长度远远超过 20 m,故外壳的感应电流采用导体额定电流^[15]。

流经导体的电流值与外壳的感应电流值相等,导体与外壳的功率损耗可表示为

$$P_c = I^2 R_c \quad (3)$$

$$P_t = I^2 R_t \quad (4)$$

其中

$$R_c = K_c \frac{\rho_c [1 + \alpha_c (T_c - T_a)]}{\pi D_{ci} C_c} \quad (5)$$

$$K_c = 1 + 0.03 \left\{ \frac{[1 - 0.0016(T_c - 75)] C_c}{10} \right\}^{3.75} \cdot \left\{ 1 - \frac{[1 - 0.0016(T_c - 75)] C_c}{D_{ci} + 2C_c} \right\}^{1.5} \quad (6)$$

$$R_t = K_t \frac{\rho_t [1 + \alpha_t (T_t - T_a)]}{\pi D_{ti} C_t} \quad (7)$$

$$K_t = 1 + 0.03 \left\{ \frac{[1 - 0.0016(T_t - 75)] C_t}{10} \right\}^{3.75} \cdot \left\{ 1 + \frac{[1 - 0.0016(T_t - 75)] C_t}{D_{ti} + 2C_t} \right\} \quad (8)$$

式中: K_c 为导体的集肤效应系数; ρ_c 为导体的直流电阻率; T_a 为环境温度; α_c 为导体的电阻温度系数; D_{ci} 为导体内径; C_c 为导体壁厚; K_t 为外壳的集肤效应系数; ρ_t 为外壳的直流电阻率; α_t 为外壳的电阻温度系数; D_{ti} 为外壳内径; C_t 为外壳壁厚。

1.3 GIL 传递的热量

对于不同的敷设方式,GIL 的热计算各不相同。本文主要考虑水平敷设方式,且 GIL 不受太阳辐射作用。外壳与外界空气间的对流方式不同,外壳的对流散热量也不相等,本文主要考虑外壳与外界空气的自然对流。GIL 在水平敷设时,沿长度方向的温度分布是均匀的,取单位长度 GIL 母线作为计算对象。

导体与外壳封闭空间内的 SF_6 绝缘气体因温度差异产生自然对流,因此两者之间的换热量取决于 Pr 和 Gr ,即

$$Pr = \frac{C_p \mu}{\lambda} \quad (9)$$

$$Gr = \frac{g \beta (R_{ti} - R_{co})^3 (T_c - T_t)}{\mu^2} \quad (10)$$

式中: Pr 为绝缘气体普朗特数; Gr 为绝缘气体格拉晓夫数; C_p 为绝缘气体比定压热容; μ 为绝缘气体运动黏度; g 为重力加速度; R_{ti} 为外壳内半径; R_{co} 为导体外半径; β 为绝缘气体的容积膨胀系数

$$\beta = \frac{1}{273 + T_d} \quad (11)$$

$$T_d = \frac{T_c + T_t}{2} \quad (12)$$

其中 T_d 为 SF_6 气体的定性温度。

导体与外壳间的自然对流换热量为

$$Q_{cc} = \frac{2\pi\lambda_e (T_c - T_t)}{\ln(D_{ti}/D_{co})} \quad (13)$$

式中: D_{co} 为导体外径; λ_e 为当量导热系数

$$\lambda_e = 0.4\lambda (GrPr)^{0.2} \quad (14)$$

对于导体对外壳的辐射散热,根据斯忒藩-玻尔兹曼定律,从导体到外壳的辐射散热量为

$$Q_{cr} = \frac{C_0 \pi D_{co} \{ [(273 + T_c)/100]^4 - [(273 + T_t)/100]^4 \}}{1/(1/\epsilon_c + (D_{co}/D_{ti})(1/\epsilon_t - 1))} \quad (15)$$

式中: C_0 为斯忒藩-玻尔兹曼常量,即黑体辐射系数,值为 $5.67\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; ϵ_c 为导体外表面黑度,表面光滑铝一般为 $0.04\sim0.06$,表面涂无光泽漆铝一般为 $0.85\sim0.90$; ϵ_i 外壳内表面黑度。

外壳与空气的对流换热量为

$$Q_{ic} = h\pi D_{to}(T_t - T_a)$$

(16)

$$h = \frac{Nu_a \lambda_a}{D_{to}}$$

(17)

式中: h 为空气对流换热系数; Nu_a 为空气的努塞尔数; λ_a 为空气导热系数; D_{to} 为外壳外径。

式(16)在无风条件下,廊道内部外壳与空气间的对流换热是自然对流换热,空气的自然对流换热系数可由式(18)~(22)进行计算

$$Nu_a = C(Gr_a Pr_a)^n$$

(18)

$$Gr_a = \frac{g\beta_a D_{to}^3 (T_t - T_a)}{\mu_a^2}$$

(19)

$$\beta_a = \frac{1}{273 + T_{da}}$$

(20)

$$T_{da} = \frac{T_t + T_a}{2}$$

(21)

$$Pr_a = \frac{C_{p,a} \mu_a}{\lambda_a}$$

(22)

式中: C 和 n 为常量; Gr_a 为空气的格拉晓夫数; Pr_a 为空气的普朗特数; $C_{p,a}$ 为空气的比定压热容; β_a 为空气的容积膨胀系数; μ_a 为空气的黏度; T_{da} 为空气定性温度,代表外壳周围气流的平均温度。

式(16)在通风条件下,廊道内部外壳与空气间的对流换热是强迫对流换热。通风时,空气沿管长方向流动,故外壳与空气的强迫对流换热可看成外掠平板的强迫对流换热,空气的强迫对流换热系数可由式(22)~(25)进行计算^[16]

$$Nu_a = 0.664 Re_a^{0.5} Pr_a^{1/3}, Re_a < 5 \times 10^5$$

(23)

$$Nu_a = (0.037 Re_a^{0.8} - 871) Pr_a^{1/3}$$

$$5 \times 10^5 \leq Re_a < 10^7$$

(24)

$$Re_a = \frac{v D_{to}}{\mu_a}$$

(25)

式中: Re_a 为空气的雷诺数; v 为空气流速。

单相 GIL 的外壳对周围空气的辐射散热量为

$$Q_{tr} = C_0 \epsilon_i \pi D_{to} \left[\left(\frac{273 + T_t}{100} \right)^4 - \left(\frac{273 + T_a}{100} \right)^4 \right]$$

(26)

1.4 相关参数计算

SF_6 气体的密度与压力、温度的关系可用 Beat-tie-Bridgman 公式计算

$$P = [56.2\rho T(1+B) - \rho^2 A] \times 10^{-6}$$

(27)

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

(28)

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

(29)

式中: T 为绝对温度; ρ 为 SF_6 气体的密度; P 为 SF_6 气体的压强。

苏通 GIL 绝缘气体压强为 0.4 MPa ,额定电流为 $6\,300\text{ A}$ 。利用式(27)~(29)计算得到的不同环境温度下 SF_6 气体的密度如表 1 所示,环境温度为 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 时不同管道内压下绝缘气体 SF_6 的密度如表 2 所示。

表 1 不同环境温度下 SF_6 气体密度($P=0.4\text{ MPa}$)

$T_a/^\circ\text{C}$	15	20	25	30	35	40
$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	26.1	25.7	25.1	24.6	24.2	23.7

表 2 不同管道内压下 SF_6 气体密度($T_a=25\text{ }^\circ\text{C}$)

P/MPa	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	1.0
$\rho/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	6.05	12.23	18.58	25.10	31.80	38.70	68.90

1.5 计算模型的实现及验证

为了准确预测 GIL 导体和外壳的温度,建立了基于能量守恒热平衡状态下的节点解析法,其计算流程如图 3 所示。首先,根据具体的 GIL 结构给定导体和外壳的初始温度,计算导体和外壳的电阻率和集肤效应系数,从而得到导体和外壳的初始功率损耗。通过式(16)和(26)计算外壳的对流传热量和辐射散热量 Δ_1 ,当小于 5% 时,通过式(13)和(15)计算导体的对流传热量和辐射散热量 Δ_2 ,如果大于 5% ,更新导体温度,重新计算,直至 Δ_1 和 Δ_2 都小于 5% 时,便可获得导体和外壳的温度。基于上述流程,编制相应的计算程序,从设置好输入工况参数至输出计算结果用时约 2 s ,可见该方法计算快捷。算法中温度改变时,迭代步长根据实际应用的 GIL 测温装置的精度进行设置,而导体和外壳的初始迭代温度与初始环境温度保持一致。为计算方便,本文设置温度迭代步长为 $0.1\text{ }^\circ\text{C}$,导体和外壳的初始迭代温度为 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 。

用本文的方法计算文献[13]中实验对象 GIL, GIL 的结构参数如表 3 所示。

表 3 GIL 结构参数^[13]

部件	内径/mm	壁厚/mm
导体	160	20
外壳	860	16

当环境温度为 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 、导体通过电流为 8 kA 时,

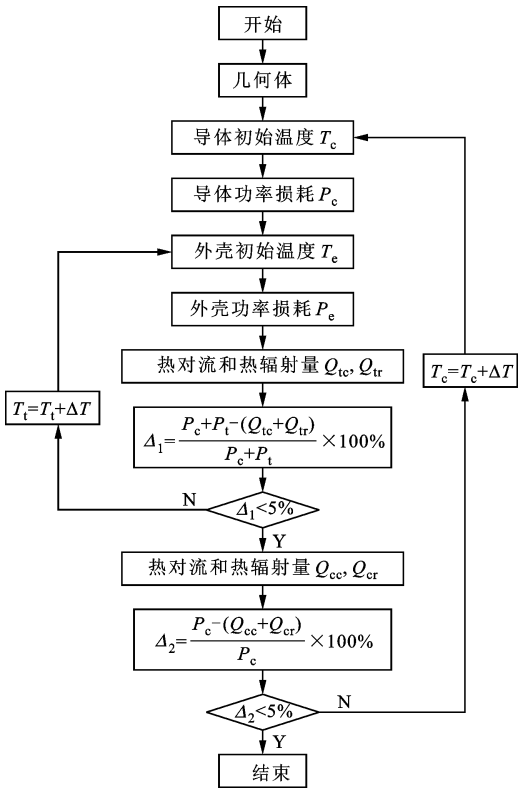


图 3 热平衡状态下节点解析法计算流程图

导体和外壳的温度计算结果与文献[13]中实验结果的比较如表 4 所示。

表 4 解析法计算结果与实验结果^[13]比较

部件	T/℃		误差/%
	计算值	实验值	
导体	68	68.8	0.74
外壳	40	40.6	1.48

从表 4 中可以看到,解析法计算得到的导体温度为 68℃,外壳温度为 40℃,与文献[13]中实验得到的导体和外壳温度的误差分别为 0.74% 和 1.48%,表明本文发展的节点解析法计算准确度较高。下面将结合苏通 GIL 管廊工程的运行工况特点,利用节点解析法来预测某国产 1 100 kV 的 GIL 产品不同条件下的热特性。

2 不同条件下 GIL 热特性计算结果分析

首先针对国内某公司的两种不同材料的 1 100 kV GIL 产品,结合苏通廊管可能的运行基本工况,分析苏通 GIL 廊管热特性的差异。GIL 结构参数及材料如表 5 所示,其中 A 类材料导体为 6101,外壳为 5052;B 类材料导体为 6A02,外壳为 5A02。

表 5 GIL 结构参数及材料

部件	内径/mm	壁厚/mm	材料(铝合金)	
			A	B
导体	170	15	6101	6A02
外壳	880	10	5052	5A02

各材料在 20℃时的电阻率:6101 为 $3 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$,5052 为 $5 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$,6A02 为 $3.5 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$,5A02 为 $4.8 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ 。导体外表面和外壳内表面均涂有无光泽漆,其黑度均为 0.85,通过计算得到空气的自然对流系数为 $4.2 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

苏通 1 100 kV GIL 假定的基本运行工况及温度要求为:SF₆ 气体压强为 0.4 MPa,额定电流为 6 300 A,廊道出口气流温度不高于 37℃,廊道内部的环境温度不高于 43℃。实际运行中,导体电流存在波动现象,故本文研究考虑负载电流分别为 4 000、5 000、6 300 A 的情况。

针对苏通 1 100 kV GIL 可能存在的运行工况,本研究的工况参数如表 6 所示。

表 6 本文研究的工况参数

参数	取值
T _a /℃	15,20,25,30,35,40
I/A	2 000,3 000,4 000,5 000,6 300,7 000,8 000
P/MPa	0.1,0.2,0.3,0.4,0.5,1.0

2.1 环境温度对 GIL 热特性的影响

图 4 给出了不同环境温度下 $I = 6\,300 \text{ A}$ 时 GIL 的温度计算结果。从图中可以看出,在负载电流为 6 300 A 时,环境温度与 GIL 温度呈线性正比关系,即随着环境温度的升高,GIL 的温度也将升高,因此环境温度对 GIL 的运行温度影响显著,在实际运行时需要对环境温度进行有效的监控。两种不同材料的 GIL 其温升曲线的斜率基本是一致的,同一环境下 A 类材料导体温度一般比 B 类材料的低 5℃左右,但外壳温度几乎相同,也就是说 GIL 的材料对 GIL 内部的母线导体运行温度影响很大,而外壳的温度对其并不敏感。就降低 GIL 内部导体运行温度来说,A 类材料将更为适用。环境温度为 25℃时,GIL 外壳温度接近 43℃,周围气流温度接近 37℃。可见,自然对流情况下,为保证 GIL 的安全稳定运行,环境温度应调控在 25℃以下或者改变外壳的对流换热方式,譬如对廊道通过气源泵供气来加大外壳与周围气流的热交换量。

图 5 给出了不同环境温度和负载电流下两种材

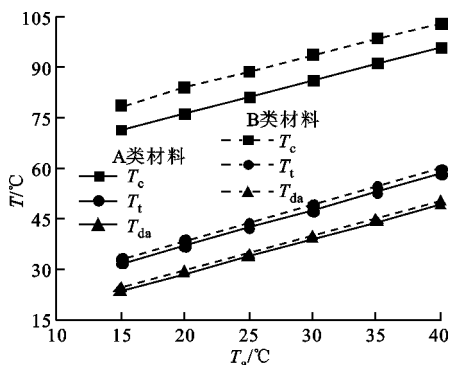
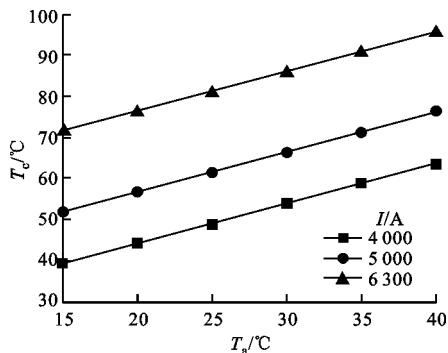
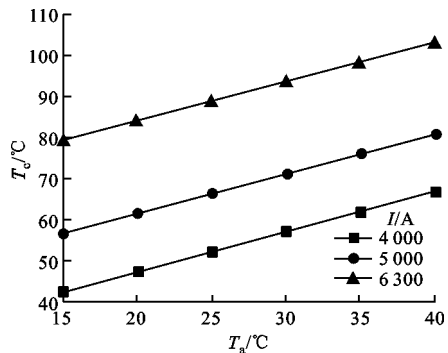


图4 不同环境温度下 $I=6300\text{ A}$ 时的 GIL 温升

质的导体温度。从图中可以看出,各负载电流下,导体温度随着环境温度的变化同样能保持正比线性关系,表明导体温度随环境温度的变化率不受 GIL 材料和负载电流的影响。这可能与其固定的几何结构有关。随着负载电流的加大,电阻产生的损耗能量加大,导体的温度势必上升。可以看到:就 A 类材料 GIL 而言,负载电流从 4000 A 到 5000 A 时,导体温度上升了 13°C , 5000 A 到 6300 A 时,导体温度上升了 20°C ;就 B 类材料 GIL 而言,上述两种负载电流变化下,导体温度分别上升了 14°C 、 22°C 。可见, GIL 运行过程中, A 类材料的 GIL 具有相对较低的运行温度,同时若负载电流波动较大,导体产生



(a) A 类材料



(b) B 类材料

图5 不同环境温度和负载电流下两种材质的导体温度

温度波动诱导的脉动热应力。在实际运行时,负载电流的变化幅度应保持在一定范围,否则会引起导体的脉动热冲击应力,长期运行势必影响导体的使用寿命。

2.2 负载电流对 GIL 热特性的影响

不同负载电流下 GIL 的温度计算结果如图 6 和图 7 所示。从图 6 中可以看出,在环境温度为 25°C 时, GIL 的温度与负载电流间的关系近似呈指数函数形式变化,即随着负载电流的增大, GIL 温度先缓慢增长后迅速上升。两种不同材料的 GIL, 负载电流不同时外壳温度几乎相等,因此负载电流的增大对外壳的温度影响很小;随着负载电流的增大, A、B 两类材料的温差越来越大。从图 7 中可以看出,两种不同材料 GIL 导体的温差与负载电流的关系也是呈指数函数形式变化的。

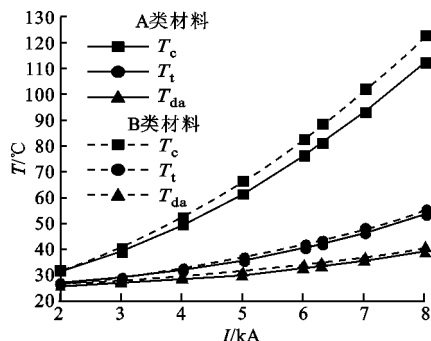


图6 不同负载电流下 GIL 的温升 ($T_a=25^\circ\text{C}$)

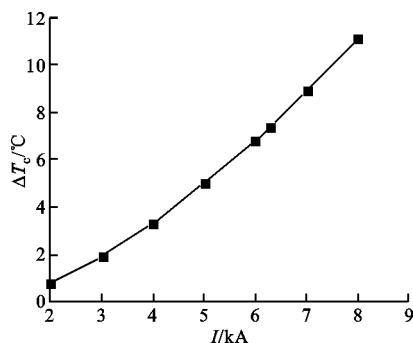


图7 不同负载电流下 A、B 两种材料 GIL 导体的温差

2.3 管道内压对 GIL 热特性的影响

GIL 母线管道内通常充有不同压力的绝缘气体,由于泄露的影响,运行时管内压力会出现不同的变化。环境温度为 25°C 和负载电流为 6300 A 时,不同管道内压下计算的 GIL 温度如图 8 所示。从图中可以看出,管道内压增大,导体温度会随之下降低,而外壳的温度保持不变。同时可以看出:管道内压小于 0.4 MPa 时,导体温度下降较快;管道内压大于 0.4 MPa 时,随着管道内压的增大,导体温降

逐渐平缓。可见,在满足绝缘性能的前提下,就降低 GIL 内部导体温度而言,为获得最大的经济效益,管道内压应保持在 0.4 MPa 左右。此外,就两种不同材料的 GIL 而言,其温度变化趋势基本一致,同一环境下 A 类材料的导体温度一般比 B 类材料的低 10℃左右,但外壳温度基本相同。

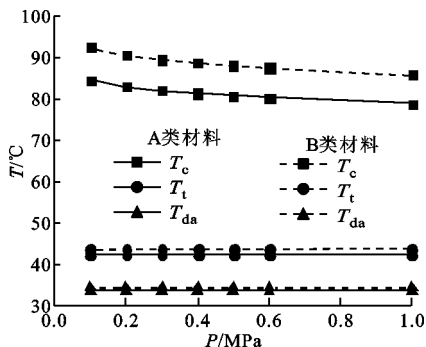


图8 不同管道内压下 GIL 的温升

3 结 论

本文基于能量守恒原理,发展了一种 GIL 热特性计算的节点解析法。通过与文献实验数据的对比,验证了本文方法能够准确快捷地预测 GIL 温度。针对国内某公司的两种不同材质的 1 100 kV GIL 产品,结合苏通廊管可能的运行基本工况,研究了苏通 GIL 廊管的热特性,得出主要结论如下。

(1)材料、环境温度、管内压力对导体温度都有很大的影响,但对外壳温度的影响并不显著,因此实际运行时通过监测得出的外壳温度变化并不能反映 GIL 内部导体温度的变化,可能会引起危险情况的漏检,应引起注意。

(2)研究发现对于两种材料,不同工况对 GIL 导体和外壳的温度影响趋势一致,但 A 类材料相对更低,从降低导体、外壳温度角度考虑,A 类材料更适用。此外,GIL 运行过程中,若负载电流波动较大,导体将产生随温度波动而诱导的脉动热应力,因此在实际运行时,负载电流的变化幅度应保持在一定范围,否则会引起导体的脉动热冲击应力,长期运行势必影响导体的使用寿命。

(3)环境温度为 15~45℃时,环境温度与导体和外壳温度呈线性正比关系,且不受负载电流变化的影响。研究发现,在自然对流条件下,环境温度应调控在 25℃以下,或者改变外壳的对流换热方式,譬如对廊道通过气源泵供气来加大外壳与周围气流的热交换量,以降低环境温度。

(4)负载电流为 2 000~8 000 A 时,GIL 温度

与负载电流间的关系近似呈指数函数形式,即随着负载电流的增大,GIL 温度先缓慢增长后迅速上升。

(5)管道内压增大,导体温度会随之下降,而外壳的温度保持不变。此外,在满足绝缘性能的前提下,就降低 GIL 内部导体温度而言,为获得最大的经济效益,管道内压应保持在 0.4 MPa 左右。

参考文献:

- [1] 孙涛,陈福广. 安全为计,主动出击:南通海事全力保障苏通 GIL 管廊工程建设 [J]. 中国海事,2017(3): 68-69.
SUN Tao, CHEN Guangfu. Take the initiative for safety purpose: Nantong MSA endeavor to secure the construction of Sutong GIL pipe rack project [J]. China Maritime Safety, 2017(3): 68-69.
- [2] 特高压苏通 GIL 综合管廊工程 [J]. 电力工程技术,2017(1): 2.
EHV Sutong GIL comprehensive pipe rack project [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017(1): 2.
- [3] 吴晓文,舒乃秋,李洪涛,等. 气体绝缘输电线路温升数值计算及相关因素分析 [J]. 电工技术学报,2013,28(1): 65-72.
WU Xiaowen, SHU Naiqiu, LI Hongtao, et al. Temperature rise numerical calculation and correlative factors analysis of gas-insulated transmission lines [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 65-72.
- [4] 靳一林,舒乃秋,邹怡,等. 气体绝缘输电线路温升特性有限元分析 [J]. 电工电能新技术,2015(3): 29-34.
JIN Yilin, SHU Naiqiu, ZHOU YI, et al. Finite-element-analysis for characteristic of temperature rise in gas-insulated transmission lines [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2015(3): 29-34.
- [5] 张磊,陈芯蕊,张景锋. 500 kV 气体绝缘金属封闭输电线路在泗泾变电站的应用 [J]. 电力科学与工程,2012(6): 64-68.
ZHANG Lei, CHEN Ruixin, ZHANG Jingfeng. Application 500 kV gas insulated transmission line in Si-jing substation [J]. Electric Power Science and Engineering, 2012(6): 64-68.
- [6] 李尹光,丁中民,徐文刚. 两例气体绝缘输电线路(GIL)故障原因分析及处理 [J]. 电气时代,2016(11): 66-67.
LI Yinguang, DING Zhongmin, XU Wengang. Fault

- analysis and treatment of two gas-insulated transmission lines (GIL) [J]. *Electric Age*, 2016(11): 66-67.
- [7] 严杰. 糯扎渡电厂 500 kV GIS 与 GIL 连接处波纹管外壳过热的原因分析 [C]//2014 年云南电力技术论坛论文集. 昆明: 云南省电机工程学会, 2014: 3-7.
- [8] 朱雷鹤, 李祥. 浅析 500 kV 瓶窑变 GIL 管道母线热伸缩问题及处理 [J]. *浙江电力*, 2006, 25(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, 25(5): 49-51.
- [9] 李海波, 万荣兴, 方勇. 兰州东变电站 750 kV GIS 母线筒缺陷原因分析 [J]. *高压电器*, 2010, 46(11): 12-15. LI Haibo, WAN Rongxin, FANG Yong. Defect analysis of the 750 kV GIS busbar tube of the Lanzhoudong substation [J]. *High Voltage Apparatus*, 2010, 46(11): 12-15.
- [10] CHAKIR A, KOCH H. Long term test of buried gas-insulated transmission lines (GIL) [C]//Power Engineering Society Winter Meeting. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2003: 1326-1331.
- [11] COOKSON A H, PEDERSEN B O. Thermal measurements in a 1 200 kV compressed gas insulated transmission line [C]//Transmission and Distribution Conference and Exposition. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1979: 163-167.
- [12] MIZUKAMI T, SATO H, ANDOT N. Gas-insulated transmission cable with semi-prefabricated unit [J]. *IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems*, 2007, 98(5): 1709-1716.
- [13] HAM J K, KIM Y K, KIM J S, et al. Heat transfer in gas-insulated bus bars [C]//ASME 2003 Heat Transfer Summer Conference. New York, USA: ASME, 2003: 453-459.
- [14] SUN G, JIN X, XIE Z. Analytical calculation of coupled magnetothermal problem in gas insulated transmission lines [J]. *Telkomnika*, 2013, 11(4): 645.
- [15] 阮全荣, 谢小平. 气体绝缘金属封闭输电线路工程设计研究与实践 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011: 28-29.
- [16] 杨世铭, 陶文铨. 传热学 [M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 212-217.

(编辑 荆树蓉)

(上接第 61 页)

- [3] MINEA A A. Uncertainties in modeling thermal conductivity of laminar forced convection heat transfer with water alumina nanofluids [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2014, 68: 78-84.
- [4] SARKAR J, GHOSH P, ADIL A. A review on hybrid nanofluids: recent research, development and applications [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2014, 43: 164-177.
- [5] KADJA M, REZAIGUIA I. Investigation of conjugate heat transfer in microchannels using variable thermophysical property nanofluids [C]//ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. New York, USA: ASME, 2013: V015T16A018.
- [6] 魏琪. 基于熵产最小的微槽冷却热沉优化设计 [C]//中国数学力学物理学高新技术交叉研究学会学术年会. 成都: 中国数学力学物理学高新技术交叉研究学会, 2008: 207-210.
- [7] 邵宝东, 孙兆伟, 王丽凤. 微槽冷却热沉结构尺寸的优化设计 [J]. *吉林大学学报(工学版)*, 2007, 37(2): 313-318. SHAO Baodong, SUN Zhaowei, WANG Lifeng. Optimization design of structural size of microchannel cooling heat sink [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2007, 37(2): 313-318.
- [8] HUSAIN A, KIM K Y. Optimization of a microchannel heat sink with temperature dependent fluid properties [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2008, 28(8): 1101-1107.
- [9] KULKARNI K, AFZAL A, KIM K Y. Multi-objective optimization of a double-layered microchannel heat sink with temperature-dependent fluid properties [J]. *Applied Thermal Engineering*, 2016, 99: 262-272.
- [10] SHI Xiaojun, WEI Yadong, LI Shan. Numerical investigation of laminar convective heat transfer and pressure drop of water-based Al_2O_3 nanofluids in microchannels [J]. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2018, 90: 111-120.
- [11] LEE J, MUDAWAR I. Assessment of the effectiveness of nanofluids for single-phase and two-phase heat transfer in micro-channels [J]. *International Journal of Heat & Mass Transfer*, 2007, 50(3/4): 452-463.

(编辑 荆树蓉)