

基于相似理论与准则关联式的气体绝缘母线 电磁场-温度场综合模拟

李洪涛¹,舒乃秋¹,孙国霞²,谢志扬²,金向朝²

(1. 武汉大学 电气工程学院,湖北 武汉 430072;2. 广东电网公司佛山供电局,广东 佛山 528000)

摘要: 针对原型气体绝缘母线(GIB)温升试验耗时长且成本高的不足,提出一种基于相似理论与准则关联式的电磁场-温度场综合模拟方法。借助控制方程组与准则关联式建立温升过程中功率损耗、对流传热以及辐射传热的数学模型,通过相似分析推导出 GIB 多物理场的温升相似准则,并设计相似模型。利用有限元方法对比不同负荷电流下,原型 GIB 与相似模型的导体与外壳的电流密度、功率损耗、对流传热系数以及温度分布,并与温升试验数据进行对比分析,验证了所提模拟方法的有效性。

关键词: 温升; 试验; 气体绝缘母线; 电磁场; 多物理场; 有限元法; 模型; 相似理论

中图分类号: TM 501

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.09.010

0 引言

气体绝缘母线 GIB(Gas Insulated Bus)在电力系统中应用广泛,其温升特性是 GIB 设计领域的重要研究内容^[1-4]。温升模拟试验作为一种重要的验证方法,对于研究不同环境温度和负荷电流下的 GIB 温升特性具有重要意义和工程应用价值。

温升模拟试验包括原型模拟试验与相似模拟试验,其中,原型模拟试验采用原型模型进行温升试验,存在试验成本高、试验周期长及试验条件不易控制等不足^[5-8]。相似模型以其良好的经济性和实用性,常用来代替原型模型,间接地模拟设备的热性能,得到广泛应用^[9-11]。但传统相似模拟方法难以直接对复杂的温升现象进行综合模拟,文献^[12]建立了航天器的相似模型,并模拟了对流和辐射传热现象,但由于对流与辐射传热量相似比不同,必须对相似模型进行热流补偿,增加了试验的复杂性。

针对上述问题与研究现状,本文将相似模拟方法运用于 GIB 的热设计,分析了 GIB 温升现象的相似特性,通过引入准则关联式解决了电磁场与温度场的综合模拟问题,设计了一种相似模型,该模型几何尺寸较小,且仅需较低的负荷电流与内部压力,克服了原型温升试验的不足。

1 GIB 温升机理与相似模拟

GIB 由载流导体和金属外壳构成,内部充满 SF₆ 气体,其温升过程是包含涡流、气体流动以及传热的复杂物理现象。当 GIB 通以工频电流时,导体中

会产生焦耳热损耗 P_e ,并在外壳中产生涡流损耗 P_i ,二者之和称为功率损耗。焦耳热损耗产生的热量通过辐射传热 Q_{r1} 和自然对流传热 Q_{c1} 与外壳进行热交换,功率损耗产生的热量则通过辐射传热 Q_{r2} 和自然对流传热 Q_{c2} 耗散至环境空气中,引起导体和外壳温度逐渐升高,如图 1 所示。

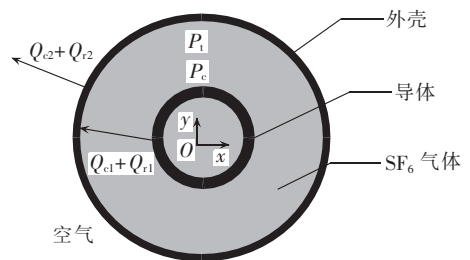


图 1 GIB 传热机理示意图

Fig.1 Heat transfer mechanism of GIB

GIB 相似模拟是指在相似理论的基础上,通过建立 GIB 相似模型间接地对原型的特性进行试验研究的方法和过程。相似模拟的理论基础是相似三定理^[13]:定理 1,即对于相似的现象,其同名相似准则的数值相等;定理 2,即现象中的物理量可表示成相似准则之间的函数关系式;定理 3,即对于同一类物理现象,如果同名相似准则在数值上相等,则现象相似。

GIB 温升相似模拟流程见图 2。首先,根据电磁场和传热学相关知识,建立描述 GIB 温升现象的数学模型;其次,根据定理 2 对温升所涉及的物理现象进行相似分析,基于此,综合分析 GIB 温升的相似特性,运用方程分析或量纲分析法推导多物理场的相似准则;再次,依据定理 1 进行相似模型的参数设计;最后,运用定理 3 判断模型 GIB 与原型的温升相似程度,检验相似模型的准确性,若相似程度较低,则返回检查数学模型是否准确、相似分析是否完善及参数设计是否合理,并进行修改,否则表

收稿日期:2013-07-18;修回日期:2014-05-13

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2009CB724500)

Project supported by the National Basic Research Program of China(973 Program)(2009CB724500)

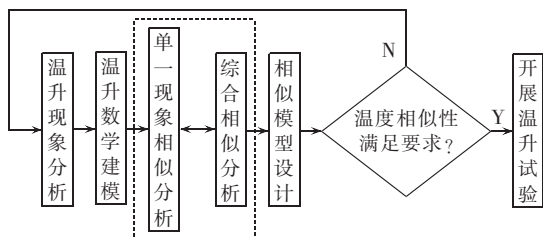


图 2 GIB 温升相似模拟流程图

Fig.2 Flowchart of GIB temperature-rise similarity simulation

明相似模拟有效,所设计的相似模型可用于温升试验。

2 GIB 温升相似分析

2.1 电磁场相似

为描述导体的焦耳热损耗与外壳的涡流损耗,采用 $\mathbf{A}, \phi$ - $\mathbf{A}$ 法建立涡流场分析的数学模型。根据麦克斯韦方程组,涡流场控制方程可表述为^[14-15]:

$$\begin{cases} \nabla \times (\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A}) - \nabla (\frac{1}{\mu} \nabla \cdot \mathbf{A}) = \mathbf{J}_t \\ \nabla \cdot (-\sigma(T) \partial \mathbf{A} / \partial t - \sigma(T) \nabla \phi) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$\mathbf{J}_t = \mathbf{J}_s + \mathbf{J}_e = \mathbf{J}_s - \sigma(T) (\partial \mathbf{A} / \partial t + \nabla \phi) \quad (2)$$

其中, $\mathbf{A}$ 为矢量磁位; ϕ 为标量电位; μ 为磁导率; σ 为电导率; $\mathbf{J}_t, \mathbf{J}_e$ 与 $\mathbf{J}_s$ 分别为总电流、涡流及源电流密度; t 为时间; T 为温度。

涡流损耗与焦耳热损耗计算公式分别为:

$$P_t = \frac{1}{2\sigma(T)} \int |\mathbf{J}_e|^2 dV \quad (3)$$

$$P_c = \frac{1}{2\sigma(T)} \int |\mathbf{J}_s|^2 dV \quad (4)$$

其中, V 为体积。

在式(1)~(4)的基础上,运用方程分析法^[9,13]推导出 GIB 的电磁场相似准则,为了方便表示,统一利用 l 表示几何特征参数,如式(5)所示。

$$\begin{aligned} \frac{\mu \sigma l^2}{t} = \Pi_1, \quad \frac{\mu \sigma l \phi}{|\mathbf{A}|} = \Pi_2, \quad \frac{\mu |\mathbf{J}_s| l^2}{|\mathbf{A}|} = \Pi_3 \\ \frac{\sigma l^3 |\mathbf{A}|^2}{t^2 P_t} = \Pi_4, \quad \frac{|\mathbf{J}_s|^2 l^3}{\sigma P_c} = \Pi_5 \end{aligned} \quad (5)$$

2.2 温度场相似

由对流传热的质量守恒、动量守恒及能量守恒方程知,要实现流体温度场的完全相似,必须保证强制对流的流体场与(或)自然对流介质的密度场相似。与研究对象为流体的传统对流传热相似问题不同,对 GIB 温升相似模拟而言,需较准确地模拟导体与外壳的定性温度,而不必刻意保证流体的流速与温度分布完全相同。因此,本文借助准则关联式进行对流传热的相似分析,此处的准则关联式仅需明确其基本形式及部分参数的取值,分析如下。

a. 封闭母线中的导体与 SF_6 的对流传热属于

有限空间自然对流传热,将有限空间的自然对流传热近似等效为热传导,通过引入当量导热系数 λ_e 计算导体和 SF_6 的对流传热量 Q_{cl} ^[7,16]:

$$Q_{cl} = \frac{2\pi\lambda_e L(T_c - T_i)}{\ln(D_{oi}/D_{co})} \quad (6)$$

$$\lambda_e = C_1 \lambda_f (G_r P_r)^{0.2} \quad (7)$$

$$G_r = g \alpha_v (T_c - T_i) L_e^3 \rho_f^2 / \mu_f^2 \quad (8)$$

$$P_r = \mu_f C_p / \lambda_f \quad (9)$$

其中, L 为母线长度; D_{oi} 与 D_{co} 分别为外壳内径与导体外径; T_c, T_i 与 T_f 分别为导体、外壳及 SF_6 (空气) 的开氏温度; C_1 为未知常数; G_r 与 P_r 分别为格拉晓夫数和普朗特数; λ_f 为 SF_6 (空气) 导热系数; g 为重力加速度; α_v 为体胀系数; L_e 为 SF_6 (空气) 特征尺度; ρ_f 为 SF_6 (空气) 密度; C_p 为 SF_6 (空气) 定压比热容; μ_f 为 SF_6 (空气) 动力粘度。

b. 外壳与壳外空气的对流传热因热边界层的发展基本不受干扰,属大空间自然对流,采用对流传热系数 h 计算对流换热量 Q_{c2} ^[17]:

$$Q_{c2} = \pi D_{co} L h (T_i - T_a) \quad (10)$$

$$h = \lambda_f N_u / D_{co} \quad (11)$$

$$N_u = C_2 (G_r P_r)^{0.3} \quad (12)$$

其中, N_u 为努塞尔数; D_{co} 为外壳外径; C_2 为未知常数; T_a 为环境空气的开氏温度。

假设 SF_6 不参与热辐射,母线导体对外壳的面-面辐射传热量 Q_{r1} 与外壳对环境空气的辐射传热量 Q_{r2} 分别计算如下^[7,17]:

$$Q_{r1} = \pi D_{co} L \delta \frac{T_c^4 - T_i^4}{\frac{1}{\varepsilon_{co}} + \frac{D_{co}}{D_{oi}} \left(\frac{1}{\varepsilon_{oi}} - 1 \right)} \quad (13)$$

$$Q_{r2} = \pi D_{co} L \delta \varepsilon_{oi} (T_i^4 - T_a^4) \quad (14)$$

其中, δ 为斯忒藩-波尔兹曼常数,其值为 5.67×10^{-8} ; $\varepsilon_{co}, \varepsilon_{oi}, \varepsilon_{oi}$ 分别为导体外表面、外壳内表面以及外壳外表面的发射率。

导体与 SF_6 、外壳与环境空气交界面的热平衡方程组为:

$$\begin{cases} P_c = Q_{r1} + Q_{cl} \\ P_c + P_t = Q_{r2} + Q_{c2} \end{cases} \quad (15)$$

综合分析对流传热、辐射传热以及热平衡的相似性,推导得到 GIB 的温度场相似准则如下:

$$\begin{aligned} \frac{\lambda_f^{0.8} l^{1.6} \rho_f^{0.4} C_p^{0.2}}{\mu_f^{0.2} Q_{cl}} = \Pi_6, \quad \frac{l^{1.9}}{Q_{c2}} = \Pi_7, \quad \frac{Q_{r1}}{l^2 \varepsilon_{co}} = \Pi_8 \\ \frac{Q_{r2}}{l^2 \varepsilon_{oi}} = \Pi_9, \quad \frac{Q_{r1}}{l^2 \varepsilon_{oi}} = \Pi_{10}, \quad \frac{P_c}{P_t} = \Pi_{11}, \quad \frac{P_c}{Q_{r1}} = \Pi_{12} \\ \frac{P_c}{Q_{cl}} = \Pi_{13}, \quad \frac{P_c}{Q_{r2}} = \Pi_{14}, \quad \frac{P_c}{Q_{c2}} = \Pi_{15} \end{aligned} \quad (16)$$

3 模型设计与分析验证

3.1 模型设计

综合分析电磁场与温度场的相似准则,即式(5)

与(16),在不改变材料特性和表面状态的前提下(相似比为 1),推导出各传热量的相似比与几何相似比 K_l 的关系如下:

$$\begin{cases} K_{Q_{c1}}=K_l^{1.6}K_{\rho_l}^{0.4}, K_{Q_{c2}}=K_l^{1.9} \\ K_{P_c}=K_l^2K_l^{-1}, K_{P_i}=K_l^2K_l^3K_l^{-2} \\ K_{Q_{c2}}=K_{Q_{c1}}=K_l^2 \end{cases} \quad (17)$$

由式(17)可知,当 SF_6 气体压力、源电流幅值以及电流周期相似比分别取 $K_{\rho_l}=K_l$ 、 $K_l=K_l^{1.5}$ 、 $K_l=K_l^2$ 时,可使得相似准则 $\Pi_1\text{--}\Pi_{14}$ 完全满足、相似准则 Π_{15} 近似满足,较好地实现了温度场的相似,且无需任何热流补偿措施,各传热量的相似比如式(18)所示。

$$\begin{cases} K_{P_c}=K_{P_i}=K_l^2 \\ K_{Q_{c1}}=K_l^2, K_{Q_{c2}}=K_l^{1.9} \\ K_{Q_{c2}}=K_{Q_{c1}}=K_l^2 \end{cases} \quad (18)$$

K_l 作为自由设置的相似比,可针对不同结构与尺寸的 GIB 灵活选择,本文以 $K_l=4$ 为例,所设计的 1/4 相似模型与原型^[7]的尺寸参数如表 1 所示,部分物理量的相似比计算如下:

$$\begin{cases} K_{\rho_l}=4, K_l=16, K_l=8, K_h=0.87, K_{\lambda_c}=4 \\ K_{Q_{c1}}=K_{P_c}=K_{P_i}=K_{Q_{c2}}=K_{Q_{c1}}=16, K_{Q_{c2}}=14 \end{cases} \quad (19)$$

表 1 原型与相似模型尺寸参数
Tab.1 Dimension parameters of prototype and similarity model

模型	D_{ci}	D_{co}	D_i	D_o
原型	150	180	470	500
1/4 相似模型	37.5	45	117.5	125

3.2 仿真分析与试验验证

分别建立原型 GIB 与 1/4 相似模型的有限元模型,导体与外壳材质均为铝合金,部分仿真参数如表 2 所示。利用有限元分析软件 ANSYS 12.0 进行了 GIB 的稳态热分析:首先通过电磁场分析计算焦耳热损耗和涡流损耗,根据流体力学理论,采用流体多组分传输模型计算母线温度场分布,通过单元映射方法实现了涡流场、流场以及温度场的间接耦合^[18-19]。模型的求解域与边界如图 3 所示,对于空气层外边界 Γ_1 施加恒温边界条件,即指定空气层外边界处的温度为环境温度,母线外表面 Γ_2 与母线内部流-固交界面 Γ_3 上分别施加大空间热辐射边界条件与面-面热辐射边界条件,整个求解域流-固交界面上施加无滑移边界条件。模型的基本假设如下:GIB 足够长,简化为二维问题;电磁分析时,忽略位移电流的影响;源电流为正弦电流; SF_6 气体与空气的对流换热方式均为自然对流;忽略 SF_6 气体本身的辐射换热因素;假设 SF_6 和空气均为理想气体,导热系数与动力粘度均与温度相关且满足 Sutherland 定律,比热为常数。

表 2 原型与相似模型仿真参数
Tab.2 Simulation parameters of prototype and similarity model

参数	原型	相似模型
电流幅值/A	5 000, 7 000	625, 875
电流频率/Hz	50	800
SF_6 压力/MPa	0.35	0.0875
环境温度/ $^{\circ}\text{C}$	23	23
0 $^{\circ}\text{C}$ SF_6 动力粘度/($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	1.42×10^{-5}	1.42×10^{-5}
0 $^{\circ}\text{C}$ 空气动力粘度/($\text{Pa}\cdot\text{s}$)	1.72×10^{-5}	1.72×10^{-5}
0 $^{\circ}\text{C}$ SF_6 导热系数/[$\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$]	0.01206	0.01206
0 $^{\circ}\text{C}$ 空气导热系数/[$\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$]	0.0244	0.0244
0 $^{\circ}\text{C}$ 导体导热系数/[$\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$]	2.2	2.2
0 $^{\circ}\text{C}$ 外壳导热系数/[$\text{W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$]	2.2	2.2
0 $^{\circ}\text{C}$ SF_6 比热/[$\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$]	665.18	665.18
0 $^{\circ}\text{C}$ 空气比热/[$\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$]	1 005	1 005
0 $^{\circ}\text{C}$ 导体比热/[$\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$]	880	880
0 $^{\circ}\text{C}$ 外壳比热/[$\text{J}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$]	880	880
0 $^{\circ}\text{C}$ 导体电阻率/($\Omega\cdot\text{m}$)	2.95×10^{-8}	2.95×10^{-8}
0 $^{\circ}\text{C}$ 外壳电阻率/($\Omega\cdot\text{m}$)	2.95×10^{-8}	2.95×10^{-8}
导体外表面发射率	0.8	0.8
外壳内表面发射率	0.8	0.8
外壳外表面发射率	0.8	0.8

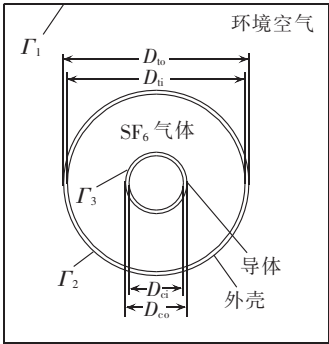


图 3 GIB 热分析求解域与边界
Fig.3 Solution region and boundaries of thermal analysis for GIB

图 4 给出了原型与相似模型负荷电流分别为 5 000 A 和 625 A 时 GIB 的电流密度分布。可以看出,原型电流密度不仅在数值上为相似模型电流密度的 1/2,且与相似模型呈现完全相同的分布规律。根据电流密度分布,得到单位长度的焦耳热损耗与涡流损耗如表 3 所示,计算结果表明功率损耗的相似比同样得到了很好的满足。

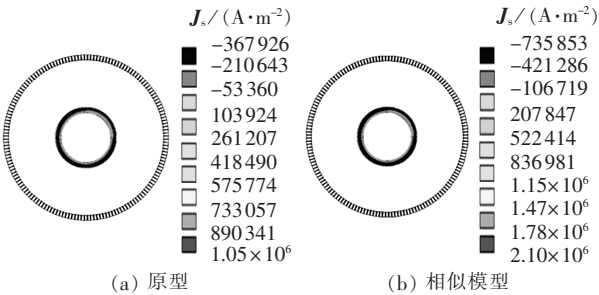
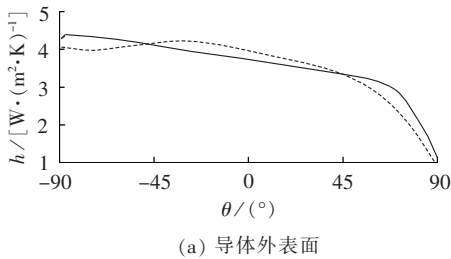


图 4 电流密度分布
Fig.4 Current density distribution

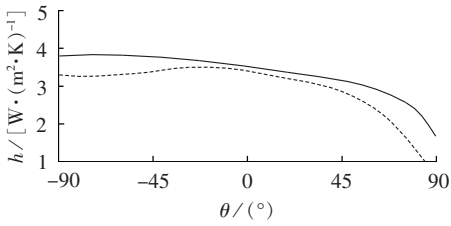
表 3 原型与相似模型功率损耗
Tab.3 Power loss of prototype and similarity model $W \cdot m^{-1}$

模型	焦耳热损耗	涡流损耗
原型	115.419 772	38.515 141 7
1/4 相似模型	28.854 943 1	9.628 785 41

将功率损耗计算结果映射至温度场进行稳态热分析,导体与外壳外表面的对流传热系数如图 5 所示,其中 θ 为表面所在位置与水平面所成的角度。导体外表面的对流传热系数相似比为 1,如图 5(a) 中虚线所示,外壳外表面的对流传热系数相似比为 0.87,经折算后如图 5(b)中虚线所示。通过与原型对流传热系数进行对比,可以看出相似模型的对流传热系数在数值上与原型接近,仅在分布上存在一定误差,误差产生的原因在于没有针对气体本身的流速和温度分布进行相似处理。图 6、7 分别对比了原型和相似模型中导体与外壳的稳态温度分布,分析表明,虽然在相似分析时将对流传热进行了等效处理,忽略了流体本身的部分相似性,但相似模型的导体和外壳温度分布规律仍与原型基本保持一致,验证了等效处理的有效性。



(a) 导体外表面

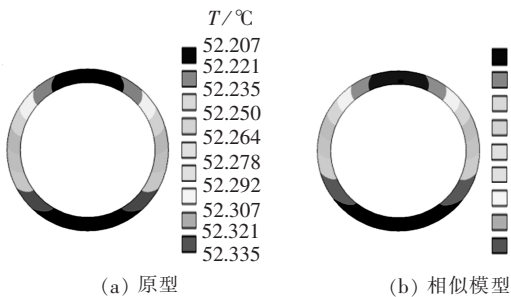


(b) 外壳外表面

——原型,-----相似模型

图 5 母线表面对流传热系数

Fig.5 Convective heat transfer coefficient of GIB surface

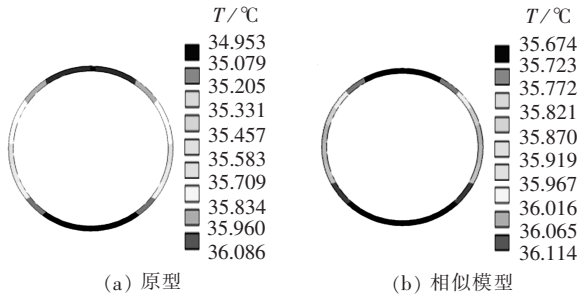


(a) 原型

(b) 相似模型

图 6 导体温度分布

Fig.6 Temperature distribution in conductor



(a) 原型

(b) 相似模型

图 7 外壳温度分布

Fig.7 Temperature distribution in tank

为进一步验证所提方法的正确性,将不同负荷电流下原型和相似模型的温度计算值与文献[7]中的试验测量值进行对比,如表 4 所示。分析结果表明,相似模型的导体与外壳温度与原型吻合较好,所设计的相似模型能够代替原型开展温升模拟试验。

表 4 计算和试验温度对比

Tab.4 Comparison between calculated and tested temperatures $^{\circ}C$

方法	原型				相似模型			
	$I=5\,000\text{ A}$		$I=7\,000\text{ A}$		$I=625\text{ A}$		$I=875\text{ A}$	
	T_e	T_i	T_e	T_i	T_e	T_i	T_e	T_i
计算	52.3	36.1	74.2	45.9	52.2	36.1	75.4	47.4
试验	50	36	72	50	—	—	—	—

4 结论

针对 GIB 原型温升模拟试验的不足,提出了基于相似理论与准则关联式的电磁场-温度场综合模拟方法。借助准则关联式等效地模拟了导体与 SF_6 、外壳与空气之间的对流传热,结合电磁场和传热方程,推导出 GIB 温升现象的相似准则,并设计了温升相似模型,解决了传统对流-辐射相似模拟中对流与辐射传热量相似比不同的问题。仿真与试验结果表明所设计的模型具有与原型相似的温升特性,该综合模拟方法为 GIB 热设计提供了新的试验思路,实现方便且能够降低试验成本。

参考文献:

[1] KIM J K,HAHN S C,PARK K Y,et al. Temperature rise prediction of EHV GIS bus bar by coupled magnetothermal finite element method[J]. IEEE Trans on Magnetic,2005,41(5): 1636-1639.

[2] HO S L,LI Y,LIN X,et al. Calculations of eddy current,fluid, and thermal fields in an air insulated bus duct system[J]. IEEE Trans on Magnetic,2007,43(4):1433-1436.

[3] KIM S W,KIM H H,HAHN S C,et al. Coupled finite-element-analysis technique for prediction of temperature rise in power apparatus[J]. IEEE Trans on Magnetic,2002,38(2):921-924.

[4] 吴晓文,舒乃秋,李洪涛,等. 基于光纤光栅的气体绝缘开关母线温度在线监测系统[J]. 电力自动化设备,2013,33(4):155-160.

WU Xiaowen,SHU Naiqiu,LI Hongtao,et al. Online temperature monitoring system based on FBG for GIS bus[J]. Electric Power

- Automation Equipment, 2013, 33(4): 155-160.
- [5] CHAKIR A, SOFIANE Y, AQUELET N, et al. Long term test of buried Gas Insulated transmission Lines(GIL)[J]. Applied Thermal Engineering, 2003, 23(13): 1681-1696.
- [6] ITAKA K, AKARI T, HARA T. Heat transfer characteristics of gas spacer cables[J]. IEEE Trans on Power Application System, 1978, 97(5): 1579-1585.
- [7] MINAGUCHI D, GINNO M, ITAKA K. Heat transfer characteristics of gas-insulated transmission lines[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1986, 1(1): 2-9.
- [8] 于文斌, 江波, 张国庆, 等. 自愈光学电流互感器现场运行稳定性试验[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(4): 44-48.
- YU Wenbin, JIANG Bo, ZHANG Guoqing, et al. Experiment on site operational stability of optical current transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(4): 44-48.
- [9] 汤广福, 贺之渊. 相似理论在大功率电力电子装置试验中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(22): 74-79.
- TANG Guangfu, HE Zhiyuan. Application of similarity theory in high power electronics equipment test[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(22): 74-79.
- [10] ZHANG Y D, RUAN J J, WANG Y. Scaling study in a capacitor-driven railgun[J]. IEEE Trans on Plasma Science, 2011, 39(1): 215-219.
- [11] BRUBAKER M A, LINDGREN S R, FRIMPONG G K, et al. Streaming electrification measurements in a 1/4-scale transformer model[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14(3): 978-985.
- [12] 刘云龙, 梁新刚, 任建勋, 等. 微重力场中对流-辐射耦合换热系统的地面模拟[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1997, 37(3): 106-109.
- LIU Yunlong, LIANG Xingang, REN Jianxun, et al. Thermal scale modeling of radiation-convection system in micro-gravity environment[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 1997, 37(3): 106-109.
- [13] 周美立. 相似工程学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998: 96-204.
- [14] BENATO B, DUGHIERO F. Solution of coupled electromagnetic and thermal problems in gas-insulated transmission lines[J]. IEEE Trans on Magnetic, 2003, 39(3): 1741-1744.
- [15] 谢德馨, 姚纓英, 白保东, 等. 三维涡流场的有限元分析[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2008: 8-38.
- [16] 吴励坚. 大电流母线的理论基础与设计[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985: 249-253.
- [17] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社, 2006: 4-16.
- [18] 吴晓文, 舒乃秋, 李洪涛, 等. 基于流体多组分传输的气体绝缘母线温度场数值计算与分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(33): 141-147.
- WU Xiaowen, SHU Naiqiu, LI Hongtao, et al. Thermal field calculation and analysis of gas insulated busbars based on fluid multiple species transport[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(33): 141-147.
- [19] 杨永明, 程鹏, 陈俊, 等. 基于耦合场的通风电缆敷设电缆载流量计算及其影响因素分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(7): 139-143.
- YANG Yongming, CHENG Peng, CHEN Jun, et al. Current-carrying capacity calculation based on coupling fields for cable in ventilated trench and its influencing factors[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(7): 139-143.

作者简介:



李洪涛

李洪涛(1987-),男,江西九江人,博士研究生,研究方向为电气设备在线监测与故障诊断(E-mail: 5pro@163.com);

舒乃秋(1954-),男,湖北黄冈人,教授,博士,研究方向为电力设备在线监测、故障诊断及状态检修;

孙国霞(1978-),女,俄罗斯族,新疆塔城人,工程师,博士研究生,研究方向为电力系统及其自动化、在线监测及智能电网;

谢志扬(1975-),男,广东佛山人,高级工程师,硕士,从事开关缺陷分析及状态检修工作;

金向朝(1980-),男,浙江金华人,高级工程师,硕士,从事高电压试验技术工作。

Comprehensive simulation of electromagnetic-temperature field in GIB based on similarity theory and nondimensional correlation

LI Hongtao¹, SHU Naiqiu¹, SUN Guoxia², XIE Zhiyang², JIN Xiangchao²

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Foshan Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid, Foshan 528000, China)

Abstract: Aiming at the long time consumption and high cost of prototype GIB(Gas Insulated Bus) temperature-rise experiment, a method of comprehensive electromagnetic-temperature field simulation based on similarity theory and nondimensional correlation is proposed. The mathematical models of power loss, convection and radiation are established according to the governing equations and the nondimensional correlations, the temperature-rise similarity criteria of GIB multi-physical field is derived by similarity analysis and the similarity model is designed. Finite element method is applied to compare the current density, power loss, convective heat transfer coefficient and temperature distribution of conductor/tank between the prototype GIB and the similarity model for different load currents. They are also compared with the data of temperature-rise experiment, which verifies the effectiveness of the proposed method.

Key words: temperature rise; testing; gas insulated bus; electromagnetic fields; multi-physical field; finite element method; models; similarity theory