第2卷第2期 2019年3月

文章编号: 2096-5125 (2019) 02-0194-07 DOI: 10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2019.02.011 中图分类号: TM854

文献标志码: A

±1100 kV 直流 SF₆ 气体绝缘穿墙套管支柱绝缘子 电场分布特性分析

刘鹏¹,李乃一²,田汇冬¹,冯骅³,吴泽华¹,王浩然¹,毛航银⁴,彭宗仁¹

(1. 电力设备电气绝缘国家重点实验室(西安交通大学),陕西省 西安市 710049;

2. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院,浙江省 杭州市 310014;

3. 全球能源互联网发展合作组织,北京市 西城区 100031; 4. 国网浙江省电力有限公司,浙江省 杭州市 310007)

Analysis of Electric Field Distribution of Post Insulator Used in ±1100 kV DC SF₆ Gas Insulated Wall Bushing

LIU Peng¹, LI Naiyi², TIAN Huidong¹, FENG Hua³, WU Zehua¹, WANG Haoran¹, MAO Hangyin⁴, PENG Zongren¹

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China;
 2. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310014, Zhejiang Province, China;

3. Global Energy Interconnection Development and Coopreration Organization, Xicheng District, Beijing 100031, China;

4. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310007, Zhejiang Province, China)

Abstract: The UHV DC wall bushing is the only channel connecting the valve hall and DC yard, and it loads total voltage and current. As the key equipment of converter station, its safe operation is directly related to the safe operation of entire system. China's 1100 kV DC wall bushing adopts a V-shaped structure, which is formed by connecting two hollow composite indoor and outdoor insulators through a gas insulated pipeline passing through the wall. Two post insulators are vertically installed inside the gas insulated pipe line. In this paper, according to the nonlinear conductance model of gas-solid insulation system, the physical process of carrier generation, recombination, migration and diffusion inside the gas is considered. The electrical field distribution in gas insulated pipeline of 1100 kV wall bushing is calculated under DC voltage, and the differences between the linear and nonlinear conductance model has been compared. Meanwhile, the transient electrical field distribution of insulator under the electrothermal coupling condition has been calculated. The result in this paper provides a model selection basis for electrical field calculation of gas-solid insulation system, which

基金项目: 国家电网公司科技项目"多屏结构气体绝缘特高压变压器套管关键技术研究及样机研制" (SGZJ0000KXJS1800291)。

Science and Technology Foundation of SGCC 'Key Technology Research and Prototype Trial-production of Multishield Structure Gas Insulated UHV Transformer Bushing'(SGZJ0000KXJS1800291). is of great significance to the design of insulation structure.

Keywords: wall bushing; gas insulation; post insulator; electrical field distribution; UHV

摘 要:特高压直流穿墙套管作为换流站中连接阀厅和直流场的唯一通道,是承载系统全电压、全电流的核心设备。作为换流站的核心设备,其安全稳定运行关系到整个系统的可靠性。中国某1100 kV直流穿墙套管采用V型结构,由户内和户外两个空心复合绝缘子通过穿墙而过的气体绝缘管道连接而成,气体绝缘管道内部垂直安装两个支柱绝缘子。根据气固绝缘系统的非线性电导模型,考虑了气体内部载流子的产生、复合、迁移及扩散的物理过程,计算了1100 kV穿墙套管内部气体绝缘管道的支柱绝缘子在直流电压下的电场分布,并比较了线性电导模型与非线性电导模型之间的差异。同时,计算了电热耦合条件下的绝缘子暂态电场分布。研究结果可为气固绝缘系统电场计算提供模型选用依据,对绝缘结构设计具有参考意义。

关键词:穿墙套管;气体绝缘;支柱绝缘子;电场分布;特高压

0 引言

特高压直流穿墙套管作为换流站中连接阀厅和直 流场的唯一通道,是承载系统全电压、全电流的核心 设备^[1]。与常见的电容式套管相比,特高压直流SF₆气 体绝缘穿墙套管以SF₆气体为主绝缘,并采用内屏蔽电 极调控内、外电场,在可靠性、安装、造价、国产化 等方面都具有明显优势,近年来被逐步应用和推广^[2]。

目前特高压直流SF₆气体绝缘穿墙套管的外绝缘 设计较为统一,均为FREP/HTV空心复合绝缘子^[3], 但不同厂家采用的内绝缘设计则存在一定的差异。其 中是否有必要在套管内部引人绝缘支撑是主要的争议 之一:虽然支柱绝缘子能缓解中心导体发生挠度或冷 热形变时对端部的压力,从而提升套管的机械性能; 但同时长期运行在直流电压下的绝缘子由于表面电荷 积聚等因素引发沿面闪络并导致设备损坏的风险也会 有所增加^[4]。因此,合理分析支柱绝缘子在直流电压 下的电场分布,对提高套管的绝缘性能具有重要意 义。图1为"V"形1100 kV直流SF₆气体绝缘穿墙套管 型式试验现场。



图 1 1100 kV直流SF₆气体绝缘穿墙套管型式试验现场 Fig. 1 Type test of 1100 kV DC SF₆ gas insulated wall bushing

合理计算各种电压形式下的电场分布是设计绝缘 结构的先决条件。在许多文献^[5-6]和工程设计中,通常 通过求解电流场的控制方程来获得直流电场的分布。 除了电流连续性方程外,如何合理地给出气体区域的 电流密度与场强之间的对应关系(如固体区的欧姆定 律)是准确求出计算结果的关键。然而,由于气体电 流密度与载流子类型和其漂移一扩散过程有关,因此 难以通过这种简单的对应来表征电流密度。

研究表明,当场强较小时,气体电流密度和场强 的关系满足欧姆定律^[7]。随着场强逐渐升高,在一定 范围内电流将达到饱和并保持不变。仅当场强超过某 一限值后,电极发射电子(正离子碰撞阴极、光电效 应等)在强电场作用下加速冲击气体分子使其进一步 电离,电流密度才又再度随场强的增大而上升。牛津 大学Weigart等人对SF₆气体的自然电离率以及离子的 迁移率、扩散系数、复合系数进行了较为全面的测 量,并根据离子的迁移、扩散过程给出了相应的运动 方程^[8]。Volpov建议将上述运动方程应用到气体绝缘 系统的电场建模中以提高直流电场计算的准确性^[5]。 文献[9-10]建立了直流电压下气体绝缘系统的电场模 型,计算得到的柱式绝缘子表面电位分布与测量结果 吻合较好。

本文采用弱电离气体的非线性电导数学模型,充 分考虑气体中离子的产生、复合、迁移和扩散作用, 利用多物理场有限元分析软件COMSOL Multiphysics, 建立了绝缘子一气体复合绝缘结构表面电荷积聚有限 元耦合方程组,计算了1100 kV直流穿墙套管气体绝 缘管道中支柱绝缘子在直流电压下的稳态电场分布, 并比较了线性电导模型与非线性电导模型之间的差 异。同时,采用电热耦合方法计算了支柱绝缘子的暂 态电场分布,分析了极性反转前后电场变化的规律。

1 气-固复合绝缘结构表面电荷积聚模型

目前,800 kV直流穿墙套管均为水平结构,即 将2个空心复合绝缘子通过气体绝缘管道对接,与水 平成10°~15°角固定在阀厅墙壁上,其示意图如图 2(左)所示。该结构形式有利于套管内部散热,且施 工较为便捷^[11]。对于1100 kV直流SF₆气体绝缘穿墙套 管来说,长度较长的中心导体(水平布置时长约28 m) 及空心复合绝缘子使得套管在水平布置下的力学问题 比较突出。针对上述问题,拟设计一种"V"形结构 的1100 kV穿墙套管供工程选择^[12]。该结构形式下两 个空心复合绝缘子被倾斜地固定在水平放置的气体绝 缘管道两端,气体绝缘管道内部垂直安装2个支柱绝 缘子,其示意图如图2(右)所示。



与水平结构相比,"V"形结构的优势包括:减小 中心导体的挠度形变、减轻空心复合绝缘子对法兰的 压力,从而降低套管机械设计方面的难度;同时因套

1.1 非线性电导数学模型

SF₆气体中的支柱绝缘子表面电荷积聚主要有3种 机制,即基于电流连续性方程和欧姆定律的体电荷密 度分布模型,基于弱电离气体载流子运动方程的漂 移一扩散模型和气固界面上表面电荷的暂态模型。以 上模型均可建立非线性偏微分方程组,并采用有限 元方法进行求解得到电荷分布,再根据高斯定理和 Dirichlet条件,求解出相应的电场分布。

固体介质中满足电流连续性方程:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{J}_1 + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \tag{1}$$

支柱绝缘子所用材料通常为环氧/氧化铝复合材料。当场强小于一定值时,固体介质内部满足欧姆 定律:

$$\boldsymbol{J}_{1} = -\boldsymbol{\gamma}_{1} \cdot \nabla \boldsymbol{\varphi}_{1} \tag{2}$$

根据高斯定律:

$$\nabla \cdot (-\varepsilon_1 \cdot \nabla \varphi_1) = \rho$$
 (3)
联立式 (1)~(3) 可建立材料参数与直流电场的

关系:

$$\nabla \cdot (\gamma \boldsymbol{E} + \varepsilon \frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial t}) = 0 \tag{4}$$

可得到固体中体电荷与场强的关系,即体电荷密 度暂态方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\gamma_1}{\varepsilon_1} \rho + \boldsymbol{E} \cdot \nabla \gamma_1 = 0$$
(5)

在气体域中同样满足高斯定律,其表示形式如下:

$$\nabla^2 \varphi_2 = -\frac{\rho^+ - \rho^-}{\varepsilon_0} = -\frac{e \cdot (n^+ - n^-)}{\varepsilon_0}$$
(6)

气体中正、负离子在电场作用下发生迁移,并伴 随一定的扩散过程,满足以下的迁移一扩散方程:

$$\frac{\partial n^{\pm}}{\partial t} \pm \nabla \cdot (n^{\pm} b^{\pm} \boldsymbol{E}) - D^{\pm} \nabla^2 n^{\pm} = G - k_{\rm r} n^+ n^- \qquad (7)$$

气体中的电流密度取决于正负载流子的迁移和扩 散效应:

$$J_{2} = eE \cdot (n^{+}b^{+} + n^{-}b^{-}) - e \cdot \nabla (D^{+}n^{+} - D^{-}n^{-})$$
(8)

Volpov从电流连续性方程出发,推导了表面电荷 密度的暂态方程,建立了表面电荷密度与介质分界面 两侧电流密度及表面切向场强之间的关系^[5]:

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = J_{1n} - J_{2n} - \nabla \cdot (\gamma_s \cdot \boldsymbol{E}_{\tau})$$
(9)

1.2 气体绝缘管道仿真模型

1100 kV直流SF₆气体绝缘穿墙套管户内和户外部 分的内屏蔽结构采用相同设计。内屏蔽结构和支柱绝 缘子在空间位置上距离较远,相对独立的两者电场间 的相互影响较小,因此可将套管主体结构(即空心复 合绝缘子和内屏蔽结构)和气体绝缘管道部分单独建 模以简化研究对象。

建立"V"形1100 kV直流穿墙套管气体绝缘管道 的三维仿真模型,如图3所示。其中,截断的气体绝缘 管道内径1.32 m,长12 m;2个环氧浇注件直径为20 cm, 高度为50 cm,其两端配有深4 cm的嵌件。



图 3 支柱绝缘子仿真模型 Fig. 3 Simulation model of post insulator

计算时,根据对称性建立图3的1/4模型,中心导体及支柱绝缘子屏蔽罩的表面电位为相应的外施电压,管道壁的表面电位为0。不考虑绝缘子表面电导率的影响,气体介质采用弱电离气体电导模型,用到的材料参数如表1所示^[13-14]。

表 1 支柱绝缘子电场计算参数

 Table 1
 Parameters for electric field calculation of post insulator

参数	SF ₆ (0.45 MPa)	环氧浇注件
\mathcal{E}_r	1	6
γ /(S/m)	—	$1.5 \times 10^{-16} e^{0.06T}$
$(dN/dt)/IP/(cm^3 \cdot s)$	55	
$\mu^{\pm}/[\mathrm{cm}^2/(\mathrm{V}\cdot\mathrm{s})]$	0.13	
$k/(\mathrm{cm}^3/\mathrm{s})$	6×10 ⁻⁷	_

热场计算时,采用图3中的全模型,中心导管承载直流电流。金属和绝缘子采用传热模型,根据SF。 气体的雷诺数,管道内部的绝缘气体域采用标准湍流 模型。外壳表面与外界空气的换热属于大空间与有限 空间内的自然对流传热,故采用对流换热模型,可采 用实验关联式计算得到。同时,计算时考虑材料表面 的热辐射过程。详细的计算方法参见文献[15],计算 参数如表2所示。

表 2 支柱绝缘子热场计算参数 Table 2 Parameters for thermal field calculation of post insulator 参数 铝合金导管 环氧浇注件 SF₄ 密度 pV=nRT2.76 2.33 $/(g/cm^3)$ 热导率 $1.9 \times 10^{-7} T^2 - 9.05 \times 10^{-5} T$ 0.23T + 38.511.2 +0.02065/[W/(m·K)] 动力黏度 1.18×10⁻¹⁰T²-5.69×10⁻⁸T /Pa·s $+1.865 \times 10^{-5}$

2 直流电压下的绝缘子电场分布

不同直流电压和绝缘子体积电导率组合下气体绝缘管道内的归一化电位和按间隙平均场强标准化后的场强分布如图4所示。

图4给出支柱绝缘子径向侧表面标准化后的法向(气体侧,正y方向)和切向(负z方向)场强分布(即弱电离气体电导模型计算结果,以下称非线性模型计算结果),并与假设气体电流密度满足欧姆定律时(以下称线性模型)以及忽略气体电流密度后(即绝缘子表面法向场强分量为0)的计算结果进行对比,如图5所示。

图5中,当外施电压较高、绝缘子体积电导率较 大(条件1)时,较大的固体侧电流密度使得两种模 型下气体侧电流密度间的差异被掩盖,场强分布曲线 基本重合,对比忽略气体电流密度后的计算结果,这 种条件下气体侧电流密度本身对整体场强分布的影响 也已经可以忽略;反之,当绝缘子体积电导率较小 (条件2)或电压较低(条件3)时,电荷积聚过程主 要取决于气体侧电流密度,两组场强分布在局部有一 定差别;用于匹配非线性模型计算结果的线性模型气 体等效电导率随电压的降低或绝缘子体积电导率的减 小而增大,其原因是气体电流密度 $J \propto \mu, \rho, E$,参 照欧姆定律的形式,电流密度饱和后的气体等效电导 率 $y \propto 1/E$,而以上两种变化均会增大气体侧场强。

直流电场的建立过程是电场由容性分布转为阻 性分布的过程,其达到稳态的标志是:在介质分界 面两侧电流密度的法向分量相等(介质界面积聚的 面电荷不再变化),在介质内部电流密度的散度为0 (介质内部积聚的体电荷不再变化)。从电荷的观点 来看,直流电场可以看作电极表面电荷、介质极化 电荷、介质界面电荷和介质体电荷所建立电场在空 间中的叠加。由前面两种电荷建立的电场,其建立 时间极短,可认为随着外施电压变化,容性电场分 布瞬时建立。而对于介质界面和介质内部的自由电 荷,存在积聚逐渐饱和的过程,因而其建立的电场









也是随之缓慢变化的。

表3是非线性和线性模型的计算成本(单元数、 网格剖分时间和求解时间)对比。

衣 〉 内仲气仲电寺侯堂り昇成争的比;	表 3	₹3	两种气体电导模型计算成本的!	北车
---------------------	-----	----	----------------	----

Table 3 Comparison of calculation costs between two gas conductance models

项目	非线性模型 (弱电离气体电导模型)	线性模型 (气体电流密度满足欧 姆定律)
单元数	3.4×10^{6}	3.7×10^{5}
网格剖分时间	约10 min	247 s
求解时间	约40 min	116 s

从表中可以看到,采用非线性模型时的单元数约 为采用线性模型时的10倍,同时前者的网格剖分及求 解时间远大于后者。上述计算结果表明,当外施电压 较低或绝缘子体积电导率较小时,采用线性模型时需 选取合适的气体等效电导率以减小其计算结果与非线 性模型的差别;而当外施电压较高、绝缘子体积电导 率较大时,两种气体电导模型的计算结果相差不大, 计算速度较快的线性模型具有一定优势。

3 电热耦合条件下的绝缘子暂态电场分布

1100 kV直流穿墙套管额定电流(*I*_{DC} = 5455 A)下,环境温度20 ℃时气体绝缘管道内的温度分布如图 6所示,同时给出支柱绝缘子3个典型位置处的温升曲线,如图7所示。

从图6中可以看到,支柱绝缘子的轴向温度梯度主 要出现在其中、上部,最大温差约25 ℃。从图7中可以 看到,尽管环氧浇注件的热扩散系数较小,但受气体 散热作用的影响,绝缘子内部各位置上的温度变化过 程基本一致:温度场变化过程的时间常数约为10 h,即 通流约50 h后基本达到稳态,中、下部温度场变化过程 的持续时间略大于上部。



图 6 额定电流下气体绝缘管道内的温度分布图 (环境温度20 ℃)





图 7 支柱绝缘子典型位置处的温升曲线

Fig. 7 Temperature rise curves of key points on post insulator

由于极性反转计算时采用暂态模型计算,其迭代

时间较长,故采用线性模型进行计算。采用线性模型 时,由于温度梯度将导致材料的电导率在空间上出现 梯度,通过求解式(4)可获得温度梯度下的直流电 场分布。极性反转电压(U_{PR} = 1400 kV,电压极性由 负变正,反转过程耗时2 min,反转前、后的加压时长 均为100 h以保证电场和温度场分布均能够达到稳态)。 下支柱绝缘子的暂态电场分布如图8和图9所示。其 中,图8为反转前、后时刻的支柱绝缘子表面合成场 强分布。



图 8 极性反转前、后支柱绝缘子的表面场强分布曲线 Fig. 8 Surface field strength distribution curves of supporting insulator before and after polarity reversal

从图中可以看到,2种情况下反转结束时刻绝缘 子上部场强均有所增大,中、下部场强均有所减小。 忽略体电荷影响时,该现象是由于绝缘子表面负电荷 (即同号电荷)积聚所引起的,而由于反转前内部同 样积聚负电荷(即同极性电荷),因此体电荷对电场 的影响方式与表面电荷一致:同极性体电荷将进一步 削弱反转前的绝缘子上部电场,加强下部电场,同时 使得反转前、后的场强变化幅度有所增大。

图9是支柱绝缘子3个典型位置处的场强变化。极 性反转前、后实际上分别代表了温度场和电场变化过 程同时进行以及前者先于后者达到稳态的情况。

从上图中可以看到,绝缘子上部电场变化过程的 持续时间小于下部。由于绝缘子各位置上的温度变化 过程差别较小(见图7),因此该现象是因为上部高温 减小了该区域内环氧浇注件的本征时间常数所引起 的。从图中还可以看到,反转前场强变化过程的时间 常数大于反转后,其中对于温度变化较大的绝缘子上 部,反转后过程的时间常数相对于反转前过程减小了 约50%。根据计算,绝缘子上部温度由20℃升高至约 45℃的过程中,环氧浇注件的本征时间常数由约30 h 减小为约5 h,由于温度场变化过程的时间常数约为10 h (见图7),因此高温区内电场变化过程的持续时间 主要取决于温度场变化过程。另外由于前10 h内温度 的上升速度较快,因此场强变化速度在加压初期存在 一个先增大后减小的过程。



图 9 支柱绝缘子关键位置处场强随时间的变化曲线 Fig. 9 The variations of field strength with time at key positions of post insulator

4 结论

本文利用多物理场有限元分析软件COMSOL Multiphysics,建立了1100 kV直流穿墙套管中气体绝 缘管道的模型,基于非线性电导模型计算了支柱绝缘 子在直流电压下的电场分布与电热耦合条件下的暂态 电场分布,得到结论如下:

1)采用非线性模型(即弱电离气体电导模型)
 时占用的计算资源较高,当使用瞬态计算模型且迭代
 步数较高时,宜采用线性模型。用于匹配非线性模型
 计算结果的线性模型气体等效电导率随电压的降低或
 绝缘子体积电导率的减小而增大。

2)当外施电压较高、绝缘子体积电导率较大时,两种气体电导模型的计算结果相差不大。当绝缘子体积电导率较小或电压较低时,电荷积聚过程主要取决于气体侧电流密度,两组场强分布在局部有一定差别。

3)额定电流下套管支柱绝缘子存在约25℃的轴向温度梯度,其引起的同极性体电荷积聚将增大电压极性反转前、后的电场变化幅度;电热耦合条件下高温区内电场变化过程的持续时间主要取决于温度场变化过程,温度场分布达到稳态后,电场变化过程的时间常数减小了约50%。

参考文献

- [1] 刘振亚. 全球能源互联网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [2] 刘振亚. 中国电力与能源[M]. 北京:中国电力出版社, 2012.
- [3] 谢雄杰,刘琴,许佐明,等. SF₆气体绝缘直流穿墙套管污 秽闪络特性[J]. 高电压技术, 2018, 44(6): 1806-1813.
 Xie Xiongjie, Liu Qin, Xu Zuoming, et al. Pollution flashover performances of SF₆ insulated DC wall bushing[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(6): 1806-1813 (in Chinese).
- [4] 彭宗仁,李乃一,刘鹏,等.一种用于特高压直流工程的 气体绝缘式穿墙套管: CN205724746U[P]. 2016-11-23.
- [5] Volpov E. Electric field modeling and field formation mechanism in HVDC SF₆ gas insulated systems[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10(2): 204-215.
- [6] Lorenzi A D, Grando L, Pesce A, et al. Modeling of epoxy resin spacers for the 1 MV DC gas insulated line of ITER neutral beam injector system[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2009, 16(1): 77-87.
- [7] 陈季丹. 电介质物理学[M]. 北京: 机制工业出版社, 1982.
- [8] Wiegart N, Niemeyer L, Pinnekamp F, et al. Inhomogeneous field breakdown in GIS - The prediction of breakdown probabilities and voltages. Part II: Ion density and statistical time lag[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1988, 3(3): 931-938.
- [9] Winter A, Kindersberger J. Stationary resistive field distribution along epoxy resin insulators in air under DC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(5): 1732-1739.
- [10] Winter A, Kindersberger J. Transient field distribution in gas-solid insulation systems under DC voltages[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(1): 116-128.
- [11] 潘国洪,朱华艳. ±800kV直流穿墙套管安装和现场试验关 键技术研究[J]. 高压电器, 2013, 49(2): 98-102.
 Pan Guohong, Zhu Huayan. Key technologies research for the installation and field test of ±800 kV wall bushing[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(2): 98-102(in Chinese).
- [12] Straumann U, Schuller M, Franck C M. Theoretical

investigation of HVDC disc spacer charging in SF_6 gas insulated systems[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(6): 2196-2205.

[13] 罗晓庆,胡伟,徐涛.±1100kV直流U型结构穿墙套管空 气间隙放电特性及间隙距离选择[J].高电压技术,2017, 43(3):946-952.

Luo Xiaoqing, Hu Wei, Xu Tao, et al. Air gap flashover characteristics and selection of gap distances for ± 1100 kV U-shaped wall bushing[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(3): 946-952 (in Chinese).

- [14] Von Engel A. Ionized gases[M]. London: Oxford University Press, 1965.
- [15] 王青于,杨熙,彭宗仁,等.应用三维电磁-热-流耦合场 分析法计算换流变压器干式套管的温度场分布[J].中国电 机工程学报,2016,36(22):6269-6275.

Wang Qingyu, Yang Xi, Peng Zongren, et al. 3D coupled electromagnetic-themal-fluid method for computation of tempertrue field of converter transformer RIP bushings [J]. Proceeding of the CSEE, 2016, 36(22): 6269-6275(in Chinese).

收稿日期: 2018-07-09; 修回日期: 2018-08-14。

作者简介:

刘鹏(1979),男,副教授,研究 方向为变电站及输电线路电磁环境、 电力设备绝缘结构的设计和优化研 究, E-mail: pengliu@xjtu.edu.cn。

李乃一 (1988),男,博士,主 要从事变电站及输电线路电磁环境、 电力设备施绝结构的设计及优化研

刘鹏

究, E-mail: 53642551@qq.com。

田汇冬 (1994), 男, 博士研究生, 通信作者, 研究 方向为绝缘结构设计, E-mail: thd8088275@stu.xjtu.edu. cn。

彭宗仁(1954),男,教授,博士生导师,研究方向 为变电站及输电线路电磁环境、电力设备绝缘结构的设 计和优化研究, E-mail: zrpeng@xjtu.edu.cn。

(责任编辑 张鹏)