

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.06.015

装有记忆合金压片梅花触头的开关柜温度场仿真分析

黄勳哲, 陈丽安

(厦门理工学院福建省高电压技术重点实验室, 福建 厦门 361024)

摘要: 针对开关柜中真空断路器梅花触头处温升问题, 基于记忆合金材料的温度形变功能, 在梅花触头上安装记忆合金压片, 提高梅花触头的工作性能。测量不同温度时梅花触头处的接触电阻, 利用多物理场耦合分析软件 COMSOL Multiphysics 对开关柜的温度场进行仿真分析, 并进行了试验验证。仿真结果与试验结果表明: 断路器梅花触头处使用记忆合金压片其温升明显低于使用普通压片时的温升, 说明记忆合金压片有助于降低梅花触头温升, 提高开关柜运行的安全可靠性能。

关键词: 记忆合金; 梅花触头; 接触电阻; 开关柜; 温度场

Simulation of Temperature Field in the Switchgear with Memory Alloy Pressing Reed on Tulip Contact

HUANG Mengzhe, CHEN Li'an

(Key High-voltage Laboratory of Fujian Province, Xiamen University of Technology, Fujian Xiamen 361024, China)

Abstract: To reduce temperature rise of tulip contacts in a vacuum circuit breaker and improve working performance of the contacts, memory alloy pressing reeds are set on them by making use of the alloy's temperature-dependent deformation. The contact resistance of the tulip contacts is measured at different temperature, and the temperature field in the switchgear is simulated with the software COMSOL Multiphysics. Simulation and experiment show that the temperature rise of the contact with memory alloy reed is lower than that with common reed, indicating that the memory alloy pressing reed facilitate reduction of the tulip contact's temperature rise and improvement of safety and reliability of the switchgear. **Key words:** memory alloy; tulip contact; contact resistance; switchgear; temperature field

0 引言

随着中国电网的发展和输配电设备技术的提高, 开关柜已在配电网中大量使用。这些开关柜的结构形式大多采用金属铠装移开式, 即为手车式高压开关柜。当设备长期运行时, 开关柜中真空断路器的梅花触头和柜体静触头连接处因氧化或接触电阻过大而发热, 导致触头发热异常而引起温升故障, 这种现象已成为开关柜使用中的常见问题。而且, 过热问题是一个不断发展的过程, 如果不加以控制, 过热程度会不断加剧, 并对绝缘件的性能及设备寿命产

生很大的影响^[1-4]。

形状记忆合金(shape memory alloy, SMA)是一种具有形状记忆效应, 可以感知外界温度, 并在加热升温后产生形状位移的新型功能材料, 当位移受到限制时产生回复力^[5-6], 见图 1。梅花触头设有触指、支撑架和记忆合金压片; 支撑架的中间设有通孔, 支撑架的外周设有用于固定触指和记忆合金压片的定位孔; 触指装配于支撑架上并构成环形体, 记忆合金压片装设于触指外侧, 记忆合金压片的中间部分固定于支撑架定位孔侧壁, 记忆合金压片两端与触指两端扣接。当温度上升并超过记忆合金压片形变系数后, 压片发生形变, 向下紧扣触指, 降低梅花触头与静触头之间接触电阻, 减小发热, 节约电能; 当梅花

收稿日期: 2017-01-13; 修回日期: 2017-03-23

基金项目: 福建省科技项目(2015H0041, 2014H6028); 厦门市科技计划项目(3502Z20153024)。

Project Supported by the Science and Technology Project in Fujian Province(2015H0041, 2014H6028), Science and Technology Project in Xiamen(3502Z20153024).

触头承载正常时, 记忆合金材料压片可防止梅花触头松动, 保证动静触头牢靠咬合^[7-10]。而大多数场合开关柜梅花触头采用的是圆圈弹簧, 与这种实际使用状态比较, 记忆合金压片式梅花触头在材料和结构设计上大大提升了与静触头接触的可靠性, 每片压片之间都是相互独立的, 保证了压力均匀, 不受个体环境影响, 避免了以往捆绑式梅花触头出现的因温度升高后, 环状张力弹簧力值降低, 接触面积减小, 促使温升持续升高, 最终导致弹簧断裂, 触头烧损的诟病。

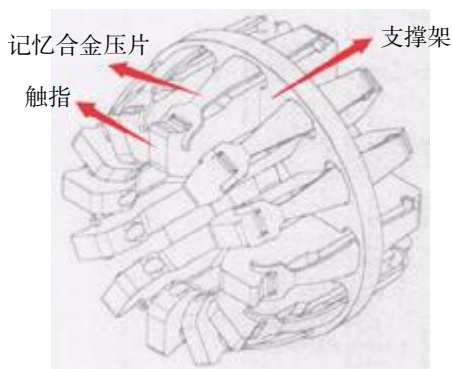


图1 装有记忆合金压片的梅花触头

Fig. 1 Tulip contact with memory alloy tabletinggs

有限元法是一种有效研究温度场的数值计算方法。**COMSOL Multiphysics** 是一款基于有限元方法求解工程设计问题的商业化计算软件, 广泛应用于力、电磁、热、光、声学领域, 可以根据需求选择添加多个物理场进行耦合分析^[11-13]。笔者利用 **COMSOL Multiphysics** 软件中的电流场和传热场的耦合分析功能对开关柜的温度场进行仿真计算, 在得到的温度场云图上对照颜色图例可以查看模型的温度分布, 并与试验结果进行对比。

1 温升试验

采用 **TDGZ**-接触式调压器, 调节后输出 **1 250 A** 的电流。利用 **12 kV/1 250 A** 开关柜进行整柜试验。温升试验示意图见图 2。



图2 12 kV/1 250 A 开关柜温升试验

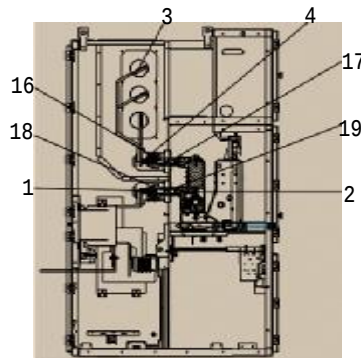
Fig. 2 The test of 12 kV/1 250 A switchgear temperature rise

试验中依次将开关柜断路器上的 **A、B、C** 三相中被试验相的梅花触头上的普通压片取下, 然后替换成试验所需的记忆合金压片。用热电偶在需要测量温升的部位进行测量。热电偶上贴上编好序号的标签, 利用能够耐高温的胶水在所对应的测量点位置进行粘贴。试验中开关柜内测量点的位置见表 1 和图 3, 并用回路电阻测试仪对其中各连接部位的接触电阻进行测量。

表 1 开关柜内埋点测量位置分布表

Table 1 The location of switchgear embedded points

标号	测量点位置	标号	测量点位置
1	下静触头	11	下梅花触头上端
2	断路器内软连接	12	下梅花触头左端
3	进线排与上分支母排搭接	13	下梅花触头下端
4	上静触头	14	下梅花触头右端
5	进线软连接与进线排搭接处	15	下梅花触头后端
6	上梅花触头上端	16	上触臂前端
7	上梅花触头左端	17	上触臂后端
8	上梅花触头下端	18	下触臂前端
9	上梅花触头右端	19	下触臂后端
10	上梅花触头后端	20	室温



1—下静触头; 2—断路器内软连接; 3—进线排与上分支母排搭接; 4—上静触头; 16—上触臂前端; 17—上触臂后端; 18—下触臂前端; 19—下触臂后端。

图3 开关柜内重要位置测量点的分布图

Fig. 3 The important location of switchgear embedded points

梅花触头 3 种不同更换形式下压片组合体的试验数据汇总见图 4 和表 2 (试验 T_1 其梅花触头三相全为普通金属压片; 试验 T_2 其仅 **B** 相梅花触头压片更换为记忆合金压片; 试验 T_3 其 **A、B、C** 三相梅花触头压片全都更换为记忆合金压片)。

试验 T_1 、 T_2 各自的温升值 $A(T_1)$ 、 $A(T_2)$ 与 $C(T_1)$ 、 $C(T_2)$ 几乎处于同一高度, 前后变化不大。更换记忆合金压片后的 **B** 相温升值 $B(T_2)$ 比未更换前的温升值

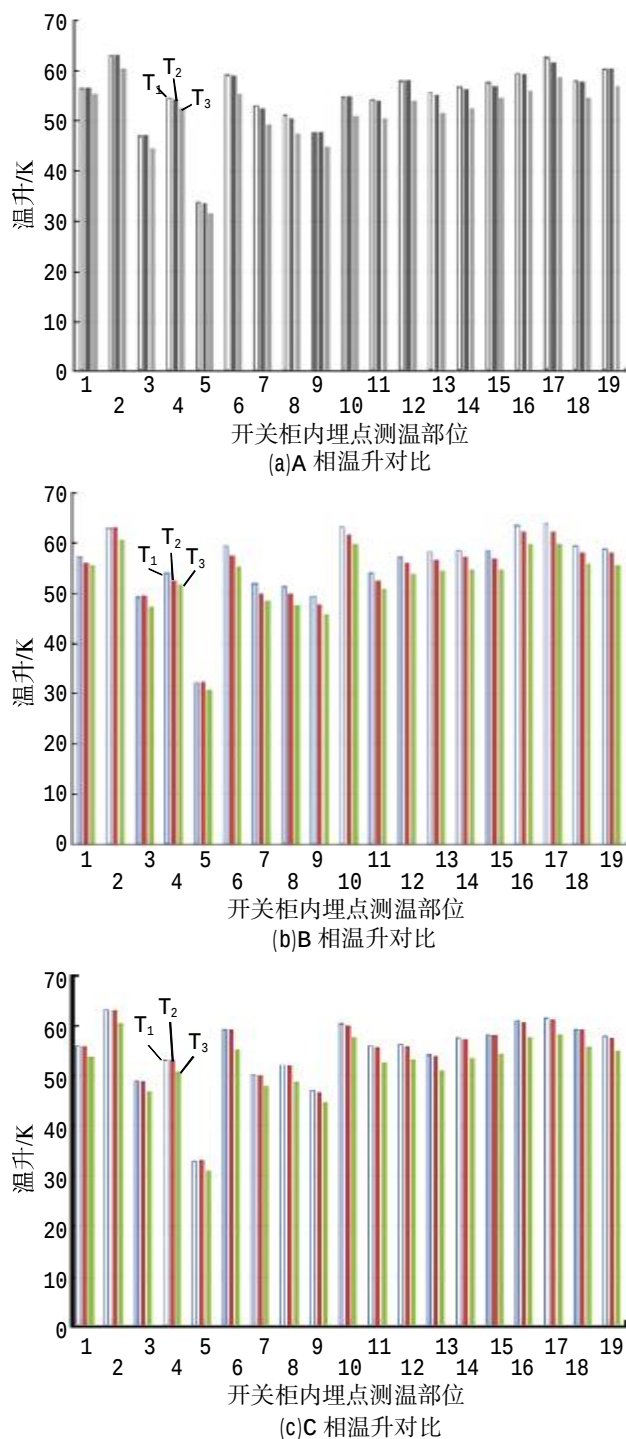


图 4 3 种不同更换形式下 A、B、C 相的各测量点温升对比图

Fig. 4 The A, B, C phase temperature rise of switchgear embedded points in three different replacement forms

$B(T_1)$ 减小, 求所有测量点的平均数后约减小 1.37 K。

对比试验 T_1 和 T_3 , 后者中 A、C 两相的压片材料换成了记忆合金压片之后, 电接触部分温升 $A(T_3)$ 、 $C(T_3)$ 降低效果显著, 求所有测量点的平均值可分别降低了约 3.37、3.07 K。由于试验中整个柜内是处于一个单独的封闭环境下, 柜内 A、C 相温升下降后, B 相温升 $B(T_3)$ 比 $B(T_2)$ 数值更小, 求平均值减小

表 2 3 种不同更换形式下 A、B、C 相的各测量点温升对比图

Table 2 The A, B, C phase temperature rise of switchgear embedded points three different replacement forms

测量点	A 相			B 相			C 相		
	T_1	T_2	T_3	T_1	T_2	T_3	T_1	T_2	T_3
1	56.4	56.4	55.2	57.3	55.7	55.6	55.9	55.9	53.8
2	63.0	63.0	60.3	62.9	63.0	60.7	63.1	63.2	60.4
3	47.0	46.9	44.3	49.2	49.3	47.2	48.9	49.0	46.8
4	54.3	54.1	52.3	54.2	52.3	51.7	53.1	53.0	50.6
5	33.7	33.6	31.3	32.3	32.3	30.7	33.0	33.2	31.0
6	59.0	58.8	55.4	59.3	57.4	55.3	59.3	59.2	55.1
7	52.9	52.4	49.2	51.9	49.6	48.5	50.1	50.2	47.9
8	51.3	50.3	47.4	51.4	49.7	47.7	52.1	52.0	48.7
9	47.6	47.5	44.6	49.4	47.7	45.7	46.9	46.8	44.6
10	54.8	54.7	50.9	63.2	61.5	59.8	60.3	60.0	57.6
11	54.2	53.8	50.4	54.2	52.4	50.8	55.8	55.5	52.5
12	58.0	58.1	53.7	57.3	55.8	53.9	56.2	56.0	53.1
13	55.5	55.1	51.4	58.1	56.4	54.3	54.1	53.9	50.8
14	56.7	56.3	52.4	58.5	57.1	54.8	57.5	57.3	53.5
15	57.8	56.7	54.3	58.4	56.6	54.6	58.1	58.0	54.2
16	59.4	59.2	55.8	63.4	62.2	59.7	60.8	60.5	57.5
17	62.8	61.6	58.5	63.7	62.2	59.8	61.4	61.2	58.2
18	58.1	57.8	54.5	59.4	57.9	55.9	59.3	59.1	55.6
19	60.2	60.2	56.7	58.9	57.8	55.4	57.9	57.6	54.7

了约 3.21 K, 这说明柜内整体温升的减小也影响了 B 相温升。

对于同一测量点, 断路器梅花触头更换了记忆合金压片之后, 电接触部位相较于更换前温升降低。比如 A 相下梅花触头左端(埋点序号为 12), 其温升 $A(T_3)$ 比 $A(T_1)$ 降低了 4.3 K。

2 开关柜温度场仿真分析

2.1 开关柜的仿真模型

开关柜被隔板分为电缆室、开关室、母线室、仪表室。每个隔室又具体的有各自的元件, 如电缆室有电流互感器, 避雷器和接地开关。所以如果不经简化就导入 COMSOL 中进行仿真, 网格剖分量, 计算占用内存多, 甚至导致网格无法剖分, 计算结果不收敛^[14]。

开关柜的简化与所添加的物理场有关, 对于电流场而言, 可以删除正常工作条件下不导电的隔板、接地开关、避雷器等实体, 将开关柜简化为进线排、上分支母排、断路器、下分支母排、电流互感器^[15]。

2.2 梅花触头和静触头的接触电阻测量

每组试验从初始温度(20 °C)开始, 以 10 °C 为变

化量,从 20 ℃依次递增到 130 ℃。将装有记忆合金压片的梅花触头和静触头放入微电脑恒温恒湿试验机加热完毕,使用回路电阻测试仪测量梅花触头和静触头的接触电阻。试验平台见图 5。



图 5 接触电阻测量

Fig. 5 Contact resistance measurements

2.3 材料参数

简化后的模型有 3 种材料组成:铜、环氧树脂和真空。仿真所需的材料参数见表 3。

表 3 材料的有关参数

Table 3 The material properties

材料	电导率/($\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$)	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	导热系数/($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	常压热容/($\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	相对介电常数
铜	5.998×10^7	8 700.000	400.000	385.000	1.000
真空	7.407×10^7	4 940.000	7.500	710.000	1.000
BPTM	5.000×10^{-15}	1 800.000	0.750	410.000	4.500

2.4 边界条件

电流场中设置终端电流添加在短接铜排面,大小为 1 250 A,频率为 50 Hz;对表 1 开关柜内各连接部位的接触阻抗分别设置为测量所得的接触电阻,真空灭弧室内动静触头的接触阻抗设置为 $8 \mu\Omega$ (产品使用手册中给出),使用记忆合金材料的梅花触头和静触头接触阻抗的设置则通过导入图 7 接触电阻测量所得的接触阻抗与温度变化的试验数据表。边界热源选择表面损耗,边界选择为接触面,分别与对应的电流场中的接触阻抗耦合。热源选择总功率损耗密度,域选择为电流流过的导体,与对应的电流场中的导体电阻耦合。

固体传热场中通过设置表面对流换热系数模拟实际空气的对流换热,COMSOL 中对流热通量的方程为 $q_0 = h \times (T_{\text{ext}} - T)$ 。根据表面空气流速大小,将参与对流冷却的面分为 3 组,B 相由于处于 A、C 相之间,散热条件较差,其对流换热系数单独设置。第 1 组为柜内空气流通较顺畅、与空气接触较充分的外表面,如断路器外壳表面和触臂表面,由于热气流密度小往上升,上触臂表面的外部温度和下触臂表面的外部温度并不相同,需要分开设置;第 2 组为柜内与

少量空气接触的内表面,如触头盒内的梅花触头、部分分支母排和静触头;第 3 组为柜体外的进线铜排;因此,据经验可以设置第 1 组 A、C 相表面的对流换热系数为 $4 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,B 相表面的对流换热系数为 $3.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ (其中上触臂表面的外部参考温度 T_{ext} 设置为 303 K,下触臂表面的外部参考温度 T_{ext} 设置为 301 K);第 2 组表面的对流换热系数为 $3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,B 相表面的对流换热系数为 $2.8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;第 3 组 A、C 相表面的对流换热系数为 $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$,B 相表面的对流换热系数为 $4.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

3 温度场仿真结果

全普通压片开关柜(下部短接)温度场见图 6。

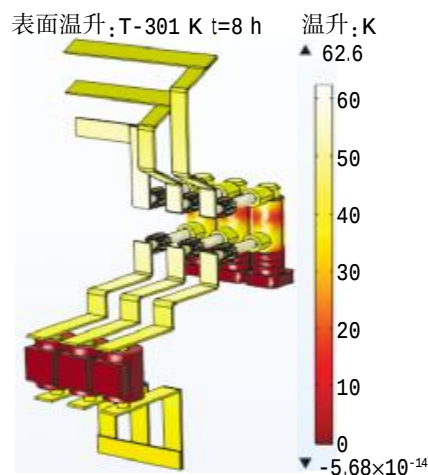


图 6 全普通压片开关柜(下部短接)温度场

Fig. 6 The temperature field of switchgear with common tablittings(undergrounding)

从图 6 中可以看出,3 根进线排的温度相差较大,通过 COMSOL 的测量工具测量发现 A 相的进线排的平均温度竟然比 C 相的进线排的平均温度高了 11 K,而实际中 A 相和 C 相的散热条件相同,显然与实际不符。猜测是由于 3 根进线排的长度不相同,散热面积不相同导致的。而现实中进线排和温升设备的母线相连,温升设备的母线长度长、面积大,能将进线排温度差距控制的很小。所以将实际中短接排移动到上边,来减少 3 根进线排的温度差距。将短接排移动到上边后,3 根进线排的温升相近,消除了进线排对梅花触头的温度影响后,分别仿真三相全为普通金属压片、仅 B 相更换为记忆合金压片和 ABC 三相全更换为记忆合金压片 3 种情况,得到改进后的开关柜温度场分布见图 7-9。以 B 相为例将仿真结果与试验结果中各测量点的温升值进行对比分析,三相全为普通金属压片情况的误差最大为 7%,最小 0.9%;仅 B 相更换为记忆合金压片情况的误差最大为 9%,最小 1.2%;A、B、C 三相全更换为

记忆合金压片情况的误差最大为5%,最小1.5%。仿真的准确性满足要求。

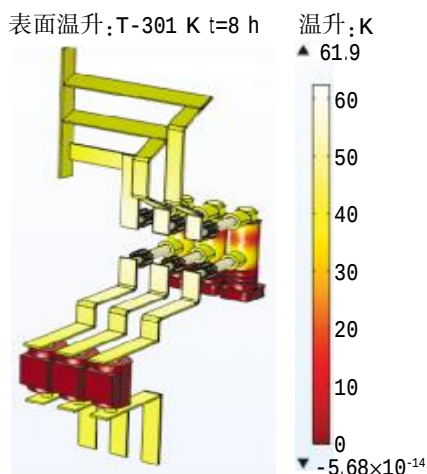


图7 全普通压片开关柜(上部短接)温度场

Fig. 7 The temperature field of switchgear with common tablettings(uppergrounding)

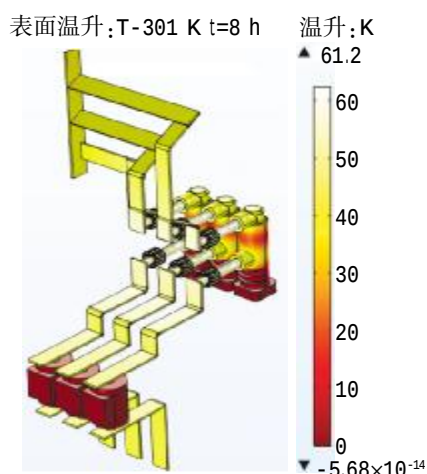


图8 B相记忆合金压片开关柜温度场

Fig. 8 The temperature field of switchgear in B phase with memory alloy tablettings

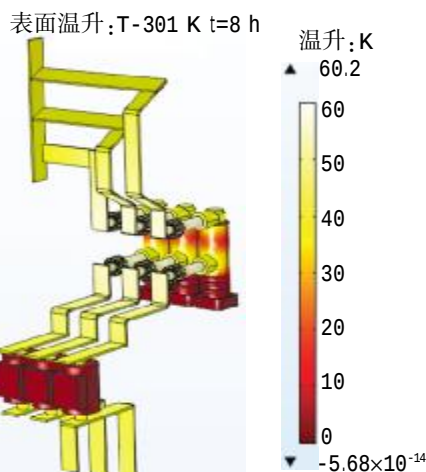


图9 三相全记忆合金压片开关柜温度场

Fig. 9 The temperature field of switchgear with memory alloy tablettings

4 结语

断路器梅花触头更换记忆合金压片的相数越多,梅花触头的温升降低越显著,说明了记忆合金压片的使用能有效降低开关柜内的温升,对设备的稳定运行有着更好的安全性和可靠性。

参考文献:

- [1] 余小玲,魏义江,刘志远,等. 高电压真空断路器温升影响因素的仿真研究[J]. 高压电器, 2007, 43(3):179-182.
YU Xiaoling, WEI Yijiang, LIU Zhiyuan, et al. Simulation study on the influence factors of high voltage vacuum circuit breaker[J]. Highvoltage Apparatus, 2007, 43(3):179-182.
- [2] 史玉杰,张华磊. 封闭式高压柜内接头发热事故分析及解决措施[J]. 工程技术, 2013, 19(9):22-23.
SHI Yujie, ZHANG Hualei. The analysis and solutions of high-voltage cabinet inner hair hot accident[J]. Engineering Technology, 2013, 19(9):22-23.
- [3] 刘 军. 高压大电流开关柜的散热问题及解决方案[J]. 中国电业(技术版), 2013(3):76-78.
LIU Jun. Heat dissipation problems of high voltage and largecurrent switchgear and its solution[J]. China Electric Power(Technology Edition), 2013(3):76-78.
- [4] 丁 健. 金属封闭高压开关柜触头发热机理分析及预防过热故障措施探讨[J]. 高压电器, 2012, 48(8):114-117.
DING Jian. Heating mechanism analysis on metal-enclosed high voltage switchgear contact with measures to prevent overheating[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(8):114-117.
- [5] 陈天翔,方晓临,苏晓艺,等. 记忆合金垫片在电力设备安全和节能中的应用试验研究[J]. 武汉大学学报, 2014, 47(4):494-501.
CHEN Tianxiang, FANG Xiaolin, SU Xiaoyi, et al. Experimental research on application of memory alloy spacer to power device security and energy saving[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2014, 47(4):494-501.
- [6] 杨 凯,辜承林. 形状记忆合金的研究与应用[J]. 金属功能材料, 2000, 7(5):7-12.
YANG Kai, GU Chenglin. Research and application of shapememory alloy[J]. Metal Functional Materials, 2000, 7(5):7-12.
- [7] 曹志民,吴小钊,刘永庆,等. 一种非自力型梅花触头抱紧力计算方法[J]. 高压电器, 2015, 51(8):98-101.
CAO Zhimin, WU Xiaozhao, LIU Yongqing, et al. Calculation method for gripping force of non-self-elastic tulip contact[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(8):98-101.
- [8] 殷立庚,陈天翔,刘勇铭,等. 采用记忆合金垫片的12 kV/1 250 A 开关柜安全试验研究[J]. 高压电器, 2016, 52(10):13-18.

- YIN Ligeng, CHEN Tianxiang, LIU Yongming, et al. Experimental study on safety in 12 kV/1 250 A switchgear applied shape memory alloy spacer[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(10):13-18.
- [9] 王红艳. 12 kV 可移开式手车断路器的电动力分析及设计改进[J]. 高压电器, 2016, 52(9):50-54.
- WANG Hongyan. Electrodynamics force analysis and design improvement of 12 kV withdrawable circuit breaker [J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(9):50-54.
- [10] 王俊波, 苗银银, 罗容波, 等. GIS 触头接触状况检测现状分析[J]. 高压电器, 2013, 49(12):137-140.
- WANG Junbo, MIAO Yinyin, WU Rongbo, et al. Analysis of present situation of GIS contact detection[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(12):137-140.
- [11] ZIMMERMAN W B J. COMSOL Multiphysics 有限元法多物理场建模与分析[M]. 北京:人民交通出版社, 2007.
- ZIMMERMAN W B J. COMSOL Multiphysics physical field modeling and analysis with finite element method[M]. Beijing:People's Communication Press, 2007.
- [12] 王 刚, 安 琳. COMSOL Multiphysics 工程实践与理论仿真[M]. 北京:电子工业出版社, 2012.
- WANG Gang, AN Lin. Multiphysics COMSOL engineering practice and theoretical simulation[M]. Beijing:Electronic Industry Press, 2012.
- [13] 王秉政, 江建武, 赵 灵, 等. 高压开关柜接触发热温度场数值计算[J]. 高压电器, 2013, 49(12):42-48.
- WANG Bingzheng, JIANG Jianwu, ZHAO Ling, et al. Temperature field simulation of contact heating in high voltage switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(12):42-48.
- [14] 王 勇. 低压断路器主回路温升的仿真模型研究[J]. 装备制造技术, 2014(4):182-183.
- WANG Yong. Simulation model of the main circuit of low voltage circuit breaker[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2014(4):182-183.
- [15] 周 岩, 高 扬, 刘婷婷, 等. 高压开关柜触头温度场的数值仿真分析[J]. 传感器与微系统, 2008, 27(12):102-105.
- ZHOU Yan, GAO Yang, LIU Tingting, et al. Numerical simulation of high voltage switchgear panel contact temperature[J]. Sensor and Micro Systems, 2008, 27(12):102-105.

黄勤哲(1991—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为高电压与绝缘技术。

陈丽安(1966—), 女, 教授, 主要研究方向为高电压与绝缘技术。

(上接第 83 页)

- [16] 廖瑞金, 肖中男, 巩 晶, 等. 应用马尔科夫模型评估电力变压器可靠性[J]. 高电压技术, 2010, 36(2):322-328.
- LIAO Ruijin, XIAO Zhongnan, GONG Jing, et al. Markov model for reliability assessment of power transformers[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(2):322-328.

饶 强(1983—), 男, 工程师, 主要从事于配电网运行维护、新技术新产品开发等方面的工作。

马 磊(1983—), 男, 工程师, 主要从事配电网运行及抢修、输变电工程建设等方面的工作。

张艳妍(1997—), 女, 副主任, 从事配网建设改造技术支持、配电自动化、分布式电源、主管电能质量及定制电力、管

理电网中心政治供电工作。

常乾坤(1985—), 男, 工程师, 博士研究生, 从事电能质量及定制电力专业的技术支持工作。

汤 华(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高压直流输电、电力系统稳定与控制。

王渝红(1971—), 女, 教授, 硕士生导师, 研究方向为高压直流输电、电力系统稳定与控制、新能源并网方式研究(通讯作者)。

魏 亮(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为高压直流输电、电力系统稳定与控制。

徐梦佳(1991—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为智能电网、电力系统稳定与控制。