

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.12.021

一种应用于柔性直流输电的IGBT散热仿真建模及分析方法

杨晓平, 雒雯霞, 骆 妮

(西安西电电力系统有限公司, 西安 710065)

摘要: 结合柔性直流输电功率模块的机械结构特点,通过对功率模块进行的合理等效简化,建立一种仿真模型。该仿真模型考虑了功率模块内部所有热源,并通过柔性直流输电运行原理,确定各热源损耗。此方法不但避免了网格划分的失败,还可以真实再现功率模块内部各热源的分布情况,有效地节约了仿真时间及计算机存储空间。基于该模型,利用Ansys软件对该仿真模型进行热仿真,并与试验结果相比,两者一致性好,验证了仿真建模及计算的合理性。

关键词: MMC; IGBT; 热仿真; 柔性直流

Modeling and Analysis of IGBT Thermal Dissipation for Flexible HVDC Transmission

YANG Xiaoping, LUO Wenxia, LUO Ni

(Xi'an XD Power System Co., Ltd., Xi'an 710065, China)

Abstract: A simulation model is built by equivalent simplification of the power module according to the mechanical structure of the flexible HVDC transmission power module. This simulation model considers all heat sources in the power module. The loss of each heat source is determined by the operation principle of the flexible HVDC transmission. This method can avoid failure of mesh generation, truly display distribution of the heat sources in the power module, and save time of simulation and computer storage space. The software Ansys is employed to complete simulation based on this model, and the simulation result coincide well with the experimental one, verifying the reasonability of the equivalently simplified model and simulation.

Key words: MMC; IGBT; thermal simulation; flexible HVDC

0 引言

柔性直流输电是 20 世纪 90 年代,在高压直流输电(high voltage direct current, HVDC)基础上发展起来的一项技术,柔性直流输电系统中的换流器采用了可关断器件如绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT),利用 IGBT 的可关断性,避免了换相失败,且解决了向无源负荷送电的问题^[1-2]。结合脉宽调制技术(pulse-width modulation, PWM),大大减小了所需滤波装置的容量,降低了系统成本。同时,正常运行的电压源换流器(voltage source converter, VSC)实现了输电系统有功和无功

的独立控制,可以为系统提供无功补偿^[3-4]。鉴于上述优点,柔性直流输电技术被广泛地应用于海上平台供电、海岛联网、风电场并网等不同领域^[5]。

随着柔性直流输电电压等级的不断提高,使流过 IGBT 的电流不断增加,导致热量剧增,这就需要模块内部具有良好的散热性能^[6]。在柔性直流输电功率模块的常见故障中,由于电子器件的温度过高而导致设备不能正常工作的比例高达 50%-60%^[7],功率模块的高度集成结构使内部各器件的散热条件也异常恶劣,因此对功率模块中的 IGBT 散热研究是非常必要的。国内已有不少文献对 IGBT 单个器件的散热进行研究^[8-11],但未将 IGBT 置于柔性直流功率模块中综合进行热分析。针对云南工程广西侧

收稿日期:2017-04-22; 修回日期:2017-06-26

基金项目:国家重点基础研究发展计划项目(2016YFB0901003)。

Project Supported by the National Key Research Program of China(2016YFB0901003).

柔性直流输电用功率模块,通过合理的等效简化及边界条件加载确定一种仿真建模及计算方法,并通过与试验对比,验证了仿真的合理性。此建模与仿真计算方法具有通用性。

1 功率模块的电气结构及工作原理

柔性直流输电系统采用的电压源换流器主要有两电平、三电平和模块化多电平等结构。由于两电平和三电平都存在谐波含量大及动态电压不稳定的问题,研究的换流器采用模块化多电平结构^[12],见图 1。

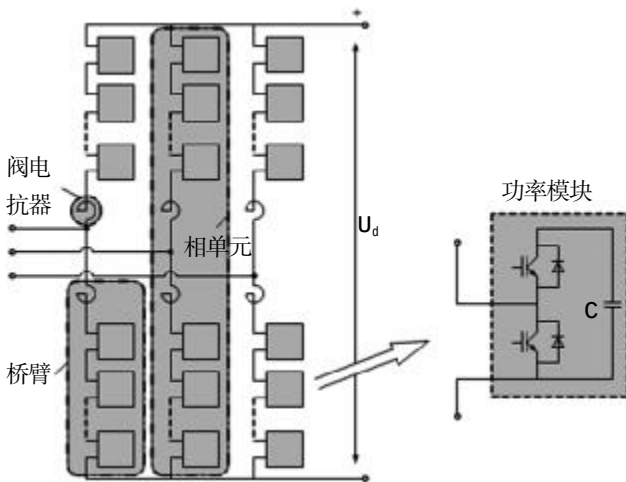


图 1 模块化多电平换流器拓扑结构

Fig. 1 Modular multilevel converter valve topology

模块化多电平换流器的功率模块采用 H 半桥模式,一个桥臂由多个 H 半桥串联而成。在运行时上、下桥臂的功率模块互补导通,最终单相中运行的功率模块总数等于桥臂中包含的功率模块数^[13]。功率模块中各器件及配套元器件连接电气原理图见图 2。

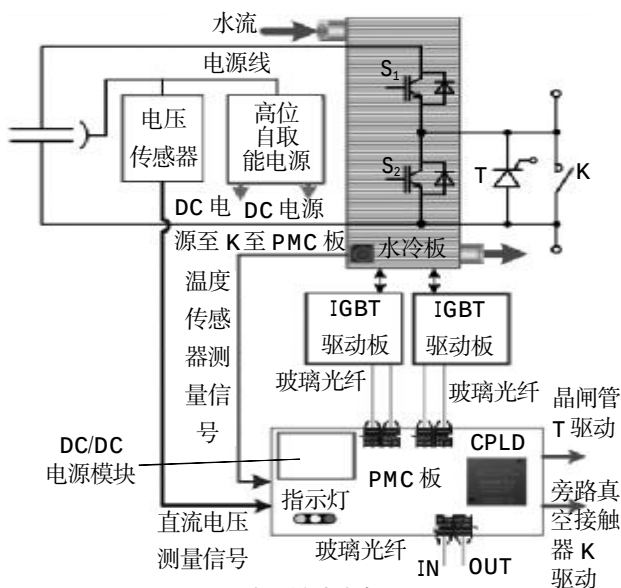


图 2 功率模块电气原理图

Fig. 2 Electrical diagram of power module

2 仿真模型建立

功率模块由 IGBT、IGBT 驱动、水冷散热器、电容、旁路晶闸管、真空接触器、高位取能电源等器件及相应的框架和夹紧装置组成。IGBT 作为功率模块的核心器件,对 IGBT 的散热仿真研究显得尤为重要。建立仿真模型时,为了更接近实际工况,需要充分考虑功率模块内部各器件工作环境温度的相互影响,同时功率模块内部结构复杂,为了便于网格划分并兼顾计算机资源,需进行合理简化,简化依据为:

- 1) 模块框架对功率模块周围的空气流动影响较小,且框架几乎不参与任何型式的换热,因此,在计算模型中删除这些部件;
- 2) 叠层母排简化为 L 型铜板,厚度为 3 mm;
- 3) 模块内部器件删除螺栓孔、倒角等对流场和换热无明显影响的特征;
- 4) 模块中的左右侧板、顶板、前面板及内部安装板厚度很小(相对于功率模块尺寸),则其在厚度方向上对空气流场的影响可以忽略,因此,采用零厚度的面代替这些部件;
- 5) 抽取水冷板内部流道,确定其为参与计算的流体域;
- 6) 设定包络模块 4~5 倍的正方体为空气流体域并参与计算。

简化后模型见图 3。简化后的仿真模型依然保留原功率模块的各器件布局及钣金开孔形式。

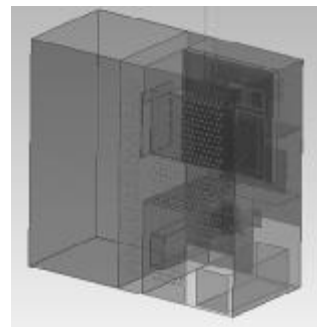


图 3 简化后的功率模块

Fig. 3 Simplified power module

定义网格全局和局部控制参数,并对水冷板流道及 IGBT 网格进行加密处理,生成以六面体为主的网格。网格总数量为 214 万个,最小网格质量为 0.137 49,满足计算要求。

3 仿真计算

3.1 边界条件加载

- 1) 水冷板入口处温度分布均匀,设为 32.3 °C;需把水冷板入口设置为速度入口,水冷板出口和空气

出口设置为压力出口。

2) 仿真设定环境温度为 40 °C (即空气域温度);

3) 功率模块内部热源主要有 IGBT、电阻、电源、驱动板、控制板、母排及电容。

IGBT 损耗总器件损耗 $P_{\text{IGBT}}(\text{W})$ 为

$$P_{\text{IGBT}} = P_{\text{on-state}} + P_{\text{turn-on}} + P_{\text{turn-off}} + P_{\text{off-state}} = 3\ 700。 \quad (1)$$

式(1)中: $P_{\text{on-state}}$ 为 IGBT 通态损耗; $P_{\text{turn-on}}$ 为 IGBT 开通损耗; $P_{\text{turn-off}}$ 为 IGBT 关断损耗; $P_{\text{off-state}}$ 为 IGBT 关断下漏电流损耗^[14-16]。

开关损耗和通态损耗随着结温的不同而变化。通常结温越高则开关损耗和通态损耗越大。开关损耗也随着门极驱动电路的开关时间变化。当使用电压源来驱动时, 当门极电阻变大时, 开关时间增加, 开关损耗也变大(门极电阻变小时正好相反)。

母排的电阻 $R=55\ \mu\Omega$, 母排损耗 $P(\text{W})$ 为

$$P = I^2 R = 63.32。 \quad (2)$$

驱动电路满载时取典型工况计算损耗, 其输入电流为 0.5 A, 对应电压 15 V, 而输出功率为 3 W, 则损耗 $P_{\text{损耗}}(\text{W})$ 为

$$P_{\text{损耗}} = P_{\text{输入}} - P_{\text{输出}} = 4.5。 \quad (3)$$

柔性直流输电换流器 1.1 倍过负荷运行工况下, 控制板正常运行时的损耗数值 $P(\text{W})$ 为

$$P = UI = 7.44。 \quad (4)$$

功率模块的电容为 12 mF, 电容损耗包括介质损耗和电阻损耗, 它们之和是通过等效串联电阻 (R_{ESR}) 来体现, 单只电容(12 mF)损耗 $P(\text{W})$ 为

$$P = I^2 R_{\text{ESR}} = 68。 \quad (5)$$

式(5)中: I 为流过电容器上的纹波电流有效值; R_{ESR} 为等效串联电阻。

功率模块内部各器件的发热量, 等效体积及单位体积发热量见表 1。

表 1 功率模块内部各器件发热量

Table 1 The heat of internal device in power module

名称	发热量/W	等效体积/ m^3	单位体积发热量/ $(\text{W} \cdot \text{m}^{-3})$
IGBT	3 700.00	$19.717\ 40 \times 10^{-4}$	3 527 848
母排	63.32	$3.902\ 40 \times 10^{-4}$	162 259
驱动板	3.00	$2.159\ 99 \times 10^{-4}$	13 888
控制板	7.40	$7.500\ 00 \times 10^{-5}$	98 666
电容	68.00	$8.496\ 00 \times 10^{-2}$	800

3.2 仿真的计算方法

热量传递有 3 种方式: 导热(热传导)、对流(热对流)和热辐射。从模型中可以看出, IGBT 与电阻这两个热源一面与水冷板换热, 属于强制对流换热形式, 其余面则与空气接触, 属于自然对流热形式。其余热

源的接触面都是空气, 参与自然对流热。IGBT 内部各层间的热量传递属于热传导。热辐射所占比重很小, 本次仿真忽略热辐射的影响。通过 Ansys 的有限元分析方法, 基于对流换热方程和导热微分方程, 并用相关参数和边界条件来进行数值计算^[17-20]。

对流换热的基本计算公式为

$$q = \alpha(t_w - t_f)。 \quad (6)$$

式(6)中: q 为热流密度, W/m^2 ; α 为对流换热系数 $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; t_w 为固体壁面温度, $^{\circ}\text{C}$; t_f 为流体温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

导热微分方程为

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda_x \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + q。 \quad (7)$$

式(7)中: ρ 为密度; c_p 为比热容; T 为温度; q 为热源的热产生率; $\lambda_i (i=x, y, z)$ 为热导率。

计算域内的水域和空气域为不可压缩牛顿性流体, 物理性质稳定。在换热模型菜单中选择 SST-KW 模型计算湍流问题; 定义水冷板流道内的流体域的材料属性为水, 包络整个功率模块的流体域材料属性为空气, 固体域有各热源器件及内部钣金, 材料属性分别设置为铝、铜和钢。选用耦合方法计算, 动量方程使用二阶计算精度; 使用混合方法初始化。

收敛标准: 速度残差设置为 1×10^{-3} , 能量收敛残差设置为 1×10^{-6} 。经过迭代计算以后的残差图见图 4。

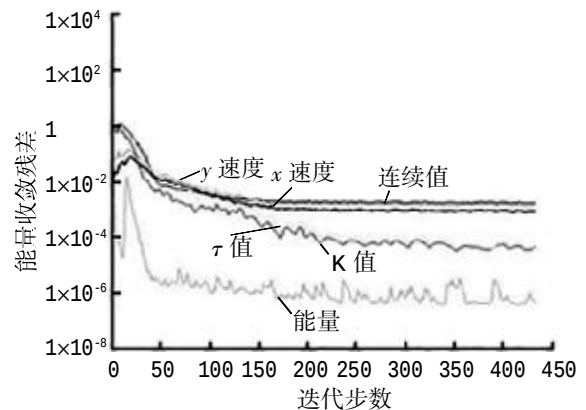


图 4 残差曲线图

Fig. 4 Residual curve diagram

4 仿真结果与分析

当入水口进水温度为 323 °C, 入水口流量为 4 L/min 时, 其他器件损耗见表 1。通过仿真, 功率模块的热分布见图 5, 内部热分布见图 6。由图 6 可以得出水冷板表面最高温度约为 320.32 K (即 47.32 °C)。

由 IGBT 的参数, $R_{\text{thJC}}=8.5\ \text{K}/\text{kW}$, $R_{\text{thCH}}=10\ \text{K}/\text{kW}$, 算出 IGBT 结温 $T_j(\text{K})$ 。

$$T_j = (R_{\text{thJC}} + R_{\text{thCH}})P + T_c = 358.32。 \quad (8)$$

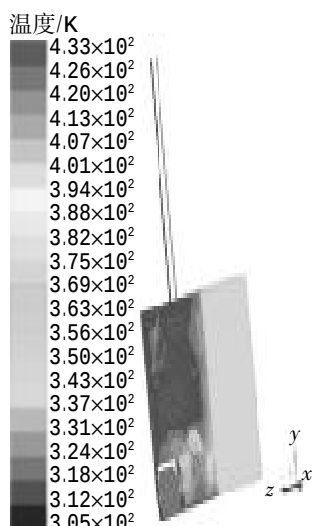


图 5 功率模块温度分布图

Fig. 5 Temperature distribution diagram of power module

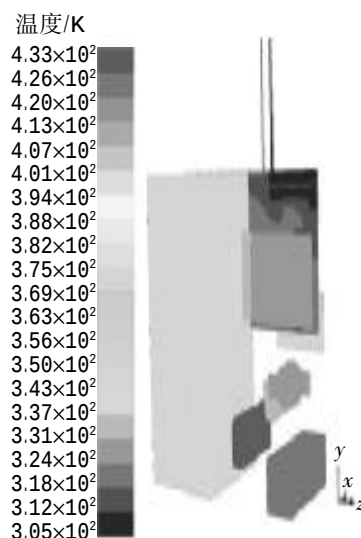


图 6 功率模块内部器件温度分布图

Fig. 6 Temperature distribution of internal device in power module

即 IGBT 结温为 85.32 ℃, 满足 IGBT 的工作结温不超过 150 ℃的要求。

5 试验研究

为了验证仿真的正确性, 搭建运行试验回路。功

率模块试验电气原理图见图 7, 试验回路的实物图见图 8。运行试验回路中, 在 IGBT 和水冷板之间预埋热电偶, 选取 IGBT 下面的 10 个测量点, 通过显示屏读取水冷板表面温度。水冷板表面测试点温度显示见图 9。

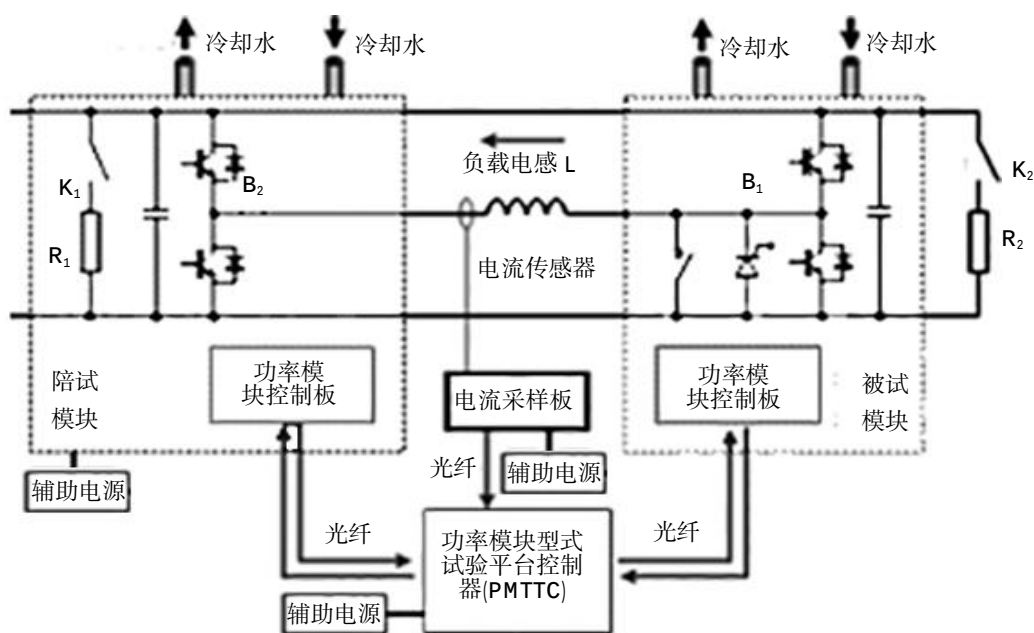


图 7 试验原理图

Fig. 7 Test schematic diagram



图 8 试验回路实物图

Fig. 8 The picture of test circuit



图 9 水冷板温度显示屏

Fig. 9 Temperature display of water cooling plate

水冷板表面温度最高值为 45.5 °C。可见, 试验结果与仿真结果吻合。

6 结论

针对应用于柔性直流输电的 IGBT 热仿真进行了研究。建立了柔性直流输电功率模块的仿真模型, 并给出相应的计算方法, 通过工程实例, 证明了该仿真模型与计算方法的正确性。结论如下:

1) 通过合理的等效简化, 得到的仿真模型可以有效地节省了仿真计算时间及存储空间;

2) 该仿真模型全面考虑模块内部各热源之间的相互影响, 基于该模型进行热仿真可以更加准确地呈现 IGBT 的工作环境;

3) 通过对比仿真结果与试验结果, 证明了该仿真模型与仿真方法的正确性。

参考文献:

- [1] 徐 政, 陈海荣. 电压源换流器型直流输电技术综述[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 1-10.
XU Zheng, CHEN Hairong. Review and applications of VSC HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 1-10.
- [2] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 72-76.
TANG Guangfu. High voltage direct current transmission technology based on voltage source converter[M]. Beijing: China Electric Power press, 2010: 72-76.
- [3] 徐 政. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 7-9.
XU Zheng. Flexible HVDC transmission system[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2012: 7-9.
- [4] DORN J, HUANG H, RETZMANN D. Novel voltage-sourced converters for HVDC and FACTS applications[C]//CIGRE Symposium. Osaka, Japan: CIGRE, 2007: 314-321.
- [5] 李庚银, 吕鹏飞, 李广凯, 等. 轻型高压直流输电技术的发展与展望[J]. 电力系统及其自动化, 2003, 27(4): 77-80.
LI Gengyin, LYU Pengfei, LI Guangkai, et al. Development and prospects for HVDC light[J]. Automation of Electric Power System, 2003, 27(4): 77-80.
- [6] LUO Z H. A thermal model for IGBT modules and its implementation in a real time simulator[D]. Pittsburgh, USA: University of Pittsburgh, 2002.
- [7] 陈 明, 胡 安, 唐 勇, 等. 绝缘栅双极型晶体管传热模型建模分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(2): 453-459.
CHEN Ming, HU An, TANG Yong, et al. Modeling analysis of IGBT thermal model[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(2): 453-459.
- [8] 郑 军, 王晓宝, 关艳霞. 基于 Ansys 的大功率 IGBT 模块内部传热研究[J]. 电力电子技术, 2011, 45(1): 104-105.
ZHENG Jun, WANG Xiaobao, GUAN Yanxia. Research on heat transfer in the high power IGBT module based on ansys[J]. Power Electronics, 2011, 45(1): 104-105.
- [9] 唐玉兔, 丁 杰. 管式 IGBT 水冷散热器性能的数值模拟研究[J]. 机电工程, 2014, 31(7): 870-874.
TANG Yutu, DING Jie. Numerical simulation on performance of tubular water-cooled radiator for IGBT module[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2014, 31(7): 870-874.
- [10] 揭贵生, 孙 驰, 汪光森, 等. 大容量电力电子装置中板式水冷散热器的优化设计[J]. 流体机械, 2010, 38(2): 57-60.
JIE Guisheng, SUN Chi, WANG Guangsen, et al. Optimization design of water-cooled heat sink applied to large-capacity power electronic equipment[J]. Fluid Machinery, 2010, 38(2): 57-60.
- [11] SUN Hairong, ZHOU Yong. Structure design for heat sink based on thermal analysis[C]//ICIMM'. [S.l.]: ICIMM', 2011: 767-773.
- [12] 丁冠军, 丁 明, 汤广福. VSC-HVDC 主电路拓扑及其调制策略分析与比较 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(10): 64-68.
DING Guanjun, DING Ming, TANG Guangfu. Analysis and comparison of VSC-HVDC topologies and corresponding modulation schemes[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(10): 64-68.
- [13] MARQUARDT R, LESNICAR A. New concept for high voltage-modular multilevel converter[C]//Proceedings of the IEEE Power Electronic Specialists Conference. Aachen, Germany: IEEE, 2004: 25-26.
- [14] 熊 妍, 沈燕群, 江 剑, 等. IGBT 损耗计算和损耗模型研究[J]. 电源技术应用, 2006, 9(5): 55-60.
XIONG Yan, SHEN Yanqun, JIANG Jian, et al. Study on loss calculation and model for IGBT[J]. Power Supply Technologies and Applications, 2006, 9(5): 55-60.
- [15] RAJAPAKSE A D, GOLE A M, WILSON P L. Electromagnetic transient simulation models for accurate representation of switching losses and thermal performance in power electronic systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 319-327.
- [16] 胡建辉, 李锦庚, 邹继斌, 等. 变频器中的 IGBT 模块损耗计算及其散热系统设计[J]. 电工技术学报, 2009, 24(3): 159-163.
HU Jianhui, LI Jingeng, ZOU Jibin, et al. Losses calculation of IGBT module and heat dissipation system design of inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(3): 159-163.
- [17] LEE T Y. Design optimization of an integrated liquid-cooled IGBT power module using CFD technique[C]//IEEE Inter Society Conference on Thermal Phenomena. [S.l.]: IEEE, 1998: 337-342.

(下转第 139 页)

- NIU Haiqing, ZHOU Xin, WANG Xiaobing, et al. Calculation and experiment of transient temperatures of single-core cables on jacket temperature monitoring[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(9): 2138-2143.
- [8] 赵建华, 袁宏永, 范维澄, 等. 基于表面温度场的电缆线芯温度在线诊断研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(11): 52-54.
- ZHAO Jianhua, YUAN Hongyong, FAN Weicheng, et al. Surface temperature field based online diagnoses study for electric cable's conductor temperature[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(11): 52-54.
- [9] SALLY M, BLACK W Z. Refinements to the Neher-McGrath model for calculating the ampacity of underground cables[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(3): 12-30.
- [10] 梁永春, 闫彩虹, 赵静, 等. 排管敷设电缆群暂态温度场和短时载流量数值计算[J]. 高电压技术, 2011, 37(4): 1002-1007.
- LIANU Yongchun, YAN Caihong, ZHAO Jing, et al. Numerical calculation of transient temperature field and short term ampacity of group of cables in ducts[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(4): 1002-1007.
- [11] HIRANANDANI A. Calculation of conductor temperatures and ampacities of cable systems using a generalized finite difference model[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, 6(1): 15-24.
- [12] 周芸, 杨奖利. 基于分布式光纤温度传感器的高压电力电缆温度在线监测系统[J]. 高压电器, 2009, 45(4): 74-76.
- ZHOU Yun, YANG Jiangli. Online temperature monitoring system for high voltage power cable based on distributed optical fiber temperature sensors[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(4): 74-76.
- [13] GARRIDO C, OTERO A F, CIDRAS J. Theoretical model to calculate steady-state and transient ampacity and temperature in buried cables[J]. IEEE transactions on Power Delivery, 2003, 18(3): 667-678.
- [14] IEC 60287:1993 Electric cables-calculation of the current rating[S]. 1993.
- [15] JB/T 10181—2014 电缆载流量计算[S]. 2014.
- JB/T 10181—2014 Calculation of the current rating of cables[S]. 2014.
- [16] 李超群, 沈培峰, 马宏忠, 等. 多回路土壤直埋高压电缆温度场建模与载流量计算[J]. 高压电器, 2015, 51(10): 63-69.
- LI Chaoqun, SHEN Peifeng, MA Hongzhong, et al. Modeling of soil buried multi-circuit cables' temperature field and ampacity calculation[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(10): 63-69.
- [17] 刘畅, 徐政, 宣耀伟, 等. 基于等效导热系数的直流电缆稳态载流量简化有限元算法[J]. 高压电器, 2016, 52(5): 7-13.
- LIU Chang, XU Zheng, XUAN Yaowei, et al. Simplified finite element method for calculating DC cable's capacity using equivalent thermal conductivity[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(5): 7-13.
- [18] 段佳冰, 尹成群, 吕安强, 等. 基于 IEC 60287 和有限元法的高压海底电缆温度场分析方法[J]. 高压电器, 2014, 50(1): 1-6.
- DUAN Jiabing, YIN Chengqun, LYU Anqiang et al. Analysis method for high voltage submarine cable based on IEC 60287 and finite method[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(1): 1-6.
- [19] ANDERS G J. Institute of electrical and electronics engineers. Rating of electric power cables in unfavorable thermal environment[M]. USA: Wiley, 2005.
- [20] MALMEDAL K, BATES C, CAIN D. On the use of the law of times in calculating soil thermal stability and underground cable ampacity[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(2): 1215-1220.
- [21] 陶文铨. 数值传热学[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2001.
- TAO Wenquan. Numerical heat transfer[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2001.
- [22] MAXIMOV S, VENEGAS V, GUARDADO J L, et al. Analysis of underground cable ampacity considering non-uniform soil temperature distributions[J]. Electric Power Systems Research, 2016(132): 22-29.
- 傅晨钊(1975—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事输变电设备运行技术研究。
- 司文荣(1981—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事输变电设备运行技术研究。

(上接第 133 页)

- [18] NEWCOMBE DR, DINESH C, BAILEY C, et al. Reliability metrics for IGBT power modules[C]//11th International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging. Xi'an: [s.n.], 2010: 670-674.
- [19] MEYSENC L, SALUDJIAN L, BRIEARD A. A high heat flux IGBT micro exchanger setup[J]. IEEE Transactions on Components Hybrids and Manufacturing Technology, 1997, 20(3): 334-341.
- [20] 陶文铨. 传热学[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2006.
- TAO Wenquan. Heat transfer[M]. Xi'an: Xi'an University of Technology Press, 2006.
- 杨晓平(1978—), 男, 博士, 工程师, 主要从事柔性直流输电技术与电能质量技术研究。
- 雒雯霞(1985—), 女, 工程师, 主要从事电力电子器件热仿真。
- 骆妮(1987—), 女, 硕士, 主要从事柔性直流输电系统中的应用开发研究工作。