

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.08.020

基于电磁场—流场—温度场耦合分析的电缆支架温升计算及实验验证

张宇娇, 郭志伟, 汪振亮, 黄雄峰, 智 李

(三峡大学梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 随着大长度大截面的电力电缆在隧道的普及, 电缆支架因涡流损耗造成的线损、以及发热产生温升形变等问题也日益严重。文中采用有限元数值计算方法, 以110 kV单相电缆及其钢支架为研究对象, 进行了电磁场—流场—温度场耦合计算。将电磁场计算得到的涡流损耗作为温度场计算的热源载荷, 同时考虑空气自然对流的散热方式, 从而计算出电缆支架的温度分布。最后进行电缆支架温升实验, 将仿真得到数据和实验数据进行对比, 验证电缆支架温升计算的准确性和有效性。

关键词: 电缆支架; 涡流损耗; 电磁场—流场—温度场; 多物理场耦合; 支架温升

Calculation and Experimental Verification of Cable Support's Temperature Rise Based on Electromagnetic-fluid-thermal Fields

ZHANG Yujiao, GUO Zhiwei, WANG Zhenliang, HUANG Xiongfeng, ZHI Li

(Hubei Key Laboratory of Cascaded Hydropower Stations Operation & Control, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China)

Abstract: The application of large-length and large-section power cable in cable tunnel leads to the serious line loss caused by eddy current in cable support and the thermal deformation of cable support. Taking 110 kV single-phase cable and its cable support as research objects and adopting the finite element numerical calculation method to calculate its electromagnetic-fluid-thermal coupling field. The eddy current loss calculated by the electromagnetic field is taken as the heat source load in fluid-thermal field, and the heat dissipation mode of the natural convection of the air is considered, thereby calculating the temperature distribution of the cable support. Finally, temperature rise experiment of cable support is conducted, and the simulation data are compared with the experimental one to verify the accuracy and effectiveness of the temperature rise calculation of cable support.

Key words: cable support; eddy current loss; electromagnetic-fluid-thermal fields; multi-physics coupling; temperature rise of support

0 引言

随着城市化建设的快速推进, 用户对电量的需求迅猛增长, 大长度大截面的电力电缆在隧道的应用也越来越多。因电缆的交变电场会产生交变磁场, 交变磁场作用在传统的金属质电缆支架上感应出涡流。在大电流作用下, 金属钢支架的涡流损耗

不能忽略, 钢支架的涡流损耗不仅会增加电力系统的线损, 造成电能的浪费, 还因为涡流损耗发热导致支架温度升高而产生形变, 钢支架长期发热也会降低电缆外护套的寿命^[1-3], 因此, 对传统的钢支架的涡流损耗以及温升情况进行研究计算, 有利于提高电力系统的运行效率以及对电缆支架温升形变的研究。

收稿日期: 2019-02-04; 修回日期: 2019-04-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(51577106)。

Project Supported by the National Nature Science Foundation of China(51577106).

国外学者对电缆支架的研究主要集中在力学分析,很少涉及到电学分析上^[4]。国内学者关于涡流损耗的研究对象主要是变压器等大型电力设施^[5-9],近些年提出的复合材料电缆支架虽然因其绝缘不产生涡流损耗,但是因其价格昂贵并不能广泛推广^[10-13]。文[14-15]对钢支架进行涡流损耗的研究,但是简化了钢支架模型,同时也没有温升计算和实验验证。

文中建立电缆支架有限元模型,对电缆支架进行电磁场—流场—温度场多物理场耦合分析,计算电缆支架的涡流损耗以及其温升情况,并且通过电缆支架试验平台测量电缆支架实际温升数据,通过对比仿真结果和实验数据,验证电缆支架温升计算的正确性。

1 计算理论

1.1 电磁场控制方程

钢支架的涡流问题属于时谐涡流场问题,电缆中交变电流形成交变磁场,交变磁场渗透入钢支架中产生感应电动势,感应电动势在钢支架中形成回路产生涡流。其中电缆支架、金属护套、缆芯产生涡流,为涡流区 Ω_1 ;空气、木箱、绝缘材料不产生涡流,为非涡流区 Ω_2 。在Maxwell方程组基础上,可推导出A, A- ϕ 法场控制方程,在库伦(Coulumb)规范 $\nabla \cdot A=0$ 条件下,在涡流区内 Ω_1 :

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) - \nabla \left(\frac{1}{\mu} \nabla \cdot A \right) + j\omega \sigma A + \sigma \nabla \phi = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \sigma (-j\omega A - \nabla \phi) = 0 \quad (2)$$

在非涡流区 Ω_2

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) - \nabla \left(\frac{1}{\mu} \nabla \cdot A \right) = J_s \quad (3)$$

式(1)-(3)中: J_s 为源密度电流, A/m²; A 为矢量磁位; ϕ 为电位; ω 为磁场变化的角频率, rad/s; μ 是磁导率, H/m; σ 是电导率, S/m。

1.2 流场—温度场控制方程

自然对流是指没有外界驱动力,流体由于自身内部存在温度差、浓度差而发生流动的现象。因为电缆沟内没有强制风产生,在正常工作时因电缆以及电缆支架发热,导致电缆沟内的空气存在温度差发生运动,其空气流动可视为自然对流^[16-20]。空气流动状况也对电缆支架的温度有较大影响,对于不可压缩的理想流体,三维流体的稳态流动方程如下:

连续性方程为

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

x 方向动量方程为

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V u) = \nabla \cdot (\mu \nabla u) - \frac{\partial p}{\partial x} + \rho f_x \quad (5)$$

y 方向动量方程为

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V v) = \nabla \cdot (\mu \nabla v) - \frac{\partial p}{\partial y} + \rho f_y \quad (6)$$

z 方向动量方程为

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho V w) = \nabla \cdot (\mu \nabla w) - \frac{\partial p}{\partial z} + \rho f_z \quad (7)$$

能量方程为

$$\rho c \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) = k \nabla^2 T + Q \quad (8)$$

式(4)-(8): u, v, w 分别为流体 V 在方向上的速度分量, m/s; ρ 为流体密度, kg/m³; p 流体周围压强, Pa; μ 为动力粘度, Pa·s; β 为热膨胀系数, 1/K; g 为重力加速度, m/s²; T 为温度, K; k 为热导率, W/(m·K); c 是空气比热容, J/(kg·°C); Q 为热流密度, W/m³。 f_x, f_y, f_z 分别是体积力的各方向分量。

热传递主要是热传导、热对流、热辐射3种方式,实验木箱散热方式有与外界环境的对流换热和辐射换热,国家标准规定,电器零部件的极限允许温升(K)数量级为 10^2 ,辐射功率很小,可以忽略不计^[21],因此对流换热起主导作用,计算时忽略辐射散热对木箱散热的影响。实验木箱对流换热控制方程为:

$$q = hS(T_w - T_e) \quad (9)$$

$$h = k \cdot N_u / l \quad (10)$$

式(9)、(10)中: h 为对流换热系数, W/(m²·K); S 为面积, m²; q 为单位时间内面积 S 上的传热热量, W/m²; T_w 为实验木箱表面温度, T_e 为环境温度; k 为热导率, W/(m·K); l 为特征尺寸, m; N_u 为努赛尔数。

$$N_u = C(G_r P_r)^n \quad (11)$$

$$G_r = \frac{g \beta \Delta T l^3}{v^2} \quad (12)$$

$$P_r = \frac{v}{\alpha} \quad (13)$$

式(11)-(12)中: G_r 为格拉晓夫数; P_r 为普朗特数; 系数 C 和指数 n 为常数。

1.3 电磁场—流场—温度场耦合计算

采用有限元数值计算方法,对电缆及其钢支架进行电磁场—流场—温度场耦合计算,首先通过电磁场计算得到钢支架上的涡流损耗,将其作为温度场计算的热源载荷,考虑空气的自然对流散热方式,最终计算出电缆支架的温度分布,流程图见图1。

2 电缆支架温升实验平台

搭建电缆支架温升实验平台,在密闭的实验木箱中模拟电缆沟中的自然对流现象,并进行电缆支

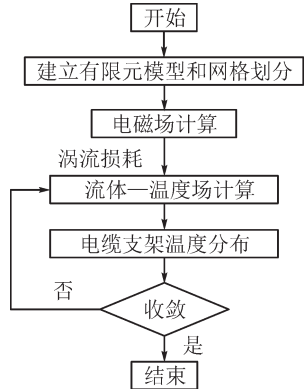


图1 电磁场—流场—温度场耦合流程框图

Fig. 1 Flow chart of electromagnetic-fluid-thermal fields analysis

架的温升实验。在仿真方法和实验平台条件一致的前提下,对比仿真分析得到的温升数据和实验平台测量得到的温升数据,验证电缆支架温升计算的正确性。

电缆支架温升实验平台见图2,包括实验木箱、电缆、升流变、调压器、开关柜、控制柜、控制系统。通过控制系统调控电缆回路电流,并能够实时监测各测温模块获取的温度数据。实验电缆支架和热电偶测温模块见图3。

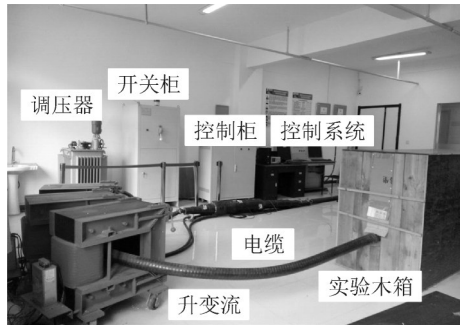
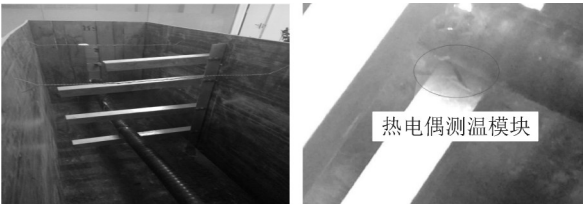


图2 电缆支架温升实验平台

Fig. 2 Cable support temperature-raising platform



(a) 木箱内电缆支架 (b) 热电偶测温模块

图3 实验电缆支架和热电偶测温模块

Fig. 3 Experimental cable support and thermocouple temperature measuring modul

温度测量模块见图3。电缆支架设计图见图4,实验木箱长2 400 mm,宽800 mm,高1 200 mm,电缆支架规格为L63×5 mm角钢,立柱长为1 150 mm,顶层横担支架长500 mm,下三层横担支架长为700 mm。实验平台采用单相电缆,电缆型号为YJLW03 64/110 kV,电缆放在最

底层横担支架上方,热电偶测温装置测量相应点温度,环境温度 T_0 ,底层横担支架测量温度 T_1 ,第二横担支架测量温度 T_2 ,电缆芯温度为 T_3 ,实验时用木板将木箱进行封顶。

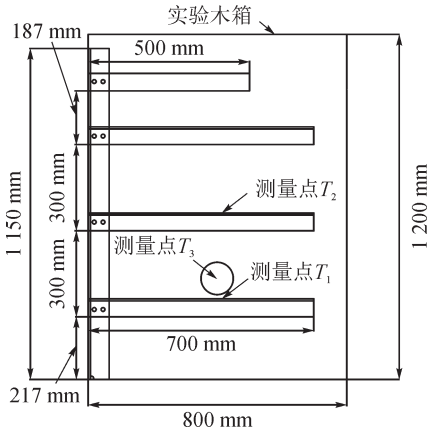
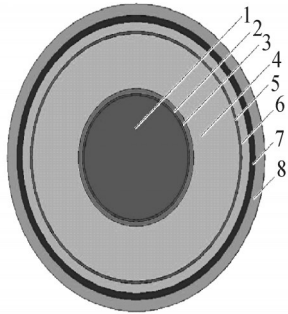


图4 电缆支架设计图

Fig. 4 Cable support design

110 kV 电缆的设计图见图5,从里到外分别为导体、半导体特多龙带、导体屏蔽、XLPE绝缘、绝缘屏蔽、半导体缓冲阻水带、皱纹铝护套和半硬质阻燃聚氯乙烯护套。



1—导体(厚度:38.9 mm); 2—半导体特多龙带(厚度:0.8 mm); 3—导体屏蔽(厚度:1.5 mm); 4—XLPE绝缘(厚度:16 mm); 5—绝缘屏蔽(厚度:1 mm); 6—半导体缓冲阻水带(厚度:5 mm); 7—皱纹铝护套(厚度:2.3 mm); 8—半硬质阻燃聚氯乙烯护套(厚度:4.5 mm)。

图5 110 kV 电缆设计图

Fig. 5 110 kV cable design

3 仿真与实验对比

根据电缆支架温升实验平台的实际尺寸,通过Ansys软件建立三维仿真模型,见图6,三维仿真模型包括电缆支架、单相电缆、实验木箱以及木箱内的流体空气。

电缆和电缆支架的有限元模型见图7,支架的温升主要是其在电磁场中产生涡流损耗从而导致温度上升的,电缆中薄层材料相对磁导率是1,不影响电磁场分布,对支架温升影响不大,而薄层结构不易剖分,因此对薄层材料切割分成两层进行双层剖分确保剖分节点在薄层内。考虑到电缆支架是

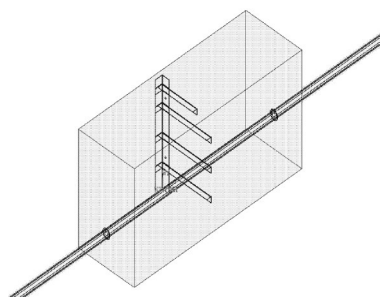


图6 三维仿真模型

Fig. 6 3-D simulation model

文中主要研究对象,并且支架中场量的变化梯度较大,为了得到更加准确的支架温升数据,对电缆支架进行局部网格细化划分。

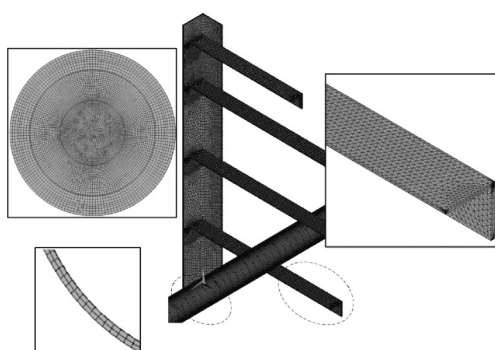


图7 电缆和电缆支架有限元模型

Fig. 7 Finite element model of cable and cable support

3.1 电缆支架三维电磁场计算

电磁场计算中,采用有限元法进行电缆支架的三维时谐电磁场计算,电缆加载频率为50 Hz,有效值为1 000 A的正弦交流电流,并设置第一类边界条件,即磁力线平行边界条件,矢量磁位 $A=0$,电磁场计算所需材料参数见表1。

表1 电磁场计算所需材料数据

Table 1 Parameters for magnetic field analysis

结构	电阻率/($\Omega \cdot m$)	相对磁导率
导体(铜芯)	1.75×10^{-8}	1
半导体特多龙带	—	1
导体屏蔽	—	1
XLPE绝缘	—	1
绝缘屏蔽	—	1
半导体缓冲阻水带	—	1
皱纹铝护套	2.83×10^{-8}	1
半硬质阻燃聚氯乙烯护套	—	1
钢支架	2.00×10^{-7}	200
空气	—	1
木箱	—	1

当加载的频率为50 Hz,有效值为1 000 A的正弦交流电流时,温升实验平台电缆支架电流密度见图8,在最底层横担支架处于电缆正下方的位置的电流密度最大,离电缆越远的横担支架电流密度越小。并且计算得到整个电缆支架的涡流损耗功率 $P=1.9$ W,从图8可以看出,电缆支架出现较大的涡流损耗。

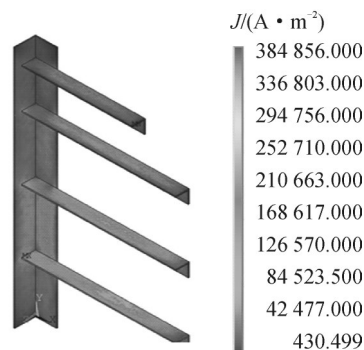


图8 实验平台电缆支架电流密度

Fig. 8 Current density of experimental cable support

3.2 电缆支架三维流场—温度场计算

在电磁场分析中,通过计算获取电缆支架涡流损耗功率和电缆发热功率,在不改变分析模型的基础上,通过改变单元性质,进行电缆支架的流场—温度场耦合分析。将电磁场分析得到的焦耳热耦合作为体积热源,测量得到环境温度为39.3 $^{\circ}C$,木板表面对流换热系数设定为5 $W/(m^2 \cdot K)$,设置实验木箱内表面处空气无滑移边界条件,即 $v_x=v_y=v_z=0$ (流体速度的 x 分量、 y 分量和 z 分量),设置参考压力。流场—温度场计算所需材料参数如表2。

表2 流场—温度场计算所需材料数据

Table 2 Parameters for fluid-thermal field analysis

结构	热导率/ [$W \cdot (m \cdot K)^{-1}$]	密度/ ($kg \cdot m^{-3}$)	比热容/[$J \cdot (kg \cdot K)^{-1}$]
导体(铜芯)	398.000	8 933.00	385
半导体特多龙带	0.300	1 150.00	1 960
导体屏蔽	0.200	938.00	1 670
XLPE绝缘	0.270	920.00	2 500
绝缘屏蔽	0.200	938.00	1 670
半导体缓冲阻水带	0.220	910.00	1 883
皱纹铝护套	237.000	2 700.00	880
半硬质阻燃聚氯乙烯护套	0.160	1 380.00	1 283
钢支架	49.300	7 850.00	460
空气	0.025	1.16	1 000
木箱	0.110	500.00	2 010

通过流场—温度场计算得到电缆支架的温度分布见图9,电缆支架最高温度为49.03℃,最高温度出现在电缆正下方的第一横担支架上的 T_1 位置,并沿着两边逐渐减少,距离电缆越远部分,温度越小。

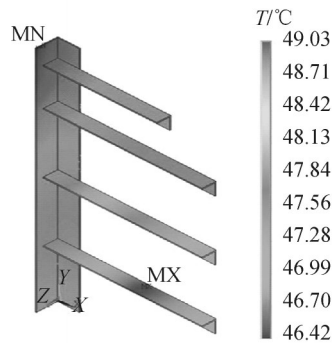


图9 电缆支架温度分布图

Fig. 9 Temperature distributions of the cable support

电缆温度分布图见图10,最高温度72.47℃出现在缆芯位置,并沿着半径方向逐渐减低。

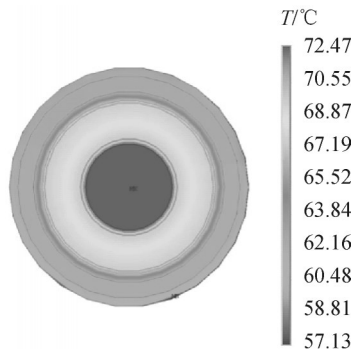


图10 电缆温度分布图

Fig. 10 Temperature distributions of the cable

在流场—温度场中空气的流动情况也是影响电缆支架温度的重要因素,通过流体场计算得到木箱内空气的流动速度矢量图见图11,木箱内部空气速率最大是0.303 m/s,在电缆附近温度最高,主要是因为电缆温度较高,周围空气运动比较激烈,空气沿着壁面向下运动,并在过程中和木箱壁面完成热交换,在木箱内形成了自上而下的自然对流现象。

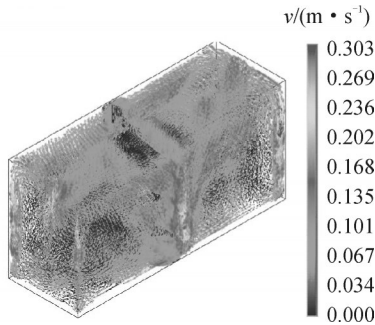


图11 空气速度矢量图

Fig. 11 Velocity distribution of the air flow

3.3 仿真结果与实验结果对比

对电缆支架温升实验平台加载电流1 000 A,经过6 h的温升实验,等各项温度达到稳定基本不再上升时,记录得到如图12的实验结果,从图12可以看出,温度达到稳定时,环境温度 T_0 为39.30℃,电缆支架 T_1 为50.04℃,电缆支架 T_2 为47.70℃,电缆缆芯温度 T_3 为74.30℃。

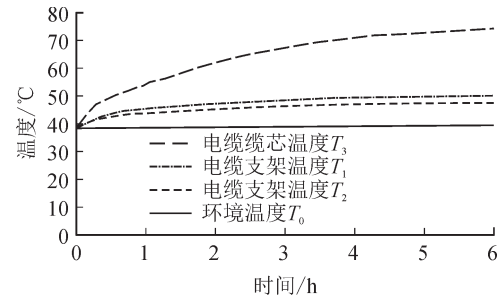


图12 电缆支架温升实验平台实验结果

Fig. 12 Results of cable support temperature-raising platform

根据表3对比电缆支架试验平台的仿真结果和实验结果,电缆支架温度 T_1 的误差为2.72%,电缆支架温度 T_2 的误差为1.72%,电缆缆芯温度 T_3 误差为2.46%,都在误差允许范围内,因此对电缆支架温升计算是合理正确的。

表3 仿真结果和实验结果对比

Table 3 Contrast of simulation results and experimental results

项目	T_1	T_2	T_3
仿真结果/℃	49.03	48.52	72.47
实验结果/℃	50.40	47.70	74.30
误差/%	2.72	1.72	2.46

4 结语

文中基于电磁场—流场—温度场多物理对单相电缆的支架进行温升计算。对电缆支架建立三维有限元模型,通过时变电磁场计算电缆支架涡流损耗,并将损耗作为流场—温度场的发热源,计算得到电缆支架的温度分布云图以及空气速度矢量图,将仿真结果和实验结果进行对比,误差在允许范围之类,表明了电缆支架温升计算的误差满足工程计算的需求,证明了电缆支架温升计算的正确性。

参考文献:

[1] 马国栋. 电线电缆载流量[M]. 北京:中国电力出版社, 2003: 149-154.

- MA Guodong. Wire and cable ampacity[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2003: 149-154.
- [2] 蒲丽娟, 游世良, 吴昊, 等. 大截面电力电缆固定金具参数与涡流损耗的数值关系分析[J]. 高压电器, 2016, 52(1): 129-135.
- PU Lijuan, YOU Shiliang, WU Hao, et al. Numerical relationship between metal cleat parameters of large cross-section power cable and eddy current loss[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(1): 129-135.
- [3] 王雨阳, 王永强, 王浩. 一起110 kV电缆终端特殊部位发热的分析处理[J]. 江苏电机工程, 2014, 33(1): 9-10.
- WANG Yuyang, WANG Yongqiang, WANG Hao. Analysis on terminal overheat of a 110 kV cable[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2014, 33(1): 9-10.
- [4] BURGESS J J, CAPOZUCCA P. Measurement of cable support point motions due to vortex - induced vibrations experiments with a vertical towed cable[C]//IEEE Conference Publications. [S. l.]: IEEE, 1989: 1448-1455.
- [5] 韩金华, 杨晓辉, 王丰华, 等. 500 kV电力变压器直流偏磁损耗特性的仿真研究[J]. 高压电器, 2015, 51(5): 40-46.
- HAN Jinhua, YANG Xiaohui, WANG Fenghua, et al. Simulation study of DC bias loss characteristics of 500 kV power transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(5): 40-46.
- [6] 张卫纯, 潘风明, 张新根, 等. 基于有限元法的电力变压器金属结构件损耗分析[J]. 高压电器, 2013, 49(11): 55-61.
- ZHANG Weichun, PAN Fengming, ZHANG Xingen, et al. Power loss analysis for structural parts in transformer based on finite element method[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(11): 55-61.
- [7] 周伟, 李岩, 井永腾, 等. 换流变压器谐波损耗的计算与分析[J]. 高压电器, 2012, 48(8): 18-23.
- ZHOU Wei, LI Yan, JING Yongteng, et al. Calculation and analysis of harmonic loss in converter transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(8): 18-23.
- [8] 邱洪波. 高速永磁发电机转子涡流损耗优化及对温度分布影响的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2014.
- QIU Hongbo. Research on eddy current loss optimization and temperature distribution in high speed permanent magnet generator[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2014.
- [9] 朱卫光. 电动车辆永磁同步电机转子永磁体损耗及温度场研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2014.
- ZHU Weiguang. Research on rotor magnet loss and thermal field in permanent magnet synchronous motor for electric vehicles[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2014.
- [10] 范龙. 基于Ansys的复合材料电缆支架的仿真分析[D]. 保定: 华北电力大学, 2014.
- FAN Long. Simulated analysis of the composite cable support based on Ansys[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2014.
- [11] 马昀涛, 李凌睿, 朱萍. 玻璃钢复合材料电缆支架的应用分析[J]. 河北电力技术, 2013, 32(6): 29-30.
- MA Yuntao, LI Lingrui, ZHU Ping. Application analysis on FRP composite material cable bracket[J]. Hebei Electric Power, 2013, 32(6): 29-30.
- [12] WANG Rongguo, LI Haiyan, LIU Wenbo, et al. Surface modification of poly(urea-formaldehyde) microcapsules and the effect on the epoxy composites performance[J]. Journal of Macromolecular Science, Part a: Pure and Applied Chemistry, 2010, 47(10): 991-995.
- [13] 侯静梅, 欧繁. SMC高分子复合材料电缆支架的性能优势和应用[J]. 价值工程, 2012, 31(32): 69-70.
- HOU Jingmei, OU Fan. The performance advantages of SMC cable support[J]. Value Engineering, 2012, 31(32): 69-70.
- [14] 朱景林. 电缆支架涡流损耗的研究[J]. 上海电力, 2009(5): 400-402.
- ZHU Jinglin. Research of cable eddy current losses[J]. Shanghai Electric Power, 2009(5): 400-402.
- [15] 聂永峰, 王建辉, 孟毓. 输电电缆支架涡流损耗的计算与分析[J]. 电网技术, 2008, 32(1): 142-145.
- NIE Yongfeng, WANG Jianhui, MENG Yu. Calculation and analysis of eddy current losses in girder frame for transmission cables[J]. Power System Technology, 2008, 32(1): 142-145.
- [16] 朗道. 流体力学[M]. 孔详言, 徐燕候, 庄礼贤, 译. 北京: 高等教育出版社, 1984: 25-30.
- LANG Dao. Hydrodynamic[M]. KONG Xiangyan, XU Yanhou, ZHUANG Lixian, Translate. Beijing: Higher Education Press, 1984: 25-30.
- [17] 李秀广. SF₆电流互感器温度场有限元分析[J]. 高压电器, 2015, 51(2): 121-124.
- LI Xiuguang. Finite element analysis of temperature field in SF₆ insulated current transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(2): 121-124.
- [18] 李明. 大温差封闭腔体自然对流数值模拟[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
- LI Ming. Numerical simulation of large temperature difference natural convection in the enclosed cavity[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2015.
- [19] 李庆领, 杨广志, 李涛. 水平圆管在大空间内自然对流换热的实验与数值分析[J]. 兰州理工大学学报, 2013, 39(2): 43-46.
- LI Qingling, YANG Guangzhi, LI Tao. Experiment on heat exchange with natural convection over horizontal circular

- texture by using fast multipole boundary method[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(9): 1436-1445.
- [18] 文习山, 郭婷婷, 吴小东, 等. 基于边界元法的江河湖泊对直接地极设计的影响[J]. 高电压技术, 2016, 42(12): 3868-3874.
- WEN Xishan, GUO Tingting, WU Xiaodong, et al. Influence of rivers and lakes on DC ground Pole design based on boundary element method[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(12): 3868-3874.
- [19] NAHMAN J, PAUNOVIC I. Effects of the local soil nonuniformity upon performances of ground grids[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(4): 2180-2184.
- [20] LIU Jie, DAWALIBI F P, MITSKEVITCH N, et al. Realistic and accurate model for analyzing substation grounding systems buried in various backfill material[C]//2014 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. [S. l.]: IEEE, 2014: 1-6.
- [21] FORTIN S, MITSKEVITCH N, DAWALIBI F P. Analysis of grounding systems in horizontal multilayer soils containing finite heterogeneities[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(6): 5095-5100.
- [22] GOUDA O E, EL DEIN A Z. Ground potential rise of faulty substations having equal and unequal spacing grounding grids conductors[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2017, 11(1): 18-26.
- [23] 许 军, 蓝 磊, 文习山, 等. 三峡电站模型地网接地电阻小比例模型试验研究[J]. 电网技术, 2003, 27(1): 38-40.
- XU Jun, LAN Lei, WEN Xishan, et al. Small-scale model test for grounding resistance of grounding mesh model for three gorges hydroelectric power station[J]. Power System Technology, 2003, 27(1): 38-40.
- [24] WEBSTER J G. Electrical impedance tomography[M]. London: Institute of Physics Publishing, 1990.
- 陶亚光(1992—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统接地技术。
- 李清泉(1969—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为气体放电、高电压与绝缘技术(通讯作者)。

(上接第148页)

- pipe in large space and its numeric analysis[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2013, 39(2): 43-46.
- [20] 陈彦君, 李元阳, 刘振华. 基于多相流模型的腔体内纳米流体自然对流换热数值模拟[J]. 上海交通大学学报, 2015, 49(5): 600-607.
- CHEN Yanjun, LI Yuanyang, LIU Zhenhua. Experiment on heat exchange with natural convection over horizontal circular pipe in large space and its numeric analysis[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2015, 49(5): 600-607.
- [21] 张冠生. 电器理论基础[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989: 17-24.
- ZHANG Guansheng. Basis theory of electric appliance[M]. Beijing: China Machine Press, 1989: 17-24.
- 张宇娇(1979—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力设备及电磁装置多物理场耦合数值分析及机辅设计。
- 郭桂炜(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电磁及多物理场耦合研究。
- 黄雄峰(1980—), 男, 博士, 研究方向为电力设备及电磁装置多物理场耦合研究、网络化控制系统。