

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.05.015

环网柜电缆室电缆屈曲对套管受力的影响规律

潘明龙¹, 方春华², 易满成³, 顾春晖³, 李桂军⁴, 沈应涛⁴

(1. 广东电网有限责任公司清远供电局, 广东 清远 511518; 2. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002;
3. 南网广州供电公司, 广州 510080; 4. 欧玛嘉宝(珠海)开关设备有限公司, 广东 珠海 519070)

摘要: 环网柜在与三芯电缆连接时其穿墙套管经常受到较大的作用力而受损,原因是电缆具有很大的抗弯刚度,其屈曲产生了较大的作用力于套管上。文中基于有限元分析建立了电缆芯线屈曲分析模型和电缆屈曲试验,探究了标准安装时、T型套管偏斜时和电缆芯线截取过长时3种情况下套管高度、套管间距、电缆型号和芯线弯曲形态对套管受力的影响规律,并提出合理建议来改善套管受力。为环网柜的设计和标准安装提供了理论依据。

关键词: 环网柜; 电缆屈曲; 套管受力; 有限元仿真

Influence of Cable Buckling on Bushing Force in Cable Chamber of Ring Main Units

PAN Minglong¹, FANG Chunhua², YI Mancheng³, GU Chunhui³, LI Guijun⁴, SHEN Yingtao⁴

(1. Qingyuan Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangdong Qingyuan 511518, China; 2. School of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China; 3. Guangzhou Power Supply Company, CSG, Guangzhou 510080, China; 4. Ormazabal Switch Equipment Limited Company(Zhuhai), Guangdong Zhuhai 519070, China)

Abstract: The wall bushing is often subjected to great force to be damaged or temperature rise when it connected with the three core cable. The reason is that the cable has large flexural rigidity, the force from cable buckling impact on the casing when the bushing connected to the split cable. In this paper, single-phase and three-phase model of cable cores is established based on finite element analysis, then the influence of case bushing height, bushing spacing, cable type and core wire bending shape on bushing stress are analyzed under the three kinds of conditions of standard installation, T type bushing deflection and cable core line intercept over-length. Last, cable buckling tests are designed to validate the result, the result shows that the error in a reasonable range. It provides a theoretical basis for the production design and standard installation of the ring main unit.

Key words: ring main unit; cable buckling; bushing force; finite element simulation

0 引言

环网供电技术可以大大提高供电的可靠性和稳定性,因此各个城市电网改造中日益受到关注和应用,同时环网柜因为其体积小、方便安装和维修,并且在使用的時候运行成本小等特点也得到广泛的应用^[1-3]。但是当前环网柜大多使用欧式的,在欧洲电力电缆通常使用的是单芯电缆,在与环网柜连接时各相分别安装,不用考虑电缆屈曲所产生的巨大作用力。而在国内配电网中,电力电缆通常采

用三芯电缆,与电缆终端设备安装时须弯曲以配合安装到位,所以会对电缆终端设备产生较大作用力,由于电力设备设计生产时往往不会考虑力的影响,因此在国内配电网中电力电缆终端设备如开关柜、环网柜等常常会出现套管破裂、套管内发热等问题,对配电网安全稳定运行带来不利影响^[4-6]。

对于目前环网柜套管受力过大,有些学者提出了一些改善措施。如文[7-8]针对欧式环网柜与三芯电缆的连接问题提出了应对方法如增加环网柜基础高度,使单相电缆芯线有足够的弯曲长度从而

降低电缆的弯曲应力,改善套管受力;文[9-11]针对环网柜与电缆终端连接处出现的出线套管破裂的问题提出了施工工艺上的注意问题和改善措施。但都只是主观的凭借经验提出的观点,而没有进行客观的理论计算。

由于套管受损主要是由电缆芯线屈曲造成的,因此文中基于有限元分析基础建立了电缆芯线的一相和三相模型,并分析了标准安装时、T型套管偏斜时和电缆芯线截取过长时3种情况下套管高度、套管间距、电缆型号和芯线弯曲形态对套管受力的影响规律,并设计了电缆屈曲试验进行验证,误差在合理范围内。为环网柜的生产设计和标准安装提供了理论依据。

1 电缆屈曲仿真

以型号为ZRYJLV22-8.7/10-3×240 mm²铝芯电力电缆为例定义模型参数,导体直径为18.4 mm,绝缘标称厚度4.5 mm,忽略电缆芯线的铜屏蔽;单元类型选择梁单元Beam189,线模型^[12-14]。

模型各部分材料属性见表1,对于电缆芯线的塑性形变分析则使用经典双线性随动强化(BKIN)模型^[15-17]。

表1 各部分材料属性

Table 1 Material properties of each part		
材料	铝绞线	XLPE
弹性模量/Pa	17×10 ⁹	120×10 ⁶
泊松比	0.42	0.40
屈服强度/Pa	8.01×10 ⁷	1.90×10 ⁷
密度/(kg·m ⁻³)	2 800	960

由于电缆终端固定在环网柜套管上之后是没有外力作用的,所以没有集中力加载电缆芯线上,但是要对电缆芯线底端施加全约束,对电缆芯线顶端施加两个方向的位移约束,一是 x 方向位移,为环网柜套管间距,二是 y 方向位移,安装情况不同,位移取值不同。通过对关键点之间的线模型施加转动约束来控制电缆芯线的弯曲形态,通过发出命令(NLGEOM,ON)来激活大应变效应然后进行计算。

2 仿真结果与分析

2.1 标准安装时各因素对套管受力影响

2.1.1 套管高度

套管高度为电缆抱箍与套管的竖直距离,文中选取了126、107、145 mm 3种典型套管间距进行建模分析,在对电力电缆的截面积的选取上,文中选取了

10 kV 电压等级常用的大部分典型截面3×120 mm²、3×150 mm²、3×185 mm²、3×240 mm²、3×300 mm²。环网柜套管高度的取值见表2。

表2 模型变量

Table 2 Model variables

变量	数值
套管间距/mm	107、126、145
缆芯截面积/mm ²	3×120、3×150、3×185、3×240、 3×300
环网柜套管高度/m	0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1.0

套管受力随套管高度变化曲线图见图1,随着电缆截取长度的增加,电缆芯线弯曲程度减小,产生的应力也在减小。套管受力随着套管高度的增加而逐渐减小,但其减小的幅度也在慢慢变小。对于截面积为120、150、185 mm²的电缆芯线,当套管高度到达500 mm时,套管受力已经小于套管允许作用力500 N^[6],在大于700 mm时,力 F 的变化率变得非常小,套管所受作用力每减少30~40 N线芯长度就要增加100~200 mm;对于截面积为240~300 mm²的电缆芯线分别在套管高度到达600 mm和800 mm时,套管受力已小于套管允许作用力。套管受力每减小50 N,线芯长度就要增加100 mm左右。

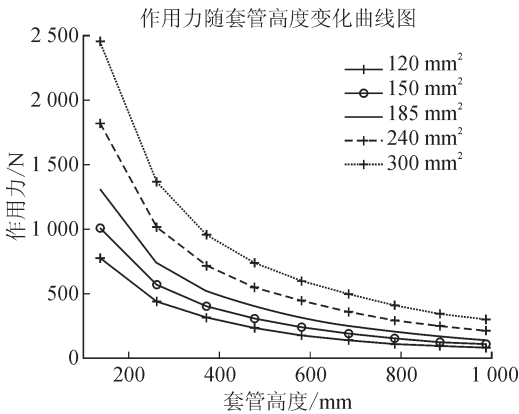


图1 套管受力随套管高度变化曲线图

Fig. 1 Curves of casing stress with the height of casing

2.1.2 套管间距

对于电缆芯线标准安装时,套管间距越小,电缆芯线的屈曲程度越小,其产生的弯曲应力也会越小。见图2,相同电缆截取长度下,套管所受作用力变化是非常小的。对于足够长的电缆芯线来说,当套管间距从107 mm增加到126 mm时,只增加了很小的电缆偏斜角度,套管所受到的作用力只增加了不到10 N。因此,标准安装时,套管间距对电缆芯线的弯曲应力的影响比较小。

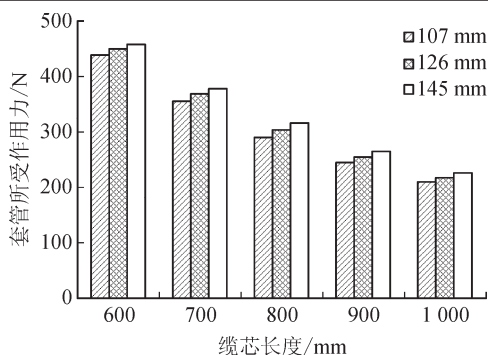


图2 240 mm²截面电缆对套管的作用力柱状图

Fig. 2 Force of 240 mm² column cable to casing

2.2 T型套管偏斜对套管受力影响

一般在环网柜安装时,许多电力施工队并不会严格按照施工说明书上进行安装,尤其在与电缆芯线进行连接时。例如,电缆终端接头安装说明上标识,电缆芯线在进入环网柜进线室与套管进行连接时要竖直安装,而通常电力施工队在安装时并没有对电缆芯线和套管进行竖直连接,因为这样会大大减少电缆的弯曲应力,从而减小对套管的作用力,这也得到许多电力开关设备厂家的默许^[18-19]。

T型套管偏斜时,电缆芯线模型的建立与正常时一样,相应的材料属性和模型变量在前面章节中已列出,在对模型进行网格划分之后,对模型的约束从顶端竖直约束改成无约束,再进行计算求解,求解之后的电缆芯线形态见图3,标准安装时电缆芯线形态见图4,图3与图4所示的标准安装电缆相比,电缆芯线对套管的作用力明显减小。

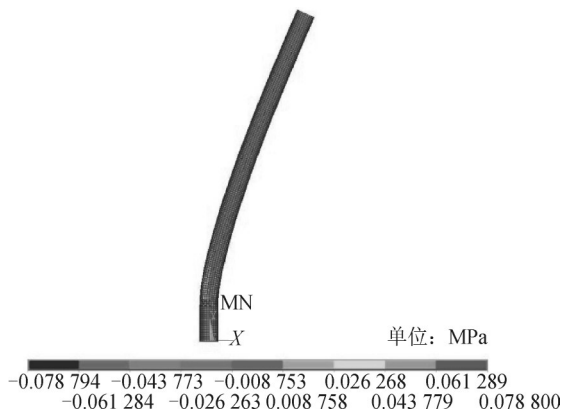


图3 T型套管偏斜时电缆芯线形态图

Fig. 3 The shape of cable core in T type casing deflection

两种情况套管所受作用力柱形图见图5,T型套管倾斜安装时要比套管竖直安装所受到的力小得多,如套管间距为126 mm时,各个电缆截取长度下套管所受作用力减小了大约50%左右。

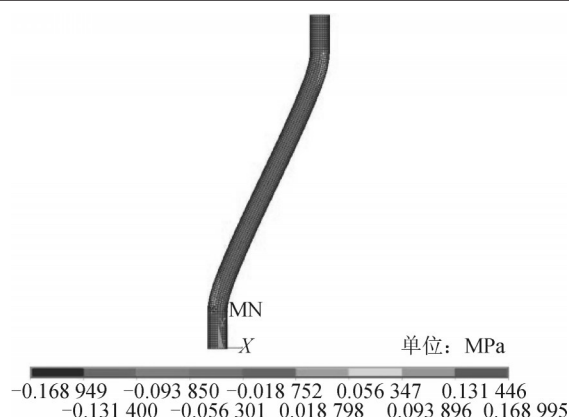


图4 标准安装时电缆芯线形态

Fig. 4 The shape of cable core in the standard installation

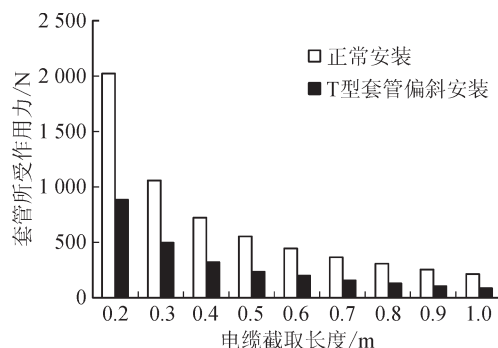


图5 两种情况套管所受作用力柱形图

Fig. 5 Column of casing stress under two kinds of conditions

2.3 电缆芯线截取过长时对套管受力影响

2.3.1 套管高度

由于三芯电缆采用的是一个共同的电缆卡箍,3支电缆相互影响,所以如果芯线电缆截取不合适时,很难调整到三相电缆都恰好合适。因此,必然有一相或两相芯线电缆比标准长度要大些。根据环网柜厂家提供的事故调查报告,这个误差值在1 cm左右。若电缆截取长度截取正好合适,那芯线电缆与套管连接后只受到较小的水平力作用,芯线电缆从电缆卡箍处到套管的双头螺栓处的弯曲曲率是比较小的,见图6,所以芯线电缆对套管的作用力也相对较小。而如果长度截取不合适,为了能使电缆接头的压接线耳与套管连接,必然要压低接线头,造成电缆弯曲过大,正如图7所示,导致对套管的作用力的增加。

套管间距为126 mm时套管y方向受力见图8,由图8可以看出,在电缆截取过长时,随着芯线长度的增加,套管竖直方向(y方向)受力在逐渐减小,而且开始时套管受力减小的非常快,但是随着芯线长度的增加,其减小的幅度开始变缓。

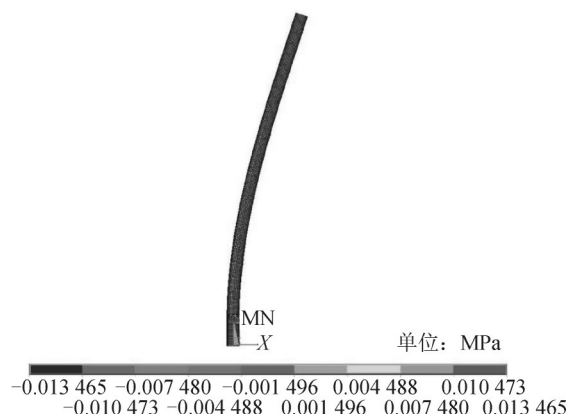


图6 电缆截取长度合适时单相电缆安装形态

Fig. 6 Installation shape of single phase cable cut suitable

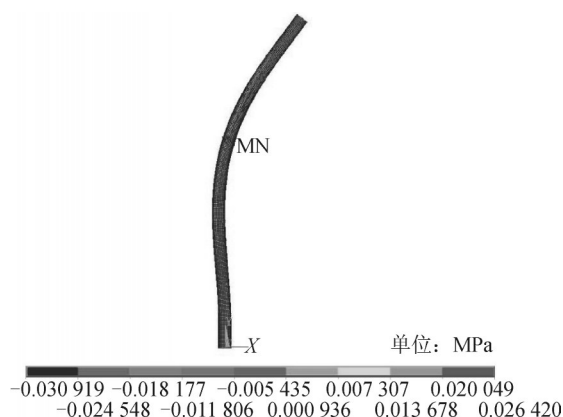


图7 电缆截取长度过长时单相电缆安装形态

Fig. 7 Installation shape of single phase cable

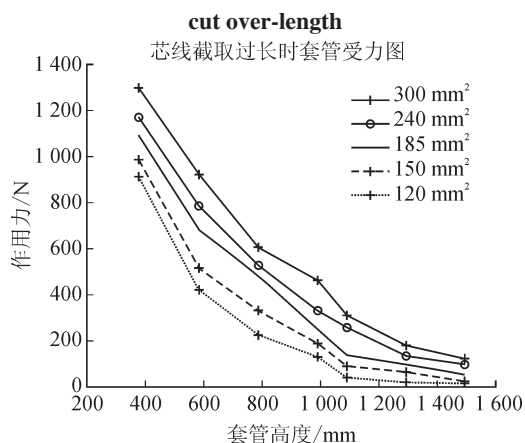


图8 套管间距为126 mm时套管y方向受力

Fig. 8 Casing y direction force when the casing distance was 126 mm

2.3.2 套管间距

电缆芯线截取过长,套管受力会随着套管间距的增大而减小,见图9,套管间距每增加约20 mm时,套管受力就会减小约100~200 N左右,套管间距的减小会直接增大电缆的弯曲应变,所以电缆芯线会对套管产生较大的作用力。因此,电缆芯线截取过长时,套管间距对其所受作用力的影响是较大的。

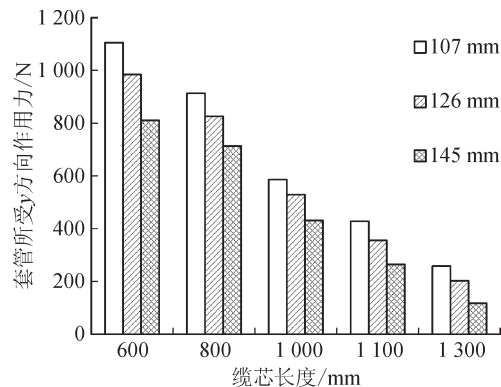


图9 240 mm²截面电缆产生的对套管的y方向作用力柱状图

Fig. 9 Column of y direction force on casing of 240 mm²

2.3.3 电缆芯线弯曲形态

由于施工现场的多样化和施工人员的操作习惯的差异化造成电缆弯曲形态的不确定性,尤其电缆芯线过长时,常常会出现电缆线芯下部、中部或上部弯曲,见图10。

为探究电缆芯线的弯曲形态对环网柜出线套管的作用力的影响规律,文中对相间距为126 mm,截面积为300 mm²和240 mm²的电缆芯线进行了仿真计算,通过设置芯线不同部位线单元的转动约束来控制电缆芯线的弯曲形态,计算结果见表3。

表3中数据为电缆芯线弯曲部位不同时套管的受力,由表3中数据可知,电缆芯线在底部弯曲时套管受力最小,在中部弯曲时套管受力最大。

3 电缆屈曲试验

为了验证仿真结果的正确性,设计了电缆屈曲试验,试验原理见图11,将剥离好的三芯电缆固定在自制的环网柜电缆室内,电缆底端用电缆抱箍与环网柜固定,顶端用双头螺栓与套管固定。套管嵌在环网柜电缆室壁上但不固定,紧线装置上端与双头螺栓连接,下端挂钩与环网柜底端相连。套管高度为电缆抱箍与套管的竖直距离,控制在400、600、800、1000、1100、1300、1500 mm。在调节好套管的高度和电缆芯线的长度之后,就可以进行电缆芯线的屈曲试验了,在套管不同高度下分别用紧线装置将压接线耳拉低1 cm,并记录拉力值。电缆屈曲实验平台实物图见图12,是在环网柜标准尺寸上进行的改装。

试验得到的线芯截取过长情况下套管受力随套管高度变化曲线图见图13,曲线走势是和仿真结果一致的,且与仿真结果误差大都小于5%,所以其结果是可以运用于工程实践的,其误差主要来源于

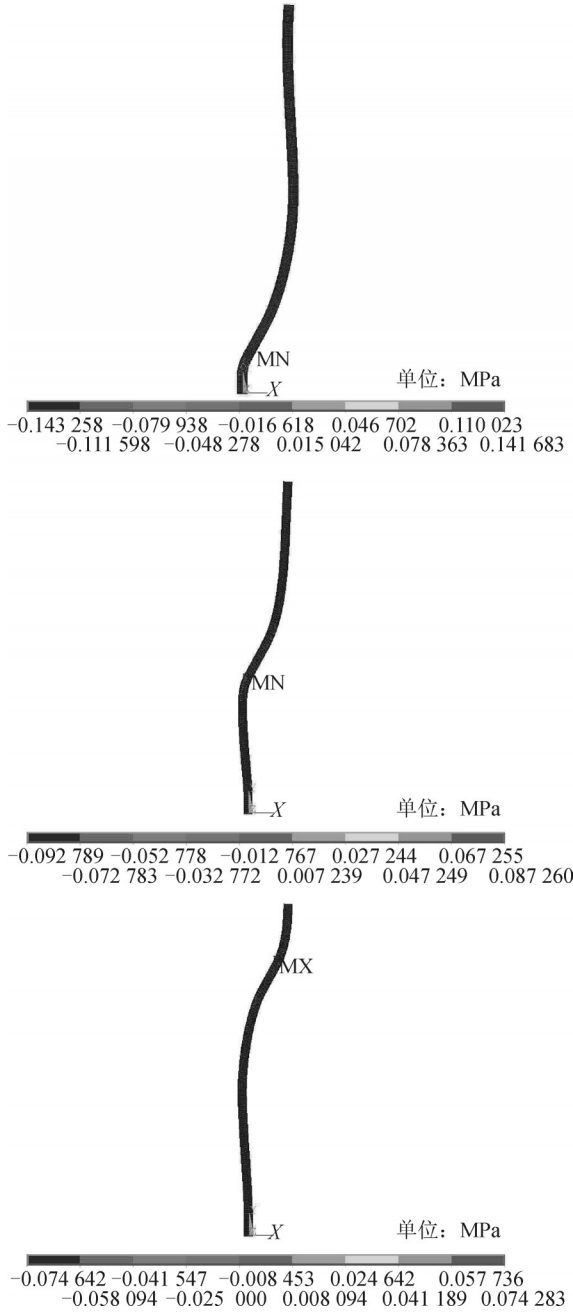


图10 电缆芯线弯曲的3种形态

Fig. 10 Three forms of cable core bending

表3 电缆不同部位弯曲时套管受力

Table 3 Casing stress at different parts of cable

套管间 距/mm	套管高 度/mm	不同弯曲处套管受力/N		
		下部	中部	上部
126	800	315	1 673	920
126	1 000	259	1 016	779

两个方面:①仿真是在非常理想的环境下进行的,没有考虑到反复弯曲的情况,而实验则会对同一个样本芯线反复弯曲,这是造成实验与仿真结果出入的重要原因;②在实验中套管是跟着线芯向

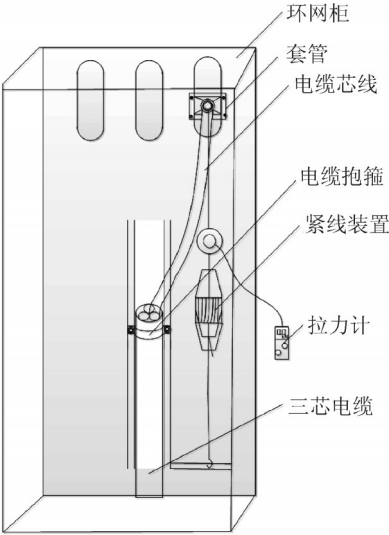


图11 套管受力试验原理图

Fig. 11 Schematic diagram of casing stress test



图12 电缆屈曲试验平台

Fig. 12 Test platform of cable buckling

下移动的,在移动过程中受到的摩擦力也会影响实验结果。

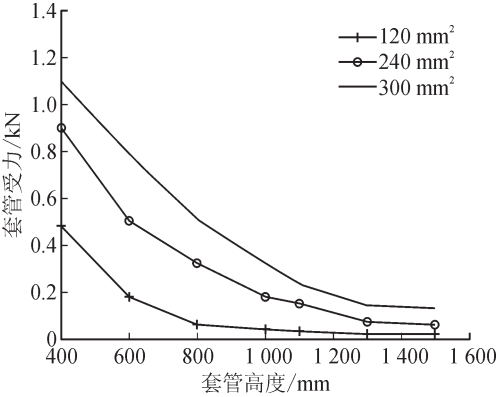


图13 套管间距126 mm时套管受力

Fig. 13 The stress of casing when casing spacing 126 mm

4 结语

套管受力随套管高度增加而减小,但是其减小

的幅度会逐渐变小,当套管高度增高到一定高度时,套管受力减小的幅度会变得非常小;

套管因受力偏斜时,套管的受力将明显会降低,最大可以降低为原来的40%左右,在不影响电气安全距离或是绝缘水平下,套管偏斜安装反而可以明显改善套管受力;

电缆标准安装时,套管受力会随着套管间距的增大而增大,套管间距每增加20 mm,套管受力增加约10 N。电缆非标准安装,如电缆截取过长时,套管受力会随着套管间距的减小而增大,套管间距每减小20 mm左右,套管所受到的竖直方向的作用力最大会增加300 N左右,此种情况下,套管间距对套管受力的影响是非常大的;

电缆非标准安装,如电缆截取过长时,套管所受的竖直力和水平力均会随着电缆截取长度的增加而减小,减小的幅度均会随着电缆截取过长的增加而逐渐减小。

参考文献:

- [1] 电线电缆手册编委会. 电线电缆手册[M]. 北京:机械工业出版社,2001.
Handbook Editorial Committee of Wire and Cable Manual. Handbook of wire and cable[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2001.
- [2] 李伟森,孟春蕾,李 蕾. 空气置换装置在产品温度试验中凝露预防方面的应用研究[J]. 环境技术, 2013(2): 48-52.
LI Weisen, MENG Chunlei, LI Lei. The application of air replacement device in condensation products in temperature tests to prevent[J]. Environmental Technology, 2013(2): 48-52.
- [3] 张东斐,都志军. 10 kV 环网柜电缆T型接头使用中应注意的问题[J]. 天津电力技术, 2006(4): 82-85.
ZHANG Dongfei, DU Zhijun. The problem need to pay attention of the use of type T connection head in 10 kV ring network cabinet cable[J]. Tianjin Electric Power Technology, 2006(4): 82-85.
- [4] 史传卿. 电力电缆安装运行技术问答[M]. 北京:中国电力出版社,2002.
SHI Chuanqing. The question and answer of power cable installation and operation technique[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [5] 巫松桢,谢大荣,陈寿田,等. 电气绝缘材料科学与工程[M]. 西安:西安交通大学出版社,1996.
WU Songzhen, XIE Darong, CHEN Shoutian, et al. Science and engineering of electrical insulation materials[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1996.
- [6] YANABU S, ZAIMA E, HASEGAWA T. Historical review of high voltage switchgear developments in the 20th century for power transmission and distribution system in Japan [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(2): 659-664.
- [7] 褚建平. 浅析10 kV 高压开关柜故障原因及防范措施[J]. 民营科技, 2012(12): 216-222.
CHU Jianping. Analysis of the fault causes and preventive measures of 10 kV high voltage switch cabinet[J]. Non-State Running Science & Technology Enterprises, 2012(12): 216-222.
- [8] 杨绪灿,杨桂通,徐秉业. 粘塑性力学概论[M]. 北京:中国铁道出版社,1987.
YANG Xucan, YANG Guitong, XU Bingye. Introduction to visco plastic mechanics[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 1987.
- [9] 龚曙光,谢桂兰,黄云清. Ansys 参数化编程与命令手册[M]. 北京:机械工业出版社,2009.
GONG Shuguang, XIE Guilin, HUANG Yunqing. Ansys parametric programming and command manual[M]. Beijing: China Machine Press, 2009.
- [10] 周金枝,李小飞. Ansys 软件在压力容器结构优化设计中的应用[J]. 湖北工业大学学报, 2008, 23(3): 64-66.
ZHOU Jinzhi, LI Xiaofei. Application of Ansys software in structural optimization design of pressure vessel[J]. Journal of Hubei University of Technology, 2008, 23(3): 64-66.
- [11] 王 雨,任亚楠,吴 猛. 钢管膨胀混凝土轴向极限承载力的有限元分析[J]. 膨胀剂与膨胀混凝土, 2016(3): 9-13.
WANG Yu, REN Yanan, WU Meng. Finite element analysis of axial ultimate bearing capacity of expansive concrete filled steel tube[J]. Expansion Agent and Expansive Concrete, 2016(3): 9-13.
- [12] 何长江. 基于Ansys 的干货集装箱力学性能分析与优化设计[D]. 南京:南京林业大学,2010.
HE Changjiang. Optimization design and analysis of mechanical properties of dry cargo container based on Ansys [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2010.
- [13] 吴凌鹏. 10 kV 开关柜常见故障综述[J]. 农村电气化, 2014(11): 60.
WU Lingpeng. Summary of common failure of 10 kV switchgear[J]. Rural Electrification, 2014 (11): 60.
- [14] 孟庆春,张 行,王俊奎. 复合材料层合梁在横向载荷作用下分层问题的解析—广义变分法[J]. 复合材料学报, 1991, 8(3): 53-60.
MENG Qingchun, ZHANG Hang, WANG Junkui. Analytical solution of the delamination problem of composite laminated beams under transverse loading: The generalized variational method[J]. Journal of Composite Materials, 1991, 8

(下转第107页)

- [15] 李善寿, 张 兴, 张鸿恺, 等. 基于功率闭环控制与 PSO 算法的全局 MPPT 方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4809-4816.
LI Shanshou, ZHANG Xing, ZHANG Hongkai, et al. Global MPPT method based on power closed-loop control and PSO algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28): 4809-4816.
- [16] 张栋梁, 谢业华, 刘 娟, 等. 基于遗传算法的有源电力滤波器滑模控制[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 69-74.
ZHANG Dongliang, XIE Yehua, LIU Juan, et al. Sliding mode control of active power filters based on genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 69-74.
- [17] 叶 林, 陈 政, 赵永宁, 等. 基于遗传算法—模糊径向基神经网络的光伏发电功率预测模型[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(16): 16-22.
YE Lin, CHEN Zheng, ZHAO Yongning, et al. Photovoltaic power forecasting model based on genetic algorithm and fuzzy radial basis function neural network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(16): 16-22.
- [18] 赵 莉, 候兴哲, 胡 君, 等. 基于改进 K-means 算法的海量智能用电数据分析[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2715-2720.
ZHAO Li, HOU Xingzhe, HU Jun, et al. Improved K-means algorithm based analysis on massive data of intelligent power utilization[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2715-2720.
- [19] 颜晓娟, 龚仁喜, 张千锋. 优化遗传算法寻优的 SVM 在短期风速预测中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 38-42.
YAN Xiaojuan, GONG Renxi, ZHANG Qianfeng. Application of optimization SVM based on improved genetic algorithm in short-term wind speed prediction[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 38-42.
- [20] 陶新民, 张冬雪, 郝思媛, 等. 基于谱聚类欠取样的不平衡数据 SVM 分类算法[J]. 控制与决策, 2012, 27(12): 1761-1768.
TAO Xinmin, ZHANG Dongxue, HAO Siyuan, et al. SVM classifier for unbalanced data based on spectrum cluster-based under-sampling approaches[J]. Control and Decision, 2012, 27(12): 1761-1768.

徐卫东(1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统在线检测技术。

聂一雄(1964—), 男, 博士, 副教授, 硕导, 主要研究方向为电工理论新技术、电仪表的应用研究。

周文文(1992—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为高压电器设备检测技术。

(上接第 99 页)

- (3): 53-60.
- [15] 李思简, 万 晖. 层合圆柱壳体表层矩形分层屈曲分析[J]. 上海交通大学学报, 1990, 24(5, 6): 164.
LI Sijian, WAN Hui. Layered buckling analysis of laminated circular cylindrical shells[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 1990, 24(5, 6): 164.
- [16] 王勖成, 邵 敏. 有限单元法基本原理和数值方法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
WANG Xucheng, SHAO Min. Basic theory and numerical method of finite element method[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012.
- [17] 朱立波. 基于 Ansys 的钢衬钢筋混凝土压力管道优化设计研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2010.
ZHU Libo. Study on the optimization design of earth pressure pipeline steel liner reinforced based on Ansys[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2010.
- [18] 林立轩. SF₆ 环网柜与电缆连接的工艺改进[J]. 农村电气化, 2007(5): 57-59.
LIN Lixuan. Process improvement of SF₆ ring network cabinet and cable connection[J]. Rural Electrification, 2007(5): 57-59.
- [19] 罗建民. 关于环网柜与 10kV 电缆连接问题的探讨及其解决措施[J]. 广东科技, 2009(10): 174-175.
LUO Jianmin. Discussion on the connection between the ring network cabinet and 10 kV cable and its solution measures[J]. Guangdong science and technology, 2009(10): 174-175.

潘明龙(1990—), 男, 硕士, 主要从事高电压绝缘与在线监测技术方面的研究工作。

方春华(1980—), 男, 博士, 副教授, 主要从事高电压绝缘与在线监测技术方面的研究工作。