

电力电缆国内外研究综述

邵森安^{1,2}, 马 颢³, 丰如男⁴, 马修水², 叶凌箭⁵, 周克良¹

(1. 江西理工大学 电气工程与自动化学院, 江西 赣州 341000; 2. 浙大宁波理工学院 信息科学与工程学院, 浙江 宁波 315100; 3. 宁波财经学院 信息工程与数据学院, 浙江 宁波 315175; 4. 宁波东方电缆股份有限公司, 浙江 宁波 315000; 5. 湖州师范学院工学院, 浙江 湖州 313000)

摘要:综述了国内外电力电缆研究现状以及存在的问题,重点分析了高压直流电缆的发展、电缆状态评估、温度场与载流量的计算,分析高温超导电缆以及附件的电磁场特性等。针对电力电缆发展存在的主要问题,提出若干对策建议。

关键词:电力电缆; 状态评估; 温度场与载流量; 电缆附件; 电磁场; 问题与建议

中图分类号: TM247.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-6901(2021)03-0001-06

Review of Researches on Power Cables at Home and Abroad

SHAO Senan^{1,2}, MA Xie³, FENG Runan⁴, MA Xiushui², YE Lingjian⁵, ZHOU Keliang¹

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China; 2. School of Information Science and Engineering, Ningbo Tech University, Ningbo 315100, China; 3. School of Information Engineering and Data, Ningbo University of Finance & Economics, Ningbo 315175, China; 4. Ningbo Orient Wires & Cables Co., Ltd., Ningbo 315000, China; 5. School of Engineering, Huzhou University, Huzhou 313000, China)

Abstract: The research status and existing problems of power cables at home and abroad were summarized. The development of HVDC cables, cable status evaluation, calculation of temperature field and ampacity, electromagnetic field characteristics of HTS cables and accessories were emphatically analyzed. Aiming at the main problems existing in the development of power cables, some countermeasures and suggestions were put forward.

Key words: power cable; status evaluation; temperature field and ampacity; cable accessory; electromagnetic field; problems and suggestions

0 引言

近年来,随着社会的不断发展进步以及人们生活水平的提高,架空输电线路已经不能满足城市对电气设备设施在占地、环境等方面越来越高的要求。城市配电网络逐步采用电力电缆来替代传统的架空输电线,电缆线路是城市配电网的发展趋势。本文综述交流和直流电力电缆国内外研究成果,探讨电力电缆发展中存在的问题和不足,提出解决问题的对策与建议。

1 电力电缆国内外研究现状

1.1 高压直流输电及电缆

和高压交流输电方式相比,高压直流输电受环

境影响较小、损耗较少、成本更低,更适用于长距离输电等场合^[1]。高压直流输电主要涉及线路整流换流器(LCC)和电压源换流器(VSC)技术,后者也叫作柔性直流输电技术。高压直流电缆作为柔性直流输电的重要组件,具有性能可靠、保养简单、受自然环境影响小、效率和输送容量高、便于长距离电能输送等特点。

依据绝缘类型的不同,高压直流电缆包含绕包型油纸绝缘电缆和挤包型塑料绝缘电缆两大类,其中挤包型塑料绝缘电缆主要包括交联聚乙烯(XLPE)绝缘电缆和热塑性弹性体(HPTE)绝缘电缆^[2]。图1为一种典型的XLPE绝缘高压直流电缆结构图。

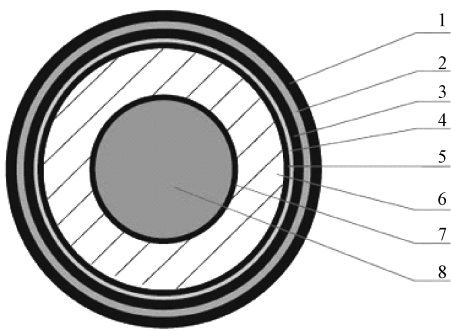
XLPE绝缘电缆相比油纸绝缘电缆具有生产工艺简单、成本较低、输送容量大、维护保养便捷等优势,早在20世纪70年代便开始应用于高压交流电缆。近年来,随着新型XLPE材料的突破和柔性直流输电技术的发展,挤包绝缘高压直流电缆成为直流输电领域研究的热点,在高压直流输电工程中得

收稿日期: 2020-06-16

基金项目: 国家海洋局“十三五”产业化项目(编号: NBHY-2017-Z2)

作者简介: 邵森安(1996—),男,硕士研究生。

作者地址: 江西赣州市红旗大道86号[341000].



1—护套 2—皱纹护套 3—阻水层 4—缓冲层
5—绝缘屏蔽 6—XLPE 绝缘 7—导体屏蔽 8—导体
图1 典型的XLPE绝缘高压直流电缆结构示意图

到了广泛应用。2013年南澳 ± 160 kV/200 MW、2014年舟山 ± 200 kV/400 MW和2015年厦门 ± 320 kV/1000 MW等高压直流输电工程的应用,让我国的挤包绝缘高压直流电缆技术实现了跨越式发展^[3]。

李忠磊等^[4-5]基于国内外高压直流XLPE电缆的运行和应用成果,针对XLPE电缆在运行中的空间电荷问题,研究了影响电缆绝缘空间电荷特性的参量和因素,探讨了电缆附件双层介质界面电荷分布规律以及抑制界面电荷的方法。

1.2 电力电缆老化及状态评估

XLPE电缆在工作过程中,电缆绝缘由于多种因素的作用而产生老化现象,对电缆的可靠性和使用寿命产生不利影响。文献[6]以不同使用年限的XLPE电缆为研究对象,探讨绝缘材料性能与绝缘老化之间的关系,并对老化程度进行评估。通过对不同评估方法进行测试,对各个方法进行对比研究,验证其有效性,找出评估效果最佳的方法。该文献仅对220 kV电压等级的XLPE电缆进行研究,未涉及更高电压等级的电缆,且用于测试的电缆试样运行年限最长只有12 a,其结论有一定的局限性。

如何评估电缆运行状态是电缆研究与应用的热点问题之一。杨颖等^[7]探讨研究某10 kV XLPE电缆的运行状态,进行老化、电气和材料试验,得出反映电缆老化状态的相关参数。基于试验结果,提出评估电缆工作状态的模型,运用该模型评估分析不同老化程度电缆的状态。该研究只针对10 kV电压等级的电缆,且用于验证评估模型有效性的电缆的运行年限只有1 a,评估分析结果不具有代表性。

文献[8]分别运用对数正态分布和Weibull分布函数评估分析电缆工作状态。通过MATLAB数据拟合得出对数正态分布更适用于评估电缆状态的结论,构建状态评估模型,运用该模型对某10 kV电

缆的运行状态进行评估。该文献研究使用该模型对电缆状态进行评估的次数较少,此外只进行了10 kV电压等级电缆状态评估,使得该状态评估模型应用范围受到限制。

1.3 电力电缆载流量与温度场计算

电缆温度场和载流量的正确分析计算有利于提高电缆的效率和稳定性,对电缆的设计、敷设和运行具有重要意义。文献[9]针对电缆热路解析模型、多物理场耦合数值分析、实时动态载流量评估等开展深入研究,分析热路解析方程、数值分析方法,阐述实时动态载流量的研究重点,以及未来电力电缆群温度场和载流量的研究方向,但对提高电缆温度场和载流量分析计算的精确度未深入研究。郑雁翎^[10]以排管敷设电缆群为研究对象,运用有限元法对电缆群温度场及载流量进行分析计算。基于优化设计算法理论和ANSYS软件,建立优化数值计算模型,对电缆群载流量进行优化计算。该研究仅对排管敷设电缆群进行研究,而对于该优化数值计算模型是否适用于其他敷设方式,如直埋敷设、隧道敷设等,没有作相关说明。Vyatkin V S等^[11]对采用超导Bi-2223带材的单层电缆在平行磁场中的载流能力进行研究。引入纵向磁场效应,提出一种新型高载流能力的超导直流电缆设计思路,探讨新型多层、高载流能力直流超导电力电缆实现的可能性。

文献[12]介绍了有限元法在地下电力电缆系统热分析中的应用。以某敷设深度为2 m的地下电缆为研究对象,在编写程序MATLAB中进行数值分析,确定土壤、热回填体和电缆的二维温度分布,研究土壤和电缆回填体导热系数、电流负载、导体截面积等参量对电缆系统温度分布的影响。虽然作者认为所提出的数学模型在编程实现中既高效又直观,但该模型仍然较为繁琐;另外该数学模型仅针对平面敷设的电缆,是否适用于其他敷设方式未作说明。

1.4 电缆电磁场及电磁干扰效应研究

1.4.1 电缆磁场分析

架空电缆由于具有成本低、空间占用小等优点,在输配电工程中得到广泛应用,但也不可忽视其对环境等方面造成的不良影响。目前架空输电线路逐渐被地下电缆取代,但仍有大量架空电缆使用。如果建筑物处于架空电缆下方,工频磁场会对居住人员产生不利影响。为解决该问题,Tong Z等^[13]对500 kV架空电缆产生的磁场进行了研究,提出一种降低室内磁场强度的屏蔽方法。该研究将Ansoft Maxwell 3D的涡流场求解器应用于磁场计算,仿真分析高压电缆的磁场效应对建筑物的影响;计算出最大

室内场强,并与限制准则中的安全限值进行比较。

在城市轨道交通系统的电气设计中,列车车厢内的磁通密度须在标准规定的限值范围内。李保霞等^[14]对地铁列车电缆产生的磁场进行分析。研究了不同种类电缆产生磁场的特性,仿真其磁场分布,提出电缆线路布局设计中限制和优化磁场分布的举措。该研究仅针对地铁列车电缆进行磁场分析,电缆电压等级较低,后续可针对更高电压等级其他类型电缆进行分析。

黄磊等^[15]以敷设在地铁隧道内的高压电缆为研究对象,建立电缆及隧道的二维有限元模型,探讨电缆正常和故障运行时的磁场特性,以及对通信、供电线路、轨道等产生的感应电动势,提出削弱工频磁场的方法。通过测量某隧道内的电缆磁场,验证分析结果的准确性,提出可能存在的安全隐患及解决方法。该研究仅针对地铁电缆的磁场进行分析探讨,因此有必要针对其他敷设环境下的电缆进行分析。

李世松等^[16]提出一种理论模型,用于计算三芯电缆的表面磁场,该模型适用于三芯任意分布情况。将运用该模型计算得到的结果与基于有限元模型的结果进行比较研究,验证该理论模型。该研究建立的坐标系及建模过程复杂,有进一步优化完善的空间。

1.4.2 电缆电场分析

电场分布是决定电缆绝缘瞬时耐压性能和电缆运行稳定性的重要因素。于竞哲等^[17]以某10 kV交流三芯XLPE电缆为对象,对其改为直流运行时的温度场和电场进行研究。运用ANSYS软件建立耦合仿真模型,分析探讨该电缆在通过直流电流时的温度场和暂、稳态电场,基于仿真结果,求得电缆载流量、电压等级取值范围以及最大输送功率等结论和参数。李忠华等^[18]基于某高压直流电缆,对影响其电场分布的因素进行研究。采用COMSOL Multiphysics软件仿真研究绝缘材料的非线性电导特性对电缆绝缘在不同温度梯度和施压方式作用下的暂、稳态电场的影响规律,得出了活化能、场强、温度梯度效应等方面的结论和建议。叶信红等^[19]以某XLPE绝缘材料为研究对象,通过试验测其电导率与温度和电场强度的关系,运用COMSOL软件进行电场和热场耦合仿真,得出绝缘内不同负荷下的电场分布情况,以此为基础设计出250 kV XLPE绝缘直流电缆。文献[20]仿真研究了不同温度梯度及施压方式下分层半径对具有双层绝缘结构的高压直流电缆绝缘暂、稳态电场分布的影响规律,验证双

层绝缘设计原则的合理性。王雅妮等^[21]以某高压直流电缆为研究对象,运用COMSOL软件仿真研究了电缆在不同敷设方式下的电场与温度场特性及其影响因素,得出了散热效率和电场分布等方面的结论。

1.4.3 电缆电磁特性及电磁干扰效应分析

近年来,很多学者开始关注高压输电线路产生的低频电磁场对人体的影响,田瑞等^[22]针对动车组电缆产生的电磁场及其对乘客健康的影响展开研究。利用COMSOL软件建立电缆对车厢内乘客的电磁暴露模型,研究车厢内处于不同位置乘客头部的磁感应强度、感应电场强度和感应电流密度,将结果与电磁暴露导则中的标准进行对比,对模型的准确性和合理性进行验证。

电缆的大量敷设对周边环境的影响越来越显著。在居民区敷设电缆时,须保证低水平的电磁场。VIKHAREV A P^[23]针对不同的屏蔽接地方式和电缆布置形式,计算了XLPE电缆线路的外磁场及磁通密度,得出电缆屏蔽接地方式和电缆排列方式对电缆外磁场和磁通密度的影响。

李艳等^[24]基于架空电缆线路的电磁环境评估标准,对500 kV电缆隧道的电磁环境影响进行研究,优化电缆敷设方式。采用CDEGS接地分析软件进行建模计算,分析评估某隧道敷设的500 kV高压交流电缆产生的电磁场。但该文献仅针对隧道敷设方式下交流电缆的电磁场进行分析,研究结论有一定的局限性,有必要对其他电压等级和类型的电缆电磁场进行探讨。

地下电缆是风力发电场的重要组成部分。Rizk M E M等^[25]对风电场遭受雷击时地下电缆的电磁场进行探讨。采用三维时域有限差分法对地下电缆进行建模,研究大地电导率、相对介电常数、雷击风塔位置、雷击电流上升时间等参数对冲击地下电缆护套的雷电电磁场的影响。得出雷击电流随大地电导率的变化规律,提出削弱雷击电流的措施。

RASOULPOOR M等^[26]对谐波和不平衡电流作用下的单芯地下电力电缆进行电磁分析,采用有限元法计算了电缆的损耗、使用寿命和磁场分布,分析了影响电缆性能的因素。

LUO J等^[27]利用混合时域有限差分法,对传输线网络在屏蔽体中的电磁干扰效应进行仿真分析。给出典型数值实例,证明屏蔽体中传输线网络瞬态响应仿真方法的准确性。此外,应用该方法对具有不同屏蔽特性的电缆互连网络进行分析。但该文献提出的方法和公式推导比较复杂,研究对象是金属

屏蔽体中的电缆网络,其应用范围有一定的局限性。

1.5 高温超导电缆及电磁分析

随着高温超导技术取得突破性进展,高温超导电缆已在电力输送系统中得到了广泛应用。其相比传统电缆具有输送容量和效率高、更轻更小、可靠性高、更加环保等优势^[28-29],在未来电网中将发挥重要作用。典型高温超导电缆的结构如图2所示。

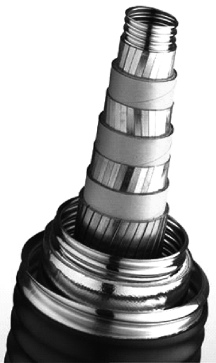


图2 典型的高温超导电缆结构示意图

具有高电流密度的超导电缆的电磁特性是影响高温超导装置应用的重要因素。ZHANG H等^[30]提出一种螺旋超导电缆和一种由钇钡铜氧化物(YBCO)包覆导体构成的罗贝尔(Roebel)电缆,分别运用理论计算法和有限元法对这两种电缆进行电磁分析,构建两种电缆的三维电磁场模型,给出它们沿轴向的磁通分布。

文献^[31]以具有自屏蔽特性的高载流量直流高温超导电缆为对象,对其进行电磁场分析。介绍了3种类型的电缆导体及其电流引线布置形式,提出一种二维模型,对电缆导体的磁场和临界电流分布进行仿真,计算分析了电缆导体的交流和磁滞损耗。

准确分析高温超导电缆的电磁-热-力耦合特性,对于优化电缆结构设计具有重要意义。Ta W等^[32]建立了高温超导电缆结构的三维有限元模型,用于电-热-力特性数值模拟与分析。运用该模型求解微分热平衡方程,得到电缆热膨胀应变和应力,以及磁场、电流密度、温度和应力的分布曲线,提出提高电缆传输能力、减弱电缆性能退化趋势的措施和建议。为了提高计算效率,作者假设该多层复合超导带材是一种均质材料,虽然能够快速高效地研究整个电缆的多重物理量耦合特性,但超导带中电磁场特性、温度和应力分布研究的准确性有待提高。

1.6 电缆附件及电场研究

电缆附件是电缆系统中最关键部件之一,主要包含接头和终端。由于电缆附件的电气、热学和力

学特性比较复杂,它们是电缆系统中最不可靠的部分,发生故障的概率很高^[33]。目前,高压XLPE电缆接头主要为预制式,根据接头内部结构的不同,预制式电缆接头又分为组合预制式和整体预制式两类。电缆终端方面,目前高压直流电缆终端也多采用预制式结构。图3和图4分别为典型的电缆中间接头和电缆终端的示意图。



图3 典型的电缆中间接头示意图



图4 典型的电缆终端示意图

空间电荷效应是直流电缆附件研究的关键点,王霞等^[34]针对该效应对直流电缆及附件绝缘界面电场分布的影响规律进行研究。通过测量硅橡胶/交联聚乙烯双层介质界面的空间电荷分布,建立电缆接头仿真模型,研究温度梯度场下空间电荷效应对电缆及附件界面电场的影响。

宋淑伟等^[35]在制备纳米硅橡胶复合材料的基础上,以200 kV高压直流电缆接头为对象,运用有限元软件对其内部暂态、稳态电场分布特性进行仿真研究。对不同温度梯度、外施电压、极性反转时间等因素下的电场分布进行研究,得出应力锥根部与

导体屏蔽管端部的场强变化规律。

严有祥等^[36]运用 COMSOL 软件,对某 ± 320 kV 直流 XLPE 电缆接头的电场与空间电荷分布进行分析。对接头电场、温度场以及空间电荷分布特性等参量进行计算,分析不同类型接头的特点,提出选型建议;探讨材料、结构等因素对接头性能的影响,并对接头材料和尺寸进行优化。

陈庆国等^[37]采用 COMSOL 软件研究了不同温度梯度下,直流电压和直流叠加冲击电压作用时某 250 kV 直流电缆接头中的电场特性,探讨温度对电缆接头内电场分布的影响规律,得出最大场强及出现位置、场强极大值点、场强随温度的变化规律等方面的结论。

乐彦杰等^[38]针对 XLPE 绝缘与粘性浸渍纸 (MI) 绝缘直流电缆的相连接头提出一种新的绕包式绝缘结构,运用 COMSOL 软件,对不同温度梯度下该复合接头中的电场分布进行仿真,分析不同种类增绕绝缘材料对接头电场分布的影响,确定增绕绝缘材料的类型,对接头的结构进行优化,并采用该增绕材料制备接头,对其进行型式试验。

电缆终端是电缆输电系统正常运行必不可少的重要部件,高寒等^[39]以 320 kV XLPE 高压直流电缆的终端为对象,运用 COMSOL 软件建立终端模型,研究施加不同载流量时,直流电压和直流叠加冲击电压下终端内的电场特性,针对 XLPE 绝缘屏蔽层的搭接长度对界面电场的影响规律进行探讨,得出界面切向场强、最大场强出现位置,以及屏蔽层搭接长度等方面的结论。

在研究电缆终端电场时,考虑空间电荷的影响同样很有必要。张瑞敏等^[40]研究了界面空间电荷对电缆终端电场分布的影响。应用电声脉冲法测试交联聚乙烯与非线性硅橡胶双层介质中的空间电荷分布,分析电缆终端主绝缘与加强绝缘界面空间电荷分布对终端最大场强的影响,并利用 COMSOL 软件探讨界面空间电荷及其分布对终端电场特性的影响规律。

XLPE 绝缘高压直流电缆终端内复合绝缘中的电场分布除了取决于空间电荷分布和界面状态以外,还受绝缘材料电导特性的影响。韩宝忠等^[41]探讨了硅橡胶电导特性对该种类电缆终端电场分布的影响规律。仿真计算以不同类型硅橡胶为增强绝缘时的终端内的电场分布,分析绝缘材料电导特性影响电场分布的原理,提出解决终端制造瓶颈问题的有效措施。

2 电力电缆发展存在的问题

近年来,电力电缆尤其是高压直流电缆的研发取得了长足进步,电压等级不断升高,电缆长度越来越长,传输距离也越来越远,但仍存在一些问题有待解决。

XLPE 绝缘高压直流电缆已成为直流输电领域的研究热点,相比其他绝缘类型的电缆具有成本低、制造工艺简单、传输容量大以及维护方便等优点,但其在工作过程中面临着比较严重的空间电荷问题,对电缆的稳定运行和寿命等产生很大影响。

电缆状态评估方面,存在研究对象电压等级单一、运行年限较短、试验次数较少等问题,得到的数据和结论具有一定的局限性,缺乏说服力和代表性。载流量与温度场计算方面,现有的数学模型存在结构及公式推导计算比较复杂,适用的敷设方式单一等不足,计算精度有待提高。对于电缆磁场的研究,现有文献涉及到的电缆种类有限,未针对其它类型的电缆进行研究;对于电缆电磁特性及电磁干扰效应方面的研究,有关文献提出的计算方法和模型建立过程比较繁杂,工作量和计算量较大,且主要针对特定类型的电缆进行研究,结论和成果应用范围受到一定限制。

由于影响高压直流电缆及附件电场分布的因素较多,因此电场分布的计算和分析比交流电缆复杂得多。从本文综述的文献研究可以看出,不少学者针对高压直流电缆及附件的电场展开了深入研究,取得了一定进展和成果,但目前这方面的研究仍存在研究方法复杂、效率较低等不足,结论和成果精确度有待提高。目前大多数研究仅进行了计算和分析,提出改善电缆及附件电场分布的措施和建议的文献报道较少。另外可以发现,有关电缆电场的研究成果较多,磁场和电磁特性等方面的文献数量较少,存在发展不均衡的问题。总体来说,相对于其他研究方向,电缆电磁场方面的研究进展比较滞后,有待深化。

对于高温超导电缆,属于新兴技术,还处于起步阶段,大多数还是关于电磁场方面的分析,没有涉及到其他特性的研究,因此高温超导电缆还有待学者们更深入的研究。

3 解决问题的建议

对于 XLPE 绝缘直流电缆存在空间电荷效应等问题,可以运用有限元等仿真软件工具和方法,研究空间电荷的分布规律及抑制方法,以及各种因素对空间电荷特性的影响,研发新型绝缘材料,比如免交

联绝缘材料等。

对于电缆的状态评估,可以针对不同运行年限的各种电压等级和类型的电缆分别进行测试对比,增加试验次数,避免偶然性等问题的出现,使得数据和结论具有科学性。载流量与温度场计算方面,可以针对不同的敷设方式,在分析计算准确性的前提下,建立过程及计算更简单的模型和方法,提高运行和计算效率。

电缆磁场研究方面,可以针对不同类型的电缆进一步进行研究,并探索出一般结论或规律;对于电缆及附件的电场分布的研究,考察各种相关影响因素,找出更完善、效率更高的研究方法,提高结论的准确性,在此基础上改善电缆及附件电场分布;针对电缆电磁特性研究,在不失研究结论准确性的前提下,简化计算方法和模型建立过程,减少工作量和计算量,另外可针对常用的电缆进行研究,使得结论和成果的适用性更强。总体来说,目前电缆电磁场研究存在理论体系不完善、进展滞后以及发展不均衡的问题,可以结合相关项目和实例,运用 ANSYS 等各种有限元软件和理论方法,参考已有的相关研究成果,进行深入、系统的研究。

针对高温超导电缆,可以对除电磁场以外的其他特性,包括力学、热学、电流传输等,合理借鉴和运用已有的研究方法和软件,进行更深入的研究。另外,要关注电力电缆最新研究成果和进展,包括其它高性能的新型电力电缆等。此外,还需对电力电缆损耗以及受力分析等方面开展相关研究。

4 结束语

本文综述了国内外电力电缆研究文献,包括高压直流电缆的发展、电缆的状态评估、温度场与载流量的计算与分析,以及电缆和附件的电磁特性研究等。现有文献提出的理论、数值方法与模型,具有一定的参考意义和价值。其中多篇文献均提出了运用有限元分析软件建模与仿真,表明该方法是电力电缆研究的重要工具和基础。此外,现有文献提出的方法和理论也有一定的局限性,有待进一步完善。本文分析了电力电缆发展存在的问题,提出解决问题的建议。

总之,国外电力电缆的研究和技术已经发展得较为成熟,国内进展比较落后,某些方面的研究还处于起步阶段,需要进一步深化探讨。

参考文献:

[1] 钟力生,任海洋,曹亮,等.挤包绝缘高压直流电缆的发展[J].高电压技术,2017,43(11):3473-3489.

[2] 何金良,党斌,周焜,等.挤压型高压直流电缆研究进展及关键技术述评[J].高电压技术,2015,41(5):1417-1429.

[3] 谢书鸿,傅明利,尹毅,等.中国交联聚乙烯绝缘高压直流电缆发展的三级跳:从 160 kV 到 200 kV 再到 320 kV[J].南方电网技术,2015,9(10):5-12.

[4] 李忠磊,杜伯学.高压直流交联聚乙烯电缆运行与研究现状[J].绝缘材料,2016,49(11):9-14.

[5] 杜伯学,李忠磊,杨卓然,等.高压直流交联聚乙烯电缆应用与研究进展[J].高电压技术,2017,43(2):344-354.

[6] 朱晓辉,孟峥峥,王浩鸣,等.运行高压交联聚乙烯电力电缆的介电性能[J].高电压技术,2015,41(4):1090-1095.

[7] 杨颖,游蛟,贾志东,等.10 kV 交联聚乙烯电缆运行状态评估分析[J].高电压技术,2017,43(5):1684-1692.

[8] 洪祎祺,魏丹萍,袁伟刚,等.基于对数正态分布的电缆状态评估方法研究[J].电力系统保护与控制,2018,46(2):79-84.

[9] 梁永春.高压电力电缆温度场和载流量评估研究动态[J].高电压技术,2016,42(4):1142-1150.

[10] 郑雁翔.电缆线路的电缆群载流量优化数值计算模型研究[J].高电压技术,2015,41(11):3760-3765.

[11] VYATKIN V S, KIUCHI M, OTABE E S, et al. Current-carrying capacity of single layer cable using superconducting Bi-2223 tapes in a parallel magnetic field[J]. Superconductor Science and Technology, 2015, 28(1): 015011(1-3).

[12] RERAK M, OČLOŤ P. Thermal analysis of underground power cable system[J]. Journal of Thermal Science, 2017, 26(5): 465-471.

[13] TONG Z, DONG Z, TONG M. Analysis of magnetic field generated by overhead cables[J]. Measurement, 2016, 89(13): 166-170.

[14] 李保霞,郭振通.地铁列车电缆布线的磁场研究[J].城市轨道交通研究,2014,17(3):54-58.

[15] 黄磊,李晨,陈庭记,等.地铁隧道内敷设高压电缆的工频磁场特性分析[J].城市轨道交通研究,2017,20(8):69-74.

[16] 李世松,袁燕岭,董杰,等.一种计算三芯电力电缆表面磁场的解析方法[J].中国测试,2017,43(4):95-99.

[17] 于克哲,苏宜靖,周浩,等.10 kV 交流 XLPE 电缆改为直流运行的温度场和电场仿真分析[J].高电压技术,2017,43(11):3653-3660.

[18] 李忠华,刘乐乐,郑欢,等.HVDC 电缆电场分布影响因素的仿真研究[J].中国电机工程学报,2016,36(9):2563-2571.

[19] 叶信红,韩宝忠,黄庆强,等.交联聚乙烯绝缘高压直流电缆电场分布计算[J].电机与控制学报,2014,18(5):19-23.

[20] 李忠华,陈漳.双层绝缘结构高压直流电缆电场分布仿真[J].高电压技术,2017,43(11):3504-3513.

[21] 王雅妮,张洪亮,吴建东,等.不同敷设方式下高压直流电缆温度场与电场仿真计算研究[J].绝缘材料,2017,50(7):71-78.

[22] 田瑞,逯迈.高速动车组动力电缆对车厢内乘客的低频电磁暴露水平仿真及其健康评估[J].高电压技术,2016,42(8):2540-2548.

[23] VIKHAREV A P. Electromagnetic situation near gas-insulated and cable power lines[J]. Power Technology and Engineering, 2018,52(2):223-226.

5 结语

本工作选取应急电源车较为常用的交联聚烯烃绝缘车辆用电缆为研究对象,从电缆载流量分析、热场分析、负荷电流校核、电缆施放与收回4个方面进行了应急电源车输出电缆的实际应用分析,结论如下:

(1) 电缆导体与环境温度差对电缆的载流量影响较大;相同工作温度下,夏季高温时的输出电缆载流量将比冬季低温时低很多;

(2) 随着运行电流的增加,电缆导体工作温度与外表皮温度均不断升高且两者温度差逐渐增大;

(3) 实际应用中,应根据负荷电流要求确定输出电缆能否满足发电条件,并依据发热情况判断电缆是否需要采取降温 and 散热措施;

(4) 电缆在施放与收回过程中不允许出现外表皮破损、绝缘损伤、绕圈、交叉、墙角磕碰挤压、地面拖行等现象,架空敷设方式有利于散热。

参考文献:

[1] 王逊峰,顾金,钱忠.应急电源车的应用分析[J].华东电力,2011,39(12):35-37.

[2] 张华,华月申.应急电源车新型快速接头研究[J].供用电,2013,30(4):43-47.
[3] 陈伟明,徐云德,庄衍平.低噪声应急电源车的开发应用[J].供用电,2008,5(1):32-33.
[4] 张小委,滕增,王月云,等.移动电源车在电力应急预案中的应用及发展前景[J].农业装备技术,2017,43(4):50-52.
[5] 叶振祥.应急电源车的结构特点[J].专用汽车,2004(1):35-37.
[6] 郭殿军,谌望,郭殿峰,等.应急电源车运行模式改造[J].内蒙古电力技术,2016,34(5):71-73.
[7] 王振,王星,黄凯,等.内燃机式电力应急电源车的检测及对比分析[J].电工技术,2020(7):106-108.
[8] 顾金,王逊峰,钱忠.应急电源车快速接入装置的研究[J].供用电,2013,30(4):43-47.
[9] 金向军,彭元泉,谭文展,等.应急电源车的技术发展趋势[J].机电一体化,2014(1):145-146.
[10] IEC 60287-1-1: Electric cables-Calculation of the current rating-Part 1-1: Current rating equations(100% load factor) and calculation of losses[S]. 2006.
[11] IEC 60287-2-1: Electric cables-Calculation of the current rating-Part 2-1: Thermal resistance-Calculation of thermal resistance[S]. 2006.
[12] 国家认证认可监督管理委员会.交流额定电压3 kV及以下轨道交通车辆用电缆:GB/T 12518—2008[S].北京:中国标准出版社,2008.
[13] 马国栋.电线电缆载流量[M].北京:中国电力出版社,2002.

(上接第6页)

[24] 李艳,孟毓.500 kV 电缆隧道的电磁场研究[J].中国科技论文,2016,11(11):1315-1320.
[25] RIZK M E M, MAHMOOD F, LEHTONEN M, et al. Investigation of lightning electromagnetic fields on underground cables in wind farms[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2016, 58(1): 143-152.
[26] RASOULPOOR M, MIRZAI E M, MIRIMANI S M. Electromagnetic and thermal analysis of underground power solid-conductor cables under harmonic and unbalancing currents based on FEM[J]. Int J Numer Model, 2018, 31(1): e2278(1-18).
[27] LUO J, WANG J, XIA Y, et al. EMI effect simulation of braided cable network using a hybrid FDTD method[J]. Int J Numer Model, 2018, 31(5): e2317(1-11).
[28] 金建勋,游虎,姜在强,等.高温超导电缆发展及其应用概述[J].南方电网技术,2015,9(12):17-28.
[29] 王银顺,张瀚.高温超导电缆的研发现状和发展趋势[J].电工电能新技术,2017,36(10):8-18.
[30] ZHANG H, ZHU J, YUAN W, et al. Electromagnetic analysis of YBCO superconducting cables with high current transporting for electric devices[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(7): 4804604(1-4).
[31] ZHANG H, WANG Y, XUE J. Electromagnetic field analysis of a high current capacity DC HTS cable with self-shielding characteristic by 2-D simulation[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(7): 8002105(1-5).

[32] TA W, GAO Y. Numerical simulation of the electro-thermo-mechanical behaviors of a high-temperature superconducting cable[J]. Composite Structures, 2018, 192(10): 616-625.
[33] YE H, FECHNER T, LEI X, et al. Review on HVDC cable terminations[J]. High Voltage, 2018, 3(2): 79-89.
[34] 王霞,朱有玉,王陈诚,等.空间电荷效应对直流电缆及附件绝缘界面电场分布的影响[J].高电压技术,2015,41(8):2681-2688.
[35] 宋淑伟,赵洪,李中原,等.高压直流电缆接头稳态与暂态电场分布特征[J].高电压技术,2017,43(11):3607-3616.
[36] 严有祥,朱婷,王蕾.基于有限元法对±320 kV 直流 XLPE 电缆中间接头电场与空间电荷的仿真计算[J].高电压技术,2017,43(11):3591-3598.
[37] 陈庆国,秦艳军,尚南强,等.温度对高压直流电缆中间接头内电场分布的影响分析[J].高电压技术,2014,40(9):2619-2626.
[38] 乐彦杰,汪洋,郑新龙,等.交联聚乙烯与浸渍纸绝缘直流电缆接头电场分布[J].电机与控制学报,2019,23(2):75-86.
[39] 高寒,李卫国,贾国滨,等.320 kV XLPE 高压直流电缆终端电场分析[J].绝缘材料,2017,50(6):48-52,58.
[40] 张瑞敏,张沛红,宋淑伟,等.界面空间电荷对高压直流电缆终端电场分布的影响[J].高电压技术,2019,45(6):1762-1766.
[41] 韩宝忠,傅明利,李春阳,等.硅橡胶电导特性对 XLPE 绝缘高压直流电缆终端电场分布的影响[J].高电压技术,2014,40(9):2627-2634.