

# 特高压直流系统与地震台站共存共荣之路

## 直流输电工程对地震台站电磁影响已成为直流工程规划与建设的突出矛盾

建设具有远距离、大容量、低损耗等输电特征的特高压直流输电系统是构建我国坚强智能电网的坚实基础和核心环节,在我国南北互供、西电东送的跨大区电网互联中发挥着重要作用。同时我国处于地震活动多发区域,遍布各地的地震观测台站承担着预报和监测地震活动的重要任务,通过观察地球电磁场变化来监测地质活动。目前地震台站之间距离为30—60km(新疆、西藏除外),十分密集,规划中还有更为密集的地震观测台网建设任务。特高压工程已无法避免对线路周边地震观测产生一定的电磁干扰,主要干扰地电场、地磁场和地电阻率观测。随着越来越多的特高压直流工程的建设和投运,其不平衡电流和单极运行入地电流对地震监测电磁影响更为显著,已成为工程规划与建设中的突出矛盾。

现行国家标准GB/T 19531.2—2004《地震台站观测环境技术要求 第2部分:电磁观测》对直流输电系统的干扰限值做出了非常严格的规定,例如线路电流5kA时,线路与地震台站的防护间距达20公里,如果考虑单极大地回路线运行工况,防护距离可达百公里以上。在电网和地震台站日益密集的情况下,足够富裕的防护空间难以达到,且线路绕行和设施迁移花费巨大,这给输电线路和地震台站建设选址都造成了很大的限制,迫切需要发展出精确的电磁影响分析方法来确定最合理的防护间距,并寻求更经济的防护措施,保证特高压直流输电系统与地震台站间电磁兼容。例如在±800kV向—上、锦—苏特高压直流输电工程中,沿线有数18个地震观测台站,严格按照防护距离要求,将无法建设线路。

## 干扰网校正系统有效剔除直流输电工程对地震台站的电磁影响

中国电力科学研究院联合地震局系统、高校和电力公司,系统地研究了特高压直流输电系统各种工况对周边地震监测中地磁场、地电场和地电阻率观测的电磁影响,发展出了新的方法体系以确定更经济合理的防护间距与技术措施,解决了因直流输电系统对周边地震观测造成影响而造成的难以获取输电走廊或线路绕行问题。

在研究得到的特高压直流输电线路和接地极对地磁观测装置、地电场观测装置、地电阻率观测装置

干扰机理和数学模型的基础上,开发了特高压直流线路和接地极对地震电磁观测台的干扰网校正系统(以下简称干扰网校正系统),该系统具备数据库查询和实时干扰计算功能,可以完成直流输电系统对地震台站电磁干扰的实时校正需求。系统主要包括三大功能:(1)直流输电系统与地震台站数据库管理。采用数据库开发软件,建立输电线路和地震台站的数据表格,完成输电线路各杆塔和地震台站的经纬度和海拔坐标及接地极附近土壤电阻率等数据管理,如线路极导线的相对平均高度,电磁观测仪器对地高度和测量电极埋设深度等。(2)直流输电线路对电磁观测的实时计算功能。通过PC机串口,实时接收线路不平衡电流和地震台站电磁观测数据,根据输入数据类型,采集时间间隔,依次对实时采集分量进行处理并采用动态数组进行存储。根据建立的直流输电线路电磁场计算模型,计算实时非平衡电流产生的地磁场、电场和电阻率,从而得到直流输电线路对地震台站电磁观测的干扰值。(3)对电磁观测数据曲线进行校正。在实时接受线路不平衡电流和电磁观测数据的同时,在系统定义的坐标系中进行描点画线,反映实时数据的变化。根据计算得到直流输电系统不平衡电流在观测点处的干扰值。将实时观测的地磁数据减去计算得到的干扰值,可得到实际未受输电的电磁观测数据,从而实现对地震台站电磁观测值的校正。

项目建立的数学模型,提出的防护距离和开发的干扰网校正系统在多个地震台站应用,效果良好,排除了邻近直流系统的干扰问题。在锦苏特高压直流输电工程中解决了武汉地震台、南京地震台、泾县地震台、海安地震台、西昌小庙地震台、青浦地震台等台站的干扰防护问题,以及向上特高压直流输电工程运行后对武汉地震台等台站的地磁干扰防护问题,节约了大量的工程改迁费用,缩短工程设计和建设周期。

目前,多项研究成果已应用于特高压直流输电工程对地震台站的电磁干扰影响防护,为GB/T19531.2—2004标准的修订提供了依据,对直流输电系统与地震台站不可避免共存时获取输电走廊、最大程度缩短二者间防护距离和节省投资具有重要的工程实用价值。

在当前土地资源非常稀缺的条件下,输电走廊和地震台站选址往往难有大幅改动的可能,应用本技术可在条件限制时通过精确计算保证双方并存的电磁兼容性,使输电工程和地震台站建设的可行性成立。本项目的研究成果将在国家坚强智能电网规划与建设中,保证环境兼容性和降低昂贵的后期改造费用提供了有效的技术措施,也为电力和地震台站在规划与建设时,保证系统间的电磁兼容问题提供了一系列具有参考价值的基础理论方法和分析评估手段。

## 科技攻关团队孜孜不倦的创新精神

为解决直流输电系统对地震台站的电磁干扰与路径选择问题,中国电力科学研究院根据地震电磁场观测仪器的工作原理和特高压直流输电系统的运行工况,通过理论研究和试验研究相结合的方式,针对特高压直流系统对地震监测中地磁场、地电场和地电阻率观测干扰的影响因子及机理进行研究,基于广域空间下直流系统电磁场求解及大量特高压直流工程实测,首次系统性明确直流系统对地震观测的干扰机理及其决定性影响因子,发展出了新的地震观测电磁干扰防护方法及其应用系统体系,解决了未来特高压直流工程和地震台站的选址,以及已存在的地震监测干扰问题。主要创新点如下:

提出了考虑垂、线路路径的直流输电系统对地磁场观测电磁影响精确分析方法,建立了直流线路空间场的精确求解数学模型,经向—上、锦—苏±800kV特高压直流工程现场试验验证,误差小,实现了直流输电线路对邻近地磁场观测的干扰识别;

建立了考虑垂直分层和水平分层的多层复合土壤和接地极配置的直流输电系统对地震台站地电场观测电磁影响计算模型,并在向—上、锦—苏±800kV特高压直流工程现场试验验证,误差小于10%,解决了国内外以往直流系统对邻近地电场观测电磁干扰难以定量计算的技术难题;

提出的防护距离和开发的直流输电系统对地震台站电磁影响校正系统,大幅缩短了直流系统与地震台站间的防护距离。

国内外未见相关的报道,与国内以往研究,具有以下突破:

(1)在研究对象的深度和广度方面:以往研究针对单个台站或直流工程,该项目分析了全国台网监测仪

器的类型和工作机制和全国范围内主要台网(15个)电磁监测数据,较系统的获得了我国直流输电系统对地震电磁监测干扰情况。

(2)在直流输电系统对地磁观测影响模型方面:以往研究仅就龙政直流线路对地震台电磁影响进行了监测和简单分析,磁场影响根据经验公式大略估计,该项目获得了直流线路干扰地磁观测的特点,确定直流线路主要干扰地磁Z分量的观测。建立了无限大均匀土壤和分层土壤情况下基于地心坐标系的入地电流磁场和极导线电流磁场计算模型,经多次试验验证误差小于5%。

(3)在直流输电系统对地电场观测影响模型方面:以往研究未包含地电场和地电阻率观测台站,该项目建立了基于有限项复系数指数级数和无穷阶泰勒级数构成多层土壤结构格林函数的电位分布计算模型,可计算不同土壤条件下接地极入地电流在土壤中的电位分布,可精确分析直流系统对地电场和地电阻率干扰,经多次试验验证误差小于10%。

(4)在直流输电系统对地震电磁观测试验及模型校准方面:该项目首次开展了计算模型的专项模拟试验和地震台网试验,并经过锦苏特高压工程调试期间的校准,研发了“特高压直流输电系统对地震观测干扰校正系统”,在±800kV锦屏—苏南特高压直流工程全电压、全功率带载调试期间,联合中国地震局地震研究所、湖北省地震局、武汉地震台、南京地震台、泾县地震台、海安地震台、西昌小庙地震台、青浦地震台等相关单位,首次采用地震观测台,以及多个野外观测点进行了地震参量连续联合观测,结果表明提出的数学模型、计算方法及干扰系统具有较高的准确度,剔除直流系统90%以上的干扰。

(5)在直流输电系统对地震台站电磁影响方面:该项目提出了更为合理的地震台站与直流输电系统间的防护距离,提出的干扰校正方法和开发的干扰

校正系统可用于工程实际,在地震台站正常工作前提下,缩短防护距离60%以上,为输电走廊获取和地震台站选址提供了切实可行的技术措施。

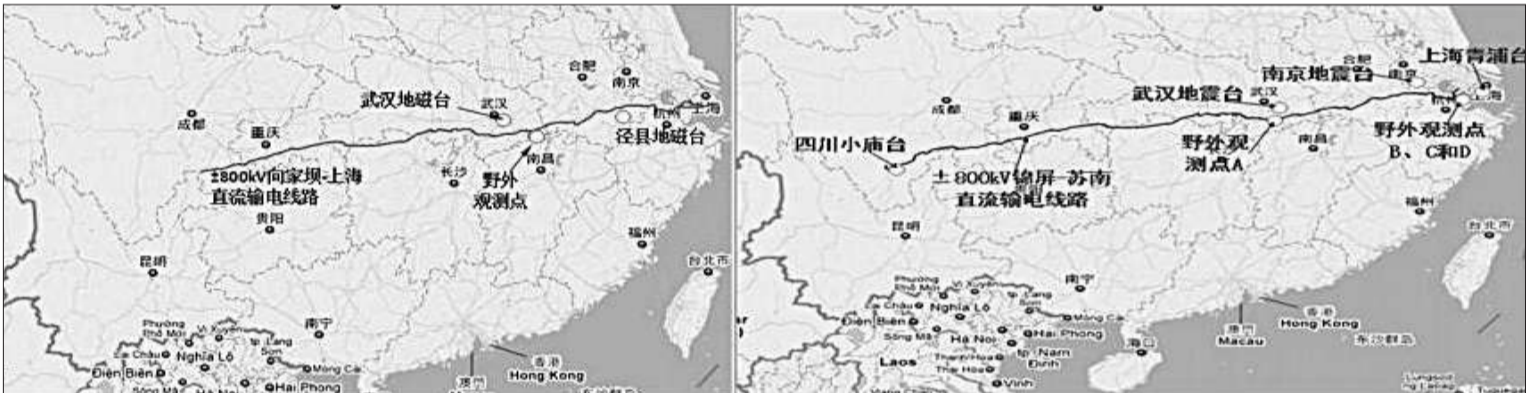
发表SCI/EI论文5篇,获授权专利2项,软件著作权1项。2014年3月,该项目通过了中国电机工程学会组织的技术鉴定,鉴定委员会一致认为:通过该项目研究,为特高压直流输电工程对地震台站的电磁干扰影响提供了理论依据和防护技术措施,其总体研究成果达到国际领先水平。

## 联合各行业研究力量进行技术攻关,不断提高团队研究能力

多行业研究力量合作攻关是科研团队取得成功的关键。中国电力科学研究院依托于国家电网公司电网电磁骚扰预测与控制科技攻关团队,联合中国地震局系统的科研、运行单位,以及高校和电力公司,各司其职,团结一致,将工作效率最大化,最后完满地完成了该项技术攻关。

电网电磁骚扰预测与控制科技攻关团队是国家电网公司首批科技攻关团队,是国家电网公司科技创新的主体。该攻关团队拥有电力系统电磁兼容和电磁研究与监测中心、电网环境保护湖北省重点实验室、电力系统电磁兼容国家电网公司重点实验室、挂靠全国电磁兼容标准化技术委员会,主要开展电网电磁环境特性及影响、电网噪声特性及控制、电网电磁骚扰特性及防护和新型环保输电技术与设备的研究、试验及标准化工作。近五年获国家科技进步奖2项、省部级科技进步奖20项,制定国家和行业标准13项,发表论文208篇。

情系民生,福泽万民,电网电磁骚扰预测与控制科技攻关团队将延续着光荣,承载着梦想,以更加磅礴的气势,在国家环境保护事业的征程中续写新的辉煌篇章! (刘兴发)



## 中国电力科学研究院“面向智能电网的计量标准及量测关键技术研究与应用”获北京市科技奖

随着电力体制改革的逐步深化,国家对电能表检定、计量标准等工作加强了监督管理;电力行业量值传递体系和计量技术管理模式发生了变化。同时,智能电网建设对电力计量提出更高要求。为了保障供电安全可靠,保证电力设备的安全性和经济性,围绕多项电力参数无法得到有效溯源及智能计量设备质量监督等问题,开展了高级量测技术的研究及应用。

本项目建立了国家电网公司智能电能表和用电信息采集系统技术标准体系,研制具有抗强磁干扰、防窃电功能的智能电表。提出了直流电压串联加法的溯源方法,研制了800kV直流分压比例标准装置,解决了我国直流特高压量值溯源问题。研制了无功电能计量标准装置,解决了无功电能溯源的问题;研制了三谐波微量值标准装置,解决了整数次谐波、间谐波、次谐波的量值溯源问题。研制了智能电表、用电信息采集终端功能及通信协议一体化测试装置,建立了低电压线路载波通信模拟仿真测试系统,提升了试验室全性能检测能力。

依托本项目形成专利14项,其中已授权专利6项;发表学术论文11篇;发布国网公司企业标准23项。由张钟华院士等权威专家组成的鉴定委员会一致认为:“该项目满足了我国智能电网发展的迫切需求,完善了国家电网公司计量技术及管理体系,具有良好的社会效益和经济效益。项目成果总体达到国际先进水平,其中智能电能表和用电信息采集系统技术标准体系填补国际空白,800kV直流分压溯源方法达到国际领先水平。”

项目建成了设备先进、技术领先、体系完整、运转高效的国家电网公司计量中心,全面提升了国网计量中心的试验检测能力和科研创新能力,进一步确立和巩固其在公司计量技术领域的权威地位。项目成果已在27家省级计量中心和国网计量中心应用。依据智能电能表和用电信息采集系统技术标准,我国建设了具有国际领先水平的覆盖面积最广、智能化程度最高、受益人口最多的用电信息采集系统,成套标准的实施提升了智能电表等设备制造行业的整体水平,使得我国在智能电网建设领域的国际地位和影响力大大提升。 (刘宣)

主要完成人 徐英群,高级工程师,中国电力科学研究院计量研究所副所长,全国计量器具标准化技术委员会委员、国家电网电力营销技术标准专业工作组委员。参与国家电网973计划项目及国网公司科技项目等重点科技项目,多次获得省部级、国网公司科技进步奖及中国电力科学研究院科技进步奖。参与编写国家电网公司营销SG186标准设计和智能电表系列标准等。先后在《电网技术》《电测与仪表》《需求侧管理》等期刊发表多篇论文。合作出版专著4部。

## “高压电缆线路载流能力提升及现场试验技术评估与应用”荣获中国电工技术学会科学技术奖

统计资料显示,近年来城市输配电电缆线路发展迅速,特别是高压和超高压电缆,已成为城市输电网络的重要组成部分,一些经济发达的中心城市,电力电缆已经成为这些城市输配电网络的骨干。高压电缆线路的经济性和可靠性,关乎城市电网的安全和社会经济的平稳运行。

针对城市电网中高压电缆线路的运行管理现状和技术需求,中国电力科学研究院开展了《高压电缆线路载流能力提升及现场试验技术评估与应用》项目研究,提出了复杂运行条件下高压电缆线路载流量的校正系数和提升方法,以及高压交联聚乙烯电缆线路现场试验技术的评估。在北京、上海、江苏、湖北等地的应用情况表明,项目成果有效促进了保障了城市高压电缆线路的经济性和可靠性。

### 项目背景

随着城市供电负荷以及供电可靠性要求越来越高,运行条件越来越复杂,电缆线路走廊限制越来越多,因此必须充分发挥电缆线路的经济性,提升线路的可靠性。

在经济性方面,现有的载流量计算标准中,一些复杂运行条件下高压电缆线路载流量无计算模型为依据;传统的载流量设计方法,留取裕度较大,不能充分发挥电缆线路的输送能力;同时对于部分需要提升载流能力的重载线路,往往缺少相关载流量提升方法和技术。总体来说,城市的电网规划建设滞后于经济发展和电力负荷需求的增长,一些重点线路的传输容量已经接近设计值,需要探索可行的提升输送容量的方法。

在可靠性方面,由于高压电缆线路必须在现场完成附件安装,在施工和安装过程中可能引入缺陷,影响电缆线路安全稳定运行。高压电缆线路竣工试验技术的有效性,作为对安装质量提升的考核手段,其有效性对于保证高压电缆线路的可靠运行至关重要。从现有运行经验看来,目前的试验方法能够有效地发现电缆线路施工和安装过程中的一些缺陷,但现有的电缆竣工试验技术,存在有效性和准确性不高,不能准确反应线路的实际缺陷和状况。

因此,如何科学地确定高压交联电缆线路的载流量,准确地排除施工和安装过程中造成的质量隐患,是城市电力电缆建设和运维管理中亟需解决的关键问题。

### 科技创新

在高压交联电缆线路载流量方向,研究团队研究了国产皱纹铝套电力电缆的缓冲层热阻对载流量的影响规律,提出了国产皱纹金属护套高压电力电缆缓冲层热阻的修正计算公式和缓冲层结构设计原则;通过试验和理论分析,提出了典型复杂运行条件下高压电缆载流量校正系数,实现了载流量的准确确定。在此基础上,进一步通过优化线路设计、消除局部热效应提出了载流量提升方法并完成了试验验证,填补了国内相关技术的空白。

在高压交联电缆竣工试验技术领域,研究团队验证了变频耐压试验的工频等效性和交流耐压试验的有效性,探索了新型局部放电检测技术在竣工试验中的应用,特别是发现了含针尖缺陷电缆的击穿电压在20—30Hz频率范围内的变化规律,采用振荡波电压

下局部放电试验检测出工频耐压试验未发现的110kV电缆线路模拟缺陷,验证了该方法的有效性。

2012年中国电机工程学会鉴定委员会认为,项目提出的运行载流量确定及提升技术合理,采用的振荡波电压局部放电检测技术路线可行,对实际工作指导性强,经济效益显著,应用前景广阔,整体达到了国际领先水平。

### 研究团队

中国电力科学研究院高压研究所电缆室是国内最早从事电力电缆运行技术研究的科研团队,主要从事电缆运维检测技术、状态评价、技术支持、现场服务等方向的研究工作,是电力行业电力电缆标准化技术委员会副秘书长挂兼单位。团队科研实力雄厚,在电缆运行技术研究领域国内领先、国际著名,完成了电缆专业领域多项课题的研究,曾获得2004年国家科学技术进步二等奖1项,2008年以来,获得湖北省科技进步三等奖2项、江苏省科技进步三等奖1项,中国电力科技进步三等奖1项、国家电网公司科技进步奖励多项。 (樊友兵)

## “特高压直流输电线路宽频域电晕电流传感器”填补了国内外电晕电流测量空白

电晕放电时的电晕电流高频特性,该发明提出了一种宽频域电晕电流电阻传感器,通过一系列技术改进措施,实现了在特高压环境下测量带宽高达30MHz的电晕电流电阻取样传感器。其核心技术主要有:

采用将分裂电阻束均匀布置在绝缘管外侧的结构,有效地降低了取样电阻表面的电场强度,确保其在特高压环境下无电晕放电。

该发明采用的取样传感器包括一组以上低感分裂电阻束,分裂电阻束由若干个均匀分布在绝缘管外侧相互并联的分裂电阻组成。由于本发明采用分裂电阻束的方式,并在其两端设置了均压环,大幅度地降低了取样传感器表面的场强,确保了该传感器在串入特高压线路后,其表面不会发生电晕现象。

通过合理配置分裂电阻束和屏蔽环电气参数,减小高频时电阻与容抗比值,大幅提高了测量带宽。为降低传感器端部的表面电场强度,避免电晕放电,需在分裂电阻束的两端安装金属屏蔽环,分裂电阻束与两端屏蔽环相连。但安装屏蔽环后增加了传感器的分布电容,可能造成传感器的频率响应变差,因而需要合理配置分裂电阻和屏蔽环的电气参数,从而减小高频时电阻与容抗的比值,提高信号的测量带宽。

将多组分裂电阻束串联,测量程切换灵活,测量更准确。

根据导线起晕状态的不同,导线上的电晕电流变化幅度较大,研究导线电晕特性时,通常需要对微安级到数十毫安的电晕电流进行测试。由于该发明采

用多组分裂电阻束串联连接的方式,因此能够具备多个测量量程,并可在控制端通过程序灵活地进行切换,测量不同幅值范围的电晕电流,从而使得测量结果更为准确。

该发明之所以能够在特高压环境下将电晕电流传感器的测量带宽从2MHz提高到30MHz,其核心在于分裂电阻束结构的采用及其与两侧金属屏蔽环的搭配,使得传感器的传感器既大大地提高了测量带宽,又能使得传感元件在特高压环境下无电晕放电。该发明可广泛应用于±1200kV下的特高压直流输电环境中,实现特高压输电线路中电晕电流的宽频域准确测量。

该项技术经国家电网公司信息通信分公司查新,由中国电机工程学会鉴定,专家一致认为,该项目在特高压直流输电线路宽频域电晕电流传感方面达到了国际领先水平。

实现了测量带宽高达30MHz的电晕电流电阻取样传感器,填补了国内外特高压直流输电宽频域电晕电流测量空白,拓宽了电晕放电及其效应研究方面频率的研究范围,推动了该领域的深层次研究,提升了我国在国际上的话语权。

开展的电磁环境研究成果已应用于溪浙、哈郑±800kV直流线路的极间距离优化设计,使极间距离缩小2m,由此节省了大量走廊资源,减少了大量房屋拆迁,对于环境保护和社会和谐具有重要意义。开展的电晕损耗研究成果为哈郑±800kV直流线路的导线选型提供了重要技术支撑,将原计划采用的6×

900mm<sup>2</sup>导线改为6×1000mm<sup>2</sup>导线,平均电晕损耗减小近1kW/km,每年节省近1000万元,对于节能减排具有重要意义。

项目主要由中国电力科学研究院和北京航空航天大学通力合作完成。团队从2009年开始研究特高压直流输电线路宽频域电晕电流测量技术,历经三年终将传感器研制成功,并装备于特高压技术国家工程实验室的试验线路和电晕笼上。在该研究领域目前已获得授权专利近20项,发表论文20余篇,先后获得国家工程技术发明奖、国家电网公司科技进步奖和北京市科技进步奖等。

团队负责人陆家楠,博士,注册环保工程师。现任中国电力科学研究院教授级高级工程师,高压所副所长,国家环保部“交直流输电线路电磁环境理论与测量技术”科技攻关团队带头人,中国电机工程学会电磁干扰专委会秘书长,全国勘察设计注册工程师管理委员会注册环保工程师执业资格考试专家组成员,国家环保部(国家核安全局)核安全与环境专家委员会委员,全国照射人体有关电、磁和电磁领域评定方法标准化技术工作组委员,国家电网公司特高压试验示范工程建设专家委员会设计组组长。完成国家电网和其他科技80余项;获中国标准创新贡献奖一等奖1项,省部级科技进步奖17项,国家电网公司科技进步奖9项。在国内外学术刊物发表论文90余篇,合编出版著作19部。主要从事电力系统电磁环境与电磁兼容研究。 (刘元庆)