

国家重点基础研究项目(973计划): 防御输变电装备故障 导致电网停电事故的基础研究

——访项目首席科学家唐炬先生

“防御输变电装备故障导致电网停电事故的基础研究”是国家“973计划”项目。该项目由重庆大学输配电装备与系统安全及新技术国家重点实验室牵头,联合清华大学、中国电力科学研究院、国网电力科学研究院、南方电网公司技术中心、武汉大学、华北电力大学和哈尔滨理工大学共同承担。本编辑部专访了项目首席科学家唐炬先生。

编辑:请您给我们介绍一下提出该项目的背景,研究的必要性、紧迫性和立项的依据。

唐:电力是现代城市群、新农村建设及全社会经济运行的总开关,电力系统发生大面积停电造成的重大突发性灾害事故,不仅会给国民经济发展带来重大影响,而且使社会公共秩序和正常生活秩序严重混乱。1998年1月,冻雨夹雪的天气给加拿大的魁北克、五大湖地区及美国部分地区造成了历史上最大的电网冰灾事故,2008年1~2月,我国南方冻雨(雨淞)给电网及社会造成了意想不到的伤害。这些事故还可以追溯到2003年相继发生的“8.14”美加、“8.28”英国伦敦、“9.1”新西兰和马来西亚、“9.28”意大利,2005年“5.25”莫斯科,2006年“7.17”美国纽约市电网和“11.4”欧洲电网等灾难性大停电事故,不但给国民经济带来了重大损失,并且给城市造成地铁、电梯、空调、电子电器等停运,致使城市公共安全秩序一片混乱。为此,世界各国电力专家都在对电网的安全下大力气进行研讨,各国政府也都把提高电网运行安全性的研究作为保证国家公共安全的任务之一,予以重点支持。

我国政府尤其重视,为了加强基本网架结构和电网反事故的防御能力,把“提高大型互联电网



运行可靠性的基础研究”列为国家重点基础研究发展计划(国家973)项目,国家自然科学基金委员会也把“电力系统广域安全防御体系基础理论及关键技术研究”列为重大研究项目。但是,对自然灾害引起输电线路故障和变(配)电设备自身故障导致电网发生灾难性事故却缺乏认识和重视,至今未将其列入国家重点基础研究计划。

实际上,不论是美国等发达国家,还是我国及其它中等发达国家,发生电网事故的主要原因包括覆冰、大气污染、雷击等自然灾害,电力系统内部运行环境对输变电设备绝缘的影响,电网的调度、控制和保护系统的故障,信息和通信系统故障,电力系统不稳定和人为操作故障等。对“8.14”等大停电事故的原因和我国电网主要问题的分析更多强调的是电网自身的稳定性问题,而世界各国电网重大灾害事故分析报告却证明了诱发事故的源头是输电线路和变电设备发生的故障。例如,“8.28”伦敦大停电事故是由并联电抗器发生故障后未被及时切除才导致事故扩大的;莫斯科“5.25”大停电是变电设备故障所致;纽约“7.17”

大停电是由电缆线路短路故障引起的。至于覆冰、大气污染、雷击等导致输电线路故障致使电网大面积停电事故在国内外的典型事例就更多。

国内外对引发电网大面积停电事故原因的分析表明：导致输变电装备故障的主要原因有两大类，即自然灾害（覆冰、大气污染、雷击等）和变电设备自身内绝缘潜伏性缺陷。据我国统计：2001~2006年，全国电网发生的重大事故分别为53、36、55、54、69、81起，其中自然灾害导致输电线路故障而引起的重大事故分别为7、5、10、14、17、35起，设备自身故障引起的重大事故为29、22、27、29、31、32起，两者之和占当年总事故数的百分数分别为68%、75%、67%、80%、70%、83%。发生的这些电网重大事故直接威胁着城市及全社会的公共安全。比如，2005年全国345个城市因故障停电47034次，2006年347个城市因故障停电63276次。其中输电线路、电缆、变压器、断路器等主要输变电装备的故障次数都占总故障数的80%以上。特别是2008年初，极端天气气候使我国华中、华东、川渝和贵州、湖南、广东、广西等大范围遭遇冰灾，导致大量杆塔倒塌和线路断线，近20个省（170个县）的电力供应受到影响，10个机场和众多的高速公路被迫关闭，京广铁路主干线和诸多铁路段及国道停运，致使广州等大城市公共安全受到严重威胁。

这就是我们提出本项目的背景和依据。从中也可看到本项目研究的紧迫性。

编辑：开展该项目研究的科学意义是什么？

唐：本项目研究的重要科学意义在于：

(1) 本项目研究的是国家中长期科学与技术发展规划纲要中能源领域的“超大规模输配电和电网安全保障”和973计划2008年度项目“城市防灾和重大突发性事件应急处置的科学基础”的研究内容。是研究城市重大突发性灾害中最为重要的大面积停电事故的预防、预警与处置等关键技术的关键科学问题。

(2) 本项目研究的是输变电装备故障发生发展的物理过程，寻找反映故障产生过程中危及运行安全的特征信息，据此提出预防预警理论及方法，建立输变电装备运行安全在线监测与故障诊断、预警与处置的智能化综合系统，并为从源头上构建一道安全防御系统提供基础理论及关键



唐炬先生

技术。

(3) 本项目的研究涉及气象及环境科学、电磁学、材料学、现代传感与人工智能技术、计算机与网络通信技术以及模糊、小波、分形、神经网络、灰色等现代数学，通过多学科的交叉融合，既可促进多学科的发展，又可促进电气工程学科的基础理论研究和工程科学研究的进步。

编辑：该项目研究的目的是什么？可能的突破点是什么？

唐：本项目的目标是通过基础理论和关键技术的研究，建立输电线路和变电设备突发性事故防御的理论体系，在引发输变电装备故障的特征信息的提取与识别、监测与诊断、预警与处置等一些关键科学技术问题上将有所突破。比如：

(1) 建立输电线路覆冰形成的数学物理模型，提出输电线路防冰、融冰的新思路和关键技术。

(2) 建立覆冰绝缘子放电发展过程及闪络电压预测的数学物理模型及方法，提出防御绝缘子覆冰闪络的理论及方法以及关键技术。

(3) 建立绝缘子自然积污规律及污闪电压预测的数学模型及方法，提出防御绝缘子污闪理论及方法以及关键技术。

(4) 建立雷电绕击超特高压输电线路的数学物理模型，创建雷电过电压在线监测、故障识别和定位的理论及方法，以及对变电设备内绝缘损伤的预测理论及方法。

(5) 建立寿命预测理论及方法；研究纳米绝缘材料和提高油纸绝缘抗老化性能的添加剂。



(6) 建立变电设备内绝缘潜伏性缺陷诱发早期和突发性故障的发生发展的数学物理模型及预测理论与方法, 以及相应的特征信息。

(7) 提出输电线路运行安全状态远程和变电设备就地或远程在线监测与故障诊断、预警与处置的理论以及在线预警系统的原理及方法, 建立相应的示范性在线预警系统。

编辑: 本项目的研究对我国社会、经济、科技发展和预防突发性灾害事故有何贡献?

唐: 本项目的研究成果将为重冰区及复杂气候环境地区输电线路的设计和变电设备的制造提供科学依据; 为输变电装备运行状态在线监测与故障诊断、预警与处置提供理论及关键技术基础, 为从大面积停电事故的源头建立一道反事故防御系统提供科学理论及关键技术。

可为“西电东送、南北互供、全国联网”及超特高压交直流输电线路的安全运行提供强有力的基础理论及关键技术。在此成果的基础上进一步开发输变电装备运行安全状态在线监测与故障诊断、预警与处置的综合预警系统, 形成高新技术产业; 同时本成果的基础理论及关键技术还可为我国输变电装备的制造水平跻身于国际先进行列提供理论及技术支持, 为城市综合防灾体系的建立提供科学支撑。

编辑: 请您介绍一下该项目的研究内容在国内研究中的现状和发展趋势。

唐: 国内外有关研究的现状和发展趋势可从3个方面进行介绍。

(1) 输电线路故障的机理及特征信息的获取、识别与预测预防方面

根据国内外的统计, 造成输电线路常见故障的主要原因是线路(导线、地线、杆塔)覆冰、绝缘子覆冰、积污和雷击。

自20世纪50年代以来, 国内外都相继开展了输电线路导线(地线)覆冰机理、观测、抗冰、融冰技术等方面的研究。已提出了20多种由雨凇、雾凇形成的经验模型和计算公式, 但没有一个计算模型被证明是具有通用性的。目前的发展趋势是试图建立一个物理意义清晰而又与气象参数、地理条件、海拔高度等相关的能预测导线上形成雨凇、雾凇或混合凇的数学物理模型。

由于覆冰绝缘子的放电过程和影响因素(覆冰前的污秽状况、海拔高度、覆冰状态等)比污秽放电更为复杂, 加之需要人工气候室, 因此对其研究的难度就更大。目前国内外对冰闪、污闪机理的研究都还处于探索阶段。在冰闪数学模型和预测数学模型方面, 加拿大和我国都取得了一定的进展。

根据我国500kV交流线路和前苏联330~1150kV交流线路的运行统计, 造成超特高压输电线路跳闸的重要原因是雷电绕击。国外不仅非常重视对雷电过电压的实时监测、在线识别及定位的研究, 探索将气象和电力GPS与过电压在线监测系统联网对雷电过电压进行多系统定位的一种新的防雷理论及方法, 同时也在探索雷电波入侵变电站时对变电设备内绝缘损伤的预测方法。

为使试验结果具有重复性、再现性和规律性, 国内外研究输电线路故障机理等的发展趋势是采用以人工气候室为主、自然环境现场为辅的试验研究与理论分析及仿真相结合的综合研究技术路线。主要研究输电线路导(地)线覆冰的形成过程和覆冰量预测理论及方法, 新的抗冰融冰理论及方法, 绝缘子冰闪和污闪放电的机理与物理过程, 表征覆冰、积污程度和冰闪、污闪的特征信息并建立计算和预测的数学模型。目前我国不仅有能力模拟复杂气候环境的大型($\Phi 7.8\text{m} \times 11.6\text{m}$)多功能人工气候室, 而且中国电科院、国网电科院、南方电网公司技术中心等正在建设更大的人工气候室和特高压试验基地。此基础具备研究输电线路故障的发生发展机理和特征信息获取与识别等的的能力。

(2) 变电设备内部故障的机理及特征信息获取、识别与预测预防方面

由于输变电设备处于强电磁场环境中, 反应设备各种潜伏性缺陷和内绝缘老化的特征信息非常微弱, 因而特征信息的提取至今仍是一个难题。到1998年, 全球电力企业中只有4.3%的变电设备和0.4%的配电变压器设备安装了在线监测装置。由于对故障发展规律和机理的研究甚少, 因而安装的设备装置的运行结果难以满足工程需要。

对于变电设备各种潜伏性缺陷及内绝缘时效老化的发展规律及机理的基础研究, 在国内外都还处于起步阶段。对于新型的纳米有机薄膜介质

和以添加剂提高油纸绝缘的抗老化性能的研究,目前国内外都还处于探索性研究阶段。无论是未来新型的还是现用的介质材料和绝缘新结构,都必须研究其老化的机理、故障发生发展的物理过程及其规律,寻找剩余寿命预测和运行状态监测的各种特征信息。因此,除通过物理模拟或工业模型的大量试验和仿真研究以外,尚需做真型内绝缘结构试验研究,构建内绝缘老化或故障发生发展的数学物理模型,建立运行状态预测的理论及方法。这一些目前国内外也都还处于探索性研究阶段。

(3) 输变电装备故障导致电网突发性事故的预警与处置理论及方法方面

对输变电装备故障导致电网事故的发生发展进行有效的预警与处置的理论及方法的研究,是电力行业和公共安全的迫切需求,它既是国内外研究的热点,也是一个具有挑战性的难题,比如现场采集特征信息的各种传感器、强电磁场中的电磁兼容技术和后台对故障处置决策的专家系统等都是挑战性的难题。目前国内外研究的重点是多传感器及其信息融合技术,以在线监测为基础、可靠性与经济性为中心的状态维修理论及方法,特别是建立各种典型故障物理模型、工业模型和真实模型,对故障产生的机理、种类、位置、危险性程度进行大量的理论分析,建立大型的样本数据库,并引入现代数学方法等,以便为建立智能化的在线预警系统提供理论和关键技术支撑。

对输电线路和变电设备故障的预警与处置是涉及多学科交叉的难题,不仅涉及传感器技术和小波分析、混沌、粗糙集、神经网络、分形等一系列现代数学理论与方法,而且还涉及现代网络与通信技术。因此,需要借助利用多学科交叉融合开展大量的基础研究。

编辑: 请介绍该项目要解决的关键技术问题和主要研究内容。

唐: 拟解决的关键科学问题主要包括3个方面:

(1) 输电线路故障的机理及特征信息获取、识别与预测预防

1) 输电线路(导线、地线、杆塔和绝缘子)覆冰的形成和引发电网灾害的机理及规律,预测模型及防治方法;

2) 绝缘子在自然环境中积污和导致外绝缘发生闪络的机理及规律,预测模型及防治方法;

3) 雷击形成电网灾害的物理本质、特高压输电线路雷电绕击规律,雷击对变电设备内绝缘损伤的评估模型及方法。

(2) 变电设备内部故障的机理及特征信息的获取、识别以及预测预防

1) 变电设备突发性故障的形成机理和规律,评估模型和方法。

2) 变电设备绝缘老化状态的表征、机理及规律。

(3) 输变电装备故障导致电网突发性事故的预警与处置理论及其方法方面。

1) 输变电装备运行状态在线监测与故障诊断、预警与处置的原理;

2) 输变电装备状态维修的决策理论模型。

本项目的研究内容包括:

(1) 输电线路故障形成的机理及特征信息的获取、识别以及预测预防

1) 研究输电线路覆冰和冰灾事故的形成过程、分析及监测方法以及预测模型;建立输电线路覆冰特征、导线覆冰舞动的分析和计算模型;建立不均匀覆冰、不均匀脱冰时杆塔受力的非线性动力学分析和计算模型;研究输电线路防冰、除冰和融冰的原理、方法及技术措施;

2) 研究绝缘子覆冰的形成机理与规律,覆冰绝缘子闪络过程,建立绝缘子冰闪物理数学模型,研究冰闪的预测方法以及防止绝缘子冰闪的方法和措施;

3) 研究输电线路电瓷、玻璃和复合绝缘子的积污规律、受潮润湿规律、污秽闪络过程,建立污秽绝缘子闪络的判据和预测理论模型,研究运行绝缘子积污和污闪的监测方法及技术,研究防污闪的系统理论及方法;

4) 研究长空气间隙放电的物理过程,建立输电线路雷电绕击的物理数学模型,研究雷电造成电网绝缘损伤的评估模型以及雷击故障监测方法。

(2) 变电设备内部故障产生的机理及特征信息的获取、识别以及预测预防

1) 研究用于变电设备内绝缘的材料时效老化的物理与化学过程,并构建其剩余寿命预测模型,提出表征绝缘老化的特征量和监测方法;



2) 研究变电设备内绝缘早期及突发性故障的发生、发展过程及其规律, 研究表征其特征信息的识别理论及方法, 提出特征量, 构建内绝缘早期和突发性故障的预测理论模型。

(3) 输变电装备故障导致电网突发性事故的预警与处置理论及方法

1) 研究输变电装备突发性事故的发生发展机理与条件以及反映突发性故障的特征信息, 构建综合预警模型, 并建立相应的决策处置系统和有效的防御体系、措施及方法;

2) 研究变电设备绝缘运行状态综合评价理论与方法, 构建以可靠性和经济性相结合的综合评估模型及理论, 提出以在线监测为基础的变电设备绝缘故障处置的状态维修理论和决策支持系统。

编辑: 请您介绍一下该项目的总目标和如何实现这些目标?

唐: 项目的总目标是: 根据我国实施“西电东送、南北互供、全国联网”及其建设特高压输电网的电力发展战略和确保国家公共安全的重大需求, 针对我国输变电装备的主要故障(即自然灾害引发输电线路故障和设备内各种潜伏性缺陷以及内绝缘时效老化引起的设备故障), 开展电气科学、材料科学、气象学、力学、信息科学、计算机科学等多学科交叉的基础理论和关键技术研究, 建立输变电装备运行安全的科学模型, 开发具有在线监测与故障诊断、预警与处置等多功能的预防系统的关键技术, 为从引发电网事故的源头(即输变电装备)上构建防御电网重大事故的第一道防线。

将项目总目标分解为5年的分目标如下:

第1年: 完成课题分解, 确立课题详细的研究体系, 组织研究队伍, 完善研究的技术路线和仪器设备, 全面进入研究工作。

第2年: 完成所有试验研究平台的搭建工作和理论研究体系方案, 优化试验与分析条件, 完善模拟和理论研究模型, 并开始试验和进行理论的系统研究。

第3年: 获取多项突破性研究成果, 提出多项有创新见解的新理论, 在SCI和EI检索源刊物上发表学术论文;

第4年: 提出分阶段报告, 组织检查与交流, 落实下阶段及需要调整的任务; 继续在SCI和EI检索

源刊物上发表学术论文, 将研究的输变电装备主要故障在线监测和故障诊断预警与处置子系统投入现场试运行, 并申报国家发明专利和软件著作权。

第5年: 继续在SCI和EI检索源刊物上发表论文, 将研究的输变电装备在线预警与处置子系统组成线路和变电设备两个多功能智能化示范系统并投入现场试运行, 各项任务达到预期目标, 完成课题研究总结报告, 申报科技成果奖, 并继续撰写后续论文和申报成果。

本项目由重庆大学牵头, 汇集了国内本学科领域的优势单位如清华大学、中国电力科学研究院、国网电力科学研究院和南方电网技术中心等共同完成。研究单位拥有在国内外具有显著特色的大型多功能人工气候实验室、特高压试验研究基地及设备, 高速摄像机、超高速照相机、紫外成像仪等高性能测试仪器, 以及用于仿真和理论计算的一系列先进软件。主要承担单位之间具有优势互补和有长期密切合作攻关的基础, 并各自在该领域取得过重要的前期研究成果。

编辑: 该项目的总体研究方案是什么? 如何实现?

唐: 由首席科学家负责管理项目的总体目标、任务分工、工作协调。将项目分8个研究课题进行研究, 由课题负责人负责各课题的技术路线, 具体实施研究工作。采用理论与试验研究相结合并由现场验证的技术路线, 各课题定期开展阶段性总结, 加强课题组与课题组之间、课题组与国际学术团体之间的学术交流, 不断总结, 及时发现研究过程中的不足之处, 不断改进研究方案和研究方法, 以保证课题的高质量完成。同时, 必须解决的关键技术有:

(1) 如何建立人工气候实验室模拟各种自然气象环境, 以保证规律性研究符合实际;

(2) 如何建立与流体力学、气象学和绝缘材料表面物理性质等相关的绝缘子表面污秽放电模型, 以适应自然污秽积聚和润湿规律的研究;

(3) 如何获取雷电放电与发展过程的微观信息, 以保证建立放电数学模型的正确性;

(4) 如何利用单一或联合的电、声、光、软科学量测技术, 寻找因宏观故障特征量的变化导致材料结构缺陷的合理有效的表征、提取和识别故障的特征信息, 解决故障与特征信息之间的关联

比对问题;

(5) 如何结合宏观试验与微观材料性质的分析, 解决理论绝缘缺陷模型与真实绝缘缺陷的相似性问题;

(6) 如何采用信号处理技术, 解决微弱信号传感中的干扰问题。

编辑: 该项目研究的创新性和特色是什么?

唐: 本项目的创新和特色主要体现在4个方面的研究突破上。

(1) 在对电网大面积停电事故的主源头的研究方面。力争在3大基础理论研究中有所突破。3大基础理论包括: 冰灾、大气污染、雷害等自然灾害导致输电线路故障的机理与预测理论; 变电设备内绝缘各种潜伏性缺陷和老化导致故障的机理与预测理论; 输变电装备运行安全状态在线监测与故障诊断、预警与处置的理论。

(2) 在对输电线路防御自然灾害的研究方面。在预测预防输电线路冰灾事故关键技术上有重大突破; 在冰闪、污闪机理和特征量提取的关键技术上取得突破; 在雷电过电压实时监测、故障的在线识别及定位和对变电设备绝缘水平影响的预测理论及方法上的突破。

(3) 变电设备的自身故障方面。在设备内绝缘老化和早期故障诱发突发性故障的机理与特征量提取、纳米复合介质和借助添加剂等提高油纸绝缘抗老化性能上的创新性突破。

(4) 输变电装备运行安全状态检测方面。对在线监测与故障诊断、故障预警与处置的理论及方法的研究上取得重大进展, 特别是在嵌入式智能诊断专家系统和故障危害性水平预警上的实质性突破。

编辑: 请介绍一下8个研究课题的具体设置与基础研究的关系。

唐: 本项目是紧紧围绕我国“西电东送、南北互供、全国联网”和特高压输电的电力发展战略, 防御输变电装备故障引发电网大面积停电导致突发性、灾难性事故, 开展3个方面的基础研究, 共设置8个研究课题。

(1) 输电线路故障的机理及特征信息的获取、识别与预测预防的研究

课题1: 输电线路覆冰故障形成机理与预测模

型及防治方法;

课题2: 输电线路绝缘冰闪机理与预测模型及防治方法;

课题3: 输电线路绝缘污闪机理与预测模型及防治方法;

课题4: 雷击导致输电线路故障的在线识别与对变电设备内绝缘损伤的评估模型及方法。

(2) 变电设备内部故障的机理及特征信息的获取、识别与预测预防的研究

课题5: 变电设备内绝缘时效老化机理与评估模型及预测方法;

课题6: 变电设备内绝缘早期及突发性故障的机理与预测原则及方法。

(3) 输变电装备故障导致电网突发性事故的预警与处置理论及方法的研究

课题7: 输电线路故障在线预警与处置的原理及关键技术;

课题8: 变电设备内部故障的在线预警与故障处置的理论及关键技术。

编辑: 谢谢唐先生在百忙中接受我们的采访。



作者简介:

唐炬(1960—)男, 重庆市学术技术带头人, 教育部首届优秀骨干教师, 全国“百篇优秀博士学位论文”获得者, 享受国务院政府特殊津贴的专家。重庆大学电气工程学院副院长, 重庆大学输配电装备与系统安全及新技术国家重点实验室常务副主任, 重庆大学“985”科技创新平台——电力装备安全与技术研究院常务副院长, 中国电工技术学会测试委员会副主任委员, 全国电力设备状态维修与在线监测标准化技术委员会委员, 重庆市电机工程学会常务理事、副秘书长, 重庆市经济管理学会“高级专家顾问团”成员。

长期从事电气设备绝缘在线监测与故障智能诊断技术和高电压测试技术方面的研究工作, 重点研究大型电力变压器和气体绝缘组合电器(GIS)早期与突发性故障的检测与诊断、电气设备局部放电超高频监测技术与模式识别、电气设备在线监测抗干扰技术、脉冲信号的检测与传感技术、电气设备状态维修与安全运行评估等。先后获得国家科技进步二等奖1项, 省部级科技进步一等奖1项、三等奖4项, 国家级优秀教学成果一等奖1项, 省级优秀教学成果一等奖2项、国家发明专利授权7项、公开4项, 在国内外著名刊物和国际学术会议上发表论文120余篇, 被SCI和EI等收录70篇。E-mail: cqtangju@vip.sina.com