

# 大风地区支柱类设备风振响应研究综述

刘敬华<sup>1</sup>,李鹏<sup>2</sup>,汉京善<sup>2</sup>,李丹煜<sup>2</sup>,刘彬<sup>2</sup>,高春辉<sup>3</sup>

(1.国家电网有限公司,北京 100031;2.中国电力科学研究院有限公司,北京 100192;

3.国网内蒙古东部电力有限公司电力科学研究院,内蒙古 呼和浩特 010010)

**摘要:**大风地区支柱类设备大幅风振引起的隔离开关开合困难及疲劳损伤、断裂问题,是目前亟需解决的一种影响变电站(换流站)安全稳定运行的灾害形式。文中根据不同支柱类设备风振破坏特征对变电站风振引起的灾害事故进行了分类。按照支柱类设备仿真分析、支柱类设备设计施工两方面阐述了国内外研究的现状,对比了结构整体的分析研究,分析了从静力角度对变电站支柱类设备模型进行计算的不足之处,指出了目前对支柱类开关设备的风振响应动力分析与测试研究存在的问题;并对大风区支柱类设备大幅风振引起的隔离开关开合困难及疲劳损伤、断裂问题的未来研究方向进行了展望。

**关键词:**变电站;支柱类设备;大风;风振响应

**中图分类号:**TM 572 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2023)02-0001-07

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20230201

## Research Review on Wind-induced Vibration Response of Pillar Equipment in Strong Wind Area

LIU Jinghua<sup>1</sup>, LI Peng<sup>2</sup>, HAN Jingshan<sup>2</sup>, LI Danyu<sup>2</sup>, LIU Bin<sup>2</sup>, GAO Chunhui<sup>3</sup>

(1. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China; 2. China Electric Power Research Institute

Co., Ltd., Beijing 100192, China; 3. Electric Power Research Institute of State Grid Inner Mongolia

Eastern Power Co., Ltd., Huhehaote 010010, Nei Menggol)

**Abstract:**The problems of opening and closing difficulties in disconnectors, fatigue damage and fracture caused by large-scale wind-induced vibration of pillar equipment in strong wind areas are a disaster form affecting the safe and stable operation of substation (converter station), which needs urgently to be solved. According to the wind-induced damage characteristics of different pillar equipment, the disaster accidents caused by wind-induced vibration in substation are classified. According to the simulation analysis of pillar equipment and the design and construction of pillar equipment, the current research situation at home and abroad is described, and the analysis and research of the whole structure are compared. The shortcomings in the calculation of pillar equipment model in substation are analyzed from the static point of view, and the existing problems in dynamic analysis and test research for wind-induced vibration response of pillar equipment are pointed out. In addition, the future research directions for opening and closing difficulties in disconnectors, fatigue damage and fracture caused by large-scale wind-induced vibration of pillar equipment in strong wind areas are prospected.

**Key words:**substation; pillar equipment; strong wind; wind-induced vibration response

## 0 引言

运行经验表明,大风地区变电站部分支柱类设备风振现象显著,对变电站的安全稳定运行构成严

重威胁。根据中国天气预报业务规定,蒲福风级6级及以上的风被定义为大风。中国东北地区、西北地区包括特高压在内的多个变电站,其户外场直流隔离开关、接地开关等部分支柱类开关设备在大风天气时曾发生多起大幅风振,导致设备永久变形、断裂或者动静触头短时相对变形过大,进而引起这些开关设备开

合闸操作困难,严重影响变电站安全稳定运行。例如,2019年2月20日及3月15日,蒙东某±800 kV 特高压换流站 408 kV 直流隔离开关两次出现大幅风振现象及重合闸困难;2006年4月9日,新疆某变电站 220 kV 断路器母线侧隔离开关 A 相支撑绝缘子在强风作用下根部折断,严重影响供电。此外,长期大幅振动易引起支柱类电气设备的结构疲劳损伤和破坏。尤其是部分支柱类隔离开关设备,由于其结构平面外刚度较小,顶部导电杆和均压环自重大且受风面积大,因此在风荷载作用下一般做大幅值低频往复运动。这容易引起开关设备支架结构(钢结构与支柱绝缘子)、基础连接部位(螺栓及混凝土垫层)、连接法兰盘等主结构及附属设施的疲劳损伤和破坏,降低支柱类开关设备的安全使用寿命。大风天气对电网安全稳定运行的影响规律、安全评估及防护技术是目前电网安全和防灾减灾领域研究的重点方向。

下面重点从大风天气对场站内支柱类设备影响问题的 69 篇文献中的 4 个重要方面的研究现状进行分析,对当前研究的不足之处进行论述,并对下一步研究方向进行展望。

## 1 输变电设备风场特性研究

大风可能导致变电设备及金具的断裂、变形或倒塌。中国常见大风地区主要包括西北地区和内蒙地区。如西北地区的新疆维吾尔自治区,区域内存在两大主要风区,分别是“三十里风区”和“百里风区”,这两个风区一年当中大风日数达到 140 以上,主要以 3 月至 6 月居多。

由于蒙东风区海拔相对较高,地形以平原和低山丘陵为主,地势平坦,容易形成持续、稳定的强风天气。气象观测数据表明,在赤峰市的翁牛特旗、克什克腾旗和松山区的交界地带,70 m 离地高度年平均风速达到了 8.0~9.3 m/s;呼伦贝尔、通辽、兴安盟地区的年平均风速也处于较高水平。上述地区的变电站支柱类电气设备在大风作用下,长期处于较高的振动水平,结构塑性破坏或疲劳损伤问题显著。为了准确把握大风地区支柱类电气设备的风振响应,首先需要开展变电站风场特性研究。

经验表明,与线路风场不同,变电站内风场除了受地区风场大环境的影响,还与站内设备布置情况息息相关。由于变电站有错综林立的建筑物及电气设

备存在,风场湍流度增加且风速风向转换频繁,微气象特征明显。已有电网风场及风荷载的研究成果主要针对输电线路野外风场进行,且一般仅考虑地形效应对微气象的影响。

国内输变电领域对地形风场的研究起步较晚,早期对峡谷风场的研究主要针对实际工程需要进行了野外山区峡谷观测和分析研究<sup>[1-4]</sup>:1)随着中国西部大开发战略的实施,针对西部复杂山区修建输变电线路的需要,国内不少学者专家投入到峡谷风场效应的实测研究当中。目前主要研究成果均针对峡谷横风向断面的风场分布特性。文献[5]针对山区峡谷的现场实测开发了一种悬索吊挂式风特性观测系统。文献[6-9]分别对四渡河峡谷、坝陵河大桥处峡谷、大渡河大桥处的高海拔高温差深切峡谷和赤石大桥处峡谷进行了现场实测研究。复杂地形现场实测耗费人力物力,且受气候的影响测试成功率较低,数据尤为珍贵。2)随着风洞试验在国内的开展和日渐成熟,峡谷风场研究逐渐从野外实测走向试验室。文献[10]以湘西矮寨主跨 1176 m 的超大跨度悬索桥为工程背景,进行了地形模型的风场特性风洞试验研究,提出了以梯度风速为参考风速的山区风环境风洞试验方法;提出峡谷内沿桥跨方向平均风剖面的分布是不均匀分布的,以统一的剖面形式进行风场分布描述是不科学的,该结论为处于山区特殊地形的输变电设备风场分析提供参考。文献[11]针对北盘江特大桥处山区峡谷地形进行缩尺比为 1:1000 的模型风洞试验,研究发现该观测地无明显风速加速效应。文献[12]针对三水河特大桥所在河谷处的复杂地形进行了风场特性风洞试验研究,同样也得出观测地无明显的峡谷风效应的结论。3)近几年,计算机计算能力的迅猛提升以及算法方面的逐步优化,使得计算流体力学得以运用在这样庞大网格数量的峡谷地形当中。文献[13]基于计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)模拟峡谷地貌以获得附近风场参数。文献[14]针对深切峡谷,运用 CFD 数值模拟研究揭示了复杂地形地貌风场的分布特征。文献[15]基于 Fluent 软件二次开发,对不同风向角作用下的山区峡谷风场进行了数值模拟。

现有研究对于输电线路等高耸杆塔结构沿峡谷走向方向的风场分布情况的研究相对较少。文献[16]基于各国规范对山丘地形风场的规定,针对某特高压大跨度输电塔的风振响应进行了研究,结

果表明当输电铁塔处于具有倾角的地形时,铁塔的动力位移响应和平均位移响应与处于平坦地面时有明显的差异,山地风场下输电塔的位移响应与平坦地区偏差约 23.0%~59.6%,山地地形对输电塔风振响应有很大影响。文献[17]以 500 kV 张恩线为工程背景,引入地形效应修正风速剖面,分析输电塔风致振动效应,结果表明引入地形效应下的输电塔风振响应均值较修正前大。文献[18]采用风洞试验研究遮挡山体坡度、高度和间距对风场的影响,并利用风场数据及统计方法分析某输电塔线体系的风振疲劳寿命。

中国已建成的特高压变电站或换流站中,有部分安装了用于常规气象监测的风速监测装置,仅能够提供 10 min 或 1 h 的平均风速,且风速仪安装位置位于站内建筑顶部;常规站内建筑相对较大,可类比于各种山体,因此风速仪受建筑扰流效应影响明显且距离户外电气设备较远,观测到的平均风速结果仅能对站内风场提供参考,无法给出用于支柱类变电设备风振分析的瞬时风速、风向数据。

综上所述:考虑微地形效应的风场特性研究在气象和桥梁工程领域开始较早,主要针对野外复杂山地、峡谷地形下的风场进行实测和数值模拟研究;输变电领域考虑微地形效应的风场特性研究开始较晚,现有研究主要针对输电线路以及输电铁塔在野外环境下的山地风场特性,而针对变电站微环境下的风场特性测试与仿真尚处于空白阶段。

## 2 变电设备风振响应规律及抗风设计研究

在变电设备风振响应分析及抗风设计研究方面,国内外学者主要针对避雷针、避雷器、套管等其他站内设备已进行了相关研究,针对支柱类隔离开关风振分析与测试成果的研究相对较少。

### 2.1 变电支柱类设备及架构风振响应分析方面

伴随更高电压等级输电线路的建设,以及电力设备分布于各种地理气候区域,因此输变电设备的结构形式也不断发生改变,复杂的结构造成风场变得复杂,因此也导致了一些输变电设备故障。大风地区变电站支柱类设备破坏案例如图 1 所示。



图 1 大风地区变电站支柱类设备破坏案例

变电站内变电架构的典型特点是支柱细高柔度大,因此在风荷载作用下容易发生失稳或结构破坏。调研发现,国内外尚未将风荷载的时变性纳入变电架构的设计当中。针对大风地区,目前的设计还克服不了实际环境对结构的影响,所以在大风地区存在设备因风振受损的事故。变电架构的主要形式如图 2 所示。

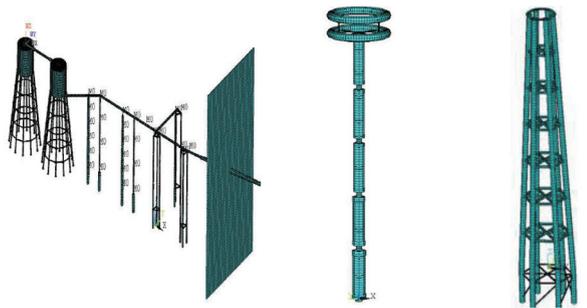


图 2 支柱类变电设备抗风计算一体化仿真模型

文献[19]通过调研某变电站避雷针结构相贯节点断裂事故,对该变电构架避雷针在风荷载作用下发生的横风向涡激共振进行了分析,运用双向流固耦合计算方法对该结构在风荷载作用下的风振响应进行了分析,并利用分析结果对避雷针的设计提出改进方法。文献[20]以安徽某 1000 kV 变电构架为研究对象,进行变电架构风振系数分析,计算得出 1000 kV 电压等级三跨变电架构的风振系数阈值比现行规范均有余量。文献[21]以 500 kV 全联合变电架构为对象进行风振受力分析,计算结果显示联合架构相对于普通架构受风荷载影响更加复杂,影响更大。文献[22]在渭南东 750 kV 变电构架研究中得出的结论与文献[21]一致,提出了 45° 风对变电架构的影响最大,在结构设计中需要考虑其对架构安全的影响。文献[23]以某 800 kV 交流高压隔离开关为研究对象,从理论计算和数值仿真两个角度,对不同风荷载作用下的高压交流隔离开关合

闸过程中动触头位置偏移规律进行研究,为产品设计、开发提供理论依据,研究结果表明:下部导电杆的应力应变值远大于上部导电杆;下部导电杆根部是导电闸刀的高应变区,应通过结构优化降低动触头端点偏移量。上述研究从静力角度对隔离开关导电杆局部模型进行计算,尚未考虑下部绝缘子及钢支架结构的整体变形影响。

综上,在变电设备及架构风振响应分析方面,目前国内外学者主要关注 220~1000 kV 不同电压等级变电架构及避雷针等站内钢结构设施,基于仿真手段研究此类结构风振响应、风振系数及体型系数等,而对变电设备风振响应则研究较少,变电设备架构风振响应的研究尚处于起步阶段,有较大的研究空间。

## 2.2 变电设备抗风设计技术方面

变电设备抗风设计主要针对变电站的避雷针。文献[24]计算了在强风荷载作用下的钢管式避雷针结构稳定性,提出了在满足结构局部稳定情况下采用径厚比大的钢管材料更稳定安全。新疆地区 750 kV 变电站站址大部分处于风压较大的戈壁滩,因此站内设备受风场影响较大。文献[25]研究了新疆地区 750 kV 变电站内避雷针破坏事故,并进行了结构稳定性验证,通过实验以及理论分析提出该避雷器破坏的原因是风振导致的共振产生结构本身损伤。文献[26]根据中国甘肃、新疆等西北地区近年来发生的避雷针设备坠落倒塌事故,进行了避雷针结构的风振实验分析,提出了西北地区同类型避雷针破坏的原因是风振导致底部结构产生裂痕,并进一步引发结构破坏而倒塌。文献[27]调研了中国西北大风地区 750 kV 变电站构架避雷针结构倾倒事故,归纳总结了西北地区变电站内架构类结构破坏的主要原因:一是长期风荷载作用导致结构在应力集中处发生结构疲劳损伤,进而引发局部破坏;二是由于施工作业不规范导致结构的连接处焊接不合格,焊接薄弱处在风荷载作用下发生破坏损伤;三是长期的风荷载作用导致法兰盘处的连接螺栓松动,加剧了结构的不稳定性,进而导致避雷针断裂。文献[28]对一起变电站构架避雷针折断事件进行了灾后事故分析,根据避雷针结构进行了仿真建模,在此基础上进行受力分析,提出该次避雷针事故是由于法兰连接处应力不足导致的;并根据仿真结构分析,提出了针对法兰连接处的加固措施与方法。

文献[29]分析了微气象、微地形等外界因素对结构安全的影响,综合运用风、力学等相关理论进行避雷针结构的风载荷影响分析,分析了不同建筑物高度对站内避雷针设备的风振影响结果,提出站内设备在设计时需要考虑站内不同建筑物对结构的影响。文献[30]采用有限元分析技术进行避雷针设备的仿真分析,通过对比不同类型的避雷针结构,从静力学、动力学以及结构疲劳性进行分析,提出了传统圆柱形避雷针结构在力学稳定性方面弱于六棱锥型结构。文献[31]利用仿真分析软件进行了避雷针结构不同高度风荷载受力分析,计算结果显示在距离底部 5 m 处的位置避雷针结构受到的应力最大,因此在避雷针设计的时候需要验证结构不同高度的受力情况,并提出了危险点的寿命分析方法。文献[32]根据某站内避雷针架构在风灾后结构破坏特征进行仿真分析,利用有限元分析方法进行了避雷针结构的模型搭建,通过不同风荷载作用在结构上进行受力分析,提出了结构在风荷载作用下的破坏模式。文献[33]针对一变截面杆塔结构进行有限元分析,通过计算风荷载作用下的塔身自振频率以及杆塔振动形式进行安全性校核,并计算了塔身不同位置在大风作用下的位移,提出了塔身结构在水平方向刚度相对较低,建议加强结构横向刚度,以及提出了抑制风振作用的建议。文献[34]总结了避雷针防振减振的研究成果,分析了不同避雷针的结构安全加强方法,提出加强避雷针中下部结构刚度的建议,并认为利用一侧牵引绳能增加结构的稳定性。

综上所述,在变电站内支柱类设备防风抗风设计技术领域,目前国内外学者主要针对不同形式避雷针结构的抗风设计参数及疲劳寿命进行了研究,并提出可减小此类结构风振响应的构造措施和建议,而对支柱类设备风振响应分析及抑制技术关注极少。

## 3 变电支柱设备结构及基础疲劳损伤分析方法研究

变电站支柱类设备与输电线路不同,覆冰对支柱类设备竖向产生的影响可以忽略不计。站内钢结构或支柱绝缘子可以看作一种杆类结构,该类结构受横向力作用的影响明显大于竖向力作用。在横向力作用下,主要是风荷载的影响,架构会发生高频低

振幅振动,由于西北地区全年风力较大,因此会造成支柱类设备与结构的疲劳破坏与倒塌。

文献[35]以输电铁塔为研究对象,结合现场实验与实际观测对铁塔减振消能措施进行分析,结果显示,安装减振耗能装置的输电铁塔的寿命相对于未采取减振措施的明显较长,为后来的输电铁塔设计与安装提供了一种可供参考的减振技术。文献[36]为了研究大型输电铁塔的风振效应,结合理论分析与现场观测实验,分别进行了不同风力作用下的大型输电铁塔结构响应分析,并设计了输电铁塔等比例缩小模型的风洞试验,全面地分析了不同风向、不同风力大小的铁塔模型风振响应特征。文献[37]利用 ANSYS 进行了杆塔结构的仿真试验,通过对结构的部位分别加载风荷载进行结构受力分析,研究结果显示横向风荷载作用下,结构的底部连接处最危险,应在结构设计时作充分考虑。文献[38]对输电塔架结构进行了风振疲劳分析,提出了风振并不会造成铁塔的寿命大幅度减短,因此在设计阶段,可以考虑弱化风振的影响。文献[39]进行了输电铁塔风振实测,结合实测数据与理论分析对塔架结构疲劳性能进行计算分析。文献[40]分析了在动载荷作用下,导线风振对输电铁塔的应力影响。文献[41]在分析了输电铁塔风振导致疲劳破坏的案例后,针对输电铁塔的疲劳寿命预测方法进行了实验验证与分析。文献[42]考虑一段时间内风荷载连续作用下输电铁塔的疲劳分析,采用时域分析方法进行输电铁塔与输电导线耦合关系的分析,提出了一套考虑疲劳累积损伤原理的输电铁塔疲劳寿命评估方法。文献[43]通过“风荷载模拟-结构有限元分析-关键部位的疲劳损伤累积-整塔的疲劳寿命估算”流程,进行了输电塔塔线体系风振疲劳的时域分析,采用时域分析方法计算输电铁塔关键部位的动力响应,据此进行输电铁塔疲劳寿命的计算与评估;同时得出输电塔塔线体系关键部位疲劳累积损伤主要出现在 6~14 m/s 的风速区段,并提出了通过加强个别杆件来提升整塔的疲劳寿命。文献[44]利用雨流计数法进行实测载荷的分析,将实测载荷作用过程比作若干载荷循环作用,为结构的疲劳寿命估算提供了一种新的参考方法。文献[45]从数据分析方法入手,将杆塔结构在静力作用下的破坏强度与动力作用下的结构疲劳强度进行了关系映射研究,从统计学方面建立了结构疲劳寿命的计算

模型。文献[46-48]基于杆塔结构的风振疲劳试验数据,利用数据分析方法与统计原理,提出了杆塔风振疲劳寿命的推算方法。文献[49-50]从数据分析角度,结合统计学原理从材料本身特性出发,研究材料疲劳分散性特点,提出了结构疲劳寿命统计模型。文献[51]结合蒙特卡尔仿真法以及矩阵分析法对受风力作用影响较大的金属结构进行了优化,提出了结构在风力作用下的裂纹演化趋势。文献[52]考虑结构的裂隙破坏对杆塔结构疲劳不同阶段的影响,提出了结构在应力作用下裂隙长度的概率分布。

综上,结构疲劳研究方面,目前国内外学者在航空、土木工程领域的疲劳理论和试验分析方法已经相对成熟,成果较为丰富;对输变电工程领域而言,目前国内外学者针对大跨越、特高压、老旧线路等输电塔的疲劳寿命评估技术研究较为深入,但针对变电类支柱设备的疲劳效应研究涉及较少。

## 4 支柱类变电设备振动特性及减振技术研究

随着超高压、特高压工程不断建设,变电站(换流站)电压等级升高,变电设备的结构尺寸也不断增大。多年来,为了保证电网的供电安全性和可靠性,国内外学者和机构针对大型电气设备在地震作用下的振动特性及减隔振技术开展了卓有成效的研究,相关领域研究成果可为支柱类设备在大风作用下结构受力状态仿真建模、新型减振及防护装置设计提供有意义的借鉴。

早期,国内研究机构和学者对电气设备的抗震试验和理论分析展开了大量研究,包括静力试验、动力试验、减震设计分析等,取得了显著的成果;但是这些成果也大多局限于较低电压等级的电气设备研究中。2006年以来,伴随着特高压工程的大规模兴建和投入运营,中国电力科学研究院在特高压电力设施的抗震计算与测试方面开展了卓有成效的研究工作,包括避雷器、断路器等变电设备抗震测试,棒形支柱绝缘子组合结构、高压电抗器回路系统、串补回路系统、旁路断路器、主变压器回路抗震方案的优选分析工作等,为工程建设提供了有效支撑。文献[53-55]针对特高压输电线路的整体抗震性能进行了调研分析,包括线路以及站内设备,分别进行了结构抗震可靠性评估。文献[56]以变电站内电容器

支撑架构为研究对象进行结构抗震受力分析,从结构的可靠性以及架构稳定性进行了理论分析,提出了针对支柱类结构提升稳定性与可靠性的优化技术,在一定程度上保证了结构的稳定安全,但是该技术对站内大型支柱类设备并不适用。文献[57]对变电站内瓷柱型断路器进行了抗震实验,利用ANSYS进行结构的仿真有限元分析。文献[58]以500 kV高压断路器为研究对象,从结构的静力与动力载荷作用下的受力情况进行分析,在不同条件下进行了设备抗震能力的实验分析。文献[59]对电流互感器的抗震性能进行实验分析,提出结构上部质量过大会影响整个结构的抗震性能,因此提出减小支柱类设备顶部质量来保证结构的稳定性,从而提升支柱结构的抗弯刚度。文献[60]总结分析了国内抗震方向的研究现状,通过实验分析了变压器的动力响应,提出了抗震设计技术方案。汶川地震之后,电力设施抗震研究受到了相关单位的高度重视,中国电力科学研究院、国网经济技术研究院等提出了抗震设计过程中支架动力放大系数的修改建议,并针对设备的地震破坏机理进行了较深入研究;同时,中国电力科学研究院研发了适用于瓷支柱类电气设备的减震装置和适用于变压器、高压电抗器等类型设备的隔震装置,并在云南、四川、甘肃、新疆等高烈度地震区的变电站进行了试点应用。

总体而言,变电设备在抗震领域的地震动力响应分析技术、减隔震技术及振动台试验技术等方面较电气设备抗风研究更为成熟,成果也更为丰富,但是在风振方面还有很大的研究空间。

## 5 结 论

为了准确分析大风地区支柱类电气设备的风振响应,上面对当前有关变电站风场特性研究的成果进行了分析。从输变电设备风场特性研究现状、变电设备风振响应规律及抗风设计研究现状、变电支柱设备结构及基础疲劳损伤分析方法研究现状、支柱类变电设备振动特性及减振技术研究现状四方面进行分析,发现目前的研究尚未对处于大风地区变电站内特殊风场的支柱类设备进行有针对性的研究分析。

下一步在该领域的研究重点应从以下几方面着手:一是针对大风地区变电站内受大型设备以及建

筑影响的风场进行研究分析;二是针对站内不同电压等级支柱类设备进行大风条件下的风振实验分析,开展现场实测,将仿真与实测结合分析等。

### 参考文献

- [1] 傅抱璞.河谷内的风速[J].气象学报,1963(4):518-526.
- [2] 傅抱璞.起伏地形中的小气候特点[J].地理学报,1963(3):175-187.
- [3] 傅抱璞.坡地方位对小气候的影响[J].气象学报,1962(1):71-86.
- [4] 陈万隆.峡谷中风状况的分析[J].南京气象学院学报,1979(S1):28-33.
- [5] 孙洪鑫,王修勇,陈政清,等.山区峡谷高空风环境悬索吊挂式观测系统[C]//第十四届全国结构风工程学术会议论文集.北京:中国土木工程学会桥梁及结构工程分会工程委员会,2009:153-157.
- [6] 庞加斌,宋锦忠,林志兴.山区峡谷桥梁抗风设计风速的确定方法[J].中国公路学报,2008,21(5):39-44.
- [7] 朱乐东,任鹏杰,陈伟,等.坝陵河大桥桥位深切峡谷风剖面实测研究[J].实验流体力学,2011,25(4):15-21.
- [8] 张明金,李永乐,唐浩俊,等.高海拔高温差深切峡谷桥址区风特性现场实测[J].中国公路学报,2015,28(3):60-65.
- [9] 蔡向阳,龚平,谢鹏,等.赤石特大桥山区地形桥位风特性现场实测[J].公路工程,2017,42(2):1-5.
- [10] 陈政清,李春光,张志田,等.山区峡谷地带大跨度桥梁风场特性试验[J].实验流体力学,2008(3):54-59.
- [11] 胡峰强,陈艾荣,王达磊.山区桥梁桥址风环境试验研究[J].同济大学学报(自然科学版),2006(6):721-725.
- [12] 白桦,李加武,刘健新.西部河谷地区三水河桥址风场特性试验研究[J].振动与冲击,2012,31(14):74-78.
- [13] 祝志文,张士宁,刘震卿,等.桥址峡谷地貌风场特性的CFD模拟[J].湖南大学学报(自然科学版),2011,38(10):13-17.
- [14] 李永乐,蔡宪棠,唐康,等.深切峡谷桥址区风场空间分布特性的数值模拟研究[J].土木工程学报,2011,44(2):116-122.
- [15] 沈炼,韩艳,蔡春声,等.山区峡谷桥址处风场实测与数值模拟研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2016,43(7):16-24.
- [16] 李正良,魏奇科,孙毅.山地地形对输电塔风振响应的影响[J].电网技术,2010,34(11):214-220.
- [17] 刘先珊,熊卫红,肖正直.山地环境中500 kV输电塔线体系风振响应研究[J].武汉大学学报(工学版),2016,49(5):668-673.

- [18] 张春涛,李正良,范文亮,等.遮挡山体对输电塔线体系风振疲劳的影响[J].振动与冲击,2013,32(10):184-191.
- [19] 刘冉.基于双向流固耦合的变电构架避雷针结构风振响应分析[D].郑州:郑州大学,2019.
- [20] 陈寅,陈传新,郑威,等.1000 kV 变电构架风振系数的计算[J].电力建设,2011,32(9):30-32.
- [21] 韩文庆,刘建秋,商文念.500 kV 全联合构架风荷载影响分析[J].低温建筑技术,2011,33(9):54-56.
- [22] 丁建智.750 kV 超长变电构架风振响应和风振系数研究[D].西安:西安建筑科技大学,2012.
- [23] 莫冰,王宇驰,司小伟.风力作用下 800 kV 高压交流隔离开关导电闸刀在合闸过程中动触头偏移的研究[J].现代制造技术与装备,2016(10):96-98.
- [24] 陶春,吴必华.浅谈单杆式钢管避雷针的设计[J].电力建设,2004,25(10):28-36.
- [25] 杨世江,高贵亮,张立明,等.750 kV 变电站工程大风地区架构避雷针技术研究[J].电气时代,2017(10):55-56.
- [26] 卫永鹏,王强,陈亚林,等.变电站钢结构变截面避雷针涡振现象及现场措施分析[J].科技创新与应用,2016(28):199-200.
- [27] 王建,邓鹤鸣,刘劲松,等.风害区域 750 kV 变电站构架避雷针变形分析及应对措施[J].电瓷避雷器,2017(2):14-18.
- [28] 丁国君,郭磊,董曼玲,等.构架避雷针折断原因分析及对策[J].河南电力,2015,43(4):6-9.
- [29] 王太江.荷载计算对避雷针结构设计的重要性[J].城市建设理论研究,2013(24):1-5.
- [30] 伍斯.基于 ANSYS 的避雷针杆的有限元分析[D].武汉:湖北工业大学,2012.
- [31] 张兆凯.变电站在役避雷针塔受力分析与剩余寿命评估[D].天津:天津大学,2014.
- [32] 陈怡文.变电构架避雷针结构的风致动力响应分析[D].郑州:郑州大学,2017.
- [33] 陈萌,管品武.某电信楼避雷针结构的动力响应分析[J].世界地震工程,2003(4):79-82.
- [34] 高东方.避雷钢管塔结构风振特性与控制研究[D].郑州:郑州大学,2011.
- [35] HAVARD D G, Perry O C. Lattice tower member fatigue and its control using a novel damping scheme[C].2000 Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE.
- [36] OKAMURA T, OHKUMA T, Hongo E, et al. Wind response analysis of a transmission tower in a mountainous area[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2003,91(1-2):53-63.
- [37] WARPINSKI M K, CONNOR R J, HODGSON I C, et al. Influence of flexibility on the fatigue performance of the base plate connection in high-mast lighting Towers[J]. Journal of Structural Engineering-asce, 2010,136(3):324-329.
- [38] WYATT T A. An assessment of the sensitivity of lattice towers to fatigue induced by wind gusts[J]. Engineering Structures, 1984,6(4):262-267.
- [39] JENSEN J J, FOLKESTAD G. Dynamic behaviour of transmission towers: field measurements[J]. Engineering Structures, 1984,6(4):288-296.
- [40] YASUI H, MARUKAWA H, MOMOMURA Y, et al. Analytical study on wind-induced vibration of power transmission towers[J].1999,83(1-3):431-441.
- [41] MIKITARENKO M A, PERELMUTER A V. Safe fatigue life of steel towers under the action of wind vibrations[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998,74-76(2):1091-1100.
- [42] 汪之松,李正良,肖正直,等.输电塔线耦合体系的风振疲劳时域分析[J].华南理工大学学报(自然科学版),2010,38(4):106-111.
- [43] 饶俊.特高压输电钢管塔疲劳寿命时域分析[J].江西科学,2012,30(2):181-184.
- [44] MATSUSHI M, ENDO T. Fatigue of metals subjected to varying stress[C].In Proceeding of the kyushu Branch of Society of Mechanical Engineers, Fukuoka, Japan, 1968:37-40.
- [45] DIONNE M, DAVENPORT A G. A simple relationship between the gust response factor and fatigue damage[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1988,30(1-3):45-54.
- [46] PETROV A A. Dynamic response and life prediction of steel structures under wind loading[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1998,74(98):1057-1065.
- [47] REPETTO M P, SOLARI G. Dynamic alongwind fatigue of slender vertical structures[J]. Engineering Structures, 2001,23(12):1622-1633.
- [48] REPETTO M P, SOLARI G. Wind-induced fatigue of structures under neutral and non-neutral atmospheric conditions[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2007,95(9-11):1364-1383.
- [49] BOGDANOFF J L, KOZIN F. Probabilistic models of cumulative damage[M].New York:Wiley,1985.
- [50] DREWNIAK J, TOMASZEWSKI J. Probabilistic model of fatigue crack growth[J]. Key Engineering Materials, 2013,200(10):81-98.

系统内能源站调配的其他非设定因素、偶然因素、主观因素等,使智慧能源系统集成中心的负荷协调分配策略综合优化。

3) 针对智慧能源系统源端的负荷协调分配的定级排位分配控制方法,提出了通过自动寻优与循环激活等机制促进负荷分配的可靠;通过圈内序列维稳及出圈关键信号确认机制避免系统大的波动,确保智慧能源系统源端有机高效协调。

#### 参考文献

- [1] 冯庆东.能源互联网与智慧能源[M].北京:机械工业出版社,2015.
- [2] 梁海峰,李晓航,高亚静.首批“互联网+”智慧能源示范项目特点研究[J].电力科学与工程,2018,34(9):1-7.
- [3] 陈以明,李治.智慧能源发展方向及趋势分析[J].动力工程学报,2020,40(10):852-858.
- [4] 成蓉,刘彤.加快区块链技术创新赋能实体经济[EB/OL].(2019-10-30).[2022-06-17].[http://m.xinhuanet.com/tech/2019-10/30/c\\_1125168864.htm](http://m.xinhuanet.com/tech/2019-10/30/c_1125168864.htm).
- [5] 王金玉,金宏哲,王海生,等. ISSA 优化 Attention 双向 LSTM 的短期电力负荷预测[J].电力系统及其自动化学报,2022,34(5):111-117.
- [6] 祝文军,王思宁,高晓欣,等.基于知识流和迁移学习的负荷预测[J].电信科学,2022(5):114-123.
- [7] 朱清智,董泽,马宁.基于即时学习算法的短期负荷预测方法[J].电力系统保护与控制,2020,48(7):92-98.
- [8] 胡威,张新燕,李振恩,等.基于优化的 VMD-mRMR-LSTM 模型的短期负荷预测[J].电力系统保护与控制,2022,50(1):88-97.
- [9] 杜玉吉,林小杰,张晓灵,等.智慧区域能源系统设计与

调控关键技术与应用[J].中国科技成果,9(19):38-42.

- [10] 吕宝龙,王海军,赵鸿飞,等.综合智慧能源站智能工况动态寻优系统研究[J].科学技术创新,2021(1):107-110.
- [11] 杨海柱,李梦龙,江昭阳,等.考虑需求侧电热气负荷响应的区域综合能源系统优化运行[J].电力系统保护与控制,2020,48(10):30-37.
- [12] 李咸善,马凯琳,程杉.含多区域综合能源系统的主动配电网双层博弈优化调度策略[J].电力系统保护与控制,2022,50(1):8-22.
- [13] 贾楚蕴,李华强,高红均.基于合同能源管理的园区能耗优化及多主体利益分配研究[J].新能源,2020,48(10):30-36.
- [14] 周星,刘江敏,褚农,等.智慧能源站“多站融合”工程中交直流微网系统研究[J].电测与仪表,2022,59(6):27-32.
- [15] 何畅,程杉,徐建宇,等.基于多时间尺度和多源储能的综合能源系统能量协调优化调[J].电力系统及其自动化学报,2020,32(2):77-84.
- [16] 颜拥,陈星莺,文福拴,等.从能源互联网到能源区块链:基本概念与研究框架[J].电力系统自动化,2022,46(2):1-14.

#### 作者简介:

孙海翠(1982),女,硕士,高级工程师,主要从事发电厂仪控与智能化设计研究;

孙 漾(1984),男,博士,高级工程师,主要从事发电厂仪控与智能化设计研究;

周梦婕(1988),女,硕士,工程师,主要从事发电厂仪控与智能化设计研究;

顾玉顺(1992),男,硕士,工程师,主要从事发电厂仪控与智能化设计研究。(收稿日期:2022-07-19)

(上接第7页)

- [51] YANG J N, MANNING S D. Stochastic crack growth analysis methodologies for metallic structures [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1990, 37(5):1105-1124.
- [52] 王世村,孙炳楠,叶尹.自立式单杆输电塔顺风向风振疲劳分析[J].浙江大学学报(工学版),2005(12):1880-1884.
- [53] 李天,李杰,沈祖炎.高压变电站抗震可靠性分析(二)[J].地震工程与工程振动,2000(4):37-43.
- [54] 李天,李杰,沈祖炎.高压变电站抗震可靠性分析(一)[J].地震工程与工程振动,2000(3):43-49.
- [55] 李杰.生命线工程的研究进展与发展趋势[J].土木工程学报,2006(1):1-6.
- [56] 郭惠勇,张陵,蒋健.电力电容器组架结构抗震性能的

优化分析和计算[J].工程抗震,2002(4):31-36.

[57] 李亚琦.电瓷型高压电气设备体系抗震性能分析[D].北京:中国地震局地球物理研究所,2002.

[58] 张伯艳,杜修力,吴忠,等.550 kV 高压开关抗震性能计算分析[J].工程抗震,1999(2):34-37.

[59] 刘晓明,曹云东,王尔智,等.220 kV 高压 SF<sub>6</sub> 电流互感器抗震性能分析[J].变压器,2001(2):21-24.

[60] 郭振岩.变压器抗地震性能的研究[J].变压器,2005(S1):13-31.

#### 作者简介:

刘敬华(1977),男,硕士,教授级高级工程师,研究方向为输电线路工程;

李 鹏(1987),男,博士研究生,研究方向为结构工程;

汉京善(1992),男,硕士,工程师,从事输电线路在线监测工作。(收稿日期:2022-08-28)