







- 四川省一级期刊
- 万方数字化期刊群入网期刊
- 中国学术期刊(光盘版)入编期刊
- 中国期刊全文数据库收录期刊
- 首届《CAJ-CD规范》执行优秀奖获奖期刊
- 中国学术期刊综合评价数据库统计刊源期刊
- 重庆维普中文科技期刊数据库收录期刊
- 超星数字图书馆入网期刊
- 中国核心期刊(遴选)数据库收录期刊

配电网是新型电力系统建设的主战场。分布式电源、储能、多元负荷等新要素的发展将深刻改变配电网的结构、特性和运 行方式,电力用户对高可靠性、高质量电力供应的需求不断提升,同时社会各界对山火、人身触电等安全风险的防范提出了更 高的要求。

面向新型电力系统的

故障检测与处置技术是配电网安全、可靠运行的关键保障。为了支撑新型配电网的发展,满足高质量发展目标下的高安全 性、高可靠性供电需求,国内外学者在新型配电网故障特性、检测方法、继电保护以及快速恢复等技术领域开展了广泛的研 究,并取得了一定的突破。为此,《四川电力技术》特邀电子科技大学**张真源**教授、四川大学**高红均**副教授、国网四川电科院 **张华**高级工程师作为特约主编,主持"面向新型电力系统的配电网故障检测与处置技术"专题,希望与作者和广大读者一起探 讨新形势下配电网故障检测与处置技术领域面临的挑战、机遇和发展方向。诚邀从事相关研究的专家学者和科研人员积极投稿。

征稿方向(包括但不限于)

(1)含分布式电源的配电网故障特性

(4)面向防灾减灾需求的配电网故障处置技术(5)微电网、直流配电网故障特性及处置技术

(2)适应分布式电源接入的配网继电保护技术

- 保护技术 (5)微电网、直流配电
- (3)满足高可靠性供电需求的配电网故障快速定位、处置与复电技术

投稿要求

(1)本次专栏接受研究论文(包括理论研究、数值模拟和实验研究)及高质量的综述。

配电网故障检测

(2)摘要250~300字为宜,须包含四要素,即目的、方法、结果、结论,同时应着重说明文章的创新点。

(3)论文引言中研究目的清晰明确,详细介绍国内外研究背景,对现有其他研究者的工作进行客观的评述;阐述自己的观点, 并对自己的研究思路做一总体介绍。论文研究设计和方法叙述清楚,数据合理并被正确地分析和解释;比较所提出的方法和现 有方法的优缺点。

(4)正文部分要求层次清晰、重点突出、论述严谨、文字简练,避免长篇公式推导,字数以不超过6000字(包括图表)为宜。(5)结论部分应概括文章研究工作,给出创新性、指导性结论。

来稿请用Word排版,格式、摘要、作者信息请参考《四川电力技术》投稿网站首页论文模板。

投稿须知

(1)请登录《四川电力技术》投稿网站:http://scdljs.ijournals.cn/scdljs/home注册作者用户名和密码进行投稿,投稿栏目请选择 "**配电网故障检测与处置技术**"专题。

(2) 投稿截止时间: 2023年7月30日。

(3) 投稿联系人: 雷老师18602855676

程老师028-69995169 罗老

罗老师028-69995168

四川电力技术 SICHUAN DIANLI JISHU

四川省一级期刊、万方数据数字化期刊群入网期刊、《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊全文数据库》收录期刊、首届《CAJ-CD 规范》执行优秀奖获奖期刊、中国学术期刊综合评价数据库统计刊源期刊、重庆维普中文科技期刊数据库、《超星数字图书馆》入网期刊、《中国核心期刊(遴选)数据库》入选期刊

第2期

2023年4月20日

《四川电力技术》	
编辑委员会	日次
主任委员 胡海舰 副主任委员 刘俊勇 委 员(按姓氏笔画笔形为序) 马芳平 王 卓 王渝红 司马文霞 年 珩 朱 康 何正友 余 熙 吴广宁 张安安 李 旻 李富祥 李镇义 尚近寿 苏少春 邹见效 陈 峰 胡朝华 唐万斌 梅生伟 黄 琦	・电网灾害防控・ 大风地区支桂类设备风振响应研究综述
董秀成 蒋兴良 韩晓言 廖学静 秘 书 李世平 程文婷	·····································
四川电力技术 双月刊 1978年创刊 中国标准连续出版物号: <u>ISSN 1003-6954</u> <u>CN 51-1315/TM</u> 2023年第46卷第2期(总284期) 主管单位:四川省电力公司 主办单位:四川省电力公司	基于改进樽海鞘群算法的区域综合能源系统优化调度
四川电力科学研究院 发行范围:公开 主 编:李富祥 副 主 编:程文婷 编辑出版:《四川电力技术》编辑部 发 行:四川电力科学研究院 地 址:成都市高新区锦晖西二街 16 号 邮政编码:610041 电话:(028)69995169/5168/5165 邮箱:cdscdljs@163.com 设 计:四川科锐得实业集团有限公司 文化传播分公司 印 刷:四川和乐印务有限责任公司 国内定价:每册 12.00 元	 生800 kV 雅砻江换流站 BP13 高压电容器不平衡电流及过电压分析 ±800 kV 雅砻江换流站 BP13 高压电容器不平衡电流及过电压分析 並一, 刘 磊, 李小鹏,张 纯,黄 宇,张 曾,张华杰,曾雪洋(59) 基于避雷器尾端电流监测的电力系统过电压反演 动思宇,黄佐流,刘守豹,郭海霞,王世旭,张 丰(64) 基于 HCM5000 的混合级联直流输电仿真系统实现与应用 小 刘 晨,肖 鲲,李传西,吴庆范,刘旭辉,宋延涛,滕尚甫,李桂举(70) 基于 apFFT 和带约束条件的最小二乘拟合的间谐波检测算法 … 王天行,舒 勤(76) 500 kV 变电站直流电源系统级差配合特性分析及建议 小 董汉彬,张明丽,蒋 枝,李淑琦,罗 洋,李 晶,王嘉易(84)
L 河口空华 参戏 J GN 31-1315/ IM * 19/8 * b * A4 * 94 * zh * P * ¥12.00 * 3000 * 15 * 2023-04	叶根法兰螺栓松动位移变化仿真分析与监测方案优化

本期责任编辑 罗 锦 编辑 程文婷 洪 洁 罗 锦

CONTENTS

• Power Grid Disaster Prevention and Control under Extreme Natural Environment •
Research Review on Wind-induced Vibration Response of Pillar Equipment in Strong Wind Area
LIU Jinghua, LI Peng, HAN Jingshan, LI Danyu, LIU Bin, GAO Chunhui(1)
A Review on Active Defense Technology of Extreme External Disasters in Power System
Bypass Protection Strategy with High Reliability for MMC Sub-module Faults in Extreme Environments
LIU Fan, BU Xianghang, FU Zhengzheng, FAN Songhai, ZHU Ke, ZHANG Zongxi, CUI Tao, ZHAO Fuping(15)
• New Power System •
Overvoltage Analysis and Suppression Strategy of Sending AC Grid with High Renewable Energy Penetration under DC Blocking
Protection Configuration and Setting Method of Variable-speed Pumped Storage Unit with Full-size Converter
Regional Meteorology Correlated Wind Power Prediction Based on Digital Twin DAI Jiakun, XIANG Yue, LIU Junyong, ZHANG Xin(32)
Optimal Dispatching of Regional Integrated Energy System Based on Improved Salp Swarm Algorithm WAN Kai, LIU Chuang, CHEN Lei(39)
A Coordinating Control Scheme of Source Side Based on Electric and Heating Smart Energy System
A Distributed Adaptive Overcurrent Protection for Microgrid ZAO Weihong, QI Xiaoxiao, DONG Xuetao, LI Decun, ZHI Kaihua(52)
Operation and Maintenance Technology Research ·
Analysis of Unbalance Current and Overvoltage of BP13 High-voltage Capacitor in ±800 kV Yalongjiang Converter Station
LIU Lei, LI Xiaopeng, ZHANG Chun, HUANG Yu, ZHANG Zeng, ZHANG Huajie, ZENG Xueyang(59)
Overvoltage Inversion of Power System Based on Tail-end Current Monitoring of Lightning Arrester
Implementation and Application of Hybrid Cascaded DC Transmission Simulation System Based on HCM5000
LIU Chen, XIAO Kun, LI Chuanxi, WU Qingfan, LIU Xuhui, SONG Yantao, TENG Shangfu, LI Guiju(70)
Inter-harmonic Detection Algorithm Based on apFFT and Least Square Fitting with Constraints WANG Tianxing, SHU Qin(76)
Characteristic Analysis and Suggestion for Stage Difference Coordination of DC Power Supply System of 500 kV Substation
DONG Hanbin, ZHANG Mingli, JIANG Zhi, LI Shuqi, LUO Yang, LI Jing, WANG Jiayi(84)
Simulation Analysis on Displacement by Bolt Looseness of Blade Root Flange and Its Monitoring Scheme Optimization
WU Weijun, LIN Jiamin, WEI Dongyuan, CHENG Qingyang, WANG Dongli, LI Hongren(89)

SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY

2023 Vol.46 No.2 (Ser.No.284) Bimonthly,Started in 1978 Address: No. 16, 2ND Jinhui West Street, High-tech Zone, Chengdu,Sichuan,China Postcode:610041

Sponsor: Sichuan Society of Electrical Engineering Sichuan Electric Power Research Institute

Editor in chief:LI Fuxiang Editor & Publisher: Editorial Department of SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY

大风地区支柱类设备风振响应研究综述

刘敬华¹,李 鹏²,汉京善²,李丹煜²,刘 彬²,高春辉³

(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 Jinghua¹, LI Peng², HAN Jingshan², LI Danyu², LIU Bin², GAO Chunhui³

(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

基金项目:国家电网有限公司科技项目(SGTYHT/19-JS-215/SGMDDK 00GGJS2000022)

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±800kV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 塔。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^[1-4]: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1h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高大,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。

综上可知: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 是长期的风载荷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5m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,提出了结构在风载荷作用下的破坏模式。 文献[33]针对一变截面杆塔结构进行有限元分析, 通过计算风载荷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。

综上研究成果,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 构的不同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]考虑一段时间内风载 荷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计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 shceme [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] MATSUISHI M, ENDO T. Fatigue of metals subjected to varying stress [C]. In Proceeding of the kyushu Brand 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: Wiely, 1985.
- [50] DREWNIAK J, TOMASZEWSKI J. Probabilistic model of fatigue crack growth [J]. Key Engineering Materials, 2013, 200(10):81-98.

(下转第51页)

关于电力系统极端外部灾害主动防御技术的评述

郁 琛^{1,2},常 康^{1,2},刘韶峰^{1,2},黄 燕^{1,2},王 辉^{1,2},薛 峰^{1,2}

(1. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司,江苏南京 211106;

2. 智能电网保护和运行控制国家重点实验室,江苏南京 211106)

摘 要:近年来台风、山火、覆冰、暴雨等极端外部灾害频发,对电力系统安全稳定运行构成了重大威胁。亟需实现对 全网的态势感知、在线决策和一体化协同防控。文中基于"双碳"能源转型与新型电力系统建设的新形势,论述了电 力系统极端外部灾害及其对电网影响的新特征;构建了基于决策信息流的电力系统极端外部灾害防御全过程体系; 提出了将停电防线拓展至系统级与设备级的资源统筹;最后,对电力系统极端外部灾害主动防御技术的发展方向进 行了展望。

关键词:电力系统;极端外部灾害;主动防御;风险评估 中图分类号:TM 711 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2023)02-0008-07 DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230202

A Review on Active Defense Technology of Extreme External Disasters in Power System

YU Chen^{1,2}, CHANG Kang^{1,2}, LIU Shaofeng^{1,2}, HUANG Yan^{1,2}, WANG Hui^{1,2}, XUE Feng^{1,2}
(1.NARI Group Corporation/State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 211106, Jiangsu, China;
2. State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Control, Nanjing 211106, Jiangsu, China)

Abstract: In recent years, the frequent occurrence of extreme external disasters such as typhoons, mountain fires, ice cover and rainstorms has become a major threat to the safe and stable operation of power system. Network-wide situation awareness, online decision-making and integrated collaborative prevention and control are urgently needed. Based on the "double carbon" energy transformation and the new situation of power system construction, the new features of extreme external disasters and their impacts on power grid are described, the extreme external disaster prevention system based on information flow in decision-making process is constructed, and the resources planning is put forward to expand power line to the system level and equipment level. Finally, the development direction of active defense technology for extreme external disasters in power system is prospected.

Key words: power system; extreme external disasters; active defense; risk assessment

0 引 言

台风、覆冰、山火、暴雨、高温、寒潮等极端外部 灾害的频频肆虐给电力系统安全稳定运行带来了空 前挑战^[1]。例如:2013年,国家电网有限公司运营 范围内 110 kV 及以上的输电线路因山火跳闸次数 达97条次,其中500kV及以上线路跳闸37条次, 锦苏、复奉等多条特高压直流线路因山火发生闭锁或 异常;2016年9月15日,受台风"莫兰迪"影响,福建 电网电力基础设施损失严重,"莫兰迪"对厦门电网 造成了毁灭性重创^[2],6座220kV变电站、21条 220kV线路、45座110kV变电站、52条110kV线 路、10743台配电变压器、713条10kV线路停运, 造成福建全省165万用户停电;2018年1月25日至 31日,中国南方地区发生了一轮大范围电网冰灾,覆 冰线路超过2500条次,华中、华东电网33条500kV 线路停运,220kV以下线路跳闸2394条次,损失负

基金项目:国家电网有限公司科技项目"融合 SG-ECS 全局信息 的电网极端外部灾害应急决策支持技术研究与应用" (5108-202218280A-2-93-XG)

荷 1039 MW;2020 年 12 月,湖南电网 90%以上的风 机因覆冰退出运行,装机容量达 5500 MW 的风电场 出力陡降至 169 MW,极大影响了电网安全和电力 供应,加剧了中国南方冬季供电缺口;2022 年 7 月 至 8 月,四川省面临历史同期最高极端气温、历史同 期最少降雨量、历史同期最高电力负荷"三最"叠加 的严峻局面,极端高温灾害与干旱灾害并行,电力供 需矛盾极为突出,为让电于民,工业、商业用电分别 从 463 GWh、225 GWh 降至 156 GWh、192 GWh^[3]。 以上案例充分反映了将电力系统停电防御框架向外 部灾害预警及应急处置延伸的必要性。

文献[4]提出了将传统安全稳定防御系统拓展 到自然灾害防御系统的具体改进要求,包括广域的 信息采集、自然灾害引发电力系统故障的量化分析、 通过调度系统动态生成的预防控制、灾害发生过程 中的应急控制以及灾后的恢复控制等。文献[1]针 对安全稳定防御系统的改进要求,提出了针对不同 灾害的自适应外部环境的预警防御方法。文献[5-10] 分别针对雷电、山火、覆冰、台风、暴雨等单一外部灾 害,基于致灾分析的机理模型或数据驱动的人工智 能算法,建立了输变电设备故障概率评估模型。文 献[11-13]设计并构建了应对若干外部灾害的电网 监测预警及安全稳定防御系统。文献[14]从外部 灾害防御所需的信息采集、外部灾害下电力系统风 险评估以及应对外部灾害的电力系统安全稳定控制 方法等方面总结了相关研究现状。文献[15]分析 了电网安全稳定各道防线的风险控制代价特征,提出 了适应灾害下概率及损失变化特征的风险控制策略。

下面进一步基于"双碳"能源转型与新型电力 系统建设的新背景、新形势,论述电力系统极端外部 灾害及其对电网影响的新特征,构建电力系统极端外 部灾害防御的全过程体系,并提出相应的防御方法。

1 电力系统极端外部灾害及其对电网 影响的新特征

1.1 极端外部灾害耦合关系趋于复杂多变

从气候系统的综合观测和多项关键指标表明, 全球变暖趋势仍在持续并进一步加剧全球水循环, 极端事件将变得更为严重,呈现出种类多、分布地域 广、发生频率高、造成损失重、灾害风险高等特 点^[16]。中国高温、强降水等极端天气气候事件趋 多、趋强,登陆中国的台风平均强度波动增强。气候 复杂多样、时空变化大,使得电力系统面临的极端外 部灾害从单一灾种向多灾种耦合发展,各灾害之间 可能并发施加破坏影响,也可能相互诱发、推波助澜。

2021年夏季,台风"烟花"在浙江登陆并直接影响上海、江苏、安徽等多个省份,造成浙江省 318 万余户停电^[17]。而台风"烟花"其外围和副高南侧的偏东气流引导大量水汽向中国内陆地区输送,加之其他天气系统以及地形等因素的共同作用,导致河南省出现历史罕见的极端强降雨^[18],河南省各地电网不同程度受损,其中仅郑州因灾停电的用户就达到 126 万户^[19]。

2022年夏季,川渝地区极端高温干旱天气持续,极易引发山火险情。8月21日,重庆市巴南区 界石镇突发山火,让电力线路面临持续高温、山火双 重"烤"验,导致500kV珞南一、二线故障,严重危 害电网安全稳定运行,给重庆迎峰度夏电力保供带 来巨大调整挑战^[20]。

1.2 电网更易受灾且后果更严重

在"双碳"及能源转型目标下,随着新型电力系 统的建设,新能源发电比例增大和电力电子广泛应 用,使系统频率、电压、惯量、备用等安全稳定支撑能 力不足,电网抗扰性下降,更易受极端外部灾害影 响。与此同时,大电网联系紧密,承担远距离输电任 务的特高压线路以及重要跨区输电线路,经常跨越 茂密林区和植被丰富区,使局部故障影响全局化、电 网稳定形态复杂、极端恶劣天气等对电网的影响加 大。由此引发输变电设备群发性故障,并有可能进 一步催生连锁反应,引发更严重后果。

在 2021 年 7 月至 8 月河南持续强降雨应急处 置中,500 kV 官渡变电站存在设备停运的重大风 险。而该站作为郑州东北区域最重要的电源枢纽, 担负着重要用户供电任务,同时也是特高压天中直 流的重要配套工程,一旦有失,引发的连锁反应后果 不堪设想。国网河南省电力公司紧急调派 200 余人 的应急队伍赶赴现场,奋战 6 个昼夜解除了该变电 站险情^[19]。

2021年2月,美国得克萨斯州遭遇冬季风暴。 在低温与冰雪风暴的双重夹击下,缺少防寒装备的 风力发电机组因大规模结冻而无法正常运转。由于 加压输气、供应火力发电的柴油机组系统在低温状 态中凝固结冻,输气系统陆续低温停摆,让火力发电 厂瘫痪。最终引发该州历史上最为严重的电力供能 危机,造成400万用户停电,供水、供气中断,死亡至 少40人,电价上升百倍,能源市场陷入混乱,引发巨 大社会灾难和能源安全舆论^[21]。

1.3 电网风险评估维度增多且难度增大

极端外部灾害下电网风险评估指标应涵盖输变 电设备受灾程度、电网安全稳定运行、重要负荷失 电、保电场景等多个层面,指标体系维度大大增加。 并且由于电网应急场景演化的复杂机理、多级电网 设备的电气和物理关联导致了不同维度之间关联特 征难以识别。同时,电网内部海量设备类型和数量, 也极大增加了基于不同设备的评估指标复杂性。此 外,上述多维风险指标还要考虑到不同时序变化、不 同设备耦合、保电场景中保供任务的等级和时长等 因素。因此,构建满足风险评估和不同应急决策需 求的综合风险评估指标,是电力系统外部灾害主动 防御的关键和难点。

1.4 电网应对手段愈发多样但协调难度大

从一次系统角度提高设计标准以避免故障,是 较为直接的外部灾害防御方法。但一次系统的投资 将随设计标准的提高而急剧增加,而且总有一些比 设计依据更严重的灾难场景仍然不能单纯依靠一次 系统来抵御。因此,属于二次系统的停电防御系统 不可或缺^[22]。

在外部灾害发生前、发生过程中和发生后,需要

通过不同的安全稳定控制方法减小故障损失。预防 控制,是在故障前调整系统运行方式,使高风险故障 发生后系统依然保持稳定运行。应急控制,是在故 障发生后,一方面通过紧急控制措施保证电网的稳 定;另一方面对自然灾害造成的电网设备故障进行 修复。恢复控制,是对因自然灾害造成的停电区域 恢复供电,减小因停电造成的损失。

此外,随着电网形态的发展,包括可控负荷、储 能、直流功率调制技术等电网调控新手段,在评估其 有效性和灵敏性后,亦可作为有效应对措施。

然而上述应对手段,或处于电网状态演变的不 同阶段,或分属于电网公司不同业务部门,在技术和 管理上都存在着协调优化的难度。需要以全过程防 控风险最小为目标,研究各应对措施之间的协调优 化方法,打破信息与管理壁垒。

2 电力系统极端外部灾害防御全过程 体系

2.1 极端外部灾害防御全过程体系

下面从电力系统可靠供电风险、碳平衡风险两 个方面,以及广域信息采集、数据挖掘分析、评估决 策支持3个维度建立极端外部灾害防御全过程体 系,如图1所示。其主要内涵包括:1)电力系统内、



图 1 极端外部灾害防御全过程体系框架

外部数据的整合;2)在外部灾害发生发展的不同阶段实现全过程防御,包括灾前预警预控阶段(人、设备、物资的超前部署)、灾中快速分析与阻断(应急调配)、灾后有序恢复(应急抢修),实现电力可靠供电中电网调控与应急抢修之间的协调;3)以电力为核心,整合灾害风险、电力可靠供电风险以及碳平衡风险与电力可靠供电风险间的协调;4)基于外部环境综合分析的输变电设备故障概率评估与发电能力不足概率评估。

2.2 极端外部灾害防御决策过程

电力系统极端外部灾害防御决策过程可分为灾 前预案制定和灾后应急抢修决策,如图2所示。

灾前的预案制定过程:首先,基于气象要素及自 然灾害监测预报系统(例如雷电定位分析系统^[23]、 山火雷达实时监测系统[24]、输电线路覆冰监测系 统^[25]、台风预警系统等),在外部环境综合分析系统 (平台)上进行自然灾害的智能匹配;其次,根据外 部灾害种类的特征,对其演化轨迹进行预测,如山火 蔓延预测、覆冰厚度增长预测、雷电区域外推预测 等:然后,结合电网模型数据及相关地理地形信息, 对自然灾害下电力系统设备的故障概率进行评估: 接着,进一步结合电网实时运行信息,对电网进行风 险评估或事故事件等级评估:最后,根据电网风险评 估结果,提前进行救灾抢修预案推演及人员物资的 部署。对于灾前的预案制定方法,有不少文献进行 了研究。文献[26]提出了一种基于时间序列迭代 的输电线路覆冰厚度估计方法。文献[27]则将覆冰 状态预测拓展到了风机叶片,将发电侧受灾影响纳入 风险评估范围。文献[28]结合应用统计学原理建立 了一种优化的电网山火风险预警模型。文献[29]

将台风灾害下的输电线路故障概率评估模型提升为 输电通道故障概率评估模型。文献[30]提出灾前 电网预防分区方法,在预测防护阶段依据故障概率 和拓扑连通度进行电网分区,并通过支路有功调整 降低灾害抵御阶段系统失稳的风险。文献[31]综 合考虑电网韧性与经济性,提出了台风灾害下灵活 性资源提前布点优化算法。

灾后的抢修决策过程:首先,基于信息技术,实 时采集移动载体上的各类信息,如抢修车辆信息、物 资装备信息、抢修队伍及其携带的抢修 APP 信息、 无人机勘灾反馈信息等,并在智能调度指挥系统 (平台)进行数据整合:然后,进一步结合灾损统计 与道路交通信息等,形成救灾抢修智能调度方案,并 实时更新修正、支撑决策制定。其中,智能调度指挥 系统(平台)进行数据整合时可通过缓冲网^[32]的架 构,付出一定的响应时滞,实现信息安全校核、过滤 及边缘计算任务分配,为广义环境下的电网控制决 策提供安全、有效、精炼的数据支撑。为及时掌 握极端灾害情况下对电网的影响或破坏等信息, 有效地协助灾后指挥及修复工作,文献[33]提出了 一种基于时空地理网格的电网多源数据融合方法。 文献[34]提出了一种极端灾害下考虑动态重构的 微网形成策略,以充分发挥燃气轮机、燃料电池等可 控分布式电源在极端灾害下的支撑作用。文献[35] 将道路交通实时状态(受损)等外部系统信息应用 于灾后的应急抢修策略。文献[36]将移动储能及 其优化配置策略纳入台风灾害后的电网恢复方案 中。文献[37]提出了电动汽车参与供电恢复的台 风灾害下电网恢复策略,并验证了其经济性及恢复 效果优于应急发电车。文献[38]进一步提出了电力



图 2 电网灾害防御决策过程

与通信动态交互影响的电网灾害故障协调恢复方法,以提升极端灾害下电网故障恢复能力。

2.3 极端外部灾害防御信息流

电力系统极端外部灾害防御,涉及到电力系统 内部信息与外部信息的融合,如图 3 所示:内部信息 包括电网模型、电网实时运行数据等;外部信息中, 既有静态的地形、地貌信息,又有灾损统计等各类动 态信息,还有抢修车辆、队伍等移动载体信息。这些 信息不但数量庞大、大量冗余,还有安全风险隐患。 例如,通过无人机等信息终端所采集的数据极易被 黑客劫持并注入恶意代码或指令。这些信息终 端若能够直接进入电力内网,则电网将暴露在遭 受黑客攻击的极端风险之下。为此,可以利用缓 冲网^[32]架构对上述信息进行安全性分析后再进 入电力系统内网。

缓冲网利用电力内网与公用网对响应速度要求 上的差别,付出额外的时滞来换取信息安全防御的 可行性,使其成为电力内网与公用网之间信息安全 的枢纽。此外,部分计算功能可在信息缓冲区通过 边缘计算实现,使得只需要向内网传递知识提取后 的少量信息,缩短了响应时滞,减少了内网的信息处 理量,提高了信息可靠性。

3 电力系统极端外部灾害防线拓展

3.1 统筹系统级与设备级的需求和资源

电力系统极端外部灾害防御中,如何快速识别

出对电网安全稳定运行、重要用户保电风险影响较 大的关键设备,并对其进行应急资源超前布控及优 化调配,成为阻断故障演化及连锁反应的关键。为 此,需要将风险防御延拓,通过保设备安全来保电网 安全和供电安全。

2018年1月下旬的雨雪冰冻灾害期间,湖南电 网结构破坏较大:1月27日9:21时,祁韶直流线路 双极由于4491塔(湖南湘潭)线路绝缘子因覆冰影 响出现间歇性拉弧,进一步降压至400kV运行(双 极低端停运);1月27日20:22时,宾金直流线路双 极因1508塔(湖南益阳)覆冰严重,降压70%运行。 至此,复奉、锦苏、宾金、祁韶、灵绍、江城、林枫直流 线路降压运行,龙政、葛南、宜华直流线路双极停运, 天中、德宝直流线路因受端安控系统直流调制量约 束,功率分别调减至4800 MW、2200 MW,安全形势 异常严峻。国网湖南公司紧急核算临时方式,利用 娄底市500 kV 民丰变电站直流融冰装置连续对 500 kV 五民线、220 kV 民洢线等多条重要线路提前 实施融冰,保障了湖南电网主网架安全稳定运行。

由此可见,需要基于电网安全稳定运行在线量 化评估技术,对关键风险设备进行快速识别、优化应 急处置的对象和时序,以此适应外部灾害演变与电 网运行方式变化,提升极端外部灾害防御决策的智 能化与精细化。为此,需要统筹全网系统级与设备 级的全局资源进行应对。



图 3 极端外部灾害防御信息流

3.2 实现防线拓展的平台基础

2020年,国家电力调度通信中心牵头研发的新 一代调度技术支持系统,在传统自动化系统运行控 制平台和模型驱动型应用的基础上,运用云计算、大 数据、人工智能等 IT 新兴技术,构建云计算平台和 数据驱动型应用的新一代调度技术支持系统。在体 系架构上,基于生产控制子平台和调控云子平台两 种平台,构建实时监视、自动控制、分析校核、培训仿 真、计划市场、运行评估、调度管理和数据服务八大 类业务应用,利用调度数据网、综合数据网和互联网 3种网络,广泛采集发电厂、变电站、外部气象环境、 用电采集、电动汽车以及柔性负荷等数据,并基于人 机云终端,实现对两种平台、八大类业务应用的统一 浏览查看。目前系统处于试点应用阶段。

2021年,国家电网公司安监部牵头建设了新一 代应急指挥系统(SG-ECS),通过数据中台接入用电 信息采集系统、调控云系统等业务系统、统一车辆平 台、应急队伍管理系统等相关数据,能够实现电网运 行、设备状态、物资调配、电网 GIS 等信息的互联互 通和资源共享,力争涵盖结构化预案、灾情监测、灾 损恢复、资源调配、重要保电等多方面业务需求。 SG-ECS 目前正在山东、上海等网省公司进行试点, 尚处于应用场景探索与研发期。

综上所述,基于开放式的架构融合更广域的信息来保障电网安全和供电安全是统一的发展趋势。 上述新一代系统为统筹系统级与设备级的需求和资源提供了全局信息与平台基础。但仍需进一步通过服务化接口向应急指挥人员、调度人员、抢修人员提供电网综合风险量化服务、应急处置服务等。并通过不同业务服务化的互调互用,实现调度、运检等不同业务部门的协同。

4 电力系统极端外部灾害防御的研究 展望

对于极端外部灾害,需要统筹全网系统级与设备级的全局资源进行应对,目前主要面临以下6个方面的问题:

1)极端外部灾害下的电力系统输变电设备故 障概率及风险评估大多局限于单一灾种场景,鲜少 计及各灾种之间的耦合关联关系,缺少复合灾害下 的综合评估^[39]; 2)缺少综合考虑设备故障及连锁反应对全网安
 全稳定运行与重要负荷保电风险的量化评估指标;

3) 仅通过电网运行方式的预调来减轻外部灾害对电网的扰动以及降低灾害一旦发生后的停电损失,存在代价高、难以阻断故障演化的问题;

4)输变电设备外部灾害应急处置基本依赖离 线预案和人工经验,难以应对灾害演变与电网运行 方式变化;

5)在应急资源有限的情况下,缺少根据综合风险排序进行资源优化调度的决策支撑;

6)需要加强各内、外部系统的信息互通、协调 优化电力系统各道防线的控制措施、协同处理各业 务部门的应对流程。

为此,建议的研究方向包括:

1) 在细化电力系统外部灾害防御数据需求的 基础上, 研究建立基于缓冲网架构的内、外部数据整 合平台。统筹各专业资源, 打破数据壁垒, 加强资源 整合, 实现电网运行、设备状态、物资调配、电网 GIS 等信息的互联互通和资源共享, 确保突发事件情况 下应急管理实时化、可视化、智能化、数字化, 有效提 升突发事件应对能力。

2)跟踪灾害演变趋势与电网方式动态变化,基 于电网安全稳定运行在线量化评估技术,研究快速 识别影响电网安全稳定运行与重要负荷保电的关键 设备集,提升防御决策的精细化水平。

3)基于时序风险提前对关键输变电设备进行 应急资源优化部署,研究人员、车辆、物资、装备等应 急资源的超前布控与紧急调整方法。

4)进一步拓展电力系统极端外部灾害防御所 关注的受灾设备。例如,风机叶片覆冰的机理分析、 预测、故障模型建立及风机叶片融冰技术的研究。

5) 在信息物理社会系统(cyber-physical-social system, CPSS)框架下,研究计及相关外部系统的信息,提升防御决策的可行性与精确性。例如,将道路 交通实时状态(受损)等外部系统信息应用于灾后 的应急抢修策略^[40]。

6)协调优化外部灾害防御措施与电网恢复控制方案^[26],有效减少电网受灾停电事故后的负荷停 电损失和再次停电的风险,为应急指挥中心和运检 部门合理调配应急人力、物力提供建议,综合提升电 网停电防御及防灾减灾能力。

5 结 论

电力系统极端外部灾害防御在"双碳"及能源 转型目标下,需要基于电网全局信息的融合以及电 力系统内、外部信息的融合,实现系统级与设备级安 全的统筹、协调、优化,自适应极端外部灾害及电网 运行趋势变化,并提升其应急决策的智能化、精细化 水平,更加精准、高效地通过保设备安全来保电网安 全和供电安全。

参考文献

- [1] 薛禹胜,吴勇军,谢云云,等.停电防御框架向自然灾害
 预警的拓展[J].电力系统自动化,2013,37(16):18-26.
- [2] 澎湃新闻.台风"莫兰蒂"深夜登陆重创厦门电网,致 全市大面积停电[EB/OL]. (2016-09-15)[2022-08-28]. https://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_ 1529153.
- [3] 国网四川省电力公司.四川启动突发事件能源供应保障一级应急响应[EB/OL].(2022-08-21)[2022-08-28].http://www.sc.sgcc.com.cn/html/main/col8/2022-08/21/20220821132642844109393_1.html.
- [4] 薛禹胜,费胜英,卜凡强.极端外部灾害中的停电防御 系统的构思(一)新的挑战与反思[J].电力系统自动 化,2009,32(9):1-6.
- [5] 谢云云,薛禹胜,王昊昊,等.电网雷击故障概率的时空 在线预警[J].电力系统自动化,2013,37(17):44-51.
- [6] XIE Yunyun, LI Chaojie, LV Youjie, et al. Predicting lightning outages of transmission lines using Generalized Regression Neural Network [J]. Applied Soft Computing Journal, 2019, 78:438-446.
- [7] 吴勇军,薛禹胜,陆佳政,等.山火灾害对电网故障率的时空影响[J].电力系统自动化,2016,40(3):14-20.
- [8] 谢云云,薛禹胜,文福拴,等.冰灾对输电线故障率影响的时空评估[J].电力系统自动化,2013,37(18):32-41.
- [9] YU Chen , HUANG Yan, CHANG Kang, et al. The early warning of icing flashover fault of transmission line based on partial mutual information method and support vector machine[C]. 4th IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration, Wuhan, IEEE:2020.
- [10] 吴勇军, 薛禹胜, 谢云云, 等. 台风及暴雨对电网故 障率的时空影响[J].电力系统自动化,2016,40(2): 20-29.
- [11] 王昊昊, 徐泰山, 李碧君, 等. 自适应自然环境的电
 网安全稳定协调防御系统的应用设计[J].电力系统
 自动化,2014,38(9):143-151.

- [12] 陆佳政,吴传平,杨莉,等.输电线路山火监测预警系统的研究及应用[J].电力系统保护与控制,2014,42(16):89-95.
- [13] CHANG Kang, YU Chen, LIU Shaofeng, et al. Design and application of power grid security risk assessment and hierarchical control system in natural disasters [C]. International Conference on Power System Technology, Haikou, China, 2021.
- [14] 罗剑波,郁琛,谢云云,等.关于自然灾害下电力系统 安全稳定防御方法的评述[J].电力系统保护与控制, 2018,46(6):158-170.
- [15] 常康,徐泰山,郁琛,等.自然灾害下电网运行风险 控制策略探讨[J].电力系统保护与控制,2019, 47(10):73-81.
- [16] 中国气象局.中国气候变化蓝皮书(2022)[M].北京: 科学出版社,2022.
- [17] 中国电力报."烟花"来袭! 能源电力员工全力保供 应[EB/OL].(2021-07-29)[2022-08-28].https:// baijiahao.baidu.com/sid=1706314194642910362&wfr= spider&for=pc.
- [18] 中国天气网.官方解读河南极端强降雨成因[EB/OL].
 (2021-07-21)[2022-08-28].https://baijiahao.baidu.
 com/sid=1705866914999242948&wfr=spider&for=pc.
- [19] 国网河南省电力公司.众志成城,捍卫光明[EB/OL].
 (2021-08-11)[2022-08-28].http://www.ha.sgcc.com.
 cn/html/main/col8/2021-08/11/20210811165700815420304_
 1.html.
- [20] 国网重庆市电力公司.国网重庆电力苦战 24 小时恢复输电"大动脉"正常运行[EB/OL].(2022-08-24)
 [2022-08-28].http://www.cq.sgcc.com.cn/html/main/col8/2022-08/24/20220824151136717557524_
 1.html.
- [21] 钟海旺,钟海旺,程通,等.美国得州 2021 年极寒天 气停电事故分析及启示[J].电力系统自动化,2022, 46(6):1-9.
- [22] 薛禹胜,费圣英,卜凡强.极端外部灾害中的停电防御 系统构思(二)任务与展望[J].电力系统自动化, 2008,32(10):1-5.
- [23] 张启明,周自强,谷山强,等.海量雷电监测数据云计算 应用技术[J].电力系统自动化,2012,36(24):58-63.
- [24] 李江,曹永兴,朱军,等.输电线路山火雷达实时监测 技术及应用研究[J].四川电力技术,2021,44(1): 53-57.
- [25] 徐志钮,李先锋,郭一帆,等.基于温度滞后相位的 输电线路覆冰监测方法[J].电力工程技术,2022, 41(6):91-100.

(下转第38页)

极端环境下 MMC 子模块故障高可靠旁路保护策略

刘 凡,卜祥航,付峥争,范松海,朱 轲,张宗喜,崔 涛,赵福平

(国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610041)

摘 要:电力系统空间范围大且各环节联系紧密,雷击、地震、极寒等极端环境易对电力设备产生直接和间接影响,并 进一步引起系统电气量的剧烈变化,研究极端环境下 MMC 子模块的故障保护对提高电力系统的安全稳定运行水平 具有重要意义。文中分析了极端环境下 MMC 子模块的故障特性,采用基于子模块电容电压比较的故障诊断方法,提 出一种在子模块输出端口间加装晶闸管的极端环境下 MMC 子模块高可靠旁路故障保护策略:配置冗余供能电路确 保子模块状态可控,利用晶闸管过电压击穿作为后备被动保护,结合子模块的多级保护和热、冷备用冗余子模块的投 入,实现极端环境下对故障子模块的高可靠旁路保护。以±800 kV 特高压柔性直流输电系统为算例,经仿真验证所提 策略具有良好的可行性,能够提高极端环境下子模块故障保护的可靠性和速动性,同时对晶闸管击穿后流过桥臂电 流进行热仿真,发现已超过其工作温度限制,为满足长期旁路通流要求,加装晶闸管击穿后须通过散热器进行强 制冷却。

关键词:MMC 子模块;故障保护;极端环境;过电压击穿;晶闸管 中图分类号:TM 461 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2023)02-0015-07 DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230203

Bypass Protection Strategy with High Reliability for MMC Sub-module Faults in Extreme Environments

LIU Fan, BU Xianghang, FU Zhengzheng, FAN Songhai, ZHU Ke, ZHANG Zongxi, CUI Tao, ZHAO Fuping (State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: Power system has a large spatial range and all links are closely connected. Extreme environments such as lightning strikes, earthquakes, and extreme cold are likely to have direct and indirect impacts on power equipment, and further cause drastic changes in electrical quantity of the system. Studying fault protection of MMC sub-modules in extreme environments is of great significance to improve the safe and stable operation level of power system. The fault characteristics of MMC sub-modules in extreme environments are analyzed, and a fault diagnosis method based on sub-module capacitance-voltage comparison is used to propose a bypass fault protection strategy with high reliability for MMC sub-modules in extreme environments where thyristors are installed between the output ports of sub-modules. The redundant energy supply circuit is configured to ensure the controllable state of sub-modules and the input of hot and cold backup redundant sub-modules, it can realize the highly reliable bypass protection for faulty sub-modules in extreme environments. Taking the ±800 kV UHV HVDC flexible transmission system for example, the proposed strategy has good feasibility and can improve the reliability and quickness of sub-module fault protection in extreme environments. In order to meet the long-term bypass flow requirements, forced cooling must be carried out through the radiator after the breakdown of the installed thyristor.

Key words: MMC sub-module; fault protection; extreme environment; overvoltage breakdown; thyristor

0 引 言

上发生概率非常低的事件,如极寒、高温、暴雨、地震、 洪水、台风、闪电、野火等。极端自然环境及灾害往往 是突发性的,很容易对电力设施产生直接和间接影 响,甚至对电力系统设备造成破坏,影响电力系统安 全稳定运行,引发大规模停电,并造成大量财产损失。 模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)拓扑由德国学者于 2003 年提出,MMC 主电路 拓扑的基本单元为子模块^[1]。单个 MMC 子模块发 生故障的概率较低,具有较高的可靠性。但考虑到 极端自然环境及灾害对 MMC 设备的不利影响, MMC 含有大量的级联子模块,一旦发生故障,换流 器将无法正常工作甚至发生跳闸停运等事故^[2-3]。 在极端环境下,对 MMC 子模块及时的故障诊断与 保护直接关系到电力系统能否正常运行。因此,研 究极端环境下 MMC 子模块的故障保护,对减少极 端自然环境及灾害的不利影响,以及对提高电力系 统的安全稳定运行水平有着重要作用。

当前针对极端环境下 MMC 子模块故障保护的 研究仍较少,主要采用的保护方法为配置子模块故 障冗余保护:受极端环境影响子模块故障后合闸子 模块旁路开关,实现故障子模块的隔离;将热备用冗 余子模块迅速接入桥臂,结合电容电压均衡控制实 现子模块故障的就地保护[4-6]。文献[3,7]提出将 少量子模块置于热备用状态,而将其余子模块则置 于冷备用的子模块冗余保护方法。文献[8]提出一 种可在阀基控制器(valve base controller, VBC)和子 模块控制器(sub-module controller, SMC)中实现的 子模块故障诊断策略:但诊断精度受限于子模块 电容电压的采集精度和系统控制周期,电压监测 电路易受干扰发生电压采样错误,导致保护误动。 文献[9-10]对 MMC 子模块保护时序逻辑进行了优 化,通过延时动作降低了保护误动作的可能性;但一 定程度也降低了保护的可靠性和速动性。文献[11] 提出在换流阀原结构上加装晶闸管的保护方法,能 够较快将故障子模块旁路,对绝缘栅双极型晶体管 (insulated gate bipolar transistor, IGBT) 起到保护作 用,但晶闸管需要被施加触发信号。极端环境下电力 设备可靠性下降,上述方法均存在一定不足,在极端环 境下对 MMC 子模块故障保护的可靠性受到限制。

下面从极端环境下 MMC 子模块故障被可靠旁路入手,分析 MMC 子模块的故障特性和晶闸管的 过电压击穿特性,并对子模块故障监测方法进行介 绍,提出一种极端环境下 MMC 子模块故障高可靠 旁路保护策略,在子模块输出端口间加装单向或双 向晶闸管,利用晶闸管过电压击穿实现子模块的高 可靠旁路,并对其可行性进行了仿真验证。

1 MMC 拓扑结构及子模块故障

1.1 MMC 基本拓扑结构

图 1 为三相 MMC 拓扑及半桥子模块结构, MMC 由 6 个桥臂组成,每个桥臂由若干个子模块级 联和一个电抗器 L₀ 串联构成,上下桥臂组成一个相 单元。半桥子模块由 IGBT 管(VT₁和 VT₂)和二极 管(VD₁和 VD₂)以及电容 C₀ 组成;K 为旁路开关, 用于旁路故障子模块。其中,U_{de}为直流电压;I_{de}为 直流电流;i_{am}为桥臂电流;U_c为子模块的电容电压; u_{sm}为子模块的端口电压。



图 1 三相 MMC 拓扑及半桥子模块结构

子模块正常工作过程时有3种状态:

状态 1(投入状态): VT₁ 开通、VT₂ 关断, 电流 可双向流动, 其输出端始终引出子模块电容电压。

状态 2(切除状态): VT₁关断、VT₂开通,子模 块电容被旁路,输出电压为 0。

状态3(闭锁状态): VT₁、VT₂ 均关断,随电流 方向的改变电容状态在充电、旁路之间变化。

1.2 极端环境下子模块故障特性分析

电力系统由发、输、变、配、用多个环节组成,空间范围大且联系紧密。雷击、地震、极寒等极端环境易对电力设备造成损害,并进一步引起系统电气量的剧烈变化,使电力电子器件和储能电容的故障率大大提高,IGBT 和续流二极管等电力电子器件损坏、储能电容损坏、触发控制故障会造成 MMC 子模块故障。MMC 子模块故障特性分析已有相关研究,

这里针对极端环境下电力电子器件损坏引起的3种 典型 MMC 子模块故障进行故障特性分析^[3,8]。

1) IGBT 或续流二极管短路故障

当一正常 IGBT 开通时,与之互补的续流二极 管或另一 IGBT 发生短路故障,会使子模块的桥臂 连通。导致子模块放电并产生高等级的短路电流, 子模块端口电压减少。

2) IGBT 开路故障

当子模块处于投入状态时,若 VT₂发生开路故障,运行状态与正常情况下相同;若 VT₁发生开路 故障,运行状态如图 2 所示,此时子模块输出电 压和电容充放电情况受桥臂电流 *i*_{arm}的方向影响。 当 *i*_{arm}>0 时,桥臂电流通路与正常运行状态相同,电 容充电;当 *i*_{arm}<0 时,桥臂电流流过 VD₂,电容不会 放电,子模块输出电压为 0 而不是 *U*_c,此时桥臂中 将产生较大环流,需要启动子模块保护。而在保护 将故障子模块旁路之前,VT₁开路故障会导致故障 子模块的电容电压持续上升。由于电容电压均衡策 略,当电容电压上升到一定值时,将不再开通 VT₁给 电容充电。



图 2 投入子模块且 VT₁ 开路时桥臂电流通路

当子模块处于切除状态时,若 VT₁ 发生开路故障,其运行状态与正常情况下相同;若 VT₂ 发生开路故障,该情况下子模块的电流通路与图 2 所示通路相同。当 *i*_{am}>0 时,桥臂电流通过 VD₁ 对电容充电;当 *i*_{am}<0 时,桥臂电流流过 VD₂,与正常运行状态相同。故障子模块的电容电压将会上升,并在桥臂上出现电流环路。

3)续流二极管开路故障

此时子模块的电流通路会发生改变。在 VD₁ 发生开路故障情况下,子模块电容因电路改变无法 充电,其电压减少;当 VD₂ 开路故障时,故障子模块 中的充放电通路仍然存在,不会导致电容电压下降。 但无论哪一个续流二极管发生开路,均会导致桥臂 电流断续,严重影响系统的稳定运行。

2 晶闸管过压击穿与功率模块旁路机理

2.1 晶闸管过电压失效模式及击穿稳定性

晶闸管是目前耐压水平最高、输出容量最大的 电力电子器件^[12]。发生反向过电压击穿之后晶闸 管就失去反向阻断特性,反向的半波电流可连续流 经晶闸管。但起初正向的半波电流仍无法在晶闸管 导通,随着反向过电压击穿的多次进行,晶闸管的正 向阻断特性也会失去,使正向半波电流也能在晶闸 管上连续导通。如在过电压击穿过程中晶闸管上发 生面积较大的损坏,使上下钼片出现接触情况,晶闸 管将会在损坏处联接导通双向电流。

选取 45 ℃ 环境温度对 3 个晶闸管(型号为 KPC3900-42,最大工作温度为 85 ℃)进行正反向直 流阻断电压极限耐受能力测试,得到该款晶闸管阻 断电压与漏电流关系曲线如图 3 所示。



图 3 晶闸管正反向直流阻断电压测试曲线

由图 3 可得, 晶闸管的正反向漏电流在阻断电 压不大时变化很小,转折点在 5200 V 阻断电压处, 在该点后晶闸管的漏电流出现上升,并在正反向阻 断电压为 5600 V 时开始猛烈上升。

晶闸管的击穿电压远远大于其额定电压,同时 具有不连续性,因此一般情况下 MMC 子模块内的 其他元器件会在晶闸管被击穿前损坏。在实际应用 中采用提前设计好的转折晶闸管,基于晶闸管击穿 试验,得到转折晶闸管击穿电压可受控的结果,晶闸 管的击穿稳定性较好。

2.2 晶闸管旁路功率模块机理

MMC 在极端环境下的运行过程中,脉冲误发、 过电流、过电压或机械损坏等都可能造成子模块故 障,经故障诊断后可采取以下动作使故障子模块在 较小影响下退出运行:向保护系统发出故障报警信 号并闭锁子模块脉冲;闭合旁路开关 K 将故障子模 块旁路,并投入冗余子模块;故障情况严重时保护还 应动作使系统跳闸。

保护动作判定依据基于对 MMC 子模块的电容 电压测量数据,数据误差将导致保护误动作。通常 采用设定多级保护按时序逻辑动作的方法提高保护 动作的准确性,但同时会减小在突发故障情况下保 护动作的速动性。故提出在子模块输出端口加装单 向或双向晶闸管 V,如图 4 所示。在半桥子模块中, 晶闸管放置方向为阴极连接桥臂中点,阳极连接电 容负极,晶闸管之间电压为 0、U_c(U_c 为电容电压)。 晶闸管 V 仅作为无源过压保护元件使用,不需要主 动触发。当子模块发生故障导致电压异常上升,在 保护系统因电压采集错误或延时动作而没有及时闭 合旁路开关时,子模块输出端口间的晶闸管作为后 备保护元件,由于过电压被击穿,从而实现对故障子 模块的高可靠旁路。



图 4 子模块输出端口加装晶闸管拓扑

通过对 MMC 子模块故障特性分析可知,IGBT 开路故障下子模块的桥臂电流通路、输电电压和储能电容充放电情况均会发生改变,并导致子模块输出端口电压上升。以±800 kV 直流输电工程为例,MMC 正常运行状态下子模块输出端口电压应为2 kV,将子模块过电压后备保护阈值,即加装晶闸管的击穿电压设置为2200 V±100 V。当子模块发生故障导致输出端口电压迅速上升并超过过电压后备保护阈值时,加装晶闸管立即发生击穿,其击穿波形如图 5 所示。



加装晶闸管被击穿后,流过电流迅速增大而电 压迅速跌落,从而快速将故障子模块旁路。经过一 段延时后,保护系统动作闭合旁路开关 K,使流过晶 闸管的电流下降,防止晶闸管因门极附近局部温度 过高被烧毁。

3 极端环境下 MMC 子模块故障保护 策略

3.1 子模块故障诊断

目前用于子模块故障诊断与定位的方法主要有 参数计算法和子模块电容电压比较法^[13-16]。这里 采用基于子模块电容电压比较的故障诊断方法。

对于每个桥臂具有 N 个子模块的三相 MMC 系统,用开关函数描述第 i 个子模块的开通和关断状态。

$$S_i = \begin{cases} 1, & \text{VT}_1 \not \exists \exists, \text{VT}_2 \not \xi B \\ 0, & \text{VT}_1 \not \xi B , \text{VT}_2 \not \exists \exists \end{cases}$$
(1)

流过子模块电容的电流正方向与桥臂电流 i_{am} 相同,正常运行时流过子模块电容的电流 i_c为

$$i_{C_0} = S_i i_{\rm arm} \tag{2}$$

由图 2 可知: 当 $i_{c_0} > 0$ 时, 子模块电容充电; 当 $i_{c_0} < 0$ 时, 电容放电。设系统控制周期为 T_c , 则任一控制周期结束时的子模块电容电压 $U_c(t+T_c)$ 为

$$U_{\rm C}(t + T_{\rm C}) = U_{\rm C}(t) + \frac{1}{C_0} \int_{\iota}^{\iota + T_{\rm C}} i_{C_0}(t) \, \mathrm{d}t =$$

$$U_{\rm C}(t) + T_{\rm C} S_i \frac{i_{\rm arm}(t) + i_{\rm arm}(t + T_{\rm C})}{2C_0}$$
(3)

式中: $U_{c}(t)$ 为子模块电容电压 t 时刻的初始测量值 值; C_{0} 为子模块电容值; $i_{arm}(t)$ 为 t 时刻的桥臂电 流; $i_{arm}(t+T_{c})$ 为控制周期结束时的桥臂电流; S_{i} 为 该控制周期内的子模块开关状态。

由子模块在极端环境下的故障特性分析可知, 故障子模块的电容会发生不正常充放电情况。可以 比较各周期内电容电压增量的计算值和实际值,从 而对子模块是否故障进行诊断。由式(3)可得子模 块电容电压增量的计算值为

$$\eta_1 = T_C S_i \frac{i_{\rm arm}(t) + i_{\rm arm}(t + T_C)}{2C_0}$$
(4)

子模块电容电压增量的实际值为

$$\eta_2 = U'_{\rm C}(t + T_{\rm C}) - U_{\rm C}(t) \tag{5}$$

式中,U'c(t+Tc)为控制周期结束时的子模块电容电

压测量值。

在正常和故障情况下,单个控制周期内电容电 压计算值和实际值相差不大,因此采用两者比值作 为故障诊断指标。子模块故障诊断指标 η 为

$$\eta = \left| \frac{\eta_1}{\eta_2} \right| \tag{6}$$

子模块正常运行时,任一控制周期结束时 $\eta \approx 1$ (充放电时 $\eta_1 = \eta_2$;不充放电时 $\eta_1 = 0 \pm \eta_2 \approx 0$, 定义该情况下 $\eta = 1$),子模块不同状态下监测到的 η 为

$$\eta = \begin{cases} 1, \quad 正常运行 \\ 0, \quad VT_1 短路故障, VT_2 开路故障 \quad (7) \\ \infty, \quad VT_1 开路故障 \end{cases}$$

在极端环境下,通过监测 η 可实现对子模块的 典型故障诊断。该故障诊断方法基于控制周期前后 的桥臂电流测量值,在系统故障发生时满足 η = 1, 可避免极端环境下系统故障时子模块保护误动。

3.2 极端环境下 MMC 启动控制策略

极端环境下在诊断子模块发生故障后,保护系 统执行以下指令:

1) 封锁故障子模块的 IGBT 脉冲;

2)闭合旁路开关 K 将故障子模块旁路;

3) 控制系统禁止故障子模块再次投入;

4) 热备用冗余子模块接入桥臂,同时由冷备用 冗余子模块及时补充。

为避免信号干扰使电压采集错误而导致的保护 误动作,通过硬件和软件过、欠电压保护相结合对子 模块电容电压进行可靠监测,同时结合上述基于子 模块电容电压比较的故障诊断方法实现对故障子模 块的可靠诊断^[17-18]。在子模块控制板上设置硬件 模拟电路对子模块电容电压进行检测,同时在阀控 软件保护上设置延时上报机制,使阀控进行多次故 障判别,在检测到电压异常达到一定时间后,再上报 故障并使保护系统动作。基于子模块电容电压比较 的故障诊断方法判别准确,且可避免系统故障时子 模块保护的误动;但需要等待 MMC 控制周期的结 束。以 MMC 控制频率为 800 Hz 为例,对子模块故 障的保护延时最长可达 1.25 ms,因此将其作为子模 块故障的一个后备保护诊断。

图 6 为极端环境下 MMC 子模块故障的保护诊

断框图。



设置硬件模拟电容过电压基准电压 u_{ref_max} 和欠 电压基准电压 u_{ref_min} ,当子模块电容电压大于 u_{ref_max} 或小于 u_{ref_min} 时,通过硬件模拟电路比较判断并向 SMC 输出故障信号。此时 SMC 控制芯片开始计时, 设定延时时长为 20 μ s,通过延时动作减小因信号干 扰造成电压采集错误的影响;同时在子模块电压异 常情况下及时切除故障,避免子模块承受故障的时 间超过临界值。经过阀控的多次故障判别,若 20 μ s 延时后故障信号不消失,则 SMC 向上层控制器上报 故障使保护系统动作。另外在控制周期结束时,对 子模块电容电压增量的计算值和实际值进行比较, 若 $\eta \neq 1$,也直接上报故障使保护系统动作。

保护系统立即将故障子模块旁路并对热备用冗余子模块施加触发信号,使其经历一个电容充电过程后进入正常工作。随后将一定数量的冷备用冗余子模块切换至热备用状态,保持热备用冗余子模块数量的稳定,该冗余保护方法框图如图7所示^[19-20]。



图 7 子模块冗余保护

所提的极端环境下子模块故障多级保护策略设 置多个阈值与延时判据协同工作,能够较好地提高 保护的可靠性与快速性,减少保护系统因数据采集 错误等因素造成的误动作,同时在子模块故障后电 压迅速上升的情况下能够使晶闸管击穿及时将故障 子模块旁路,实现极端环境下对故障子模块的高可 靠旁路。配置冗余供能电路并采用冷、热备用子模 块的保护方法,有效地保障系统在极端环境下子模 块发生故障后能继续稳定运行。

4 仿真验证

为验证所提极端环境下 MMC 子模块故障高可 靠旁路保护策略的可行性和有效性,在 PSCAD/ EMTDC 上搭建±800 kV 特高压柔性直流输电系统 模型,对 MMC 子模块发生故障后的旁路过程进行 仿真分析,仿真步长为 10⁻⁶ s。换流阀子模块快速 旁路开关额定电压为 3.6 kV,额定耐受冲击电压为 10 kV,额定电流为 1600 A,换流阀相关参数如表 1 所示,系统基本参数如表 2 所示。

表1 柔性直流换流站换流阀参数

参数名称	数值
子模块额定运行电压/V	2100
子模块电容/mF	18
单桥臂子模块数量(含冗余)/个	216
单桥臂全桥子模块数量(含冗余)/个	176
单桥臂半桥子模块数量(含冗余)/个	40
表 2 ±800 kV 特高压柔性直流输电系	统基本参数
	数值
交流系统额定电压/kV	525
交流系统额定频率/Hz	50
直流侧额定功率/MW	5000
直流侧额定电压/kV	±800
联接变压器容量/MVA	290
联接变压器变比	525/220
桥臂电抗器/mH	75

4.1 极端环境下 IGBT 发生开路故障

设置柔性直流换流站 A 相上桥臂一个半桥子 模块在1s时发生 VT₁开路故障,正常工况下子模块 上报故障至阀控系统,由阀控系统下发旁路开关合 闸命令。为体现加装晶闸管在极端环境下可靠旁路 保护的功能,事先向子模块旁路开关设置拒合命令。 故障发生后,子模块电容电压上升,2.9 ms 后达到所 提方法加装晶闸管的击穿电压,晶闸管被击穿,子模 块输出端口电压下降至0后被旁路。根据动态模拟 试验,加装晶闸管的合闸波形如图8所示,从合闸波 形可知,加装晶闸管合闸时间在3.0 ms以内,能够 及时旁路故障子模块,保证系统的稳定运行。

将子模块旁路开关拒合命令取消后,由于子模 块电容因旁路放电,其电压实际值 η_2 远小于计算值 η_1 ,故 $\eta = \infty$ 。在晶闸管合闸结束 1.5 ms 后诊断出 子模块故障,故障信号由 0 阶跃至 1,旁路开关闭合 后流过桥臂电流,同时故障子模块的触发脉冲被闭 锁,热备用冗余子模块被施加触发信号。系统有功 功率在故障发生后出现波动,但在晶闸管过电压击 穿旁路子模块后迅速恢复稳定。



图 9 为子模块被旁路后半桥子模块在初始电压 为 2200 V 的放电曲线图。根据仿真结果,直流电容 电压从额定电压降低到 1%所需的放电时间为 720 s。



4.2 晶闸管冷却设计

基于 Ansys Workbench 有限元仿真软件对晶闸 管击穿后流过桥臂电流进行热仿真如图 10 所示。 从图 10 可以看出,晶闸管在不加装散热器的情况 下,两个压接面的温度分别超过了 200 ℃和400 ℃, 超过 120 ℃的晶闸管被击穿后工作温度限制。所 以,加装晶闸管被击穿后,在子模块内必须通过散热 器进行强制冷却。

增加散热器条件下加装晶闸管短路失效后长期 通流热仿真结果如图 11 所示。

从图 11 可以看出,加装晶闸管被击穿后,在长 期通流情况下,晶闸管温度约 70 ℃左右,满足极端 环境下长期旁路通流要求。



图 10 无散热器条件下的晶闸管短路失效后通流热仿真



图 11 增加散热器条件下的晶闸管短路失效后通流热仿真

利用晶闸管过电压击穿作为子模块故障后备保 护地提高极端环境下保护系统的速动性和可靠性, 解决 IGBT 器件的功率模块不能长期故障失效的问题,有效防止极端环境下子模块故障对系统的不利 影响进一步恶化。

5 结 论

上面分析了极端环境下 MMC 子模块典型故障 特性,介绍了一种基于子模块电容电压比较的故障 诊断方法,可在控制周期结束时诊断子模块的运行 状态。并提出了一种极端环境下 MMC 高可靠旁路 保护策略,在常规的单/双晶闸管旁路方案的基础 上,利用晶闸管过电压击穿特性实现对 MMC 子模 块故障的可靠后备保护。硬、软件过电压保护需要 设置一定的时延避免保护误动作,而电容电压比较 故障诊断方法对 MMC 系统控制周期具有较大的依 赖性。利用晶闸管过电压击穿构成的后备被动保 护,能够在部分条件下有效提高子模块故障保护的 速动性和可靠性,保证系统的安全稳定运行。同时 一定程度上避免信号采集错误对保护动作的不利影 响,实现极端环境下对故障子模块的高可靠旁路。

通过搭建±800 kV 特高压柔性直流输电系统算

例进行仿真验证,所提出的极端环境下 MMC 子模 块高可靠旁路故障保护策略具有良好的可行性,尤 其是在极端环境子模块发生 IGBT 开路故障的情况 下,能够迅速可靠地旁路故障子模块,保证系统的安 全稳定运行。同时,为满足长期旁路通流要求,加装 晶闸管被击穿后,在子模块内必须通过散热器进行 强制冷却。

参考文献

- LESNICAR A, MARQUARDT R. An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range [C]//2003 IEEE Bologna Power Technology Conference, Bologna, Italy, IEEE: 2003.
- [2] 汪涛, 虞晓阳, 文继锋, 等. 模块化多电平柔性直流 输电换流器子模块过电压保护[J]. 电力系统自动化, 2020,44(21):107-115.
- [3] 管敏渊, 徐政. 模块化多电平换流器子模块故障特性和 冗余保护[J].电力系统自动化,2011,35(16):94-98.
- [4] LIU J P, ZHAO B, CHEN Y M, et al. A novel controlled punch-through IGCT for modular multilevel converter with overvoltage bypass function [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(7):8280-8290.
- [5] 邓佛良. MMC 子模块多目标冗余优化配置方法研究[D].吉林:东北电力大学,2020.
- [6] 萧展辉,蔡微,黄剑文,等. MMC 型多端柔性直流配 电系统协同控制与故障电流抑制策略[J].电力系统保 护与控制,2019,47(11):103-110.
- [7] 杜晓舟,梅军,田杰,等.模块化多电平子模块冗余与带 故障运行策略[J].电网技术,2016,40(1):19-25.
- [8] 李探,赵成勇,李路遥,等.MMC-HVDC 子模块故障诊 断与就地保护策略[J].中国电机工程学报,2014, 34(10):1641-1649.
- [9] 李鑫,刘大明,孙晓瑜,等.模块化多电平换流器功率 模块过压保护策略及优化[J].电测与仪表,2019, 56(9):43-48.
- [10] 罗程,赵成勇,张宝顺,等.MMC 控制系统时序逻辑与 子模块故障监测[J].电力自动化设备,2015,35(5): 83-88.
- [11] 敬华兵,年晓红,龚芬.MMC子模块元件短路故障机
 理及其新型保护策略[J].电工技术学报,2015, 30(3):21-27.
- [12] 岳珂,庞磊,陈炫宇,等.脉冲电压作用下晶闸管反向 恢复期损伤效应与机理分析[J].电网技术,2020, 44(7):2794-2800.

(下转第88页)

高比例新能源接入下送端电网直流闭锁 过电压分析与抑制策略

史华勃¹,丁理杰¹,焦浩然²,金 萧²,年 珩²

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610041;

2. 浙江大学电气工程学院,浙江杭州 310027)

摘 要:近年来,以风电和光伏为主的可再生能源发电技术发展迅速。考虑到可再生能源资源富集区域和重负荷区 域之间存在空间上的分布差异,高压直流输电被证明是一种能够有效将电力进行远距离传输以提升可再生能源消纳 的技术。高压直流输电系统的直流闭锁故障,特别是直流双极闭锁故障,会导致送受端交流电网中产生过电压浪涌, 进而可能导致发电机脱网运行。文中建立了直流闭锁故障下送端交流电网中过电压的数学模型,分析了可再生能源 发电设备的无功功率对直流闭锁下电网过电压的影响,进而以送端电网的无功功率裕度最大为目标提出了一种最优 有功出力分配策略。基于 Matlab/Simulink,设计了一个案例来验证所提出的最优有功出力分配策略减少直流闭锁下 电网过电压的有效性。

关键词:可再生能源发电;高压直流输电;最优出力分配;过电压抑制;直流闭锁 中图分类号:TM 712 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2023)02-0022-06 DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230204

Overvoltage Analysis and Suppression Strategy of Sending AC Grid with High Renewable Energy Penetration under DC Blocking

SHI Huabo¹, DING Lijie¹, JIAO Haoran², JIN Xiao², NIAN Heng²

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang, China)

Abstract:Renewable energy power generation technologies dominated by wind power and photovoltaics have grown rapidly in recent years. Considering the spatial distance between renewable energy-rich areas and heavy loaded areas, high voltage direct current (HVDC) transmission technology is a method that can efficiently transmit power to improve renewable energy consumption. Converter blocking of HVDC transmission system, especially DC bipolar blocking, can cause overvoltage surges in AC grid, which can force the renewable generators to be off-grid. The mathematical model of overvoltage of sending AC grid under DC blocking is established. The influence of reactive power of renewable energy generators on overvoltage in AC grid under DC blocking is analyzed. An optimal active power distribution strategy is proposed to increase the overall reactive power margin of sending AC grid to reduce overvoltage surges. A case is designed based on Matlab/Simulink to verify the proposed optimal active power distribution strategy.

Key words: renewable energy generation; high voltage direct current transmission; optimal output distribution; overvoltage suppression; DC blocking

0 引 言

根据国际可再生能源机构理事会发布的《2022

基金项目:国网四川省电力公司科技项目(52199722000H);四川省 科技计划项目(2021JDTD0016) 年可再生能源产能统计》,2021年中国光伏发电 机新装机容量为54.9 GW,风电机组新装机容量 为47.6 GW。中国的太阳能资源主要集中在西部、 北部地区,风能资源主要集中在"三北"地区,而用 电负荷主要集中在中东部地区^[1]。高压直流(high voltage direct current, HVDC)输电技术是将电能进行远距离传输以解决源荷逆向分布问题的有效手段,因此高压直流输电工程在全球范围内得到广泛应用^[2]。

工程中广泛应用的高压直流输电系统的换流站 采用晶闸管作为换流元件,整流桥和逆变桥在运行 过程中都需要吸收大量无功功率(约为传输有功功 率的 50%),因此必须在换流站中利用交流滤波器 来补偿三相半控桥吸收的无功功率^[3-4]。

HVDC 系统的换流器闭锁故障是常见的直流故 障之一,可分为单极闭锁故障和双极闭锁故障^[5]。 当 HVDC 系统发生直流闭锁故障时,直流的功率传 输通道被关闭,三相桥吸收的无功功率随着有功功 率的降低而迅速降低。换流站中交流滤波器的盈余 无功功率转移到交流电网,导致交流电网中产生过 电压浪涌。直流双极闭锁引起的过电压比直流单极 闭锁更严重^[6]。

现有的一些研究分析了直流闭锁下的过电压, 并提出了改进的控制策略。文献[7]分析了双馈风 力发电机组在直流闭锁过电压下的有功功率和无功 功率的约束条件,并提出了单机的功率指令改进策 略。文献[8]提出在风电场中安装超导故障电流限 制器(superconducting fault current limiter,SFCL)和 瞬态电压控制(transient voltage control,TVC),进而 可有效提高风电场的高压穿越能力。文献[9]提出 在整流站增加由金属氧化物压敏电阻组成的能量吸 收支路,来减少直流闭锁故障下传输到交流电网的 无功功率以减少过电压浪涌。文献[10]针对直流 闭锁故障提出了一种交流电网过电压的计算方法, 该方法计算准确但需要大量系统参数且过程复杂。

下面建立了一种用于快速估计直流单极闭锁以 及直流双极闭锁故障下交流电网过电压浪涌峰值的 数学模型,分析了可再生能源发电设备的无功功率 对直流闭锁下交流电网过电压的影响。基于数学模 型和影响分析,以提高交流电网的整体无功裕度为 目标提出了适用多个可再生能源电站的最优出力分 配策略,进而有效抑制直流闭锁下交流电网中的过 电压。

1 直流闭锁故障下交流电网过电压特性

直流闭锁故障下换流站中交流滤波器盈余无功

涌入交流电网的情况在送受端电网中是对称的,考 虑到大部分可再生能源发电设备往往安装在送端电 网上,对过电压分析均基于送端电网展开。

典型的 HVDC 输电系统的拓扑结构如图 1 所示。多个风电场和多个光伏电站接入到送端交流电网中,送端电网中的火电厂用同步电机的次暂态电势和内阻抗等效,其中的内阻抗包括线路阻抗和发电机的次暂态电抗。HVDC 输电系统的每极都由一个十二脉动变流器构成,采用十二脉动变流器可有效避免五、七次谐波的产生。交流滤波器安装在含十二脉动变流器的换流站中,在为变流器提供无功功率补偿的同时起到消除高频谐波的作用。





由图1可知,送电交流电网的交流母线电压直 接取决于火电厂的功率特性,送端电网的交流母线 电压可表示为

$$U_{\rm acs} = E_{\rm tp} - \frac{R_{\rm tp}}{E_{\rm tp}} P_{\rm tp} - \frac{X_{\rm tp}}{E_{\rm tp}} Q_{\rm tp}$$
(1)

式中: U_{acs} 为送端交流母线电压; E_{tp} 为火电厂等效内 电势; R_{tp} 为火电机组等效内电阻和火电厂到交流母 线的线路电阻之和; X_{tp} 为火电机组等效内感抗和火 电厂到交流母线的线路感抗之和; P_{tp} 、 Q_{tp} 分别为火 电厂输出到交流母线的有功功率和无功功率。

整流站中三相桥需要吸收的有功功率和无功功 率^[11]为

$$\begin{cases} P_{dc} = \frac{12\sqrt{2}}{\pi} u_{acs} K_e i_{dc} \cos \alpha \\ Q_{dc} = \frac{12\sqrt{2}}{\pi} u_{acs} K_e i_{dc} \sin \alpha = P_{dc} \tan \alpha \end{cases}$$
(2)

式中: i_{de} 为 HVDC 系统的直流电流; K_e 为交流母线 到全控桥上变压器的变比; α 为整流站的整流角; P_{de} 、 Q_{de} 分别为三相桥吸收的有功和无功功率。

忽略线路损耗和交流滤波器的有功功率,送端

交流电网的功率平衡方程可表示为

$$\begin{cases} P_{dc} = P_{tp} + \sum_{i=1}^{n} P_{PVi} + \sum_{j=1}^{m} P_{WFj} - P_{load} \\ Q_{dc} = Q_{tp} + \sum_{i=1}^{n} Q_{PVi} + \sum_{j=1}^{m} Q_{WFj} + Q_{SVC} - Q_{load} \end{cases}$$
(3)

式中: P_{PVi} 、 Q_{PVi} 为*i*光伏电站输出到交流母线的有 功功率、无功功率; P_{WFj} 、 Q_{WFj} 为*j*风电场输出到交流 母线的有功功率和无功功率; Q_{ACF} 为交流滤波器输 出的无功功率; P_{load} 、 Q_{load} 为负荷消耗的有功功率、无 功功率;*n*为光伏电站的数量;*m*为风电场的数量。

在短期的直流闭锁故障下不考虑交流滤波器的 投切,交流滤波器可视为线性元件,其无功功率为

$$Q_{\rm ACF} = \frac{U_{\rm acs}^2}{U_{\rm ac0}^2} Q_{\rm ACF0} \tag{4}$$

式中:U_{ac0}为故障前的交流母线电压;Q_{ACF0}为故障前 交流滤波器输出的无功功率。

考虑到故障前交流滤波器的补偿无功功率与 HVDC系统中三相桥吸收的无功功率相匹配,将 式(2)代入式(4)中可得

$$Q_{\rm ACF} = \frac{U_{\rm acs}^2}{U_{\rm ac0}^2} P_{\rm dc0} \tan \alpha_0$$
 (5)

式中: P_{de0} 为故障前 HVDC 系统传输的有功功率; α_0 为故障前的触发角。

风电场和光伏电站的功率特性与并网点(point of common coupling, PCC)电压之间的关系很复杂, 不能用单一函数表示。此外,一般而言,电网负荷与 交流母线电压之间的关系也是非线性的。采用机电 暂态仿真的思想,将送端电网上的所有发电机组和 负载都等效为一个具有阻抗的电压源。它的等效阻 抗根据瞬态扰动下的电压波动确定;等效内电势则 根据等效阻抗值和稳态的交流母线电压值计算确 定。那么将式(3)代入式(1)并改写可得

$$U_{\rm acs} = U_{\rm s} - \frac{R_{\rm s}}{U_{\rm s}} P_{\rm dc} - \frac{X_{\rm s}}{U_{\rm s}} (P_{\rm dc} \tan \alpha - Q_{\rm SVC}) \quad (6)$$

式中:R_s为等效电阻;X_s为等效感抗;U_s为等效内电势。

考虑到等效电阻通常远小于等效电抗,将 式(5)代入式(6),那么送端交流母线的电压可表示为

$$U_{\rm acs} = U_{\rm s} - \frac{R_{\rm s}}{U_{\rm s}} P_{\rm dc} - \frac{X_{\rm s}}{U_{\rm s}} (P_{\rm dc} \tan \alpha - \frac{U_{\rm acs}^2}{U_{\rm ac0}^2} P_{\rm dc0} \tan \alpha_0)$$

$$(7)$$

在直流闭锁故障下,HVDC系统输送的有功功

率迅速下降,三相桥吸收的功率随闭锁迅速降低 至 0。因此,直流闭锁下送端交流母线的过电压可 表示为

$$U_{\rm acs} = U_{\rm s} + \frac{X_{\rm s}}{U_{\rm s}} (\frac{U_{\rm acs}^2}{U_{\rm ac0}^2} - \frac{p}{2}) P_{\rm de0} \tan \alpha_0 \qquad (8)$$

式中,p为和直流闭锁相关的系数,单极闭锁下,p=1;双极闭锁下,p=0。

根据式(8)可知:直流双极闭锁故障下交流母 线的过电压比直流单极闭锁故障下的过电压更严 重。因此,对过电压的分析针对更严重的双极闭锁 故障开展。

交流母线在双极闭锁故障下的过电压最大值 U_{acmax}为

$$U_{\rm acmax} = \frac{U_{\rm ac0} - \sqrt{U_{\rm ac0}^2 - 4X_{\rm s}P_{\rm dc0}\tan\alpha_0}}{2X_{\rm s}P_{\rm dc0}\tan\alpha_0} U_{\rm s}U_{\rm ac0}$$
(9)

在 Matlab/Simulink 中搭建仿真模型对式(9)进 行验证。图 2 给出了不同传输功率和不同送端电网 网架双极闭锁下送端电网过电压峰值的数学模型和 仿真结果对比图。



根据图 2,双极闭锁下仿真结果与数学模型计 算结果的最大过电压峰值误差为 0.013 pu,说明 式(9)的数学模型能够准确快速计算直流闭锁故障 下的送端电网过电压峰值。

交流母线电压和 HVDC 系统输送的功率通常 是故障前的额定值,而故障前换流站的整流角是一 个无法直接调整的参数。根据式(9),直流闭锁下 的过电压取决于送端电网的等效内电抗和等效内电 势。考虑到送端电网的等效内电势是根据稳态功率 流和等效内电抗计算的,因此只需要降低送端电网 的等效内电抗即可有效抑制过电压。

- 提高无功裕度以抑制过电压的最优 出力分配策略
- 2.1 可再生能源发电设备无功功率对交流母线过 电压的影响

送端交流电网的等效内阻包括 4 个部分:1 个 火力场、n 个光伏电站、m 个风电场和 1 个非线性负 荷。考虑到火力发电厂的调节特性缓慢且负荷特性 不可随意调节,应当充分利用可再生能源发电设备 的快速调节能力抑制交流母线中的过电压。

直流闭锁下的过电压是由于交流滤波向交流母 线注入盈余的无功功率引起的,因此有必要让可再 生能源发电设备在交流母线过电压阶段吸收更多的 无功功率以抑制过电压。

根据式(1)和式(3),可再生能源发电设备的无 功功率对交流电网电压的影响可表示为

$$\Delta U_{\text{acs}} = -\frac{R_{\text{tp}}}{E_{\text{tp}}} (\Delta P_{\text{load}} - \sum_{i=1}^{n} \Delta P_{\text{PV}i} - \sum_{j=1}^{m} \Delta P_{\text{WF}j}) - \frac{X_{\text{tp}}}{E_{\text{tp}}} (\Delta Q_{\text{load}} - \sum_{i=1}^{n} \Delta Q_{\text{PV}i} - \sum_{j=1}^{m} \Delta Q_{\text{WF}j} - \Delta Q_{\text{SVC}})$$
(10)

式中, 4 代表变化量。

根据式(4),当交流母线电压变化不大时对交 流滤波器进行局部线性化,则交流滤波器的无功功 率变化可表示为

$$\Delta Q_{\rm ACF} = \frac{2P_{\rm dc0} \tan \alpha_0}{U_{\rm ac0}} \Delta U_{\rm acs}$$
(11)

考虑到发电机的内电阻远小于内电抗,线路电阻也远小于线路电抗,因此有 *R*_{up} ≪ *X*_{up}。对于交流母线而言,负载吸收的无功功率相对较小。

$$\Delta U_{\rm acs} = \frac{\sum_{i=1}^{n} \Delta Q_{\rm PVi} + \sum_{j=1}^{m} \Delta Q_{\rm WFj}}{\frac{E_{\rm tp}}{X_{\rm tp}} - \frac{2P_{\rm dc0} \tan \alpha_0}{U_{\rm ac0}}}$$
(12)

根据式(12)可知,增加光伏电站和风电场吸收 的无功功率可以有效降低交流母线的过电压。

2.2 最优出力分配策略

在低负荷或强光和强风期间,由于电网消纳能 力优先,可再生能源发电设备需要对有功功率输出 进行限制。此处所提的最优出力分配策略,是以抑 制直流闭锁下交流母线过电压为目标设计的可再生 能源电站的出力调配策略,属于事先分配策略。根 据第1章中的数学模型,当送端电网过电压峰值超 过1.3 pu时,认为系统在直流闭锁下存在脱网运行 的风险,启动所提的出力调配策略。

可再生能源发电设备通常通过网侧变换器 (grid-side converters,GSC)与交流电网相连。因此, 可再生能源发电设备吸收的无功功率受到GSC容量 的限制,可再生能源发电设备的功率限制可表示为

$$\begin{cases} P_{PVi}^2 + Q_{PVi}^2 \leq S_2 \text{ PV}i \\ P_{WFi}^2 + Q_{WFi}^2 \leq S_{WFi}^2 \end{cases}$$
(13)

式中:S_{PVi}为 *i* 光伏电站中 GSC 所能承受的最大容量;S_{WFi}为 *j* 风电场中 GSC 所能承受的最大容量。

根据第2.1节中的推导,以送端电网中总无功 裕量最大为优化目标时对送端电网过电压的抑制效 果最好,因此最优出力分配的目标函数 Q_{reall}为

$$Q_{\text{re_all}} = \sum_{i=1}^{n} \sqrt{S_{\text{PV}i}^2 - P_{\text{PV}i}^2} + \sum_{j=1}^{m} \sqrt{S_{\text{WF}j}^2 - P_{\text{WF}j}^2}$$
(14)

有功功率的边界条件可以表示为

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{n} P_{PVi} + \sum_{j=1}^{m} P_{WFj} = P_{load} + P_{dc} \\ P_{PVi}^{min} \leq P_{PVi} \leq P_{PVi}^{max}, i = 1, 2, \cdots, n \\ P_{WFj}^{min} \leq P_{WFj} \leq P_{WFj}^{max}, j = 1, 2, \cdots, m \end{cases}$$
(15)

式中: P_{PVi}^{max} 、 P_{PVi}^{min} 为*i*光伏电站的最大出力和最小出力; P_{WFi}^{max} 、 P_{WFi}^{min} 为*j*风电场的最大出力和最小出力。

式(15)中的边界条件相对简单,可用最优潮流的思路引入拉普拉斯算子,并计算出所有未知数的偏导数都为0的极值点。易知,当有功出力与GSC容量按等比例分配时,目标函数 Q_{re_all}可以取得最大值。最优出力分配策略的流程如图 3 所示。

第一步,计算负载和 HVDC 系统的功率。第二 步,获取当前每个可再生能源发电场站的有功出力 范围和 GSC 容量。第三步,按照 GSC 容量的比例分 配可再生能源发电场站的有功出力。第四步,判断 每个发电场站的出力是否都在允许出力范围内:若 都不超过出力范围,则将当前每个发电场站出力作 为最终的最优出力分配方案;若存在超出出力范围 的发电场站,则将小于最小出力的发电场站出力取 最小值,将大于最大出力的发电场站出力取最大值, 从总功率和需要分配出力的发电场站合集中剔除这 些已经确定出力的极限发电场站,然后返回第三步 重新计算。



图 3 最优出力分配策略的流程

3 仿真验证

下面设计了一个可再生能源发电机组有功盈余 工况下的出力分配案例,以验证了所提出的最优出 力分配策略的优越性。送端电网上的火电机组最小 运行功率为 600 MW,负荷功率为 500 MW,HVDC 系统的电压等级为±500 kV,其最大外送功率为 1500 MW。表1和表2分别给出了风电场和光伏电 站的当前出力范围以及 GSC 的容量。

	表1 风电场的出	力与容量限制	单位:MW
编号	GSC 最大容量 S _{WFj}	最大 P ^{max} WFj	最小出力 P _{WFj}
WF1	200	200	50
WF2	220	200	50
WF3	260	200	50
WF4	80	80	30
WF5	300	100	50
	表 2 光伏电站的出	出力与容量限制	单位:MW
编号	GSC 最大容量 S _{PVi}	最大出力 Pmax PVi	最小出力 P _{PVi}
PV1	220	220	110
PV2	180	180	90
PV3	120	120	60
PV4	280	280	140
PV5	320	300	150

根据表 1 和表 2,可再生能源发电场站的最大 输出功率为 1880 MW,超过送端电网的最大有功消 纳能力 480 MW,即需要弃风/弃光总计 480 MW。 优化前方案采用平均弃风/弃光策略,10 个场站每 个出力比最大出力降低 48 MW,优化后出力方案根 据图 3 的流程图计算得到。表 3 给出了不同场站在 不同出力分配策略下的有功出力。

表 3 可再生能源电站的有功出力 单位:MV					
编号	优化前出力	优化后出力	编号	优化前出力	优化后出力
WF1	152	138.3	PV1	172	152.1
WF2	152	152.1	PV2	132	124.5
WF3	152	179.8	PV3	72	83.0
WF4	32	55.3	PV4	232	193.6
WF5	52	100.0	PV5	252	221.3

根据式(14),优化前送端电网的总无功裕度为 1240 Mvar,采用最优出力分配策略后送端电网的无 功裕度为 1671 Mvar。所提最优出力分配策略将送 端电网的总无功裕度提升了 431 Mvar。

根据图 1 中的 HVDC 系统拓扑以及案例中的 负荷和系统外送功率情况,基于 Matlab/Simulink 建 立了电压等级为±500 kV 的 HVDC 系统仿真。图 4 给出了在采用所提出的最优出力分配策略前,即采用 平均弃风/弃光,直流双极闭锁故障下送端交流母线 的电压波形。其中,直流双极闭锁故障发生在 1.5 s。



图 4 采用平均弃风/弃光策略下送端交流母线电压

从图 4 中可知,采用平均弃风/弃光策略时,在 直流双极闭锁故障下,送端电网交流母线的最大过 电压为 1.35 pu。

图 5 给出了采用所提出的最优出力分配策略 时,直流双极闭锁故障下送端交流母线的电压波形。 从图 5 中可知,采用最优出力分配策略时,在直流双 极闭锁故障下,送端电网交流母线的最大过电压为 1.28 pu。



图 5 采用最优出力分配策略下送端交流母线电压

在本案例中,所提出的最优出力分配策略将送 端交流电网的总无功容量增加了 431 Mvar,相比于 原方案无功裕量提升了 25.8%。所提出的最优出力 分配策略可以将送端交流母线上的过电压峰值从 1.35 pu 抑制至 1.28 pu,过电压被抑制了 0.07 pu,占 原过电压的 20%。因此,所提最优出力分配策略可 有效降低可再生能源发电设备在直流闭锁故障下脱 网运行的风险。

4 结 论

直流闭锁故障会在交流电网中产生严重的过电 压,尤其是双极闭锁时过电压尤为严重。上面建立 了直流闭锁故障下 HVDC 系统的简化模型,给出了 直流闭锁下过电压峰值的快速计算方法;分析了可 再生能源发电设备对交流母线过电压的影响。基于 分析提出了一种以无功裕度最大为目标函数的最优 出力分配策略,通过仿真验证了所提的最优出力分 配策略对直流闭锁下过电压抑制的有效性。

参考文献

- [1] 陈国平,梁志峰,董昱.基于能源转型的中国特色电力 市场建设的分析与思考[J].中国电机工程学报,2020, 40(2):369-379.
- [2] 刘泽洪.±1100 kV 特高压直流输电工程创新实践[J].中国电机工程学报,2020,40(23):7782-7792.
- [3] 宋凯洋,姚骏,汪军.高压直流输电系统单极闭锁故障

下同步调相机与 STATCOM 的对比研究[J].电源学报,2021,19(6):154-163.

- [4] 年珩,金萧,李光辉.特高压直流换相失败对送端电网风机暂态无功特性的影响分析[J].中国电机工程学报,2020,40(13):4111-4122.
- [5] 陈汉雄.直流功率转移对川渝弱交流电网安全稳定影 响分析[J].电网技术,2018,42(12):4145-4152.
- [6] 邱威,贺静波,樊小伟,等.应对特高压直流大扰动的稳 定措施综述[J].电网技术,2022,46(8):3049-3067.
- [7] ZHOU Changping, WANG Zhen, JU Ping, et al. High-voltage ride through strategy for DFIG considering converter blocking of HVDC system[J].Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2020,8(3):491-498.
- [8] Ran O, Xiao X Y, Zou Z C, et al. Cooperative control of SFCL and reactive power for improving the transient voltage stability of grid-connected wind farm with DFIGs [J].
 IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(7):1-6.
- [9] FANG Xiongfeng, LI Gen, CHEN Canfeng, et al. An energy absorbing method for hybrid MMCs to avoid full-bridge submodule overvoltage during DC fault blocking [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(5):4947-4951.
- [10] 尹纯亚,李凤婷,周识远,等.基于无功功率短路比的 直流闭锁暂态过电压计算方法[J].电力系统自动化, 2019,43(10):150-154.
- [11] JIN Xiao, NIAN Heng. Overvoltage suppression strategy for sending AC grid with high penetration of wind power in the LCC-HVdc system under commutation failure[J].
 IEEE Transactions on Power Electronics, 2021,36(9): 10265-10277.

作者简介:

史华勃(1987),男,硕士,高级工程师,研究方向为抽水 蓄能技术和电力系统分析计算与稳定控制;

丁理杰(1981),男,博士,教授级高级工程师,研究方向 为电力系统稳定分析和控制;

焦浩然(1999),男,硕士研究生,研究方向为暂态谐波 扰动下双馈风电建模与控制技术;

金 萧(1995),男,博士研究生,研究方向为新能源并 网运行技术和特高压直流输电系统故障分析;

年 珩(1978),男,博士,教授,研究方向为风电并网及 控制技术。

(收稿日期:2022-10-27)

全功率变速抽水蓄能机组保护配置及整定方法

周文越,史华勃,陈 刚

(国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610041)

摘 要:正确的保护配置和整定方法是全功率变速抽水蓄能机组安全运行的关键。结合典型全功率变速抽水蓄能机 组接线方式,在分析机组运行特性的基础上,提出了适用于各种运行状态的保护配置方法;分析了变频器对机组短路 特性的影响;在此基础上,提出了将复压过流保护作为特殊区域的主保护,并给出了适用的保护整定计算方法。所提 出的保护配置和整定方法在春厂坝变速抽水蓄能示范电站得到了应用。

关键词:全功率变速抽水蓄能机组;继电保护;整定计算;发电机保护

中图分类号:TM 77 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2023)02-0028-04

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230205

Protection Configuration and Setting Method of Variable-speed Pumped Storage Unit with Full-size Converter

ZHOU Wenyue, SHI Huabo, CHEN Gang

(State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: Correct protection configuration and setting method is the key to safe operation of variable-speed pumped storage unit with full-size converter (FSC-VSPSU). Combined with the typical connection mode of FSC-VSPSU, and based on the analysis of unit operation characteristics, the protection configuration method suitable for various operating states is put forward. In view of the influence of frequency converter on short-circuit characteristics of unit, the overcurrent protection is proposed as the main protection of the special area. The applicable calculation method of protection setting is also given. The proposed protection configuration and setting method have been applied to FSC-VSPSU in Chunchang Dam Pumped Storage Power Station.

Key words: variable-speed pumped storage unit with full-size converter; relay protection; setting calculation; generator protection

0 引 言

随着新型电力系统的建设,风电、光伏等波动性 较大的新能源接入电网的比例越来越大,这些新能 源所带来的功率波动将影响电网的安全稳定运行。 变速抽水蓄能机组可实现快速的功率调节,能很好 地抑制电网功率波动。因此,变速抽水蓄能机组逐 渐成为这几年新能源发电的研究热点。

目前,双馈式变速抽水蓄能机组由于成本低的 优势,已得到了大规模的应用。但是,受制于机组的 结构,双馈式变速抽水蓄能机组能调节的功率范围 较小。相比之下,全功率变速抽水蓄能机组(variablespeed pumped storageunit with full-size converter, FSC-VSPSU)的发电机与电网完全解耦,可通过全 功率变频器实现大范围的转速变化和功率调 节^[1-3]。但是,受制于变频器的成本,FSC-VSPSU还 未得到广泛的研究和大规模的应用。

对于小型水电站,由于变频器的成本可控, FSC-VSPSU 凭借优异的功率调节性能,可用于调节 周边风电、光伏功率波动。因此,FSC-VSPSU 发电 系统在小型水力发电站的应用与升级改造具有可观 的前景及重要的意义^[4]。

继电保护是保证机组安全稳定运行的关键。目前,在变速抽水蓄能机组继电保护方面的研究,还仅 限于双馈式变速抽水蓄能机组^[5]。FSC-VSPSU 在

基金项目:国家重点研发计划项目"分布式光伏与梯级小水电互补联合发电技术研究及应用示范"(2018YFB0905200)

机组结构和特性上,与双馈式变速抽水蓄能机组存 在着较大区别,因此需对其保护配置和整定方法开 展专门的研究。为此,对 FSC-VSPSU 的运行特性进 行分析,并以此为基础开展保护配置和整定方法的 研究,构建了一套适用于 FSC-VSPSU 各种运行方式 和故障类型的保护配置;然后,以国家重点研发计划 "分布式光伏与梯级小水电互补联合发电技术研究 及应用示范"项目的春厂坝变速抽水蓄能示范电站 为例,研究了 FSC-VSPSU 保护及其配套设备保护的 整定方法。

1 FSC-VSPSU 运行特性

典型的 FSC-VSPSU 一次接线如图 1 所示。正 常运行状态下,变频器旁路断路器处于断开状态,机 端出口断路器(GCB)处于闭合状态;同步电机通过 变频器与电网相连;同步电机可处于发电和电动运 行状态,同步电机的转速不固定,根据功率调节需求 随时变化,因此,同步电机机端电压电流的频率也会 跟着随时变化;变频器通过交-直-交变换,将同步 电机机端的随频率变化的电压电流转换成与电网频 率一致的电压电流,从而实现变速发电或变速抽水 功能。变频器的容量与同步电机一致,因此 FSC-VSPSU 可实现在同步电机全功率和速度范围内的 快速转速调节。



图 1 典型 FSC-VSPSU 一次接线

特殊的结构使 FSC-VSPSU 的运行状态与常规 抽水蓄能机组有较大区别,主要运行状态如下:

1)当旁路断路器处于闭合状态时,变频器退出运行,同步电机直接与电网相连,FSC-VSPSU与常规恒速抽水蓄能机组运行特性一致,FSC-VSPSU处

于同步运行状态。

2) 当旁路断路器处于断开状态时,变频器处于运行状态,同步电机与电网非同步运行,其机端电压电流的频率随着转速变化,FSC-VSPSU处于变频运行状态。

3) FSC-VSPSU 带变频器启动时,同步电机机端 频率会由 0 逐渐升高到最低运行频率,FSC-VSPSU 处于变频启动状态。

4)FSC-VSPSU带变频器制动时,同步电机机端 频率会由运行频率逐渐降低到退出频率,FSC-VSPSU 处于变频制动状态。

另外,当变频器处于运行状态时,由于变频器的 运行特性,同步电机的机端相电压和电流存在大量 的谐波分量,其中以3次谐波及其倍数次谐波为主, 如图2所示。



图 2 变频器运行下同步电机机端电压

2 FSC-VSPSU 保护配置

FSC-VSPSU 继电保护装置需适应机组不同运 行状态,且在各种运行状态下均能正确识别故障。 因此,需针对性地对其保护配置进行研究。需要说 明的是,这里所述的 FSC-VSPSU 保护配置具体指的 是如图 1 所示的同步电机保护配置,而变频器保护 与控制集成在一起,升压变压器则按常规变压器配 置保护。

1)FSC-VSPSU 处于同步运行状态

此状态下,FSC-VSPSU 等同于常规小型恒速抽 水蓄能机组,其保护配置如表1所示^[6-7]。

2) FSC-VSPSU 处于变频运行状态

此状态下,同步电机与电网解耦。因此,需退出 通过测量系统侧等效阻抗的失磁阻抗。另外,变频 运行状态下机端的3次谐波分量可能导致定子接地 保护的3次谐波电压判据误动作,所以需退出此判据。保护配置如表2所示。

表 1	同步运行状态下保护配置
序号	保护配置
1	纵差保护
2	横差保护
3	复压过流保护
4	负序过负荷保护
5	过电压保护
6	低电压保护
7	频率保护
8	定子接地保护
9	转子接地保护
10	失磁保护
11	非电量保护
表 2	变频运行状态下保护配置

序号	保护配置
1	纵差保护
2	横差保护
3	复压过流保护
4	负序过负荷保护
5	过电压保护
6	低电压保护
7	频率保护
8	定子接地保护(无3次谐波电压判据)
9	转子接地保护
10	非电量保护

3) FSC-VSPSU 处于变频启动或制动状态

此状态下,同步电机机端电压电流的频率低于 正常运行频率,依赖于频率的保护算法仅能实现工 频周围小范围的频率变化跟踪。因此,在此状态下, 依赖于常规频率算法的保护原理将失效,此时仅能 利用适应于低频的保护算法,保护配置如表3所示。 其中,低频差动保护作为机组的主保护,频率保护和 低频过流保护作为后备保护。

表 3 变频启动或制动状态下保护配置

序号	保护配置
1	频率保护
2	低频差动保护
3	低频过流保护
4	转子接地保护
5	非电量保护

除上述的保护配置以外,对于差动保护而言,所

使用的差动电流需同步,因此:在变流器运行情况 下,即FSC-VSPSU处于变频运行状态、变频启动状 态、变频制动状态时,差动保护所用的电流应为CT2 和CT3输出的二次电流;在变流器退出运行情况 下,即FSC-VSPSU处于同步运行状态时,差动保护 所用的电流应为CT1和CT3输出的二次电流。

从上述的分析可以看出,在不同的运行状态下, FSC-VSPSU 的保护配置将有所不同。FSC-VSPSU 保护装置需具备运行状态识别和保护配置切换功 能,可利用同步电机机端电压电流和相应的断路器 位置实现运行状态识别,并根据运行状态自动切换 保护功能。具体识别方法不是所研究的重点,不再 赘述。

3 FSC-VSPSU 及其配套设备保护整定

FSC-VSPSU 及其配套设备保护整定涉及的保护 装置为如图 1 中的同步电机保护装置和升压变压器 保护装置。对于变流器而言,其保护集成在内部控制 逻辑中,定值根据变流器的特征内部固化,无需整定。

3.1 FSC-VSPSU 短路特性

短路特性直接决定保护整定原则,FSC-VSPSU 在同步运行状态下,短路特性与常规恒速抽水蓄能 机组一致。

在变频器运行情况下,变频器将同步电机与电 网解耦,FSC-VSPSU的短路特性受变频器影响。对 于变频器而言,变流器外部的故障,仅配置过压、过 流保护。当保护动作时,为保证变流器的安全,变流 器将闭锁所有电力电子元件,此时的变频器等同于 开路。变频器保护动作后,变频器两端电流的变化 情况如图3所示。从图中可看出,变频器保护动作 后,其两端的电流将迅速降为0,变频器不提供短路



图 3 变频器故障时的电流波形

3.2 升压变压器整定方法

升压变压器的保护按常规 35 kV 变压器保护配置,主要配置一套差动保护作为主保护,高压侧和低压侧各一套复压过流保护分别作为各侧的后备保护。

差动保护作为升压变压器的主保护,不受 FSC-VSPSU 短路特性的影响,差动保护按照常规变压器 整定原则整定。

高压侧复压过流保护作为升压变压器本体及其 低压侧出线的后备保护,其定值应按升压变压器低 压侧短路有灵敏度整定;为保证动作的选择性,动作 时限按与升压变压器低压侧后备保护配合整定。

低压侧复压过流保护作为升压变压器低压侧出 线的后备保护,在变频器退出运行的情况下,其保护 范围应为升压变压器低压侧至同步电机中性点出 口。在此情况下,其定值应按同步电机中性点出口 短路有灵敏度整定,动作时限按与同步电机后备保 护配合整定。

在变频器运行的情况下,同步电机与电网解耦。 在此情况下,低压侧复压过流的保护范围无法越过 变频器,其保护范围最多只能到变频器断路器与电 网侧接口处,因此其定值应按升压变压器低压侧短 路有灵敏度整定。另一方面,由于变频器不会给短 路电流提供通路,在变频器运行的情况下,变频器网 侧出口至升压变压器低压侧 CT1 这一段发生短路 时,没有主保护可动作。因此,需要将升压变压器低 压侧复压过流作为此段的主保护,此时的保护定值 应按升压变压器低压侧短路有灵敏度整定。

综上原因,升压变压器低压侧复压过流保护应 设置两段定值:1)I段定值应按升压变压器低压侧 短路有灵敏度整定。由于I段保护是作为变频器运 行的情况下,变频器网侧出口至升压变压器低压侧 CT1这一段的主保护,因此I段时限应尽可能小,可 按躲过励磁涌流整定。2)II段定值按同步电机中性 点出口短路有灵敏度整定,动作时限按与同步电机 后备保护配合整定。

除此之外,过负荷、非电量等升压变压器的其他 保护,按常规 35 kV 变压器保护整定原则整定即可。

3.3 同步机组整定方法

FSC-VSPSU处于同步运行状态时,运行特性与常规恒速抽水蓄能机组一致,因此整定方法也一致。具体整定方法参考 DL/T 2380—2021《抽水蓄能电站发电电动机变压器组继电保护整定计算技术规范》^[8]。

FSC-VSPSU 处于变频运行状态时,与常规恒速 抽水蓄能机组整定方法不一致的地方如下:

1)变频运行状态时,机端电压的3次谐波较大,需退出PT中线断线判别控制字。

2)由于变频器不会给短路电流提供通路,在变频器运行的情况下,变频器机侧出口至同步电机出口 CT2 这一段发生短路时,无主保护可动作。因此,需要将相间后备保护作为此段的主保护,此时的保护定值应按变频器机侧出口短路有灵敏度整定,动作时限按躲过短路暂态过程整定,尽量降低时限。另外相间后备保护还应作为同步电机短路的总后备,因此,相间后备保护应增加一段保护定值,按躲过同步电机最大运行电流整定,动作时限与上一级保护配合整定。

3)由于同步电机与电网不同步,频率保护定值 不应与电网频率保护配合。过频保护定值按与同步 电机机械过速保护配合整定,低频保护定值按躲过 最小抽水频率整定。

FSC-VSPSU 处于变频启动或制动状态时,低频 差动保护、低频过流保护作为此状态下的专用保护, 整定方法如下:

1)低频差动保护作为主保护,整定方法参考常 规差动保护,按躲过不平衡电流整定;

2)低频过流定值保护做低频运行下的总后备 保护,按躲过最大运行电流整定,动作时限按躲过短 路暂态过程整定。

4 保护配置及整定方法工程实践

所提出的 FSC-VSPSU 保护配置及整定方法在 春厂坝变速抽水蓄能示范电站得到了应用。该电站 依托国家重点研发计划项目"分布式光伏与梯级小 水电互补联合发电技术研究及应用示范"修建,在原 有电厂的2号主变压器 35 kV 中压侧新投 5 MW 全 功率变速抽水蓄能机组、升压变压器以及相关配套 设备,保护配置如表4所示。

35 kV 升压变压器配置 3 套保护装置,差动保 护装置、高压侧后备保护装置和低压侧后备保护装 置,相关保护定值按第 3.2 节提出的方法整定。

同步机组配置3套保护装置,FSC-VSPSU变频运行状态(包括变频启动和制动状态)下投入差动(下转第58页)

基于数字孪生的区域气象关联风电预测模型

代佳 π^1 ,向 月¹,刘俊 π^1 ,张 新²

(1.四川大学电气工程学院,四川 成都 610025;2.谢菲尔德大学自动控制与系统工程系, 英国 谢菲尔德 S10 2TN)

摘 要:新型电力系统建设下,风电清洁能源得到大力开发。由于风电的发电功率与风速、风向、气温等气象因素强关 联,具有波动性,且新建的风电场缺乏历史气象和发电数据,难以被精确预测。因此,文中提出了一种基于数字孪生的 区域气象关联风电预测方法。首先,将风电场系统物理实体与数据驱动模型相结合,实现了数据同步和实时更新;然 后,通过灰色关联分析方法筛选出对风电场发电功率影响作用较大的多元气象因素,使用 XGB 算法对优选后的气象 关联数据集进行训练,结合天气预报对风电场发电功率进行预测;最后,利用有历史数据风电场的训练模型对无历史 数据新建风电场进行预测。算例对四川某区域风电场数据进行了分析和预测,验证了所提方法的有效性与合理性, 能够获得比传统预测方法更准确的预测结果。

关键词:风电场;发电功率预测;数字孪生;气象因素;关联分析

中图分类号:TM 614 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2023)02-0032-07

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230206

Regional Meteorology Correlated Wind Power Prediction Based on Digital Twin

DAI Jiakun¹, XIANG Yue¹, LIU Junyong¹, ZHANG Xin²

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610025, Sichuan, China; 2. Department of Automatic Control and Systems Engineering, The University of Sheffield, Sheffield S10 2TN, England)

Abstract: With the construction of new power system, clean energy has a great development. Because the wind power has strong correlation with meteorological factors such as wind speed, wind direction and temperature, it has the strong volatility. And there lacks historical data of weather and power generation in the newly-built wind farms, so it is difficult to accurately predict the wind power. Therefore, a regional wind power prediction method correlated with meteorology based on digital twin is proposed. Firstly, the physical entity of wind farm system is combined with the data-driven model to realize data synchronization and real-time update. Then, the multivariate meteorological factors that have a great impact on generation power of wind farm are screened out by the gray correlation analysis method, and the optimized wind power meteorological data set is trained by extreme gradient boosting(XGB) algorithm and the future generation power of wind farm is predicted in combination with the weather forecast. Finally, the training model of wind farms with historical data is used to predict the newly-built wind farms without historical data. Cases are given to analyze and predict the wind farm data of a certain region in Sichuan province, which verifies the effectiveness and rationality of the proposed method and can obtain more accurate prediction results than the traditional prediction methods.

Key words: wind farm; generation power prediction; digital twin; meteorological factors; correlation analysis

0 引

言

随着清洁能源发电建设需求的不断增长,清洁 度和安

能源有望进入大规模发展的新阶段。如何对清洁能 源发电功率进行精确预测,是保证电力系统经济调 度和安全运行的重要基础。其中,如何建立一个更
高预测精度的模型,是亟待解决的问题。

精确的风电场发电功率预测是风电有效利用的 前提。短期风电功率预测高度依赖风速预测,风速 预测是导致预测误差的主要原因[1-2]。为了获得更 准确的短期风电功率预测结果,文献[3]提出了一 种风速校正方法,以改进基于天气因素和预报风电 功率预测模型获得的风速预测结果。然而,新建风 电场的历史风速数据可能不足以训练性能良好的预 测模型。文献[4]基于邻近风电场信息,利用卷积 神经网络算法进行了短期风速预测。在所提出的方 法中,卷积神经网络用于将风速变化的内在特征迁 移到新建的风电场。文献[5]提出了一种短期光伏 功率预测方法,应用了变分模态分解算法和双重注 意力机制长短期记忆人工神经网络,可以为功率预 测提供更高的准确性。文献[6]提出了一种基于多 源风速融合的短期风功率预测方法。文献[7]提出 了一种基于蒙特卡洛的风速校正方法,以减少因为 气象因素的误差而造成的预测精度下降。上述文献 基于风电场历史数据进行预测,但没有将出力预测 与气象因素关联分析相结合。由于缺乏新建风电场 历史数据,风电功率预测的精度仍不能令人满意。 为此,文献[8]提出了一种基于能源气象关联的风 电基地发展潜力评估方法。文献[9]提出了一种光 伏和风力发电的联合预测方法,对风能和光伏输出 功率之间的关系进行建模,可以在不同的天气条件 下都有良好的预测精度。文献[10-12]基于天气数 据对出力预测进行了分析,并分析了重要参数及其 与风电功率输出的关联。

上述方法基于风电-气象的历史数据集,考虑 了多种环境参数(风速、气压、温度和湿度)的影响, 但模型不能适应由于运行时间、运行环境变化的风 电场出力状态变化,缺少灵活性和实时性。因此,预 测模型需要与风电场的物理实体相结合,在精度变 低时,通过自主学习不断进行修正或进行故障识别, 从而实现与物理实体的同步。数字孪生技术近年来 在电力系统方面也有应用。文献[13]提出了一种 基于长短期记忆神经网络(long short-term memory, LSTM)的光伏发电功率预测方法,并利用迁移学习 建立了数字孪生模型,不仅可以得到精确的预测结 果,还节省了模型训练时间。文献[14]运用数字孪 生技术建立了虚拟空间对物理电网的映射和交互, 提出了基于数字孪生的配电网运行画像构建方法。 文献[15]基于数字孪生的概念、架构和特征,提出 了数字孪生虚拟电厂系统:通过引入数字孪生系统, 将风电场物理实体与数据驱动的预测模型结合,基 于历史数据和实时数据进行自主学习,能实现精确 的功率预测。

基于对上述文献的分析,下面提出一种基于数 字孪生的区域气象关联风电预测模型,并且通过气 象因素关联将此数字孪生模型应用到相似的新建风 电场。所提方法相较于其他预测方法有更高的预测 精度,节约了训练模型时间。

1 风电功率预测的数字孪生框架

数字孪生由现实物理空间、虚拟数字空间以及 两者间数据传输链构成^[16]。所提出的风电出力预 测数字孪生系统(wind farm digital twin,WF-DT)以 风电发电功率预测为研究对象,其框架如图1所示。 其中现实物理实体主要是风电场系统,包括风电场 气象传感器与风机等物理实体。虚拟数字空间主要 是由数据驱动的风电场发电功率预测模型。基于数 字孪生的风电发电功率预测方法主要包含以下 部分:

1)现实空间物理模型:主要包括风电场气象
 (风速、气温、气压、湿度等)与运行状态(发电功率
 等)感知。

2) 虚拟空间数字模型:基于历史数据形成风电-气象关联分析数据集,选取关联度高的几个气象 因素,利用极度梯度提升树(extreme gradient boosting, XGB)算法进行风电发电功率的实时预测。

3)数据传输链:包括数据存储、数据传输模块。

4)实时监测系统:包括误差检测及故障分析功 能。当平均误差偏高时,自动调整模型并进行故障 分析,得出偏差较大的数据项(如风速、湿度等),并 向现实物理空间进行反馈,使风电场系统进行调整。

基于数字孪生的区域气象关联风电预测系统工 作原理及能量信息流动示意如图 2 所示,其工作原 理如下:一方面,采用各种传感器对风电场所处环境 的多元气象数据进行采集,进行归一化处理后,作为 灰色关联分析、XGB 预测模型的输入量进行测试, 得到初步预测结果;另一方面,将采集到的实时气象 数据上传到数据储存库进行数据更新,并通过对比 分析,搜索最接近的气象数据,得到当时该气象条件

(1)



对应的风电场发电输出功率实际值和预测值,然后进行误差补偿得到最终的数字孪生体预测值。

图 2 预测系统工作原理及能量信息流动

2 风电-气象关联分析

气象因素对风电场发电功率的作用机理和影响 程度各不相同^[17],定量分析气象因素作用程度的大 小,进而准确识别、优化选取核心气象影响因素是选 取模型输入变量的基本前提。这里使用灰色关联分 析方法研究气象因素与风电场发电功率之间的关联 特征。其基本原理是对数据序列动态变化曲线进行 相似度的量化比较,进而分析各气象因素间关联程 度的强弱^[18]。从风电场系统的物理实体获得数据 后,数据驱动模块先采用灰色关联分析法对单个气 象因素进行分析,获取不同时期下各气象要素与风 电发电功率之间的关联度。

将风电场历史数据按照丰水期、枯水期和平水 期划分,把风电场发电功率与气象因素的序列看成 是一个灰色关联系统。分别计算多元气象因素与新 能源发电功率的灰色关联度,得出在不同时期气象 因素对新能源发电功率作用程度由强到弱的排序情 况,从而确定影响新能源发电功率的核心气象因素。 首先,定义风电场发电功率为参考序列、气象因素为 比较序列,量化两者之间的变化大小,如式(1)所示。

 $\Delta_{i}(k) = |x'_{1}(k) - x'_{i}(k)| (i = 1, \dots, m; k = 1, 2, \dots n)$

式中: $\Delta_i(k)$ 为差序列, $\Delta_i(k) = \{\Delta_i(1), \Delta_i(2), \dots, \Delta_i(k)\};$ *m* 和 *n* 分别为序列数量与序列长度; *x'_i(k)* 为第 *i* 个序列中第 *k* 个数据的值。

筛选每个差序列中的最小值 min_i min_k $\Delta_i(k)$ 及 最大值 max_i max_k $\Delta_i(k)$,定义两者之间的关联系数为 $\gamma_{oi}(k)$ ^[19]。

$$\gamma_{oi}(k) = \frac{\min_{i} \min_{k} \Delta_{i}(k) + \zeta \max_{i} \max_{k} \Delta_{i}(k)}{\Delta_{i}(k) + \xi \max \max_{k} \Delta_{i}(k)}$$
$$(i = 0, 1, \cdots, m; k = 1, 2, \cdots n)$$
(2)

式中, ξ为分辨系数, 取值范围为(0,1)。

灰色关联度 γ_{ol} 为

$$\gamma_{\rm ol} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^{n} \gamma_{\rm oi}(k) \tag{3}$$

式中,n为序列的长度。

γ_{al} 受风电场发电功率、气象因素、序列长度和 分辨系数的影响,取值范围为(0,1)。γ_{al} 表示各气 象因素与风电场发电功率的关联程度,其值越大,发 电功率与气象因素的变化趋势越相似,即气象因素 对风电场发电功率的影响作用更大。

归一化灰色关联度,如式(4)所示。

$$\gamma_i = \gamma_{\rm ol} / \sum_{i=1}^m \gamma_{\rm ol} \tag{4}$$

式中, γ_i 为第 i 个比较序列的因子权重系数,表示各 个气象因素对风电场发电功率变化的作用大小。以 γ_i 的大小排序,筛选出影响作用大的气象因素,即核 心气象因素。

3 数据驱动的风电场发电功率预测

风电场发电功率精确预测是应对风电出力随机 性、波动性与间歇性的重要手段。但其中日前预测 对历史数据的连续性和完整度要求较高,且预测的 输入变量维度较高,这会使模型结构趋于复杂,也使 基于多变天气条件的预测精度不高。同时,部分风 电场也缺乏历史数据。为此,采用数字孪生系统更进一步地将风电场物理实体特点与预测的数字模型结合,将上述关联规则作为输入变量识别优化的依据,提取出关键气象因素,并基于此构建风电出力预测模型的输入集。考虑到数据样本量不足,选用 XGB 算法对新能源出力进行 24 h 的日前预测,并与 多种算法的预测结果进行对比,验证根据关联分析 结果筛选输入变量的有效性。此外,通过构建无历 史出力数据情况下的拟合模型以确定新建电站的出 力状况,实现无历史出力数据的新建风电厂发电功 率预测。

由于实际中历史数据较为混乱且数量少,采用 XGB 算法能够在数据量较少的情况下进行较好的 拟合,取得较高的预测精度^[20]。基于数字孪生的风 电场发电功率预测 XGB 算法的模型^[21]为

$$\hat{y} = \sum f_p(x_k) , \quad f_p^R \in F$$
(5)

式中: \hat{y} 为风电场发电功率预测值;F为 XGB 算法的 回归树模型集合; f_p ()为函数空间 F中的第p个函数; x_k 为k个输入数据,即优选关联度较高的气象 因素的值。

每一次迭代不影响模型,即原来的模型保持不变,将一个新函数 **Q**()添加到模型里。一个函数对应一棵树,新生成的树拟合上次预测的残差、目标函数及迭代过程如式(5)—式(8)所示。

$$X_{\rm obj} = \sum_{k=1}^{n} l(x_k, \hat{y}) + \sum_{p} \Omega(f_p)$$
 (6)

$$\Omega(f_p) = \gamma T + \lambda \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{r} \omega_j^2$$
(7)

$$\begin{cases} y = -0 \\ \hat{y}^{(1)} = f_1(x_k) = \hat{y}^{(0)} + f_1(x_k) \\ \hat{y}^{(s)} = \hat{y}^{(s-1)} + f_p(x_k) \end{cases}$$
(8)

式中: $\sum_{k=1}^{n} l(x_k, \hat{y})$ 为预测与真实数据累计误差, l()为误差计算函数; $\hat{y}^{(s)}$ 为预测值的 s 次迭代值; $\sum_{p} \Omega(f_p)$ 为正则化项; T 为叶子结点的总数; ω_j 为 第j 个叶子节点的分数; γ 为系数, 作用是控制叶子 结点数量; λ 为系数, 作用是将叶子节点的分数控 制在合理范围。XGB 中正则化方程将根据误差变 化调整预测函数,降低阶数, 防止预测的过拟合。模 型通过不断迭代进一步缩小目标函数。每次迭代对 目标函数的影响如式(9) 所示^[22]。

$$\tau^{(s)} = \sum_{i=1}^{n} l(y_i, \hat{y}_i^{(s-1)} + f_s(X_i)) + \Omega(f_s) \quad (9)$$

最后,选取平均绝对百分比误差作为模型预测 性能的主要评价指标。

$$\Delta y_{t} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^{n} \frac{|y_{t} - \hat{y}_{t}|}{y_{t}} \times 100\%$$
(10)

式中, Δy_t 为风电场系统 t 时刻实际发电功率 y_t 和 模型产生的发电功率预测值 \hat{y}_t 之间的误差。若 Δy_t 超过设置的阈值 ω ,说明误差较大,此时系统自动分 析引起误差的原因。原因有两种:1)由风电场系统 物理空间中的传感器故障产生的,数字系统通过排 除法找到导致误差的传感器数据类型;2) WF-DT 系 统中的预测模型已不再能反映当前物理实体的真实 特性,就需要对预测模型的结构或参数进行更新。

4 算 例

针对四川某区域风电场进行能源出力与气象因素的关联分析,并基于此进行出力预测;最后,对区域内站点进行预测并验证所提出的数字孪生系统的有效性。其中风电场 2019 年和 2020 年的出力特性如图 3 所示。



4.1 风电场发电功率预测

系统在所存储的历史数据的基础上,首先对风 电场进行发电功率与气象因素的关联分析。这里选 取相关气象因素风速、风向、气温、湿度和气压,分别 对丰水期、枯水期和平水期的关联度进行了分析,其 结果如表1所示。

此风电场地处山谷,其海拔高度适中。风电场 出力的核心影响因素为风速,次要关联影响因素为 风向或气温,且影响因素具备一定的季节性。在丰 水期,风电场风向关联度远大于气温关联度。而在 枯水期及平水期,风向与气温关联度相差不大。值 得注意的是,在枯水期,湿度也对风功率有明显影 响。相较而言,无论是丰水期、枯水期还是平水期, 压强对风功率的影响都是最小的。

丰水期		枯	水期	平水期				
速	0.827	风速	0.669	风速	0.			

风电站核心气象要素关联度分析 耒 1

半7	K期	栢水期		半7	水期	
风速	0.827	风速	0.669	风速	0.783	
风向	0.633	气温	0.661	风向	0.688	
气温	0.517	风向	0.644	气温	0.644	
湿度	0.458	湿度	0.627	湿度	0.616	
气压	0.393	气压	0.600	压强	0.524	

所举算例的数字孪生过程在于气象因素实时关 联优选和 XGB 算法。为对比基于数字孪生系统中 关联规则优化对预测性能的影响及 XGB 算法对其 出力预测的有效性,分别构建传统的基于历史数据 优选关联的 XGB 以及 LSTM、深度信念网络(deep belief network, DBN) 等 3 种预测模型, 进行 24 h 的 风功率短期预测,结果如图4所示。



不同算法出力预测结果对比 图 4

由图4可知:在输出风功率较小、风功率变化较 为平缓的情况下,有实时气象优选孪生过程的 XGB 预测模型精度高于传统的基于历史数据优选关联的 XGB 预测模型,并且均略高于 LSTM 和 DBN 预测模 型:而在风电场发电功率陡增或陡降的极端风电出 力情况下,如图4(a)中时刻70~71和96~97内,所 提出的数字孪生系统的拟合风功率大幅度波动的能 力明显高于其他模型,原因就在于此孪生过程的实 时性,能够实时优选高关联的气象因素,并且对预测 过程进行校正。传统方法基于已有历史数据库,没 有与实际风电场物理实体相结合,缺乏灵活性,遇极

端风电出力情况时预测效果不佳。

计算有无数字孪生系统的 XGB 模型以及优化 选取输入变量后的 LSTM 和 DBN 在测试集上的风 功率归一化平均绝对误差(mean absolute error, MAE) 与预测精度(基于均方根误差), 如表2 与表3 所示。

表 2 风电预测误差

n-1-#0		MAE 预测误差						
	的刑	XGB(数字孪生)	XGB	LSTM	DBN			
	丰水期	0.058 2	0.063 6	0.132 3	0.115 1			
	枯水期	0.082 1	0.120 5	0.133 0	0.125 8			
		表 3 风电预测精度						
n-4-#0			预测精度	/%				
	的劝	XGB(数字孪生)	XGB	LSTM	DBN			
	丰水期	91.86	91.24	84.47	85.46			
	枯水期	85.66	87.49	87.22	87.01			

结合对图 4 的分析结果,可以看出:基于数字孪 生的统筹方法能够有效改善 XGB 的预测效果:实时 气象关联优选后的气象因素筛选降低了风功率随机 性和间歇性对预测模型最终结果的影响,对解决风 功率快速、大幅度波动情况下预测模型精度不稳定 的问题具有一定的适用性。

无历史数据相似电站预测 4.2

基于数字孪生构建无历史数据相似风电场发电 功率拟合模型,通过与有历史数据的风电场数据进 行对比以验证拟合模型的有效性。实际风功率与拟 合结果的对比如图 5 所示。



风电场发电功率拟合结果对比 图 5

由图 5 可知,在风功率较小且变化平稳的情况

下,无历史数据风电场拟合预测的整体精度较高,如 图 5(a)中时刻 1~100 h内,拟合结果与实际数据基 本完全重合,可以很好地反映风电出力状况。当气 象因素随天气条件变化较剧烈,风功率的起伏波动 大、频率高时,拟合结果与实际数据的偏差较常规天 气时有一定的增加,但依然能较好地跟随风功率的 变化。如图 5(b)中时刻 155~162 h内,拟合结果准 确反映出实际风功率的陡降和陡增,且两者的极大 值点和极小值点基本一致。

风电预测拟合的精度如表 4 所示,无历史数据 但有气象数据预测误差值保持在较好的范围内。

u-+ #¤	预测精	青度/%
时为	有历史数据无气象数据	无历史数据有气象数据
丰水期	91.52	95.41
枯水期	91.47	92.41

≠ ₄	女/工匠市新捉风市招薪测州人牲庄?	+ 1.6
衣 4	17/11/11/21/21/21/21/21/21/21/21/21/21/21/	J 1 L

5 结 论

上面提出了一个基于数字孪生的区域气象关联 风电预测模型。通过灰色关联分析方法筛选出对风 电场发电功率影响作用较大的多元气象因素:使用 XGB 算法对优选后的风电-气象数据集进行训练, 对风电场发电功率进行预测:关联预测模型与风电 场系统物理实体相结合,实现了数据同步和实时更 新。此基于数字孪生的发电功率预测模型能够利用 有历史数据风电场的训练模型对无历史数据的新建 风电场进行预测。利用所提方法对四川某区域风电 场数据进行了分析和发电功率预测,深度挖掘了区 域风电场的风电-气象关联特征,为后续预测该风 电场的发电功率和相似风电场发电功率提供了数 据。基于实时关联优选后的 XGB 算法相较于其他 算法具有更高的精度。而无历史出力数据情况下的 拟合模型所得结果在大部分时间段内与实际数据保 持一致,预测误差值保持在较好的范围内。

参考文献

- GHADIMI Noradin, AKBARIMAJD Adel, SHAYEGHI Hossein, et al. Two stage forecast engine with feature selection technique and improved meta-heuristic algorithm for electricity load forecasting [J]. Energy, 2018, 161: 130-142.
- [2] RODRIGUEZAB Fermin, FLEETWOODAB Alice, AINHOA

Galarza, et al. Predicting solar energy generation through artificial neural networks using weather forecasts for microgrid control [J]. Renewable Energy, 2018, 126: 855-864.

- [3] LI M L, YANG M, YU Y X, et al. A wind speed correction method based on modified hidden Markov model for enhancing wind power forecast [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(1):656-666.
- [4] WANG Z J,ZHANG J,ZHANG Y, et al.Short-term wind speed forecasting based on information of neighboring wind farms[J]. IEEE Access, 2020, 8:16760-16770.
- [5] 杨晶显,张帅,刘继春,等.基于 VMD 和双重注意力机制
 LSTM 的短期光伏功率预测[J].电力系统自动化,2021, 45(3):174-182.
- [6] AN J Q, YIN F, WU M, et al. Multisource wind speed fusion method for short-term wind power prediction [J].
 IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(9): 5927-5937.
- [7] XIE Z Q, JI T Y, LI M S, et al. Quasi-Monte Carlo based probabilistic optimal power flow considering the correlation of wind speeds using copula function [J].IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2):2239-2247.
- [8] CHAO Huawei, WU Gang, LI Ting, et al. A development potential assessment method for clean energy stations [J].
 Frontiers in Energy Research, 2022, 10:1–14.
- [9] SANJARI M J, GOOIL H B, NAIR N C, et al. Power generation forecast of hybrid PV-wind system [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(2):703-712.
- [10] 杨光. 光伏发电功率与气象影响因子关联关系的分析研究[D]. 保定:华北电力大学,2014.
- [11] WU Y K, WU Y C, HONG J S, et al. Probabilistic forecast of wind power generation with data processing and numerical weather predictions[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021,57(1):36-45.
- [12] 刘宇凝,王迎丽,徐明文,等.基于数字孪生混合储
 能的风电功率波动平抑策略[J].电网技术,2021,
 45(7):2503-2514.
- [13] 史凯钰,张东霞,韩肖清,等.基于 LSTM 与迁移学习的光伏发电功率预测数字孪生模型[J].电网技术, 2022,46(4):1363-1372.
- [14] 杜晓东,曾四鸣,刘科研,等.基于云模型的配电网运 行画像数字孪生构建方法[J].电力系统保护与控制, 2022,50(10):104-113.
- [15] 严兴煜,高赐威,陈涛,等.数字孪生虚拟电厂系统框架设计及其实践展望[J].中国电机工程学报,2023,43(2):604-619.

- [16] 王成山,董博,于浩,等.智慧城市综合能源系统数
 字孪生技术及应用[J].中国电机工程学报,2021,
 41(5):1597-1608.
- [17] SHI J, DING Z H, LEE W J, et al. Hybrid forecasting model for very-short term wind power forecasting based on grey relational analysis and wind speed distribution features [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(1):521-526.
- [18] WANG Yanliang, XIANG Yue. Photovoltaic-storage energy system management considering wireless data communication [J].Energy Reports, 2022,8:267-273.
- [19] WEI Xiangyu, XIANG Yue, LI Junlong. Wind power bidding coordinated with energy storage system operation in real-time electricity market: A maximum entropy deep reinforcement learning approach [J]. Energy Reports, 2022,8:770-775.
- [20] 陈振宇,刘金波,李晨,等.基于 LSTM 与 XGBoost 组 合模型的超短期电力负荷预测[J].电网技术,2020,
- (上接第14页)
- [26] 吴天宝,马小敏,唐军,等.基于时间序列迭代的输电 线路覆冰厚度估计方法[J].四川电力技术,2022, 45(5):20-25.
- [27] 熊昌全,何泽其,张宇宁,等.基于 Bi-LSTM 和支持向 量机的风机叶片短期覆冰状态预测模型[J].四川电 力技术,2021,44(3):88-94.
- [28] 周恩泽,胡思雨,张录军,等.电网山火灾害特征及风 险预警技术[J].电力工程技术, 2020,39(3):58-64.
- [29] 陈莹, 王松岩, 陈彬, 等. 台风环境下考虑地理高程信息的输电通道结构失效故障概率评估方法[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2295-2302.
- [30] 刘天浩,朱元振,孙润稼,等.极端自然灾害下电力信息物理系统韧性增强策略[J].电力系统自动化, 2021,45(3):40-48.
- [31] 马丽叶,王海锋,卢志刚,等.计及相关性影响的台风 灾害下灵活性资源韧性规划[J].电力系统自动化, 2022,46(7):60-68.
- [32] 薛禹胜.两网融合支撑下的停电防御框架(电力系统自动化公众号)[EB/OL].(2019-07-21)[2022-08-28]. https://mp.weixin.qq.com/s/LWbyLwlWs1ltyXxGXIpFcQ.
- [33] 陈彬,倪明,周霞,等.极端灾害下基于时空网格的配 电网多源数据融合方法[J].中国电力,2019,52(11): 77-84.
- [34] 张瑞曦,徐青山,程煜,等.极端灾害下考虑动态重构的 微网形成策略[J].电力工程技术,2022,41(1):56-63.
- [35] 郁琛,李尚轩,谢云云,等.考虑交通网与配电网信息

44(2):614-620.

- [21] YAO Xiaotong, FU Xiaoli, ZONG Chaofei. Short-term load forecasting method based on feature preference strategy and light GBM-XGboost [J]. IEEE Access, 2022, 10:75257-75268.
- [22] 吴春华,董阿龙,李智华,等.基于图相似日和 PSO-XGBoost 的光伏功率预测[J].高电压技术,2022, 48(8):3250-3259.

作者简介:

代佳琨(1999),男,硕士研究生,研究方向为新能源出 力预测;

向 月(1987),男,博士,副教授,研究方向为新型电力 系统规划与运行;

刘俊勇(1962),男,博士,教授,研究方向为电力系统分析、调度与市场等;

张 新(1983),男,博士,教授,研究方向为新能源电力 系统规划与运行。

(收稿日期:2022-08-26)

融合的台风后配电网抢修策略优化[J].电力系统自动化,2022,46(4):15-24.

- [36] 张璐,黄睿,王照琪,等.考虑恢复力与经济性均衡的 配电网移动储能优化配置策略[J].电力系统自动化, 2020,44(21):23-31.
- [37] 杨祺铭,李更丰,别朝红,等.台风灾害下基于 V2G 的 城市配电网弹性提升策略[J].电力系统自动化, 2022,46(12):130-139.
- [38] 姚卓磊,黄文焘,余墨多,等.智能配电网电力-通信灾 害故障动态协调恢复方法[J].电力系统自动化, 2022,46(19):87-94.
- [39] 薛禹胜,吴勇军,谢云云,等.复合自然灾害下的电力 系统稳定性分析[J].电力系统自动化,2016,40(4): 10-18.
- [40] LI Z, XUE Y, WANG H, et al. Decision support system for adaptive restoration control of transmission system [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021,9(4):870-885.

作者简介:

郁 琛(1985),男,博士,高级工程师,研究方向为电力 系统外部灾害防御;

常 康(1983),男,博士研究生,高级工程师,研究方向 为电力系统外部灾害防御;

刘韶峰(1977),男,硕士,高级工程师,研究方向为新能 源并网控制及电力系统安全稳定控制。

(收稿日期:2022-08-30)

基于改进樽海鞘群算法的区域 综合能源系统优化调度

万 锴¹,刘 闯²,陈 磊²

(1.国网湖北超高压公司,湖北 武汉 430000;2.国网湖北省电力有限公司荆门供电公司,

湖北 荆门 448000)

摘 要:为降低区域综合能源的碳排放量,提高其经济性,文中建立了以运行成本和环境成本最小为目标函数的区域 综合能源系统优化调度模型。利用莱维飞行和非线性收敛因子策略对樽海鞘群算法进行改进,得到改进樽海鞘群算 法,提升了算法的全局搜索性能和收敛能力。采用改进樽海鞘群算法对区域综合能源系统优化调度模型进行求解, 结果表明,改进樽海鞘群算法在经过47次选代后就找到了最优解为2536.24元,相比其他算法,迭代次数和收敛时间 更少,求解精度更高。根据改进樽海鞘群算法的调度方案,各设备出力合理,系统运行的经济性和环保性较好,验证了 所提区域综合能源系统优化调度模型和求解方法的实用性。

关键词:区域综合能源系统;优化调度;改进樽海鞘群算法;莱维飞行;收敛因子 中图分类号:TM 721 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2023)02-0039-06 DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230207

Optimal Dispatching of Regional Integrated Energy System Based on Improved Salp Swarm Algorithm

WAN Kai¹, LIU Chuang², CHEN Lei²

(1. State Grid Hubei Extra High Voltage Company, Wuhan 430000, Hubei, China; 2. State Grid Jingmen Electric Power Supply Company, Jingmen 448000, Hubei, China)

Abstract: In order to reduce the carbon emissions of regional integrated energy and improve its economy, an optimal dispatching model of regional integrated energy system is established with the objective function of minimizing the operating cost and environmental cost. Levy flight and nonlinear convergence factor strategy are used to improve salp swarm algorithm, and an improved salp swarm algorithm is obtained, which improves the global search performance and convergence ability of the algorithm. Then, the improved salp swarm algorithm is used to solve the optimal dispatching model of regional integrated energy system. The results show that the improved salp swarm algorithm finds the optimal solution of 2536.24 yuan after 47 iterations. Compared with other algorithms, the number of iterations and the convergence time are less, and the solution accuracy is higher. According to the dispatching scheme based on the improved salp swarm algorithm, the output of each equipment is reasonable, and the economy and environmental protection of system operation are good, which verifies the practicability of the proposed optimal dispatching model and solution method of regional integrated energy system.

Key words: regional integrated energy system; optimal dispatching; improved salp swarm algorithm; Levy flight; convergence factor

0 引 言

随着经济的发展和人们环保意识的提高,化石 能源过量消耗带来的环境问题已不容忽视。世界各 国专家学者就如何提高不同能源的互补性和可再生 能源的利用率进行了大量研究^[1-2]。区域综合能源 系统(regional integrated energy system, RIES)由电、 热、气等多种能源构成,该系统不仅能够满足负荷需 求,还具有较好的经济性和灵活性,有利于提升清洁 能源的消纳能力^[3-5]。但 RIES 内部能源种类众多, 各能源出力特点各不相同,为了提升 RIES 经济性 和稳定性,需要对其进行优化调度。

区域综合能源系统优化调度是一个非线性优化 问题,常用的方法有启发式算法、非线性规划法和人 工智能法^[6-7]。相比其他算法,人工智能法效率更 高,计算结果更准确,目前得到了广泛应用。文献[8] 以 RIES 运行成本最小为目标函数,综合考虑各类 约束条件,建立了基于粒子群算法的 RIES 优化调 度模型,并采用实际算例验证了模型的正确性和粒 子群算法的有效性。文献[9]对含有燃气轮机、光 伏、电锅炉、电制冷剂和溴化锂制冷机的综合能源系 统优化调度进行了研究,建立了以系统总运行成本 和二氧化碳惩罚成本最小的 RIES 优化调度模型, 采用模拟退火粒子群算法对模型进行了求解,获得 了最优调度方案。文献[10]根据综合能源系统内 部各设备的运行特点分别建立出力模型,以园区综 合能源系统运行成本最小为目标函数,并考虑各类 运行约束,建立了基于运行成本的综合能源系统优 化调度模型,并采用改进蚱蜢算法对模型进行了求 解,结果表明该调度模型能够降低运行成本,提高风 光消纳能力,提升经济效益和环保效益。现有研究 对冷热电联供的综合能源系统研究较少,考虑冷热 电联供的 RIES 优化调度有待进一步研究。

下面以区域综合能源系统运行成本和环境成本 最小为目标函数,综合考虑各类运行约束,建立基于 改进樽海鞘群算法(improved salp swarm algorithm, ISSA)的 RIES 优化调度模型,运用实际算例验证模 型的正确性和实用性。

1 RIES 优化调度模型

所建 RIES 的负荷有电、热、冷 3 种,具体如图 1

所示。其中,供给电负荷的设备有风电、光伏、大电 网、微型燃气轮机和蓄电池;供给热负荷的设备有电 锅炉、储热装置和热回收装置;供给冷负荷的设备有 电制冷机、储冷装置、吸收式制冷机。



1.1 目标函数

RIES 在运行过程中的成本主要包括两部分:一部分是系统内各设备正常运行产生的运行维护成本;另一部分是消耗化石能源产生二氧化碳带来的环境惩罚成本^[11]。

运行维护成本的表达式为

$$C_{\rm F} = \sum_{t=1}^{T} C_{\rm p}(t) P_{\rm grid}(t) + \sum_{t=1}^{T} C_{\rm g}(t) P_{\rm gas}(t) + \sum_{i=1}^{8} C_{i} P_{i}$$
(1)

式中: $C_{\rm F}$ 为系统总运行维护成本; T 为调度周期; $C_{\rm p}(t)$ 为t 时刻的电价; $P_{\rm grid}(t)$ 为t 时刻 RIES 向大 电网的购电功率; $C_{\rm g}(t)$ 为t 时刻天然气的单价; $P_{\rm gas}(t)$ 为t 时刻的购气量; C_i 为调度周期内第i 台 设备单位功率的维护成本; P_i 为调度周期内第i 台 设备的总输出功率。

环境惩罚成本的表达式为

$$C_{\rm E} = W \cdot \sum_{t=1}^{T} \left[\delta \cdot P_{\rm grid}(t) + \varepsilon \cdot P_{\rm gas}(t) \right] \quad (2)$$

式中: *C*_E 为系统环境惩罚成本; W 为二氧化碳惩罚 系数; δ 为向大电网购电产生二氧化碳的排放因子; *ε* 为使用天然气产生二氧化碳的排放因子。

综上所述,RIES 优化调度的总成本目标为

 $\min C = \min(C_{\rm F} + C_{\rm E}) \tag{3}$

式中,C为综合能源系统优化调度的总成本。

1.2 约束条件

1) 功率平衡约束

功率平衡约束 RIES 的电、热、冷设备功率之间 的平衡,电功率平衡的表达式为

$$P_{\text{grid}} + P_{\text{MT}} + P_{\text{BAT}} + P_{\text{PV}} + P_{\text{WT}} - P_{\text{boi}} - P_{\text{EC}} - P_{\text{load}} = 0$$
(4)

式中: P_{MT} 为燃气轮机输出功率; P_{BAT} 为蓄电池充放

电功率,充电为正,放电为负; P_{PV} 为光伏输出功率; P_{WT} 为风电输出功率; P_{boi} 为电锅炉的耗电功率; P_{EC} 为电制冷机的耗电功率; P_{load} 为系统用电负荷。

热功率平衡约束的表达式为

$$Q_{\rm boi} + Q_{\rm WH} + Q_{\rm HOT} - Q_{\rm load} = 0$$
 (5)

式中: Q_{boi} 为电锅炉的热功率; Q_{WH} 为热回收装置的 热功率; Q_{HOT} 为储热装置的热功率,放热为正,储热 为负; Q_{load} 为系统热负荷。

冷功率平衡约束的表达式为

$$I_{\rm AC} + I_{\rm EC} + I_{\rm COOL} - I_{\rm load} = 0 \tag{6}$$

式中: I_{AC} 为吸收式制冷机的制冷功率; I_{EC} 为电制冷机的制冷功率; I_{COOL} 为储冷装置的冷功率, 放冷为正, 储冷为负; I_{load} 为系统冷负荷。

2)设备出力约束

$$P_{\rm grid.min} \le P_{\rm grid} \le P_{\rm grid.max} \tag{7}$$

$$P_{\rm MT.min} \le P_{\rm MT} \le P_{\rm MT.max} \tag{8}$$

$$Q_{\text{boi.min}} \leq Q_{\text{boi}} \leq Q_{\text{boi.max}} \tag{9}$$

$$I_{\rm EC.min} \le I_{\rm EC} \le I_{\rm EC.max} \tag{10}$$

$$I_{\rm AC.min} \leq I_{\rm AC} \leq I_{\rm AC.max} \tag{11}$$

式中: $P_{\text{grid.max}}$ 、 $P_{\text{grid.min}}$ 分别为为购电功率上限和下限; $P_{\text{MT.max}}$ 、 $P_{\text{MT.min}}$ 分别为燃气轮机输出功率上限和下限; $Q_{\text{boi.max}}$ 、 $Q_{\text{boi.min}}$ 分别为电锅炉热功率上限和下限; $I_{\text{EC.max}}$ 、 $I_{\text{EC.min}}$ 分别为吸收式制冷机制冷功率的上限和下限; $I_{\text{AC.max}}$ 、 $I_{\text{AC.min}}$ 分别为电制冷机制冷

3)储能约束

储能约束包括蓄电池、储热装置和储冷装置的 各类约束,储电池储能约束的表达式为

$$\begin{cases} E_{\text{BAT.min}} \leqslant E_{\text{BAT}} \leqslant E_{\text{BAT.max}} \\ P_{\text{BAT.min}} \leqslant P_{\text{BAT}} \leqslant P_{\text{BAT.max}} \\ E_{\text{start}}^{\text{BAT}} = E_{\text{end}}^{\text{BAT}} \end{cases}$$
(12)

式中: E_{BAT} 为蓄电池容量; $E_{BAT.max}$ 、 $E_{BAT.min}$ 分别为 蓄电池容量的上限和下限; $P_{BAT.max}$ 、 $P_{BAT.min}$ 分别为 蓄电池输出功率的上限和下限; E_{start}^{BAT} 、 E_{end}^{BAT} 分别为 蓄电池在调度周期开始时和结束时的容量。

储热装置储热约束的表达式为

$$\begin{cases} E_{\text{HOT,min}} \leq E_{\text{HOT}} \leq E_{\text{HOT,max}} \\ Q_{\text{HOT,min}} \leq Q_{\text{HOT}} \leq Q_{\text{HOT,max}} \\ E_{\text{start}}^{\text{HOT}} = E_{\text{end}}^{\text{HOT}} \end{cases}$$
(13)

式中: E_{HOT} 为储热装置的容量; $E_{HOT.max}$ 、 $E_{HOT.min}$ 分别为储热装置容量的上限和下限; $Q_{HOT.max}$ 、 $Q_{HOT.min}$

分别为储热装置热功率的上限和下限; $E_{\text{start}}^{\text{HOT}}$ 、 $E_{\text{end}}^{\text{HOT}}$ 、 $D_{\text{start}}^{\text{HOT}}$ 、 $E_{\text{end}}^{\text{HOT}}$ 、 $D_{\text{start}}^{\text{HOT}}$

储冷装置储冷约束的表达式为

$$\begin{cases} E_{\text{COOL-min}} \leqslant E_{\text{COOL}} \leqslant E_{\text{COOL-max}} \\ I_{\text{COOL-min}} \leqslant I_{\text{COOL}} \leqslant I_{\text{COOL-max}} \\ E_{\text{start}}^{\text{COOL}} = E_{\text{end}}^{\text{COOL}} \end{cases}$$
(14)

式中: E_{COOL}为储冷装置的容量; E_{COOLmax}、E_{COOLmin}分别为储冷装置容量的上限和下限; I_{COOLmax}、 I_{COOLmin}分别为储冷装置热功率的上限和下限; E^{COOL}_{start}、 E^{COOL}分别为蓄电池在调度周期开始时和结束时的容量。

2 改进樽海鞘群算法

2.1 樽海鞘群算法

樽海鞘群算法(salp swarm algorithm, SSA)是近 年来由数学家 Mirjalili 等人提出的一种元启发式算 法^[12],原理是模仿海洋中樽海鞘的群体觅食行为。 在觅食过程中,樽海鞘群分为领导者和追随者,领导 者领导追随者向食物源靠拢。设食物源为 G,在 d 维空间中,樽海鞘群体所在位置矩阵定义为 S_{nxd}; 矩阵 S 中元素 s_{i,j}表示在第 j 维搜索空间中第 i 个樽 海鞘的位置;n 为樽海鞘种群的数量。

樽海鞘群算法在优化过程中,根据食物源的位 置对领导者的位置进行更新,其表达式为

$$s_{1,j} = \begin{cases} G_j + r_1 \left[(u_j - l_j)r_2 + l_j \right], r_3 \ge 0.5 \\ G_j - r_1 \left[(u_j - l_j)r_2 + l_j \right], r_3 < 0.5 \end{cases}$$
(15)

式中: G_j 为樽海鞘群领导者的位置; u_j 为第j维的上限; l_j 为第j维的下限; r_1 、 r_2 、 r_3 均为系数,其中 r_1 、 $r_2 \in [0,1]$ 。 r_1 的计算方法为

$$r_1 = 2e^{-(\frac{4t}{T})^2}$$
(16)

式中: *t* 为迭代次数; *T* 为算法设置的最大迭代次数。

追随者向领导者移动,其位置更新公式的表达 式为

$$s_{i,j} = \frac{1}{2} (s_{i,j} + s_{i-1,j}) \tag{17}$$

式中: $s_{i,j}$ 为第j维搜索空间中第i个樽海鞘的位置; $s_{i-1,j}$ 为第j维搜索空间中第i-1个樽海鞘的位置; $2 \le i \le n$ 。

从樽海鞘群算法的寻优过程可以看出,SSA 原理

简单,容易实现,但在寻优过程中容易陷入局部极值。

2.2 改进樽海鞘群算法

针对 SSA 算法中存在的不足,采用莱维飞行和 非线性收敛因子等策略对其进行改进。

1) 莱维飞行[13]

莱维飞行能够提高樽海鞘种群的多样性,为此 在樽海鞘群领导者的位置更新过程中引入莱维飞行 策略,以增强算法的全局搜索性能,有效避免算法陷 入局部最优解。具体改进如下:

$$s_{1,j} = \begin{cases} G_j + L_{evy}(d) \times [(u_j - l_j)r_2 + l_j], r_3 \ge 0.5\\ G_j - L_{evy}(d) \times [(u_j - l_j)r_2 + l_j], r_3 < 0.5 \end{cases}$$
(18)

$$L_{\text{evy}}(d) = 0.01 \times \frac{r_4 \times \sigma}{|r_5|^{\frac{1}{\beta}}}$$
(19)

$$\sigma = \left\{ \frac{\Gamma(1+\beta) \times \sin(\pi\beta/2)}{\Gamma[(1+\beta)/2] \times \beta \times 2^{(\beta-1)/2}} \right\}^{\frac{1}{\beta}} \quad (20)$$

式中: L_{evy} 为莱维飞行; $r_4 \ r_5$ 均为随机数,取值区间 为[0,1]; Γ 为 Gamma 函数,其概率分布的方差与 均值都是无界的。

莱维飞行的步长采用大量短距离步长和少量长 距离步长交替的方式变化,能够增大搜索空间,提高 优化性能。

2) 非线性收敛因子[14]

在 SSA 算法中,樽海鞘群追随者的位置是由上 一个体和当前个体的位置决定的,这样不利用算法 收敛,为此,在这一过程中引入非线性收敛因子,以 提高算法的收敛能力。具体改进为

$$s_{i,j} = \frac{1}{2}(s_{i,j} + D \times s_{\text{best}})$$
 (21)

式中: *s*_{best} 为当前最优个体位置;*D* 为非线性收敛因子,其作用是调整最优值的比重,使算法快速收敛, 其表达式为

 $D = \frac{1}{2} \left[\tan(\pi \times \frac{T}{t}) + c_{\min} + c_{\max} \right]$ (22)

式中, c_{\min} 、 c_{\max} 均为学习因子。

仿真分析表明,采用莱维飞行和非线性收敛因子 等策略改进的樽海鞘群算法的全局搜索性能和收敛 能力大大提升,使算法能够快速收敛至全局最优解。

3 模型求解

考虑 RIES 优化调度模型目标函数和约束条件的复杂性,采用 ISSA 算法对模型进行求解,求解流

程如图2所示,详细步骤为:



图 2 求解流程

1)设置调度周期和综合能源系统运行参数,包 括各设备出力上下限、分时电价、天然气价等;

2)设置改进樽海鞘群算法的相关参数,包括种 群数量、最大迭代次数、学习因子等;

3)初始化樽海鞘种群,并根据式(3)目标函数 计算个体初始适应度值;

4)利用式(18)莱维飞行策略更新樽海鞘种群 中领导者的位置;

5)利用式(21)非线性收敛因子和当前最优解 更新樽海鞘种群中追随者的位置;

6)计算种群适应度值并输出全局最优解;

7)判断算法是否达到最大迭代次数,若"是"结束计算,否则返回步骤4。

4 算例分析

为了验证所提的 RIES 优化调度模型和改进樽 海鞘群的正确性,以图 1 中的区域综合能源系统 为例进行算例分析,系统中各设备运行参数可参 考文献[15-16]。设置调度为 24 h,天然气单价为 3.15 元/m²,图 3 中给出了光伏、风电及电、热、冷负 荷的预测曲线。



图 3 光伏、风电及电、热、冷负荷的预测曲线

系统向大电网购电采用分时电价,具体如表1 所示。

分时电价

表 1

时间范围	时段	电价/(元・(kWh) ⁻¹)
10:00-15:00.18:00-21:00	峰时	1.066
0:00-7:00.23:00-24:00	谷时	0.295
7:00-10:00,15:00-18:00, 21:00-23:00	平时	0.632

ISSA 算法的参数设置为: 標海鞘种群 n = 30; 最大 迭代次数 T = 300; 学习因子 $c_{min} = 0.004$ 、 $c_{max} = 1$ 。

在 Matlab 中进行仿真计算,采用 ISSA 算法对 区域综合能源系统优化调度模型进行求解,燃气轮 机输出功率、电锅炉输出功率、电制冷机输出功率、 购电功率和吸收式制冷机输出功率的变化曲线如 图 4 所示。蓄电池、储热装置和储冷装置的功率变 化曲线如图 5 所示。



结合图 3—图 5 可以看出,在 0:00—7:00 时, 电负荷相对较大,热负荷相对较小,冷负荷最小。在 这一时段,燃气轮机和电制冷机以较小的输出功率 工作,为了满足系统热负荷需求,电锅炉输出功率较

大。由于这一时段电价较低, RIES 向大电网购电以 满足系统用电需求, 蓄电池也利用购电功率进行充 电, 储热装置和储冷装置分别处于放热状态和储冷 状态。



图 5 各储能装置功率变化曲线

在7:00—15:00时:电负荷逐渐增大,在15:00 时近乎达到峰值;热负荷逐渐降低,在14:00时达到 最小;冷负荷先增大后减小,在13:00时达到峰值。 在这一时段,燃气轮机以较大的输出功率工作,并产 生较大的余热,此时电锅炉输出功率较小,热负荷由 热回收装置和电锅炉一起提供,电制冷机输出功率 较小,吸收式制冷机输出功率较大,冷负荷由二者共 同提供。这一时段中的7:00—10:00时,电价处于 平时电价,为了满足电负荷需求,RIES的购电功率 逐渐增大。在10:00—15:00时,电价处于峰时电 价,为了降低购电成本,购电功率相对较小,蓄电池 释放电能供系统使用,储热装置和储冷装置分别处 于储热状态和放冷状态。

在 15:00—21:00 时,电负荷整体较大,热负荷 整体较大,冷负荷整体较小。此时,微型燃气轮机仍 输出较大功率并产生较高热量,电锅炉输出功率较 小,蓄电池整体呈放电状态。

为了对比 ISSA 算法的优化效果,分别采用 SSA 算法、粒子群算法(particle swarm optimization, PSO) 和灰狼优化算法(grey wolf optimization, GWO)进行 对比分析。SSA 算法的参数设置同 ISSA 算法, PSO 算法和 GWO 算法相关参数设置可参考文献[17]和 文献[18]。设置最大迭代次数为 300,在 Matlab 中 进行仿真计算。采用 4 种算法分别对目标函数进 行优化求解,4 种算法分别实验 30 次的迭代结果 如图 6 所示。由图 6 可知, ISSA 算法优化结果的波 动范围区间为[2500, 2700],整体优化效果稳定性 好于其他 3 种算法。



图 6 4 种优化算法迭代效果对比

表 2 给出了 4 种优化算法在图 6 中取得最小适 应度值的相关参数。由表 2 可知:在迭代次数方面, ISSA 算法的收敛次数为 47 次,相比其他算法的收 敛次数减少一半以上;在收敛时间方面,ISSA 算法 的收敛时间为 2.74 s,相比其他算法明显缩短;从最 优解上看,ISSA 算法计算的总成本为 2 536.24 元, 低于其他算法。由此可见,ISSA 算法能够缩短收敛 时间,提高计算精度。

表 2 4 种算法对比

优化算法	收敛次数	收敛时间/s	最优解/元
ISSA 算法	47	2.74	2 536.24
SSA 算法	102	4.45	2 595.75
PSO 算法	97	5.25	2 634.56
GWO 算法	122	5.74	2 704.85

5 结 论

以区域综合能源系统运行成本和环境成本最小 为目标函数,采用莱维飞行和非线性收敛因子策略 对樽海鞘群算法进行改进,建立基于改进樽海鞘群 算法的区域综合能源系统优化调度模型,采用实际 算例进行仿真分析,并与其他优化算法对比。结果 表明,ISSA 算法在收敛次数、收敛时间和计算精度 方面均优于其他算法,验证了所提区域综合能源系 统优化调度模型正确性和实用性。

参考文献

- [1] 朱浩昊,朱继忠,李盛林,等.电-热综合能源系统优化 调度综述[J].全球能源互联网,2022,5(4):383-397.
- [2] 李楠,柳玉宾,王恒涛,等.综合能源系统优化调度研究 综述[J].能源与节能,2021(10):58-59.
- [3] 马喜平,沈渭程,甄文喜,等.基于低碳目标的电气综合

能源系统优化调度策略研究[J].电网与清洁能源, 2021,37(12):116-122.

- [4] 林威,靳小龙,叶荣.面向区域综合能源系统的分布式 优化调度方法[J].电力建设,2021,42(11):44-53.
- [5] 郁丹,杨鹏,唐人,等.基于随机微分方程的区域综合能源系统优化调度方法[J].供用电,2022,39(5):89-95.
- [6] 姜涛,许真,张劲松,等.考虑源-储协同优化的区域综合 能源系统经济调度[J].浙江电力,2022,41(2):20-28.
- [7] 刘自发,谭雅之,李炯,等.区域综合能源系统规划关键问题研究综述[J].综合智慧能源,2022,44(6):12-24.
- [8] 李聪,秦立军,段惠.基于改进群搜索算法的含光伏发电的配电网优化重构研究[J].太阳能学报,2022,43(4):213-218.
- [9] 姚健,刘爱军.基于粒子群算法的区域综合能源优化调度方法[J].电力需求侧管理,2022,24(4):67-72.
- [10] 陈克文, 撤奥洋, 周生奇, 等. 含冷热电联供的综合能源 系统优化调度[J]. 电子设计工程, 2022, 30(5):46-50.
- [11] 李良余,马守达,盛晏.基于经济性和环保性的区域综合能源系统优化调度研究[J].上海电力学院学报, 2019,35(5):503-509.
- [12] 张凡,王雷,赵娟,等.樽海鞘群算法在电力系统最优潮 流计算中的应用[J].分布式能源,2021,6(1):35-43.
- [13] 张严,秦亮曦.基于 Levy 飞行策略的改进樽海鞘群算 法[J].计算机科学,2020,47(7):154-160.
- [14] 郑洪清,彭石燕,周永权.融合收敛因子和樽海鞘群的 蝴蝶优化算法[J].微电子学与计算机,2021,38(10): 28-34.
- [15] 王文静,于立涛,撤奥洋,等.基于 MOABC 算法的冷
 热电联供系统优化调度研究[J].电力需求侧管理,
 2019,21(4):48-53.
- [16] 侯旭倩. 电-气-热型微能源网多目标优化运行研 究[D].西安:西安理工大学,2019.
- [17] 邹玙琦,杨国华,郑豪丰,等.基于改进小生境 PSO 算 法的综合能源系统调度[J].电力系统及其自动化学 报,2020,32(7):47-52.
- [18] 张靖一,于永进,李昱君.基于改进灰狼算法的综合能 源系统优化调度[J].科学技术与工程,2021,21(19): 8048-8056.

作者简介:

万 锴(1989),男,工程师,从事电气设备运行与维护 工作;

刘 闯(1991),男,硕士,工程师,从事电气设备运行与 维护工作;

陈 磊(1992),男,硕士,工程师,从事电气设备运行与 维护工作。

(收稿日期:2022-08-23)

一种基于智慧热电能源系统源端的 协调控制方案

孙海翠,孙 漾,周梦婕,顾玉顺

(华东电力设计院有限公司,上海 200063)

摘 要:智慧能源对推进能源生产和消费革命,构建清洁低碳、安全高效的能源体系起着重要作用。文中针对智慧热 电能源系统如何进行源端协调控制提出了一种基于智慧能源站层级控制架构的定级排位负荷分配控制方法。通过 综合考虑智慧能源系统内各能源站的综合系数,进行排序定位以进行负荷分配协调,并通过自动寻优与循环激活等 机制促进负荷分配的可靠,确保智慧能源系统源端有机协调、可靠经济地运行。

关键词:智慧能源; 源端;协调控制;定级排位

中图分类号:TM 73 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2023)02-0045-07

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230208

A Coordinating Control Scheme of Source Side Based on Electric and Heating Smart Energy System

SUN Haicui, SUN Yang, ZHOU Mengjie, GU Yushun

(East China Electric Power Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200063, China)

Abstract: The smart energy will play a major role in pushing the energy production and consumption reform, as well as building a clean, low-carbon, safe and efficient energy system. A load distribution control method by sorting and positioning of hierarchical control architecture based on smart energy station is proposed herein for source-side coordinated control of electric and heating smart energy system. By considering the comprehensive coefficients of each energy station in smart energy system, sorting and positioning methods are carried out for load distribution coordination, and automatic optimization and cyclic activation mechanisms are adopted to promote the reliability of load distribution, so as to ensure the organic coordination and reliable and economic operation of source side of smart energy system.

Key words: smart energy; source side; coordinated control; sorting and positioning

0 引 言

智慧能源将先进的信息和通信技术、智能控制 和优化技术与现代能源供应、储运、消费技术深度融 合,具有数字化、自动化、互动化、智能化、精确计量、 广泛交互、自律控制等功能,实现能源的优化决策和 广域协调^[1]。中国自 2015 年首次提出"互联网+" 的行动计划以来,一系列的相关指导意见、示范项目 等相继开展,研究智慧能源的热潮随即而来,智慧能 源成为改变高碳化的能源结构、实现能源领域可持续发展的优选战略^[2-4]。

近年来,许多学者针对智慧能源展开了大量的 研究,文献[5-8]提出电力负荷预测的方法,为风、 光等可再生能源的调配奠定了基础。文献[9]提出 考虑环境效益的多机组负荷分配优化方法,利用设 置的运行经济效益目标函数,通过设置综合能源系 统热负荷、电负荷需求等模型约束条件,基于粒子群 算法的热负荷分配多目标优化,建立多机组负荷分 配优化模型。文献[10-12]提出了综合智慧能源站 智能工况动态寻优的方法,基于电站的实时数据计 算系统的经济性,挖掘用户的用能习惯和系统特性,

基金项目:上海市"科技创新行动计划"社会发展科技攻关项目 (20dz1205201);中国能源建设股份有限公司重大科技专 项和重点研发项目"揭榜挂帅"项目(CEEC2021-ZDYF-12)

支撑负荷的预测算法,演进寻优模型;并提出多区域 综合能源系统的主动配电网双层博弈优化调度策 略。文献[13]提出合同能源管理模式的电力园区 节能优化及效益分配方法,通过优化光伏、燃气轮 机、储能等设备的运行方式建立园区优化节能运行 方案,并运用 Shapley 值法解决园区节能项目中各 参与者的效益分配问题。文献[14]提出智慧能源 站"多站融合"工程中交直流微电网供电系统结构, 提高交直流系统的综合能效,推进智慧能源站"多 站融合"试点工程的开展。文献[15]提出基于多时 间尺度和多源储能的 IES 能量协调优化调度策略, 以系统运行经济最优、滚动控制时域内购能成本与 储能惩罚成本之和最低,以及设备输出功率调整量 最小为目标,建立优化调度模型,分日前、日内和实 时多个时间尺度以确保系统运行的经济性。

下面,针对智慧能源的源端提出了一种智慧热 电能源系统,它的一次能源端主要由太阳能电站、风 能电站、燃气热电联产能源站、地热能热联产能源站 等分布式可再生能源和清洁能源等构成。能源输配 载体选用性能优越的电能和热能,组成高效的能源 输配网络。针对能源生产源端如何有效地协调各能 源站生产,使其安全、高效、经济地响应能源需求端 的负荷需求,并最大效能地促进综合效益最大化,提 出了由能源站基本生产控制层、能源站优化控制层 和智慧能源集控层3层构成的层级控制架构。并针 对如何进行智慧热电能源系统负荷分配,提出了一 种智慧热电能源系统负荷分配定级排位分配控制方 法,以促进智慧热电能源系统集控中心协调调度各 能源站,使得能源网络协调一致地进行能源生产,提 高能源生产网络协作、耦合生产运行效率,促进智慧 能源技术的进一步发展。

1 智慧热电能源系统

智慧能源以信息化与工业化深度融合为主 线^[16],将移动互联网、大数据等信息通信技术与智 能电网、热能网、交通网等多种能源网络进行整合, 相互紧密耦合。能源共享网络令人充满期待,但通 往智慧能源目标的征途中,还有很多工作要做。下 面聚焦于可再生能源和清洁能源的利用,组建一种 智慧热电能源系统,系统组成如图1所示。

所提智慧热电能源系统的能源供应中心,由太

阳能热发电站(配置储能系统)、分布式光伏系统 (配置储能系统)、风能发电站、燃气热电联产能源 站、地热能热电联产能源站等组成,此为能源生产端 的组成构架,实际应用中依据工程规划与实施确定。



图1 智慧热电能源系统

上述综合能源供应中心,有电能和热能的协调, 也有储能系统的调节作用。如何在智慧能源集控中 心有效地协调各种能源生产,以使各能源站既有机 协作又平稳可靠地响应负荷端的需求是系统稳定运 行的必要前提。

2 智慧热电能源系统协调控制方案

智慧能源供应网络是由独立能源站有机组合而 形成的能源供应体系,作为一个相互协同的能源供 应网络,它高效运行的前提是各个能源供应站点科 学有效的耦合、协调,以使智慧能源供应网络及时响 应输配网络能源供给需求,优化功率分配控制,最优 化配置智慧能源网络中各能源站的出力。

智慧能源协调控制功能是布置于各分布式能源 站上层的高层控制中心,控制对象是智慧能源集控 中心下辖的有机组合在一起的能源分站。若要实现 智慧能源集控中心全局能源协调控制功能,需要满 足以下条件:

1)能源分站作为独立个体,具有高度自动化水 平,减少运行人员干预且控制性能稳定可靠;

2)能源分站能够快速、准确地响应智慧能源集 控中心指令,彻底消除控制盲区,确保控制指令的深 度、全方位下达与执行;

3)能源分站具有智能检测、设备诊断、性能分析、价格成本分析等功能,本体是功能完善的智能个体。

智慧能源协调控制系统为一个层级控制架构,整体由3个层级组成,分别为能源站基本生产控制层、 能源站优化控制层和智慧能源集控层,如图2所示。

底层智慧能源站基本生产控制层完成各能源站 作为独立个体的高度自动控制功能,使能源站在接 受上层能量输出指令时能按照其内部层级控制功 能,调动机组、系统、子系统至设备协调一致地响应 能源站接受的能量生产输送需求。



图 2 智慧能源协调控制系统

智慧能源站优化控制层共享生产实时数据,建 立能源站工艺系统和设备的性能数学模型,在线计 算、分析、评价电厂技术经济指标和设备的性能指 标,实时监测能源站运行的性能。智慧能源站优化 控制层还将部署设备状态监测与预测性维护系统, 以完成实时监测系统设备状态、分析系统设备的健康 安全系数等。同时,智慧能源站优化控制层还能根据 采集的能源站实时输出负荷信息以及性能计算分析、 系统设备分析等信息,计算分析其实时可增减负荷潜 能值,用于智慧能源网进行负荷分配的计算。

智慧能源集控中心位于由各能源站汇集而成的 能源池,进行全局监测和控制,实现智慧能源源端输 出与能源输配网络能源需求的匹配,并按需求进行 能源站能源生产任务的协调优化分配,控制智慧能 源网络有机匹配,运行稳定。

智慧能源控制功能的实现是将能源站数据与智 慧能源集控层数据全线贯通。数据按照需求流向自 下而上进行传递,将下层生产状态数据、系统设备安 全健康状态等传递给上层指令层进行分析决策。同 时数据自上而下传递,将上层做好的指令数据下传 至能源站进行能源生产。因此,稳定可靠的数据平 台是整个系统安全可靠运行的重中之重。

同时,消除智慧能源系统运行中的各种扰动,确 保能源网络安全、稳定、可靠的运行,保证功能站在 站组发生异常工况时,各子系统之间相互配合、切换 和调节到安全状态,不致产生严重后果。

3 智慧热电能源系统负荷分配控制方案

智慧热电能源系统协调控制,需要解决智慧能 源集控中心如何合理分配能源输配网络能源的供给 需求。针对图1所示的智慧能源网络提出了一种定 级排位分配控制方法。 设定智慧能源供应站配置多种类型能源站。为 了提高能源站能源生产效率、提升经济性能,依据能 源站特点设定多种能源生产模式。如太阳能热发电 站、光伏发电储能站进行电能生产,同时配备储能系 统以增加系统调节的灵活性。燃气电站和地热能源 站进行热电联产。模型仅给出一种可能的匹配方 式,而在实际应用中依据区域性发展战略和特点创 建的能源供应站同样适用下面所述的控制方案。

智慧能源负荷分配控制方案首先判断热电联产 能源站的运行模式是否为"发电主导"模式,即该能 源站首要任务是响应发电需求。若该能源站处于 "发电主导"模式,则被送入发电分配序列,等待进 行发电负荷分配;若该能源站不处于"发电主导"模 式,则被送入供热分配序列,等待进行供热负荷分 配。智慧能源负荷分配控制如图 3 所示。



图 3 智慧能源负荷分配控制

所提出的针对智慧热电能源系统源端进行的发 电和供热能源之间的协调,即对于智慧能源站本体 的发电和供热之间的协调由能源站控制层实现,智 慧能源集控层将依据能源站传送的"发电主导"模 式或"供热主导"模式信号,将其引接入对应的能源 分配控制程序行列,以进行对应能源的协调控制功 能实现。进入发电分配序列的能源站将执行计算供 电综合系数程序,根据计算的供电综合系数进行分 配排序。

排序后进入供电分配协调算法模块进行分配负 荷计算,然后将计算指令数值下达到对应能源站。 供热分配程序与上述发电分配程序类似,即判断能 源站是否为"供热主导"模式。若该能源站处于"供 热主导"模式,则其被送入供热分配序列,等待进行 供热负荷分配,后续执行供热负荷分配功能。

4 负荷分配定级排位分配控制方法

智慧能源负荷分配定级排位分配控制方法采用 最优排序思路进行能源站负荷分配,基本思想是考 量能源站当前时刻区间的性能系数,以计算其综合 最优系数值进行排序,即最优功能站最先进行任务 领取,依次类推,以完成负荷需求的分配。

供电综合系数的计算如式(1)所示。

$$\sum_{k=m_1}^{m_2} b_i^k = \sum_{k=m_1}^{m_2} (p_i^k \times e_i^k \times s_i^k \times q_i^k \times c_i^k)$$
(1)

式中: b_i^k 为第 i 个能源站 k 时刻供电综合系数; p_i^k 为 第 i 个能源站 k 时刻性能系数; e_i^k 为第 i 个能源站 k时刻经济系数; s_i^k 为第 i 个能源站 k 时刻安全系数; q_i^k 为第 i 个能源站 k 时刻供电质量系数; c_i^k 为第 i 个 能源站 k 时刻调节系数。

式(1)计算时间区间为[*m*₁,*m*₂]的综合系数, 以避免能源协调的频繁扰动。

式中综合考虑能源站性能系数,以考量能源站 性能指标是否处于较佳的状态,同时经济系数将实 时计算当前时刻该能源站成本参数,以确定相对于 智慧能源网络其经济系数水平。能源站设置的缜密 的智能监测仪表将全方位监测能源站系统、设备运 行的健康状态,并计算其对应的健康系数。供电质 量系数用以评价能源站生产电能的质量,确定其接 入能源网络的质量水平。调节系数为能源站由于特 别事项而引入的设定系数,如机组大修、特殊运行条 件、特殊分配考量等,默认值可设为1。

为了增强综合系数的评价调节效果,引入评价 矩阵**R**。



式中,r^k为 k 时刻调节系数第 n 项系数评价权值。 引入评价矩阵**R**后,能源站供电综合系数由智慧能 源集控中心根据能源网络调控政策、季节因素、市场 因素等进行评价矩阵赋值以调整各能源站各项系数 权值,增强不同时点综合系数计算的适配性。以上 参数获取将于智慧能源协调控制系统能源站优化控 制层完成。

$$\begin{bmatrix} p_{1}^{k} & e_{1}^{k} & s_{1}^{k} & q_{1}^{k} & c_{1}^{k} \\ p_{2}^{k} & e_{2}^{k} & s_{2}^{k} & q_{2}^{k} & c_{2}^{k} \\ p_{3}^{k} & e_{3}^{k} & s_{3}^{k} & q_{3}^{k} & c_{3}^{k} \\ & & \ddots & & \\ p_{i}^{k} & e_{i}^{k} & s_{i}^{k} & q_{i}^{k} & c_{i}^{k} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} r_{1}^{k} \\ r_{2}^{k} \\ r_{3}^{k} \\ r_{3}^{k} \\ r_{4}^{k} \\ r_{5}^{k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_{1}^{k} \\ b_{2}^{k} \\ b_{3}^{k} \\ \vdots \\ b_{3}^{k} \\ \vdots \\ b_{i}^{k} \end{bmatrix}$$
(3)

根据式(3)计算的综合系数计算数值将各能源 站进行排序,各排序位置能源站依据下述方法进行 负荷分配。

假设智慧能源网络 k 时刻(即时间区间[m₁,m₂]) 电能总需求为W^{*}。首先考虑热电联产类型能源站 的以热定电模式可提供的对外供电总量,求得待分 配供电需求总量为

$$W_{\rm d}^k = W^k - \sum W_{\rm HUO} \tag{4}$$

式中: W_{d}^{*} 为k时刻待分配供电需求总量; ΣW_{HUO} 为以热定电模式热电联产类型能源站总计供电总量。

分配供电需求总量 W_a^t 将首先分配给排序第一 位的能源站 UO₁。假设 k 时刻能源站 UO₁的发电能 力是 U_1^t ,则分配给其负荷任务位 U_1^t 。完成该步,将 进入排序第二位能源站的负荷分配,假设 k 时刻能 源站 UO₂ 的发电能力是 U_2^t ,则分配给其负荷任务为 U_2^t 。依次类推,完成待分配供电总量的分配。智慧 能源负荷分配控制算法如图 4 所示。



图 4 智慧能源负荷分配控制算法

假定按照上述分配机制分配完完整功能站,即 功能站可用负荷能力被完整分配结束,剩余待分配 供电需求总量为 W^{*}_d,则

$$W_{\rm dr}^k = W_{\rm d}^k - \sum U_i^k \tag{5}$$

剩余待分配供电需求总量为 W_{dr}^{*} 的处理方法采 用基于自动寻优机制与循环激活加负荷机制相结合 的处理方法。设定定级排位分配控制方法进行负荷 分配至排位p的能源站时,当 W_{dr}^{*} 低于排位p能源站 发电能力 U_{p}^{*} ,则控制器进行判断 W_{dr}^{*} 是否大于排位p能源站经济负荷低限。若成立,则将剩余待分配供 电需求总量 W_{dr}^{*} 分配给排位p的能源站;若不成立, 则顺次向下寻优,即判断 W_{dr}^{*} 是否大于排位p+1能源 站经济负荷低限。若成立,则将剩余待分配供电需 求总量 W_{dr}^{*} 分配给排位p+1的能源站;否则,依据上 述寻优原则继续向下进行寻优。

若寻优至排位最后的能源站仍未完成能源分 配,将执行循环激活加负荷机制,进行第二轮次的加 负荷分配。其基本做法为,剩余待分配供电需求总 量W^t进入排位1能源站,并判断排位1能源站是否 有加负荷潜能,若有加负荷能力,则进行排位1能源 站加负荷,加负荷量等于优化控制层计算数值;若能 源站1不具备加负荷能力,则分配控制功能继续向 下进行排位2能源站加负荷,加负荷方法同排位1 能源站。该方法依次向下循环,直至负荷分配完毕。 智慧能源负荷分配之残余负荷控制方法详见图5。



图 5 智慧能源负荷分配之残余负荷控制

为了确保智慧能源系统集控中心负荷分配的稳 定,避免出现大范围的波动影响系统的性能。采用圈 内序列维稳及出圈关键信号确认机制来解决不同时 间区间平稳切换负荷分配的功能。下面将某一时刻, 对应某一区间内的序列中已分配负荷且平稳运行的 能源站,定义为圈内能源,同时将该序列中未被分配 负荷处于停止状态的能源站定义为圈外能源站。设 定 k_1 时刻(即时间区间[m_1, m_2])对应序列 S_1 的已执 行圈内能源站序列为 $\{UO_1^{k_1}, UO_2^{k_1}, UO_3^{k_1}, \cdots, UO_n^{k_1}\},$ k_2 时刻(即时间区间 $[m_2, m_3]$)对应序列 S_2 的计算 圈内能源站序列为 $\{UO_1^{k_2}, UO_2^{k_2}, UO_3^{k_2}, \dots, UO_n^{k_2}\}$ 。 此时进行序列 S₁的圈内能源站与序列 S₂的圈内能 源站的模糊比对具体为:1)当判断某能源站既在序 列 S₁的圈内能源站又在序列 S₂的圈内能源站时,则 维稳运行,等待负荷分配函数进行负荷指令下达。 2) 序列 S₁ 的已执行圈内某能源站不在序列 S₂ 的计 算圈内能源站时,执行出圈关键参数确认法,运算程 序搜索针对该能源站的关键参数,如停机指令、设备 故障、手动指令等。若搜寻到,则执行该能源站退圈 指令;若未搜寻到,则维稳运行,继续保持该能源站 在圈内运行,直到其排序超出运行圈排序一定值时, 退出运行圈并发起报警。3)当判断序列 S2的计算 圈内能源站不在序列 S_1 的已执行圈内能源站内时, 也就是说新的序列中,该能源站的排位计算进入圈 内时,将执行负荷分配等待机制,即等待运行圈内负 荷分配有余量时,新进圈的能源站将接收指令进行 能源生产。

所述智慧热电能源系统源端协调控制方案以电 源系统协调分配为主,热源系统协调分配实现原理 和机制与其类似。

5 算例分析

以某市某日各时段智慧能源系统源端用电需求为例,如图 6 所示。根据用电负荷的长期规律设定 23:00—4:00 为时段 1,5:00—10:00 为时段 2, 11:00—16:00 为时段 3,17:00—22:00 为时段 4。

智慧能源系统源端网络设置能源站情况如表 1 所示。

根据智慧能源站生产实时数据库数据以及计算模型等获取某时段能源站的各项系数数值如表 2 所示。 设定该时段评价矩阵 $R = [0.2, 0.2, 0.3, 0.3, 1.0]^{T}$,



图 6 智慧能源用电需求

表1 智慧能源系统站点构成

能源站	i 发电	额定功率	/MW	能源站	发电额定	⋶功率∕MW
站 A		100		站 E		32
站 B		60		站 F		70
站 C		200		站 G	2	00
站 D		45		站 H	1	00
表 2 某时段智慧能源系统站点综合系数						
能源站	性能 系数	经济 系数	安全系数	全 供电 数 系	质量 调 ⁼ 数 系数	节 综合 数 系数
站 A	0.89	0.96	0.9	2 0.	86 1.0	0 1.904
站 B	0.92	0.70	0.8	4 0.	86 1.0	0 1.834
站 C	0.80	0.88	0.7	8 0.	85 1.0	0 1.825
站 D	0.86	0.85	0.8	9 0.	91 0.8	9 1.772
站 E	0.84	0.85	0.8	1 0.	80 0.9	0 1.721
站 F	0.77	0.86	0.8	7 0.	78 0.8	5 1.671
站 G	0.84	0.88	0.7	6 0.	83 0.7	7 1.591
站 H	0.93	0.72	0.6	7 0.	84 0	0.783

根据智慧能源系统集控中心实时数据测算的能 源站排位序列如表 3 所示。

_	衣 5						
	时段1	时段 2	时段 3	时段 4			
	站 A	站 B	站 B	站 G			
	站 B	站 C	站 C	站 B			
	站 C	站 D	站 D	站 C			
	站 D	站 A	站 G	站 D			
	站 E	站 F	站 F	站 F			
	站 F	站 E	站 E	站 E			
	站 G	站 G	站 A	站 A			
	站 H	站 H	站 H	站 H			

时段1内,用电需求与排位序列协调一致,此时 进入发电供给的能源站 A/B/C/D/E/F 将协调负荷 总用电需求量。时间段2内,用电需求增加,按照排 位序列的能源站G虽然满足序列的要求,但因其不 符合经济运行需求,因此激活下一位能源站 H 进入 发电供给序列。时段 3 内,用电需求基本稳定,此时 能源站 H 运行稳定,为了维稳,采取序列靠前的能 源站 E 暂时等候。时段 4 内,用电需求进一步增 加,能源站出现关键参数确认退出情况,此时按照排 律序列进行发电供给的能源站 G/B/C/D/F,计算能 源站 E 进入发电供给序列将不满足整体经济性能, 因此跳步选择能源站 A。针对本案例,进行智慧能 源系统源端协调分配,如图 7 所示。



图 7 智慧能源系统案例站点协调

从图 7 可知,智慧能源系统源端协调按照定级 排位分配控制方法进行协调匹配,同时兼顾系统运 行过程中稳定性需求与经济性运行需求,以匹配最 优的协调方案。

6 结 论

智慧能源通过能源基础设施和信息技术的深度 融合,形成了一张泛在、融合、智能、低碳的能源互联 网络,并形成与之相适应的以可再生能源为重点的 分布式能源供应与消费系统,对提高能源供需协调 能力、推动能源清洁生产、促进可再生能源消纳具有 重要的现实意义和深远的战略意义。上面提出了一 种分布式可再生能源和清洁能源组成的智慧热电能 源系统,主要内容及结论如下:

1)针对智慧能源供应网络,提出了基于智慧能 源站为能源互联网网络节点,以数据贯通为数据流 流线,以智慧能源系统集控中心为总指挥中心的层 级控制架构。整体由3个层级组成,分别为能源站 基本生产控制层、能源站优化控制层和智慧能源集 控层。

2)针对智慧能源系统源端的负荷协调分配问题,提出了一种负荷分配定级排位分配控制方法,综 合考虑智慧能源系统内各能源站的运行性能、经济 性能、安全性能,并设置调节系数,以解决智慧能源 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,使智慧能源系统集控中心的负荷协调分 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.
- [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

(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

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)

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 SF₆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)

一种适用于微电网的分散式自适应过电流保护

槽伟红^{1,2},祁晓笑^{1,2},董雪涛^{1,2},李德存^{1,2},职凯华³

(1. 国网新疆电力有限公司电力科学研究院,新疆乌鲁木齐 830011;

2. 新疆电力系统全过程仿真重点实验室,新疆乌鲁木齐 830011;

3. 新疆大学电气工程学院,新疆乌鲁木齐 830011)

摘 要:针对传统的定流继电保护不能及时响应微电网拓扑结构变化的问题,文中提出一种分散式自适应过电流保护方案。根据微电网的故障特性将微电网中的馈线以分布式电源为中心分为上游区域和下游区域。针对不同区域 分别配置基于瞬时继电器的分散式保护法。最后,在电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 平台上建立微电网模型,验 证所提方法。结果表明,所提方法能正确地切除微电网在不同运行模式、拓扑结构、DG 运行状态下的故障,提高了保 护的可靠性。

关键词:自适应过电流保护;微电网保护;瞬时过流继电器

中图分类号:TM 771 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2023)02-0052-07

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230209

A Distributed Adaptive Overcurrent Protection for Microgrid

ZAO Weihong^{1,2}, QI Xiaoxiao^{1,2}, DONG Xuetao^{1,2}, LI Decun^{1,2}, ZHI Kaihua³

(1. State Grid Xinjiang Electric Power Research Institute, Urumqi 830011, Xinjiang, China;
 2. Xinjiang Key Laboratory of Whole Process Simulation for Power System, Urumqi 830011, Xinjiang, China;
 3. College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830011, Xinjiang, China)

Abstract: Aiming at the problem that the traditional constant current relay protection can not respond to the topology changes of microgrid in time, a decentralized adaptive overcurrent protection scheme is proposed. According to the fault characteristics of microgrid, the feeders in microgrid are divided into upstream area and downstream area with the distributed generator (DG) as the center. And distributed protection laws based on instantaneous relays are configured for different regions. Finally, the microgrid model is built on PSCAD/EMTDC platform to test different types of faults. The results show that the proposed method can correctly cut off faults in different operation modes, topology and DG operation states of microgrid, and can improve the reliability of protection.

Key words: adaptive overcurrent protection; microgrid protection; instantaneous overcurrent relay

0 引 言

微电网主要由不同类型的分布式电源(distributed generator, DG)、负荷及控制装置组成^[1]。微电网有 两种运行模式,且由于 DG 的高渗透率使微电网的 潮流呈现双向特征,传统既定式的保护方案无法满 足微电网保护的要求。

目前,国内外对于微电网保护研究最多的是自 适应保护,文献[2-3]提出了一种新的等效阻抗计 算方法,基于正序等效阻抗、三阻抗圆交点的方法计 算短路故障时的等效阻抗;该方案需要进行3次测 量和计算,其数据测量和保护算法分析过程比较复 杂。文献[4]提出一种以测量故障前后母线上阻抗 变化为依据的保护方法,但该方法只考虑了并网情 况,未考虑离网情况。文献[5]考虑了微电网拓扑 和运行模式的变化,通过采样母线内的局部可用测 量值动态计算过流继电保护的保护值。文献[6-8] 采用中央保护单元对微网进行自适应保护,如果中 央保护单元通信连接中断,则保护失败。文献[9] 在中心系统和远程通信系统中不使用继电器,继电 器通过测量可见阻抗使其设置与微电网条件匹配。 因此,微电网保护的关键是计算新的保护整定值,目 前迫切需要一种能动态计算保护整定值并使保护方 案适应微电网新状态的算法。

下面在分析了微电网的故障特征后,将微电网中的馈线以 DG 为中心分为上游区域和下游区域。 针对不同区域分别配置基于瞬时继电器的分散式保 护法。该保护方案可以很好地响应微电网的各种动 态变化,解决了微电网因潮流双向保护值难以整定 的问题,保护方案不会因为某个继电器的连接中断 而导致保护失败。仿真结果表明,该保护方案可以 实时响应微电网的动态变化,提高保护可靠性。

1 微电网结构及故障特性分析

1.1 微电网拓扑结构

根据 IEEE 1547 标准对微电网的定义^[10],结合 所提保护方法,建立如图 1 的微电网模型。



图1 微电网模型

图 1 中的 PCC(point of common coupling)点为 公共耦合点,在 PCC 点断开时,微电网进入孤岛运 行。IBDG1(inverter-based DG)为风力发电微电源, DG 为同步发电机,IBDG3 为储能蓄电池,IBDG4 为 光伏微电源。Load1—Load5 均为三相对称负载, R₁—R_{5-5、}R_{IBDC1}—R_{IBDC4}、R_{Load1}—R_{Load5}分别是馈线两 端、IBDG1—IBDG4 并网点处、Load1—Load5 入网点 处的保护装置。

1.2 微电网故障特性

微电网的两种运行模式为并网模式和孤岛模 式^[11]。并网模式下微电网内发生故障时,主网对故 障电流有贡献,潮流分布不再是单向的,具有双向潮 流分布的特点;而孤岛运行时,只有微电网内的分布 式电源对故障电流做出贡献,两种运行方式下其故 障特征存在较大差异。

在 PSCAD 仿真平台上构建微电网模型, 所连接 的主网电压等级为 10 kV, 系统基准电压为 10.5 kV, $Z_s = 0.2 \Omega_o$, 线路均为 3 km 架空线路。Load1—Load5 的功率依次为 0.80 MVA、0.80 MVA、0.67 MVA、 0.34 MVA、0.82 MVA, 系统参数如表 1 所示。

表1 交流微电网系统参数

参数	数值
母线电压/V	10 000
风电机组容量/MW	0.20
光伏容量/MW	0.27
储能装置容量/MVA	0.90
直流电压源容/MW	2.00

在图 1 中 F₁处(线路 BC 段 50%处)分别设置对称短路故障和不对称短路故障。R₂和 R₂₋₂的故障电流仿真如表 2 所示。

表 2 F_1 处故障时 R_2 和 R_{2-2} 处的电流

十七四之	R ₂ 电流/kA			R ₂₋₂ 电流/kA		
议 焊 ⁻ 米 刑	北座台	并网时	离网时	北陸岩	并网时	离网时
天空	议陧刖	故障电流	故障电流	议厚刖	故障电流	故障电流
对称短 路故障	0.048	1.331	0.084	0.048	0.123	0.092
不对称 毎路故障	0.048	1.548	0.097	0.048	0.143	0.107

从表2可看出,在并网模式下,微电网无论发生 何种故障,R₂流过的故障电流总是比R₂₋₂处的大。 但在孤网模式下,微电网无论发生何种故障,R₂₋₂流 过的故障电流总是比R₂处的大。在并网时,R₂处流 过的电流包括主网提供的电流和 DG 提供的反向电 流;孤网运行时,R₂处流过的电流仅包含各微源提 供的电流,此时 R₂₋₂距离 DG 较近,流过 R₂₋₂的故障 电流大于 R₂处的故障电流。在两种不同运行模式 下,R₂处流过的电流差异较大,传统保护方法会出 现误动或拒动的情况。

2 一种分散式自适应保护方案

2.1 整体保护方案

以图 1 中的母线 BC 段和母线 C 到 Load3 段为 例,根据 DG 的接入位置,对提出的继电保护方案进 行说明。以 DG 为中间点,母线 BC 段为上游区域, 母线 C 到 Load3 段为下游区域。下游区域由单端电 源供电,配置基于瞬时继电器的分散式保护法;对于 上游处母线 BC 段,配置改进的自适应过电流保护 法;对于母线 A 到 IBDG1 段,IBDG1 和主网分别在 馈线的两端,则在该段的保护装置处配置改进的自 适应过电流保护法。

2.2 基于瞬时继电器的分散式保护法的下游线路 保护方案

微电网 DG 下游线路可看成传统辐射状网络, DG 接入没有改变潮流方向,只改变了线路的电流 故障水平。为使微电网具有有效的保护性能,必须 对微电网进行监测,并根据微电网的突然变化更新 继电器的整定值。保护方案流程如图 2 所示。



图 2 保护方案流程

在该保护方案中,继电器利用通信获取微电网 的数据,对微电网的状态进行监测,并根据这些数据 的变化调整继电器的设置。使用瞬时方向过流继电 器,该保护装置动作电流值为

$$I_0 = I_f \times M_g + \sum_{i=1}^m (K \times I_d \times S_i)$$
(1)

式(1)由两组数据组成:第一组为固定数据,包括外网短路电流 I_{f} 、DG 的最大短路电流 I_{d} 和影响因子 K;第二组为微电网组件发送给相应继电器的电信数据,包括微电网的运行模式 M_{g} 和 DG 的状态 S_{i} 。微电网组件也将线路两端断路器的位置发送给

继电器。继电器使用这些信息来监控微电网结构, 当微电网结构发生任何变化时,继电器从内存中加 载合适的 I_d 和 K 在式(1)中使用。

式(1)中 M_g为微电网的运行模式,在并网模式时值为"1",在孤岛模式时值为"0"。只考虑配电网时,故障电流值为

$$I_{\rm f} = \frac{V_{\rm g}}{Z_{\rm g}} \tag{2}$$

式中:*V*_g为配电网电压;*Z*_g为配电网至故障点处的 等效阻抗值。由于重构微电网而产生的等效阻抗值 变化,使得每个结构中继电器的整定值不相同。随 着每个 DG 的开启或关闭,使用 GOOSE 消息将 DG 运行状态发送到微电网的所有组件。当 DG 开启 时,*S*_i取1;当 DG 关闭时 *S*_i取0。继电器通过接受 GOOSE 消息来识别 DG 状态的变化,并根据式(1)更 新保护设置,GOOSE 消息的设置在文献[12]中提出。

同步发电机的最大短路电流 *I*_d 可以为额定电流的倍数,见表 3^[13]。IBDG 用的是半导体开关,所以不能像同步发电机那样提供短路电流。

表 3 不同 DG 的最大短路电流

	主网	短路电	短路电流与额定电流之比			
DG 类型	王两 电压/kV	直接	变压器	电力电子	注释	
		连接	连接	希忤		
小型同步 发电机	0.4~33	5~8	3~7	_	额定功率 0.5~5 MW	
中型同步 发电机	11~132	5~6	3~5	—	额定功率 5~25 MW	
大型同步 发电机	132	—	2.5~4.5	—	额定功率大 于 25 MW	
燃料电池	0.3~33	—	—	1.0~1.2	—	

发生短路时, DG 对故障短路电流水平的贡献 值受微电网电压、DG 额定功率和与微电网的连接 方式的影响,可以认为这是该 DG (*I*_d)的最大短路 电流的倍数,表示为*k*,*k* 为 0~1 之间的参数。系数 *K* 为 DG 观测到的阻抗变化的影响,因此随着微电 网的重构,*K* 值会发生变化。阻抗的变化对 IBDG 电流没有影响,只有 DG 控制器才能改变 IBDG 电 流。因此 IBDG 不采用影响因子 *K*,其值为 1。保 护系统将通过计算多个 DG 对多个继电器的影响系 数来创建一个矩阵,矩阵中的每一个 *K* 值由式(3) 计算。

$$K_{mn} = \frac{I_{dmn}}{I_{1}} \tag{3}$$

$$I_{\rm dmn} = \frac{V_m}{Z \times x_{mn}} \tag{4}$$

式中: K_{mn} 为第 m 个 DG 对第 n 个继电器的影响系数;同理 I_{dmn} 为第 m 个 DG 对第 n 个继电器提供的故障电流值; V_m 为第 m 个 DG 的额定电压;Z 为单位长度线路的阻抗值; x_{mn} 为第 m 个 DG 与第 n 个继电器之间的距离。

在式(1)的基础上,DG的最大短路电流和影响 因子、外网短路电流已经脱机计算并存储在瞬时过 流继电器的存储器中。通过继电器实时监测微网的 运行状态,根据式(1)—式(4)可实现实时计算,更 新各保护装置的启动电流值。

2.3 基于改进自适应过电流保护的 DG 上游线路 保护方案

DG上游区域是双电源供电系统,潮流双向流动,此时传统的保护方法会使保护误动或拒动^[14]。

式(5)为传统过电流保护整定值计算方法。

$$I_{\rm s} = \frac{K_{\rm r}' E_{\varphi}}{Z_{\rm s} + Z_{\rm l}} K_{\rm d} \tag{5}$$

式中: K'_r 为可靠系数; E_{φ} 为系统的等效相电动势; Z_s 、 Z_1 分别为配电网侧、保护线路的等效阻抗; K_d 为故障类型系数,三相故障时 K_d 取1,两相故障时 K_d 取 $\sqrt{3}/2_{\circ}$

对上游部分来说,电网是双电源供电,故障发 生在 DG 上游时,需要判断保护背侧是否接入 DG^[15]。当保护背面无 DG 接入时,系统侧实际阻抗 等于计算阻抗,系统电势为 *E*_s,且 R₁和 R₁₋₁的整定 值不受 IBDG1 的影响。

 F_1 处发生两相故障时,分析 R_1 处的正序电压 U_2 和正序电流 I_2 间的关系,可得

$$U_2 - \frac{1}{2}E_s = \frac{1}{2}I_2(Z_s + Z_1)$$
(6)

此时可得 R₁的电流整定为

$$I_2 = \frac{2U_2 - E_s}{Z_1 + Z_s} K'_r K_d$$
(7)

F₁处发生不对称短路故障时,**R**₁处的正序电压 值 *U*₃ 和正序电流值 *I*₃ 满足式(8)。

$$U_3 = I_3 Z_1 \tag{8}$$

式中, Z_1 为故障点所在线路的全部阻抗。此时 R_1 的电流整定为

$$I_{3} = \frac{U_{3}}{Z_{1}} K'_{r} K_{d}$$
 (9)

R₂和 R₂₋₂的计算与上述不同,因为 DG 接在 保护背侧,主网和 DG 提供的电流都会流向故障 点。此时应考虑式(5)中主网侧的电动势与等 效阻抗的变化。当 F₁处发生故障时,等效电路 如图 3 所示。



图 3 F₁处发生故障时戴维南等效电路

图中:*E*_s为保护装置前侧的等效电压源;*E*_d为保护装置后侧的等效电压源:*Z*_j(*j*=1,2,...,*n*)为保护装置前侧电源到故障点处的等效阻抗;*Z*_d为保护装置后侧电源到故障点处的等效阻抗。短路点故障相电压为

$$U_{k} = \frac{U_{0}}{Z_{1} + Z_{2}} \times Z_{2} \tag{10}$$

式中: U_0 为短路点故障前的电压; Z_1 为正序等值阻抗; Z_2 为负序等值阻抗; Z_0 为零序等值阻抗。又因为

$$U_{0} = E_{d} \times \frac{Z_{j} + Z_{0} \times L_{1}}{Z_{j} + Z_{0} \times L + Z_{d}}$$
(11)

取 $Z_1 = Z_2$ 简化式(10),则根据等效电路,此时 $E_d \in R_2$ 处产生的电流为:

$$I_{k} = \frac{U_{k}}{Z_{j} + Z_{0} \times L_{1}} = \frac{E_{d}}{2(Z_{j} + Z_{0} \times L + Z_{d})} (12)$$
$$I_{s} = \left| \frac{K_{r}'E_{s}K_{d}}{Z_{j} + Z_{0} \times L} \right| - K_{t} \left| \frac{E_{d}}{2(Z_{j} + Z_{0} \times L + Z_{d})} \right|$$
(13)

式中,接地故障 K_i 取0,其余故障 K_i 取1。

3 算例仿真

3.1 DG 下游保护动作的仿真验证

系统参数与第 1.2 节所示相同。设 0.3 s 时母 线 C 到 Load3 段 F₂处(50%处)发生 AB 相两相短路 故障、ABC 三相短路故障,自动重合闸动作时间为 0.42 s,故障持续 0.05 s,总仿真时间 0.6 s。并网、离 网、并网(DG 未接入)运行模式下 R_{Load3}的操作电流及 流过 R_{Load3}处故障电流波形如图 4—图 6 所示。 观察图 4—图 6,在 0.3 s 时 a 点发生故障, R_{Load3} 检测到过电流, 随着故障电流增大, R_{Load3}的操作电 流减小, b 点 R_{Load3}的操作电流等于故障电流; b 点 后,故障电流大于 R_{Load3}的操作电流, 0.32 s 时继电保 护装置动作,将故障线路切除; 故障电流在 c 点达到 最大值, c 点后, R_{Load3}动作切除故障线路, 故障电流降 低至 d 点为 0;在 0.42 s(e 点), 成功切除线路故障。









图 6 并网(DG 未接入)运行 F_2 发生故障 R_{Load3} 动作

3.2 DG 上游保护动作的仿真验证

设 0.2 s 时母线 BC 段 F₁处发生 AB 相短路故障、ABC 三相短路故障,总仿真时间为 0.5 s,此时 R₂和 R₂₋₂的自适应过电流整定值、故障电流值如 图 7、图 8 所示。



观察图 7、图 8,在 0.2 s时,F₁处发生故障,故障 电流增大,保护装置整定电流值随着故障电流的增 大而减小,故障电流在达到最大值后开始减小直至 电流达到稳定,整定值也随之稳定。0.3 s时,系统 进入离网运行模式,故障电流急剧减小,整定值也随 之减小。可以看出,改进后的自适应过电流算法整 定值更稳定,不会因系统受扰动而产生动作错误。



3.3 不同区域、不同位置故障情况下保护装置动作 情况

0.2 s 故障发生,持续 0.3 s。其中 F3 位于 AB 段 50%处,F4 位于 BC 段 70%处,F5 位于母线 C 到 Load3 段 30%处,F6 位于母线 AD 段 10%处,F7 位 于母线 E 到 Load4 段 60%处,F8 位于母线 AF 段 70%处。由表 4 可看出所提保护方法在微电网不同 区域、不同位置故障情况下都能可靠动作。

衣 4 个问区域、个问位直反生网怕超始的	表 4	表 4	个回区域、	、个问位直反	生网相短路政
----------------------	-----	-----	-------	--------	--------

故障	故障	保护	整定值/	实测值/	保护装置
	位置	装置	kA	kA	动作情况
	F.	\mathbf{R}_1	2.3	3	动作
上游	13	R_{1-1}	2.25	2.87	40TF
区域	F_4	\mathbf{R}_2	0.85	1.22	动作
		R ₂₋₂	0.095	0.146	幼臣
下游区域	F_5	$\mathrm{R}_{\mathrm{Load3}}$	0.087	0.12	动作
相邻	F.	R_3	2.69	3.15	动作
	16	R ₃₋₃	2.65	2.94	401F
	F ₇	$\mathbf{R}_{\mathrm{Load4}}$	0.05	0.082	动作
	F	R_5	2.66	3.13	动作
	1.8	R_{5-5}	2.63	3.1	49JTF

4 结 论

上面将微电网分为上游区域和下游区域,提出 一种适用于微电网分区域采取不同措施的综合保护 方法。该方法具有如下特点:

1)采用分散式保护方案,由各馈线上的瞬时过 流继电器负责监控和保护微电网,避免集中式保护 中中央控制单元连接中断而造成的保护失败;

 2)改进的自适应过电流算法考虑了系统不同 微电源对故障电流的贡献,提高了保护定值的精度;

3)保护整定值具有自适应性,提高了保护的可 靠性和灵敏性。

参考文献

- [1] 黄宜平,马晓轩.微电网技术综述(英文)[J].电工技术 学报,2015,30(S1):320-328.
- [2] 方如举. 基于正序阻抗的微电网线路故障定位策略的 研究[J].可再生能源, 2016,34(12):1819-1825.
- [3] 陈彦翔,黄景光,丁婧.微电网自适应电流保护原理 完善及其新算法研究[J].电力系统保护与控制, 2017,45(22):22-27.
- [4] 吐努合·阿米提,崔双喜,王维庆,等.一种新型微
 网内部故障保护方案[J].电力电容器与无功补偿,
 2019,40(6):166-173.
- [5] SHARAF H M, ZEINELDIN H H, IIRAHIM D K, et al. A proposed coordination strategy for meshed distribution systems with DG considering user-defined characteristics of directional inverse time overcurrent relays [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015,65:49-58.
- [6] 邓超平,唐志军,张曦,等.一种新型的微网自适应过流保护方法[J].电力系统保护与控制,2015,43(4): 38-43.
- [7] 张孟琛,王宁,王美娟,等.基于多 Agent 的微电
 网自适应保护方案设计[J].燕山大学学报,2019,43(1):68-74.
- [8] 罗玲童,杨明玉,孟航. 微电网线路保护方案优化研 究[J]. 电测与仪表, 2019,56(2):47-51.
- [9] TEIXEIRA J C, FERREIRA R R, PAVANI A G, et al. Method for adaptive overcurrent protection of distribution systems with distributed synchronous generators [C]// 2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting, USA,2015.
- [10] 张建华,史佳琪,郑德化,等.微电网运行与控制 IEC标准进展与分析[J].电力系统自动化,2018, 42(24):1-14.

- [11] ARUNKUMARI T, INDRAGANDHI V. An overview of high voltage conversion ratio DC-DC converter configurations used in DC micro-grid architectures[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2017, 77: 670-687.
- [12] MALEKI M G, JAVADI H, KHEDERZADEH M, et al. Data exchange standardization in a microgrid protection scheme according to the IEC 61850 [C]//2015 Smart Grid Conference(SGC), Tehran, Iran, IEEE:2015.
- [13] GHOTBI-MALEKI M, JAVADI H, KHEDERZADEH M, et al. An adaptive and decentralized protection scheme for microgrid protection[C]//2016 Power System Protection and Control Conference (PSPC), 2016.
- [14] SHEN S F, DA L, WANG H F, et al. An adaptive protection scheme for distribution systems with DGs based on optimized Thevenin equivalent parameters

(上接第31页)

保护装置和变频运行后备保护装置,同步运行状态 下投入差动保护装置和同步运行后备保护装置。不 同状态下保护装置的切换、保护功能的投切、保护 CT 的切换均依靠控制系统根据机组运行状态自动进行, 机组保护相关定值按第 3.3 节提出的方法整定。

在春厂坝变速抽水蓄能示范电站 FSC-VSPSU 调 试期间,保护未发生误动事故,且两次正确动作切除 了故障:第一次是转子磁场偏移导致横差电流偏大, 横差保护动作切除了机组;第二次是机组控组策略问 题导致机端电压升高,过电压保护动作切除了机组。

表 4 春厂坝 FSC-VSPSU 保护配置

一次设备	保护配置		
	变压器差动保护装置		
35 kV 升压变压器	高压侧后备保护装置		
	低压侧后备保护装置		
	差动保护装置		
同步机组	变频运行后备保护装置		
	同步运行后备保护装置		

5 结 论

上面在分析 FSC-VSPSU 运行特性的基础上,提 出了 FSC-VSPSU 保护配置和整定方法,解决了 FSC-VSPSU 继电保护运行难题。所提出的方法运 用于国家重点研发计划"分布式光伏与梯级小水电 互补联合发电技术研究及应用示范"项目的春厂坝 变速抽水蓄能示范电站,保证了电站在试运行期间 的安全稳定。另外,受制于保护改造成本和技术升 estimation [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017,32(1):411-419.

[15] 井淳子.逆变器型 DG 接入配电网对的影响及对等研 究[D].西安:西安理工大学,2019.

作者简介:

糟伟红(1995),女,硕士,助理工程师,研究方向为可再 生能源并网技术;

祁晓笑(1980),女,硕士,高级工程师,研究方向为大电 网安全运行控制;

董雪涛(1988),男,硕士,工程师,研究方向为电力系统 规划、电力系统运行及电网安全分析等;

李德存(1981),男,高级工程师,主要从事电气试验和 电气基建调试工作;

职凯华(1997),男,硕士,主要研究方向为继电保护。

(收稿日期:2022-06-09)

级风险,所提出的保护配置和整定方法均是在现有 技术上的改进,下一步还需对 FSC-VSPSU 运行及故 障特性进行深入研究,提出更具针对性的保护配置 和整定方法。

参考文献

- [1] 畅欣.FSC 可变速抽水蓄能机组功率调节特性研究[D].北京:华北电力大学,2016.
- [2] 畅欣,韩民晓,郑超.全功率变流器可变速抽水蓄能机
 组的功率调节特性分析[J].电力建设,2016,37(4):
 91-97.
- [3] 史华勃,王渝红,滕予非,等.全功率变速抽水蓄能机组
 快速功率模式小信号建模[J].电力系统自动化,2022,
 46(4):162-169.
- [4] 戴理韬,高剑,黄守道,等.变速恒频水力发电技术及其 发展[J].电力系统自动化,2020,44(24):169-177.
- [5] 梁廷婷,王凯,陈俊,等.变速抽水蓄能机组继电保护方案研究[J].水电与抽水蓄能,2020,6(5):62-67.
- [6] 中国电力企业联合会.抽水蓄能发电电动机变压器组 继电保护装置技术条件:DL/T 2018—2019[S].北京: 中国电力出版社,2019.
- [7] 陈俊,王凯,袁江伟,等.大型抽水蓄能机组控制保护关 键技术研究进展[J].水电与抽水蓄能,2016,2(4):3-9.
- [8] 中国电力企业联合会.抽水蓄能电站发电电动机变压 器组继电保护整定计算技术规范:DL/T 2380—2021[S]. 北京:中国电力出版社,2022.

作者简介:

周文越(1989),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力 系统继电保护。 (收稿日期:2022-07-24)

±800 kV 雅砻江换流站 BP13 高压电容器不平衡 电流及过电压分析

刘 磊¹,李小鹏¹,张 纯¹,黄 宇²,张 曾²,张华杰¹,曾雪洋¹

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610041;

2. 国网四川省电力公司特高压直流中心,四川 成都 610041)

摘 要:滤波器的高压电容器是特高压直流输电系统中故障率相对较高的设备,通常配置不平衡保护来反映其内部 的故障情况。为进一步明确高压电容器内部故障工况与不平衡电流、过电压等外部故障表现的量化关系,为实际工 程不平衡保护的配置与优化提供理论支撑,文中以±800 kV 雅砻江换流站 BP13 高压电容器为研究对象,考虑高压电 容器内部部分电容单元断开、电容单元内部部分电容元件断开两类典型故障,分析推导了不平衡电流与故障单元/元件 个数的对应关系,并给出了电容单元故障后高压电容器不同位置的过电压表达式。基于 PSCAD/EMTDC 仿真平台验 证了理论推导的正确性,明确了可以导致现有三段不平衡保护动作的具体故障工况。

关键词:直流输电;直流滤波器;不平衡电流;过电压

中图分类号:TM 732 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2023)02-0059-05 DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230210

Analysis of Unbalance Current and Overvoltage of BP13 High-voltage Capacitor in ±800 kV Yalongjiang Converter Station

LIU Lei¹, LI Xiaopeng¹, ZHANG Chun¹, HUANG Yu², ZHANG Zeng², ZHANG Huajie¹, ZENG Xueyang¹ (1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;2. State Grid Sichuan Electric Power UHVDC Center, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract:High-voltage capacitor of filter is a device with relatively high failure rate in UHVDC transmission syste, and it is usually equipped with unbalance protection to reflect its internal fault. In order to further clarify the quantitative relationship between internal fault conditions and external fault performance such as unbalanced current and overvoltage, and provide theoretical support for the configuration and optimization of unbalanced protection in practical engineering, BP13 high-voltage capacitor of ±800 kV Yalongjiang converter station is taken as the research object. Considering two typical faults, the partial capacitor unit disconnection and the partial capacitor element disconnection in capacitor unit, the corresponding relationship between the unbalance current and the number of faulty units/components is analyzed and derived, and the expressions of overvoltage at different positions of high-voltage capacitor after the capacitor unit fault are given. Based on PSCAD/EMTDC simulation platform, the correctness of theoretical derivation is verified. Finally, the specific fault conditions that can lead to the existing three-section unbalanced protection action are identified.

Key words: HVDC transmission; DC filter; unbalanced current; overvoltage

0 引 言

交/直流滤波器是特高压直流输电工程的关键

基金项目:中国博士后科学基金项目(2022MD713744);国网四川省 电力公司科技项目(B3199722000k) 设备,起到了滤除谐波、补偿无功功率等作用^[1]。 在滤波器结构中,高压电容器是最重要的组成部分, 它不仅承担着交流母线的工频压降或者直流线路的 直流压降,还承担大部分的谐波压降。实际运行经 验表明,高压电容器属于较易损坏的设备,且一但其 内部有电容元件故障,容易导致相邻元件过电压,进 而引发雪崩效应,威胁直流输电系统运行安全^[2-4]。

现有工程的高压电容器通常采用 H 型接线,通 过电容器不平衡保护来检测内部元件故障^[5-7]。然 而,不平衡保护的定值选取原则相对单一,多依赖设 备厂家给定。为实现可根据实际情况对不平衡保护 定值进行灵活配置或优化,需要首先掌握高压电容 器各类内部故障工况与不平衡电流、电容过电压等 的精确对应关系。下面以±800 kV 雅砻江换流站 BP13 高压电容器为对象,详细分析推导了高压电容 器内部部分电容单元断开、电容单元内部部分电容 元件断开下的不平衡电流表达式;研究了电容单元 故障后高压电容器不同位置的过电压情况;最后,仿 真验证了理论推导的正确性,并明确了不平衡保护 三段定值分别对应的故障条件。研究结论有望为后 续实际工程高压电容器故障分析、保护定值优化等 提供理论支撑和技术参考。

1 高压电容器结构及不平衡保护

1.1 高压电容器结构

高压电容器是 BP13 交流滤波器的重要组成部 分,其结构如图 1 所示。为便于检测内部电容故障, 高压电容器整体通常采用 H 型接线结构,包含 4 个 桥臂,每个桥臂由多个电容单元串并联构成。在每 个电容单元中,又包含多个电容元件组成串并联结 构。电容元件串联的内熔丝可在元件被击穿时熔断 该支路,实现对元件的保护,此外利用与电容元件并 联的均压电阻可避免局部电压过高。



图 1 BP13 交流滤波器高压电容器结构

1.2 不平衡保护

系统正常运行条件下,高压电容器整体结构对称,H桥中点无电流流过;而当某桥臂上有电容损坏

时,高压电容器结构不再对称,H桥中点流过不平衡 电流,且不平衡电流随着故障严重程度的增大而增 大。根据此原理,现有直流工程的滤波器通常配置 有高压电容器不平衡保护。将不平衡电流记为 *i*_{ub}, 流过滤波器整体的穿越电流记为 *i*_{uo},稳态不平衡保 护动作方程为:

$$i_{\rm ub} > i_{\rm ubqd}$$
 (1)

$$\frac{i_{\rm ub}}{i_{\rm tro}} > k_{\rm ubzd} \tag{2}$$

式中:*i*_{ubqd}为不平衡启动定值;*k*_{ubzd}为不平衡比例系 数定值。式(1)为启动方程,条件满足时保护逻辑 判断经过一个展宽后若不平衡电流依然大于启动定 值,则满足启动条件,启动后开放出口正电源,同时 开放保护板中的不平衡保护元件;式(2)为动作方 程,当任一相满足启动条件且满足动作方程时,稳态 不平衡保护元件动作。

稳态不平衡保护包括不平衡 I 段(报警段)和 不平衡Ⅲ段动作。当满足式(1)和式(2)时,经过 设定的延时后,装置动作于报警或跳闸。暂态不平 衡保护包括不平衡 II 段跳闸报警和不平衡 II 段保护 动作。雅砻江换流站 5631 滤波器 BP13 高压电容 器的不平衡保护 I、II、Ⅲ段比例系数定值分别为 0.039 7%、0.092 3%、0.118 8%。

2 高压电容器不平衡电流分析

针对高压电容器 H 桥部分电容单元断开、某电 容单元内部部分电容元件断开两类典型故障工况, 分别详细推导故障条件与不平衡电流的对应关系。

2.1 部分电容器单元断开

将 BP13 滤波器的高压电容器等效为如图 2 的 电路结构,H 桥 4 个桥臂的等效电容依次为 $C_1 \ C_2 \ C_3 \ C_4$;流过 4 个桥臂的电流依次为 $i_1 \ i_2 \ i_3 \ i_4$;不平 衡电流为 i_{ub} ;滤波器穿越电流为 i_{uro} 。



图 2 高压电容器等效电路结构

依据图 2,不平衡电流与穿越电流的比值为

$$\frac{i_{\rm ub}}{i_{\rm tro}} = \frac{i_1 - i_2}{i_{\rm tro}}$$
 (3)

根据电路原理,*i*1、*i*2为

$$i_1 = \frac{C_1 i_{\rm tro}}{C_1 + C_3} \tag{4}$$

$$i_2 = \frac{C_2 i_{\rm tro}}{C_2 + C_4} \tag{5}$$

整理式(3)-式(5),可得

$$\frac{i_{\rm ub}}{i_{\rm tro}} = \frac{C_1 C_4 - C_2 C_3}{(C_1 + C_3)(C_2 + C_4)}$$
(6)

可以看出在正常运行工况下,4个桥臂电容值 相等,不平衡电流为0。

现假设左上桥臂部分电容单元发生故障,此时 $C_1 = C_f C_2 = C_3 = C_4 = C$,则不平衡电流与穿越电流的 比值改变为

$$\frac{i_{\rm ub}}{i_{\rm rm}} = \frac{C_{\rm f} - C}{2(C_{\rm f} + C)}$$
(7)

式中,电容值 *C* 已知,故障桥臂电容值 *C*_f 由故障条件决定,下面详细推导分析。

为给出普遍性结论,假设单个桥臂的电容单元 串并联情况为:m 串 n 并(即 m 行 n 列)。假设每个 电容单元的电容值为 C₀,则正常工况下 4 个桥臂的 电容值等效为

$$C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = C = nC_0/m$$
(8)

结合实际运行情况,考虑一种典型的故障工况: 桥臂上某一电容单元发生故障后断开,并进一步因 过电压使其并联的电容单元故障并断开,最终导致 桥臂上某一行有 x 个电容单元断开。此时整个桥臂 等效为"m-1 行 n 列"和"1 行 n-x 列"两个电容组 合串联,则 C_f 为

$$C_{t} = \frac{\left[nC_{0}/(m-1)\right]\left[(n-x)C_{0}\right]}{nC_{0}/(m-1) + (n-x)C_{0}} = \frac{n(n-x)C_{0}}{n + (n-x)(m-1)}$$
(9)

将式(8)、式(9)代入式(7)中,整理可得

$$\frac{i_{\rm ub}}{i_{\rm tro}} = \frac{-x}{2x + 4mn - 4mx}$$
(10)

可以看出,不平衡电流与穿越电流的比值只与电容排布方式、故障条件有关。

2.2 某电容器单元内部部分电容元件断开

雅砻江换流站 BP13 滤波器的高压电容器 m 取

30、n取2,代入式(10)中可知,一只电容单元完 全断开后不平衡电流与穿越电流比值可以达到 8.197%,远超不平衡保护的动作阈值,故进一步研 究一个电容单元未完全断开(内部部分电容元件断 开)的工况。

假设桥臂上只有一只电容单元内部部分电容发 生故障断开,导致电容单元的等效电容由 C₀ 变为 *kC*₀,则故障桥臂电容可由将式(9)中 *x* 替换为 1-*k* 得到

$$C_{\rm f} = \frac{n(n-1+k)}{n+(n-1+k)(m-1)}C_0 \qquad (11)$$

同理,不平衡电流与穿越电流比值为

$$\frac{i_{\rm ub}}{i_{\rm tro}} = \frac{k-1}{4mn + (2-4m)(1-k)}$$
(12)

将 m=30、n=2 代入后整理式(12) 可得

$$\left|\frac{i_{\rm ub}}{i_{\rm tro}}\right| = \frac{|k-1|}{118k+122} \tag{13}$$

式中,由于雅砻江换流站 BP13 高压电容器单支电 容单元内部采用 14 并 4 串的电容元件结构, *k* 的范 围取[1/14, 1]。*k*取 1/14 意味着 4 串电容元件都 只剩一个完好,若再有一个断开则 *k* 直接降为 0,即 整个电容单元都断开。

综合以上分析,得到电容单元内部故障后剩余 电容与不平衡电流的关系,如图 3 所示。可以看出, 剩余电容越小,不平衡电流则越大,且不平衡电流对 于剩余电容的变化越敏感。在 *k*=1/14,即电容单元 未完全断开的最严重工况下,不平衡电流与穿越电 流的比值为 7.12%;而在仅有一个电容元件断开,即 电容单元未完全断开的最轻微工况下,*k* 为 0.981, 此时不平衡电流与穿越电流的比值为 0.008%。



3 高压电容器过电压分析

在明确高压电容器故障与不平衡电流之间关系 的基础上,进一步推导电容单元故障后电容器不同 位置的过电压情况。

假设高压电容器左上桥臂某一行有 x 个电容单 元断开,参考式(9)可知,故障后左上桥臂电容 C₁减 小,此时整个上桥臂承受电压增大。

为便于分析,忽略故障后高压电容器整体电压的变化,设其值为 U_c,故障前上桥臂电压 U_{up}为 0.5U_c,故障后上桥臂电压 U_{up}可以表示为

$$U'_{\rm up} = \frac{2C}{C_{\rm f} + 3C} U_{\rm c}$$
(14)

将式(8)、式(9)代入式(14),整理可得

$$U'_{\rm up} = \frac{2mn - 2mx + 2x}{4mn - 4mx + 3x} U_{\rm c}$$
(15)

即上桥臂整体承受的过电压倍数为

$$P'_{\rm up} = \frac{U'_{\rm up}}{U_{\rm up}} = \frac{4mn - 4mx + 4x}{4mn - 4mx + 3x}$$
(16)

对于非故障上桥臂(右上桥臂),桥臂内部的电 容完好,电压在各个电容单元行上均分,因此 P'up同 时也是桥臂内部电容单元所承受的过电压倍数。而 对于故障上桥臂(左上桥臂),由于故障行与非故障 行电压不均分,还需进一步考虑桥臂内部的电压分 配关系。

桥臂内部故障行承受的过电压倍数为

$$P'_{\rm f} = \frac{4mn - 4mx + 4x}{4mn - 4mx + 3x} \cdot \left[1 + \frac{(m-1)x}{m(n-x) + x}\right]$$
(17)

桥臂内部非故障行承受的过电压倍数为

$$P'_{\rm uf} = \frac{4mn - 4mx + 4x}{4mn - 4mx + 3x} \cdot \left[1 - \frac{x}{m(n-x) + x}\right]$$
(18)

从式(17)和式(18)可以看出,相乘得到故障行 过电压倍数 P'_f的两个系数均大于1,而相乘得到非 故障行过电压倍数 P'_{uf}的两个系数一个大于1、一个 小于1。这说明了故障行必然承受过电压、非故障行 承受过电压与否受电容排布方式和故障条件的影响。

综上可知,滤波器部分电容单元故障后断开可 能引起其他正常电容单元过电压,且过电压倍数同 样只与桥臂电容排布方式、故障条件有关。过电压 应主要考虑两个方面:1)某桥臂某行中有电容单元断 开后,会导致该行正常电容单元承受过电压;2)某 桥臂某行中有电容单元断开后,会导致与该桥臂并 联的桥臂整体承受过电压。相比之下,第一种过电 压情况更为严重。

4 仿真分析

为验证所做推导并进一步开展仿真分析,依据 ±800 kV 雅砻江换流站交流滤波器高压电容器参数,在 PSCAD/EMTDC 平台搭建 BP13 滤波器模型。 高压电容器桥臂采用电容单元 2 并 30 串的结构,电 容单元内部采用电容元件 14 并 4 串的结构。

4.1 不平衡电流理论推导仿真验证

对于雅砻江换流站高压电容器结构而言,考虑 某行有电容单元完全断开时,断开的电容单元个数 可以取1或者2,对这两种故障工况下的不平衡电 流计算值、仿真值进行了对比。另外,若电容单元未 完全断开,而是内部仅有部分电容元件断开时,故障 条件更为复杂。考虑两种典型工况:1)内部4 串电 容元件均只剩一个完好,即电容单元未完全断开的 最严重工况,此时等效电容系数 k 为 1/14;2)内部 仅有一个电容元件断开,即电容单元未完全断开的 最轻微工况,此时等效电容系数 k 为 0.981。

表1给出了上述4种工况下的理论计算值与仿 真值对比结果,其中 *i*_{ub}/*i*_{tro}表示不平衡电流与穿越 电流的比值。可以看出,仿真值与计算值基本一致, 验证了不平衡电流理论推导的正确性。

表1 不平衡电流仿真结果与计算值对比

电容单元断 开个数	k	i _{ub} /i _{tro} 计算值/%	i _{ub} /i _{tro} 仿真值/%
2	—	50	50
1	—	8.197	8.159
0	1/14	7.12	7.119
0	0.981	0.00 799	0.00 781

4.2 电容过电压理论推导仿真验证

针对滤波器桥臂电容单元断开个数取1、2两种 故障工况,分别对比了桥臂整体过电压倍数 P'_{up}、桥 臂内部故障行过电压倍数 P'_f、桥臂内部非故障行过 电压倍数 P'uf的计算值与仿真值,结果如表 2 所示。可以看出,仿真值与计算值基本一致,验证了过电压理论推导的正确性。

电容单元 断开个数	位置	过电压倍数 计算值	过电压倍数 仿真值
	$P'_{ m up}$	1.333 3	1.330 7
2	$P_{ m f}'$	40.000 0	39.928 1
	$P_{ m uf}'$	0	0
	$P'_{\rm up}$	1.008 1	1.008 0
1	$P_{ m f}'$	1.951 2	1.951 4
	$P'_{ m uf}$	0.975 6	0.975 6

表 2 过电压仿真结果与计算值对比

4.3 不平衡保护动作工况仿真分析

由上面分析计算可知,在1个电容单元完全断 开的工况下,不平衡电流与穿越电流比值可以达到 8.197%,远超不平衡保护的动作阈值。为此,基于 仿真模型进一步从不平衡保护的实际动作阈值出 发,反推可以导致相应不平衡电流的故障条件以及 过电压情况。

考虑单个电容单元内部某行有多个电容元件断 开的典型故障工况,不平衡保护 I 段、II 段、II 段分 别对应的故障工况如表 3 所示。可以看出,若某个 电容单元内部某行的 14 个电容元件中有 8 个断开, 其他行完好,则不平衡电流可以达到不平衡保护三 段定值。此时该电容单元内部故障电容元件所在行 承担 1.992 7 倍过电压(由其他完好电容元件承 担),该过电压远大于故障电容单元整体的所在故 障行承受的过电压。

衣う	个平衡保护二段走值对应的故障上沉	

不平衡保护 动作情况	电容元件 断开个数	$P_{ m f}'$	内部故障行过 电压倍数
I段 (<i>i</i> _{ub} / <i>i</i> _{tro} =0.039 7%)	4	1.046 4	1.331 3
II 段 (i _{ub} /i _{tro} = 0.092 3%)	7	1.107 7	1.772 9
Ⅲ段 (i _{ub} /i _{tro} =0.118 8%)	8	1.138 8	1.992 7

5 结 论

针对±800 kV 雅砻江换流站交流滤波器 BP13 高压电容器的不平衡电流及过电压开展研究,以期 为高压电容器故障分析、保护定值优化等提供理论 支撑和技术参考。主要结论如下:

1)针对高压电容器部分电容单元断开、某电容 单元内部部分电容元件断开两类典型故障工况,分 别推导了故障条件与不平衡电流的对应关系。结果 表明,不平衡电流与穿越电流的比值只与电容排布 方式、故障条件有关。

2) 推导了部分电容单元断开后高压电容器不同位置的过电压情况,其中,故障行的非故障电容单 元承受的过电压最为严重。过电压倍数同样只与电 容排布方式、故障条件有关。

3) 基于 PSCAD/EMTDC 仿真平台验证了所做 分析推导的正确性,并进一步给出了雅砻江换流站 BP13 高压电容器不平衡保护三段定值分别对应的 故障条件及过电压情况。

参考文献

- [1] 林圣,牟大林,刘磊,等.基于特征谐波阻抗比值的 HVDC 直流滤波器高压电容器接地故障保护方案[J].
 中国电机工程学报,2019,39(22):6617-6626.
- [2] 杨勇,张静,杨智,等.特高压直流输电系统交流滤波器
 电容元件击穿故障[J].电力电容器与无功补偿,2018, 39(4):1-6.
- [3] 田邑安,张万荣,行鹏,等.±800 kV 特高压直流工程直 流滤波器设计研究[J].高压电器,2012,48(10):73-75.
- [4] 张万荣,黄莹,荀锐锋,等.±800 kV 特高压直流工程直流滤波器设计关键问题研究[J].南方电网技术,2009, 3(6):35-39.
- [5] 梅念,李银红,陈东,等.HVDC 工程交/直流滤波器高 压电容器不平衡保护的判据研究[J].电网技术,2011, 35(12):229-234.
- [6] 黄金海,冯雷,李曼丽,等.糯扎渡送电广东特高压直流 输电工程直流滤波器 C1 不平衡保护研究[J].电力系 统保护与控制,2012,40(15):46-51.
- [7] 库晓斐,蔡泽祥,徐敏.高压直流输电系统交流滤波器 故障与保护分析[J].电力系统保护与控制,2012, 40(19):150-155.

作者简介:

刘 磊(1993),男,博士,工程师,主要研究方向为特高 压直流输电控制与保护。

(收稿日期:2022-08-10)

基于避雷器尾端电流监测的电力系统过电压反演

胡思宇¹,黄佐流²,刘守豹¹,郭海霞²,王世 ll^2 ,张 $=^2$

(1. 大唐水电科学技术研究院有限公司,广西南宁 530007;

2. 大唐观音岩水电开发有限公司,云南昆明 650011)

摘 要:避雷器是电力系统进行过电压防治的主要设备,现有避雷器监测装置可以实现电流电压的实时监测,但缺少 进一步的数据分析功能,且大多数在线监测设备使用电压互感器在线监测过电压,对一次设备性能存在一定影响。 文中设计了一种基于避雷器尾端电流监测来进行过电压分析的装置,该装置利用电流互感器进行宽频尾端电流采 集,并利用所设计的内置高频采样芯片及智能程序的现地边缘计算单元对采集结果进行首端电压的智能反演,实现 对过电压过程的数据分析,为过电压防治提供依据。

关键词:过电压;尾端电流;快速傅里叶变换;避雷器

中图分类号:TM 86 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2023)02-0064-06

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230211

Overvoltage Inversion of Power System Based on Tail-end Current Monitoring of Lightning Arrester

HU Siyu¹, HUANG Zuoliu², LIU Shoubao¹, GUO Haixia², WANG Shixu², ZHANG Feng²

Datang Hydropower Science & Technology Research Institute Co., Ltd., Nanning 530007, Guangxi, China;
 Datang Guanyinyan Hydropower Development Co., Ltd., Kunming 650011, Yunan, China)

Abstract:Lightning arrester is the main equipment for overvoltage prevention and control in power systems. The existing monitoring devices for lightning arrester can realize real-time monitoring of current and voltage, but lack further data analysis functions, and most online monitoring devices use voltage transformers to monitor overvoltage online, which has a certain impact on the performance of primary equipment. A device for overvoltage analysis based on current monitoring at tail end of lightning arrester is designed. It uses the current transformer to collect the current at the end of broadband and designs a local edge computing unit with a built-in high-frequency sampling chip and an intelligent program. And the unit realizes the intelligent inversion of the head-end voltage based on the tail-end current monitoring results and then realizes the data analysis of overvoltage process, which provides the basis for the overvoltage prevention and control.

Key words: overvoltage; tail-end current; fast Fourier transform; lightning arrester

0 引 言

避雷器是保护电气设备免受高瞬态过电压妨害 并限制续流时间、续流幅值的一种电器,它的出现有 效改善了变电所的安全和平稳运行^[1-5]。避雷器作 为有效限制电力系统工作过电压、提高电力系统正 常运行的安全保护设备,对其进行在线监测及数据 分析格外重要。

现有避雷器监测装置可以对正常运行下的泄漏 电流进行实时监测,也可对过电压作用时刻进行记 录^[6],但尚未深入挖掘冲击电流幅值及波形各项参 数中蕴含的丰富信息量。目前过电压在线监测装置 获取过电压信号的方法主要有电容/阻容分压器、电 压/电流互感器、末屏电压传感器和非接触式电压传 感器等^[7-12]。电压互感器在过电压的高频信号作用

基金项目:国家能源局2021年度能源领域首台(套)重大技术装备 项目(000019705/2022-00042);西藏玉曲河扎拉水电站 重点项目(500 MW冲击式水轮发电机组,项目编号02)

下呈现非线性和频变效应,二次侧提取的电压信号存在失真的情况,无法直接使用^[13-17]。其他的过电压在线监测方法均需要在系统一次侧另外安装电压互感器,对一次设备的绝缘性能存在影响。

下面设计了一种基于尾端电流监测分析过电压 的装置。该装置利用大电流电流互感器(current transformer,CT)与小电流 CT 相结合的方式来测量 避雷器尾端电流,具有良好宽频特性;采用高频采样 芯片对电流电压波形进行不失真记录。在该装置的 现地边缘计算单元内置了基于尾端电流反演首端电 压的过电压智能分析程序:利用有限元场分析法^[15] 得到缩比试验分布参数,并利用电磁暂态分析软件 ATP-EMTP^[18-19]构建了缩比试验电磁暂态仿真模 型;通过对各种幅值和频率下过电压作用时避雷器尾 端电流对应波形的仿真计算,确定避雷器首端电压频 率-首端电压幅值-尾端电流波形的对应关系库;并利 用快速傅里叶变换方法,实现基于尾端电流对其相应 首端电压的反演,进而实现过电压过程的数据分析。

1 避雷器尾端电流监测装置工作原理

1.1 装置组成

过电压参数监测的难点主要体现在不同原因造成的过电压,其频率范围差异较大、过电压幅值差异 大造成的尾端电流差异极大以及不同类型电压叠加 的问题^[20-23]。

一般 CT 正常运行时的尾端电流的幅值为毫安级别; 雷电过电压时, 尾端电流的幅值接近千安级别。这就要求避雷器尾端电流监测装置要有较大量程, 能够对较小电流和大电流都具灵敏性^[24-25]。

所设计装置由尾端电流监测、现地边缘计算单 元两部分组成,如图1所示。



图 1 避雷器尾端电流监测装置组成及功能

电流监测部分采用小电流 CT 与大电流高频电流互感器(high frequency current transformer, HFCT)

组合工作的方式来对避雷器的尾端电流进行采集, 详细信息见表1。

表1 两种互感器详细信息

小电流 CT	大电流 HFCT
0.1 mA~1 A (最大 10 A)	1 A~20 kA
40 Hz~2 kHz	1~30 MHz
80 mm×26 mm	外径 144 mm; 内孔径 54 mm; 厚度 37 mm
2芯屏蔽电缆,电缆规格 2×1.0 mm,长度 30 m	同轴屏蔽电缆, 长度 30 m
系统接地线(排)	系统接地线(排)
接地线从传感器 内孔穿心式,传感 器带开闭卡扣	接地线从传感器 内孔穿心式,传感器 带开闭卡扣
IP65	IP65
	小电流 CT 0.1 mA~1 A (最大 10 A) 40 Hz~2 kHz 80 mm×26 mm 2 芯屏蔽电缆,电缆规格 2×1.0 mm,长度 30 m 系统接地线(排) 接地线从传感器 内孔穿心式,传感 器带开闭卡扣 IP65

将两种型号 CT 采集到的电流进行合成后,便 可得到避雷器尾端泄露电流。

在现地边缘计算单元中内置了高频采样芯片, 其采样速率为100 MS/s,此部分用于对电流波形的 高频采集,并对冲击电流的数据及波形进行存储。 正常工作情况下,现地边缘计算单元只记录尾端泄 露电流的有效值;当过电压作用时,边缘计算单元将 对波形进行不失真存储,并通过内置的智能识别程 序,基于监测到的尾端电流反演避雷器首端电压。

1.2 基于尾端电流的过电压过程分析

在现地边缘计算单元中内置了智能识别程序, 通过此程序,可实现基于尾端电流的首端电压反演, 进而对过电压进行分析。整个智能识别程序流程如 图 2 所示。



图 2 基于尾端电流监测的首端电压智能反演流程

整个流程详述如下:

1)建立与实际试验具有几何相似、物理相似和 动态行为相似性的缩比试验模型^[26],并利用现场测 试的方式,获取尾端电流及对应首端电压样本库。

2)根据缩比试验模型,利用有限元场分析方

法,建立避雷器电场及磁场的有限元场分析模型。 基于已知避雷器的材料相对介电常数、电阻率等条件,仿真得到避雷器电位分布、相关金属部件电容分 布及避雷器电感等分布参数。

3)将有限元场分析结果作为参数,在电磁暂态 仿真软件 ATP-EMTP 中建立缩比试验电磁暂态仿 真模型。对各种幅值和频率下过电压作用时避雷器 尾端电流对应波形进行仿真计算,确定避雷器"首 端电压频率-首端电压幅值-尾端电流波形"的对应 关系库。

4)成功建立关系库后,依据快速傅里叶变换法 (fast Fourier transform, FFT)^[27]实现尾端电流 I(t)波形从时域到频域的转换,分解得到其不同频率的 冲击电流分量 I(k),过程如下^[28-32]:

首先,将非周期性的连续尾端电流波形信号 I(t)进行傅里叶变换,即

$$I(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} I(t) e^{-j\omega t} dt \qquad (1)$$

式中, $I(\omega)$ 为I(t)的连续频谱,在实际过程中,其结 果应为I(t)的离散信号I(nT)。因此,使用I(nT)来计算I(t)的频谱。有限长离散信号I(n)(n=0, 1, ..., N-1)的N点离散傅里叶变换(discrete Fourier transform, DFT)I(k)如式(2)、式(3)所示。

$$I(k) = \sum_{n=0}^{N-1} I(n) W_N^{kn}$$
(2)

$$W_N = e^{-j\frac{\pi}{N}} \tag{3}$$

式中:k=0,1,...,N-1; W_N 为旋转因子;N为 DFT 的 变换区间长度。通过 FFT,将 I(n)分解为两个序列 之和,即

$$I(n) = I_1(n) + I_2(n)$$
(4)

式中: $I_1(n)$ 为偶数序列; $I_2(n)$ 为奇数序列。 $I_1(n)$ 与 $I_2(n)$ 的长度都为N/2,则

$$I(k) = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} I_1(n) W_N^{2kn} + \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} I_2(n) W_N^{(2n+1)k}$$
(5)

所以

$$I(k) = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} I_1(n) W_N^{2kn} + W_N^k \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} I_2(n) W_N^{2kn}$$
(6)

由于

$$W_N^{2kn} = e^{-j\frac{2\pi}{N}2kn} = e^{-j\frac{2\pi}{N/2}kn} = W_{N/2}^{kn}$$
(7)

则有

$$I(k) = \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} I_1(n) W_{N/2}^{kn} + W_N^k \sum_{n=0}^{\frac{N}{2}-1} I_2(n) W_{N/2}^{kn} = I_1(k) + W_N^k I_2(k)$$
(8)

式中: $I_1(k)$ 和 $I_2(k)$ 分别为 $I_1(n)$ 和 $I_2(n)$ 的N/2点 DFT; $W_{N/2}$ 为旋转因子。由于 $I_1(k)$ 和 $I_2(k)$ 都以N/2为周期,因此I(k)又可表示为:

$$I(k) = I_1(k) + W_N^k I_2(k)$$
(9)

$$I(k + \frac{N}{2}) = I_1(k) - W_N^k I_2(k)$$
(10)

式中, $k=0,1,\cdots,N/2-1_{\circ}$

5)在成功通过快速傅里叶变换得到尾端电流 *I*(*t*)的不同频率冲击电流*I*(*k*)后,利用智能识别方 法,在避雷器"首端电压频率-首端电压幅值-尾端 电流波形"的对应关系库中查找不同频率冲击电流 *I*(*k*)对应的首端电压*U*(*k*),通过合成查找到的所 有*U*(*k*),成功反演真实首端电压波形*U*(*t*)。

6)通过分析反演得到的首端电压,获取波头时间、波尾时间、幅值等关键参数,从而对整个过电压 过程进行分析。

2 避雷器尾端电流监测装置的应用

2.1 现场安装及仿真模型建立

在某水电厂开展了避雷器尾端电流监测系统的 现场试点应用。在 500 kV GIS 升压站主变压器高 压侧罐式避雷器(A、B、C 三相)上进行试点安装,避 雷器尾端电流监测装置现场安装情况图 3 所示。



图 3 避雷器尾端电流监测装置现场安装

该水电厂采用的避雷器为 500 kV GIS SF₆ 罐式 无间隙金属氧化物避雷器,型号为 Y10WF1-420/ 960,结构如图 4 所示。

依据图 4 所示的罐式避雷器结构,在电磁暂态 软件 ATP-EMTP 中构建该避雷器的分布参数电磁 暂态模型,如图 5 所示。由于 500 kV GIS 管线及避 雷器采用单相封闭结构,因此相间没有电容、电感的 耦合作用。

基于 500 kV GIS 断路器罐式避雷器电磁暂态 仿真模型,利用 FFT 得到不同频率冲击电流 *I*(*k*)对 应的电压*U*(*k*),建立了"避雷器首端电压频率-首



图 4 500 kV GIS 断路器罐式避雷器结构





端电压幅值-尾端电流波形"的对应关系库。下面 将通过某次试验-仿真结果的对应关系说明建立此 对应关系库的可行性。

对避雷器 A、B、C 三相在分别施加 1.2/50 μs 的 典型雷电波形后,测得的典型首端电压、尾端电流波 形如图 6 所示。将图 6 试验所使用的首端电压作为 激励施加在仿真模型中,得到的首端电压与尾端电 流波形如图 7 所示。由图 6 和图 7 可知,仿真计算 结果与实验测试结果具有较好的一致性。这表明, 通过电磁暂态仿真模型建立各种典型电压作用下避 雷器"首端电压频率-首端电压幅值-尾端电流波 形"的对应关系库是可行的。

最后,合成所有 U(k)便可计算出尾端电流对 应的首端电压 U(t)。

通过图2所示流程便可依托尾端电流监测单元、 现地边缘计算单元,对波形进行不失真存储,并通过 智能识别程序实现避雷器首端电压的反演还原。 该装置监测到的正常情况下的避雷器尾端泄漏 电流显示界面如图 8 所示。





图 7 仿真模型所得的电压、电流波形



图 8 正常情况下避雷器尾端泄漏电流显示界面

2.2 现场监测实例

下面将详细介绍避雷器尾端电流监测装置在现场应用中的两种实际分析情况。

1)GIS 母线合闸过电压

在一次水电厂 GIS 对 II 母线进行充电的过程 中,变压器 B 相避雷器尾端电流监测到冲击电流,波 形如图 9(a)和图 9(b)所示,其中电流幅值为-60 A。 反推得到冲击电压幅值为-691 kV,波头时间为 80 ns,如图 9(c)所示。该装置通过分析数据及波 形,识别出此次过电压具有典型的快速暂态过电压 (very fast transient overvoltage, VFTO)特性^[33], VFTO 不仅会影响到 GIS 设备本身运行的可靠性, 而且会对 设备的绝缘性能造成很大的威胁。虽然该电压幅值 未超过 500 kV 高压设备 1550 kV 的雷电过电压耐受 值,但仍对设备有一定影响。该装置的成功分析及预 警, 可为一线生产人员提供检修指导, 防患于未然。



2) 雷电过电压

在雷雨天气情况下,在 A 相避雷器尾端监测到 冲击电流幅值为 268 A,如图 10(a)、图 10(b)所示, 通过装置反演推算得到冲击电压幅值为 695 kV,波头 时间为 19 μs,如图 10(c)所示。避雷器尾端电流监 测装置分析得知,该波形具有典型的雷电侵入波过 电压特点,其电压幅值未超过 500 kV 高压设备 1550 kV 的雷电过电压耐受值。此次成功监测到了 雷电过电压,并对其过电压水平进行了反演推算,可





由上面两个实例可看出,所设计的避雷器尾端 电流监测装置可以准确对 VFTO、雷电过电压等有 效地进行尾端电流的监测、首端电压的反演以及过 电压的数据分析等,验证了利用设计装置实施过电 压在线监测及数据分析的可行性,对提高过电压防

3 结 论

治具有重要的理论和实际价值。

上面设计了一种基于尾端电流对过电压进行反 演及数据分析的装置,该装置通过在避雷器尾端安 装全量程电流高频采集传感器,可以方便、安全、可 靠地实现对避雷器动作情况和动作电流的采集;并
在现地边缘计算单元中内置了基于快速傅里叶变换 方法的智能波形反演程序,实现了对首端电压的反 演,进而对整个过电压过程进行精确分析。

从实际应用情况来看,所提供的避雷器尾端电 流监测装置,能够有效反映避雷器动作过电压情况, 并对电力系统电磁暂态过程进行精确分析,对过电 压防治具有重要的理论和实际价值。

参考文献

- [1] 刘发成,赵洪波,齐亮.一起避雷器泄漏电流数据增大 案例分析[J].电工电气,2020(7):75-76.
- [2] 余喆,蓝道林,董树礼,等.一起避雷器泄漏电流异常增 大特殊案例分析[J].浙江电力,2018,37(5):38-43.
- [3] 朱露露. 避雷器智能在线监测系统的研究与设计[D]. 合肥:安徽建筑大学,2021.
- [4] 苏同斐,李红刚.避雷器泄漏电流超标原因分析[J].山 东工业技术,2018(22):166.
- [5] 杨敏.配网架空线路防雷措施[J].科技创新与应用, 2018(32):122-123.
- [6] 魏欣欣,安新慧.避雷器在线监测装置在变电站的应用 与研究[J].机电信息,2019(29):44-45.
- [7] 张重远,黄涛,任寅寅,等.应用电站设备宽频特性的 过电压在线监测装置[J].高电压技术,2011,37(2): 310-317.
- [8] 李伟,汤海燕,黄倩,等.配电网过电压在线监测系统的 研究[J].电测与仪表,2012,49(2):80-83.
- [9] 黄海波,赵文炎,寇小适,等.一种过电压在线监测分压 器的设计[J].变压器,2010,47(8):28-30.
- [10] 张榆,谢敏,谢施君,等.不同负载条件下 CVT 过电压 监测装置频率响应特性分析[J].四川电力技术, 2019,42(4):21-23.
- [11] 郑文哲.利用非接触无线测量技术开展过电压测量[J].电力安全技术,2020,22(10):9-15.
- [12] 袁佳歆,雷洋,熊信恒,等.一种基于多导体静电耦合
 原理的非接触式过电压测量方法[J].电工技术学报,
 2014,29(S1):524-530.
- [13] 黄雁,钟红红,叶杰,等.电压互感器 3 次谐波电压测量 失真机理分析与对策[J].变压器,2019,56(9):53-59.
- [14] 李文博. 基于 CVT 宽频线性模型的过电压在线监测 方法研究[D].保定:华北电力大学,2013.
- [15] 蔡岳丰,范啸平,邰能灵.船舶水中电场分析方法 研究综述[J].上海交通大学学报,2018,52(10): 1410-1416.
- [16] 黄华,代静,刘勇,等.GIS 电压互感器的传递过电压 试验研究[J].电测与仪表,2014,51(12):1-6.
- [17] 穆舟,江波,赵伟,等.电力系统暂态过电压测量技术 综述[J].电测与仪表,2022,59(5):1-13.

- [18] 钱鑫,李琥,施围.电力系统仿真计算软件介绍[J].继 电器,2002,30(1):43-46.
- [19] 徐政.免费使用的电磁暂态分析程序——ATP-EMTP 程序介绍[J].电网技术,1999,23(7):64-65.
- [20] 胡浩,陶曾杰.配电网的操作过电压与故障过电压[J]. 电工电气,2011(7):58-59.
- [21] 吴义纯. 基于 EMTP 的操作过电压仿真[C]//第三届 安徽自然科学学术年会安徽省电机工程学会 2005 年 学术年会论文集.合肥:安徽省电机工程学会,2005: 133-137.
- [22] 孙伟,王韵,武增尧,等.500 kV GIS 中快速暂态过电 压的测量[J].高压电器,1998,34(4):11-14.
- [23] 何文林,杨智.变电设备过电压在线监测应用研究[J]. 浙江电力,2018,37(11):36-40.
- [24] 廖思哲, 王婉婷, 郑刚.基于 EMTP 仿真和实测的接地 电缆雷电过电压特性分析[J].电瓷避雷, 2021(6): 120-124.
- [25] 陈功,段涛,许犇,等.基于 EMTP-RV 的 GIS 变电站雷 电过电压研究——以厄瓜多尔辛克雷水电站送出工 程为例[J].人民长江,2021,52(2):182-186.
- [26] 陈喆. 基于相似理论和模型试验的结构动响应分析[D].南京:南京航空航天大学,2012.
- [27] 李苑青,蒋宇飞,肖涵,等.信号与系统实验中傅里叶 变换的研究与实践[J].科技风,2021(32):68-71.
- [28] 陈玮任,张文斌,王立哲,等.基于快速傅里叶变换的 VFTO 实测波形分析[J].电子科技,2021,34(3): 65-70.
- [29] 张宝琦.快速傅里叶变换算法在电机波形测试中的应 用[J].电工技术杂志,1984(7):25-34.
- [30] 孙冬,高清维,竺德,等.离散傅里叶变换的自适应循 环电力谐波分析算法[J].安徽大学学报(自然科学 版),2013,37(6):57-64.
- [31] 王天健,吴振升,王晖,等.基于快速傅里叶变换的电 力系统频率实时计算方法[J].郑州大学学报(工学 版),2011,32(3):81-84.
- [32] 李剑飞. 基于傅里叶变换的电力谐波改进测量方法 研究[D].杭州:浙江大学,2019.
- [33] 丁登伟,庞理声,莫乔卫,等.水电站 GIS 特快速暂态 过电压在线监测系统构建及监测数据分析[J].高压 电器,2020,56(6):57-65.

作者简介:

胡思宇(1996),女,硕士研究生,助理工程师,主要研究 方向为水电大数据智能应用;

黄佐流(1968),男,工程师,主要研究方向为水电建设 工程机电设备管理、发电厂设备管理和检修维护;

刘守豹(1983),男,博士,高级工程师,主要研究方向为 电力系统暂态分析与工程电磁场数值计算。

(收稿日期:2022-07-01)

基于 HCM5000 的混合级联直流输电 仿真系统实现与应用

刘 晨',肖 鲲²,李传西',吴庆范',刘旭辉',宋延涛',滕尚甫³,李桂举¹

(1. 许继电气股份有限公司,河南 许昌 461000;2. 国家电网有限公司,北京 100031;3. 国网经济技术研究院有限公司,北京 102209)

摘 要:文中介绍了基于许继新一代 HCM5000 控制保护平台的技术特点与特高压混合级联直流输电系统的基本结构。以特高压混合级联直流输电系统为对象,搭建了基于 HCM5000 装置的控制保护 RTDS 仿真平台,阐述了基于 HCM5000 的特高压混合级联直流输电系统仿真平台从 I/O 接口及内环逻辑实现方式两个方面进行的改进措施,并对 仿真平台的系统架构与配置方案进行了说明。最后,通过将试验结果与国家标准进行对比,验证了仿真结果满足标 准要求。结果表明,基于 HCM5000 的特高压混合级联直流输电控制保护系统仿真平台可以为特高压混合级联直流输 电系统的运行特性及控制保护策略研究提供参考依据。

关键词:混合级联;HCM5000;仿真平台;RTDS
中图分类号:TM 743 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2023)02-0070-06
DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230212

Implementation and Application of Hybrid Cascaded DC Transmission Simulation System Based on HCM5000

LIU Chen¹, XIAO Kun², LI Chuanxi¹, WU Qingfan¹, LIU Xuhui¹, SONG Yantao¹, TENG Shangfu³, LI Guiju¹
(1. XJ Electric Co., Ltd., Xuchang 461000, Henan, China; 2. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China; 3. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract: The technical characteristics of control and protection platform based on Xuji's new generation HCM5000 and the basic structure of hybrid cascaded UHVDC transmission system are introduced. Taking hybrid cascaded UHVDC transmission system as the object, the control and protection RTDS simulation platform based on HCM5000 device is built, and the improvement measures from two aspects of I/O interface and inner loop logic implementation for simulation platform of hybrid cascaded UHVDC transmission system based on HCM5000 are described, and the system architecture and configuration scheme of simulation platform are explained. Finally, it is verified that the simulation results have met the requirements of national standards by comparing the test results with the relevant standards, which shows that the simulation platform of hybrid cascaded UHVDC transmission control and protection system based on HCM5000 can provide a reference basis for the study of operation characteristics and control and protection strategies of hybrid cascaded UHVDC transmission system. **Key words**; hybrid cascaded DC transmission system; HCM5000; simulation platform; RTDS

0 引 言

目前,传统的基于线性整流换流器(line

基金项目:国家电网公司科技项目"白鹤滩—江苏±800 kV 特高压 直流输电工程运行特性、控制保护策略研究及动模研制 (SGZB0000TGJS2200731) commutated converter, LCC)的高压直流直流输电 (high voltage direct current, HVDC)技术 LCC-HVDC 是直流输电最主流、最成熟的技术^[1-3],具有输电容 量大、运行稳定性好、系统损耗小、建设成本低等优 势,在远距离大容量输电方面具有不可替代的作用。 然而,传统直流输电受端换相失败问题使其在交流 系统多直流馈入场合的应用受到制约^[4-9]。近年 来,基于电压源型换流器(voltage source converter, VSC)的柔性直流输电技术 VSC-HVDC 为直流输电 技术提供了新的发展方向^[10],其具备功率控制灵 活、独立,且可接入无源网络^[11]的特点。然而,柔性 直流系统输送容量较小,可承受电压应力水平较低, 对直流线路故障的隔离需要依赖额外设备或改进的 换流器拓扑。这也使其在特高压直流输电领域缺乏 成熟的应用方案。为此,将传统直流输电 LCC 与柔 性直流输电 VSC 组合,同时发挥 LCC-HVDC 成本 低、损耗小、容量大以及 VSC-HVDC 无换相失败、控 制灵活等技术优势的混合直流输电技术逐渐成为当 前直流输电领域的研究热点,也将是完善未来电网 的重要途径^[12-13]。

其中,送端采用两组 LCC 换流阀串联,受端采 用 LCC 与 VSC 串联结构的混合直流系统,为特高压 直流系统提供了一种更为经济、灵活、快捷的输电方 式^[11-15]。这种输电方式具有以下多重优势:1)送、 受端混合,可实现大规模能源基地电力高效、经济外 送;2)受端 LCC 和 VSC 串联,可在直流线路故障下 利用 LCC 自然阻断故障电流的特征避免 VSC 阀过 电流,且 VSC 无功支撑能力也有助于 LCC 换相失败 抑制^[16-17];3)多个 VSC 并联,能有效应对现有 VSC 换流单元容量无法比拟的 LCC 换流单元的 问题;4) LCC 与多 VSC 混联,还可形成多个落点, 利于直流功率的分散消纳,降低对受端电网的冲 击^[18]。

下面,基于许继新一代 HCM5000 仿真平台,搭 建实时数字仿真(real time digital simulator, RTDS) 硬件在环特高压混合级联直流输电系统仿真平台, 对特高压混合级联直流输电系统启停、阶跃、交流故 障等运行特性进行仿真验证。同时参照国家标准及 文献对试验结果进行检验,为特高压混合级联直流 输电控制保护系统运行特性及控制保护策略研究提 供参考依据。

1 特高压混合级联直流输电系统

1.1 系统结构

特高压混合级联直流输电系统整流站单极与常规特高压整流站一致,高低端阀组均由 12 脉动换流阀构成。逆变站高端由 12 脉动 LCC 组成,低端为 3 个并联 VSC^[19-20]。对于±800 kV/8000 MW 混合级

联特高压直流工程来说,低压端由 3 个 VSC 构成是 最优的方案^[14]。各个 VSC 与直流母线之间配置快 速开关(high speed switch, HSS)。特高压混合级联 直流输电系统单极受端系统拓扑结构如图 1 所示。



图 1 特高压混合级联输电系统受端拓扑结构

1.2 混合级联直流输电系统控制原理

特高压混合级联直流输电系统在稳态运行时, 整流站采用定直流电流或者定直流功率的控制方 式,控制系统通过调节触发角的方式来调节直流电 流或者功率的大小^[21]。逆变站 LCC 通常采用定直 流电压的控制方式^[22-23],控制逻辑如图 2 所示。



图 2 LCC 换流器控制逻辑

图 2 中: U_{deref}为直流电压参考值; U_{de}为直流电 压实际值; I_{deref}为直流电流参考值; I_{de}为直流电流实 际值。当 LCC 运行在定直流电流控制模式时, I_{deref} 通过运行人员整定得到; 当 LCC 运行在定直流功率 控制模式时, I_{deref}通过直流功率参考值 P_{deref}除以直 流电压实际值 U_{de}的方式得到, 如式(1)所示。

$$I_{\rm dref} = P_{\rm dcref} / U_{\rm dc} \tag{1}$$

对于逆变站的 3 个并联 VSC,为保证直流电压 的稳定,通常采用一个 VSC 控制直流电压,其余 VSC 控制有功功率的控制方式^[24]。其控制策略采 用了阀侧电流内环与直流电压/有功功率外环、无功 功率外环的双环控制策略,如图 3 所示。



图 3 VSC 控制逻辑

图 3 中: P_{acref} 为有功功率参考值; P_{ac} 为有功功 率实际值; Q_{acref} 为无功功率参考值; Q_{ac} 为无功功率 实际值; ω L 为耦合相; i_d 为内环电流 d 轴实际值; i_q 为内环电流 q 轴实际值。有功外环及无功外环输入 经 PI 控制器后计算得到内环电流 d 轴参考值 i_d^* 和 内环电流 q 轴参考值 i_q^* , 内环电流控制器 d 轴与 q 轴输出分别叠加 d 轴前馈 U_d 与 q 轴前馈 U_q 后,将 d 轴和 q 轴解耦,变换得到三相调制波 v_{abc} 。

2 HCM5000 平台

2.1 机箱结构设计

相较于许继上一代 HCM3000 机箱, HCM5000 主机在尺寸、背板总线、处理器性能等方面有了显著 提升。详细差异如表1所示。

表 1 HCM5000 主机与 HCM3000 主机主要性能对比

对比项	HCM3000	HCM5000
机箱结构	9U	4U
背板总线	标准背板总线	>1 Gbit/s 的高速背板总线
处理器板卡	单核	双核
高速控制总线	32 Mbit/s	>300 Mbit/s

新一代机箱支持高速背板总线通讯,速率高达 1 Gbit/s,大幅度提高了数据传输性能。同时机箱具 备强大的扩展能力,配备 16 块板卡槽位。其中控制 保护主机主处理单元(service processing unit, SPU) 采用多核异构的设计方案,处理器性能的提升减少 了机箱中处理器的数量,进一步降低了插件的数量。

HCM5000 控制保护主机具备丰富的接口拓展 功能,可支持以太网、时分复用技术(time-division multiplexing, TDM)、过程现场总线(process field bus, PROFIBUS)、控制器域网(controller area network, CAN)、高速控制总线集成闪存控制器 (integrated flash controller, IFC)及高速串行高级技术 附件(serial advanced technology attachment, SATA) 硬盘接口等。通过这些接口,控制保护系统配置更 加灵活,减少协议转换装置的使用,整体结构和信息 通道更加简化可靠,能更多地满足与换流站其他设 备通信的接口需求。

2.2 高速处理板卡

HCM5000 平台开发了柔性直流内环专用板卡 SAI31,如图 4 所示。板卡采用全新的硬件设计,主 处理器首次采用基于 UltraScale MPsocs 架构的高性 能 SOC 处理器,内嵌双核 ARM Cortex-A53 + FPGA, ARM 核主频可达 1.2 GHz,最小运行周期可达 50 μs, 满足柔性直流内环控制的高速性能要求。采用嵌入 式实时操作系统与强运行时系统,满足复杂多任务 处理需求。板卡提供 8 通道 IEC 60044-8 总线通信 接口、2 通道 2.0 Gbps 高速串行传输通信(AURORA 协议)接口,满足柔性直流多通道数字量采集功能 需求。



图 4 SAI31 板卡

3 仿真系统搭建

3.1 I/O 接口优化

HCM5000 特高压混合级联直流输电仿真平台 主要包括监控层、设备层、仿真层 3 个部分,结构如 图 5 所示。相较于 HCM3000 直流控制保护仿真平台 需配置 HSMD 高速协议转换装置来实现 AURORA 协



图 5 HCM500 仿真平台结构

议转换与仿真系统接口^[26],HCM5000 支持 AURORA 协议与 RTDS 直连,取消了 HSMD 高速协议转换装 置。同时取消了装置与 GTDO(gigabit transceiver digital output)板卡、GTAO(gigabit transceiver analogue output)板卡等 RTDS 电气接口的接线,精简了仿真 平台的结构,减少了设备之间铺设电缆的工作,缩短 了仿真平台搭建的时间。

3.2 内环软件设计优化

柔性直流内环控制的链路延时是柔性直流控制 系统的关键技术指标,也是衡量柔性直流控制系统 性能优劣的重要指标^[27-29]。受限于板卡性能, HCM3000平台柔性内环控制逻辑的设计采用双板 卡的方案。单个板卡运行周期为 100 μs,板卡间采 用许继私有 IFC 协议进行通信,其结构如图 6 所示。



图 6 HCM3000 内环逻辑方案

得益于硬件性能的提升,新仿真平台将锁相环 控制逻辑及内外环控制逻辑整合进单一板卡中实 现,其软件实现结构如图 7 所示。由于取消了板卡 间的数据传输,同时提高了软件的运行周期,如图 8 所示,实测内环控制逻辑运行周期压缩至 50 µs。



图 8 HCM5000 内环运行周期

3.3 控制保护功能配置

特高压混合级联直流输电系统受端为两种不同 类型的串联换流器,因而将直流功率控制等部分极控 控制功能下放至换流器控制中,详细功能配置如下。

1) 直流站控: 换流站直流开关场的控制和监视

功能、直流开关联锁、顺序控制等功能。

2)极控:极解锁/闭锁控制、站间通信、功率控制、站间通信等功能。

3)换流器控制:换流器触发控制(常规换流器)、调制电压计算(柔直换流器)、分接头控制、换流阀运行状态监视等功能。

4)交流站控:交流开关场的控制与监视功能、 交流场联锁功能、辅助设备控制与监视功能。

5)极保护:直流极母线差动保护、直流中性母 线差动保护、阀组连接线差动保护、直流极差动保 护、直流行波保护等保护功能。

6)换流器保护:阀侧连接线差动保护、阀侧连 接线过流保护、启动电阻过流保护、启动电阻过负荷 保护、阀侧零序过压保护、桥臂过流保护等保护功能。

3.4 仿真平台屏柜配置

特高压直流输电控制保护系统主要设备有交直 流站控系统、极控制系统、换流器控制系统、极保护 系统、换流器保护系统等^[30-32]。因仿真系统主要进 行系统分析和控制保护策略和性能研究,因而对于 控制系统采用单套系统的配置方案。对于保护系 统,取消三取二接口装置,亦采用单套配置。仿真系 统采用单系统配置方案,所需屏柜配置如表 2 所示。

表 2 特高压混合级联直流输电仿真系统屏柜配置

设备名称	主设备	数量
工程师工作站	Think Station	2 台
直流站控屏	HCM5000	2 面
交流站控屏	HCM5000	5 面
极控屏	HCM5000	2 面
换流器控制屏	HCM5000	6 面
极保护屏	HCM5000	2 面
换流器保护屏	HCM5000	6 面
RTDS 仿真屏	NovaCor	1台

由表2可以看出,搭建特高压混合级联直流输 电系统共需配置21面屏柜,两站共需配置2台工程 师工作站,用于运行人员监控和调试。

4 仿真验证

基于 HCM5000 RTDS 硬件在环仿真平台,对特 高压混合级联直流输电系统基本运行特性进行仿真 验证,并与相关标准及文献进行了对比验证。

4.1 启动停运试验

特高压混合级联直流输电系统根据受端高低端

其启动方式为逆变侧低端控直流电压 VSC 先 启动,然后启动低端控功率 VSC,最后启动逆变侧高 端 LCC。待逆变站建立直流电压后,启动整流侧,开 始输送直流电流。从图 9 HCM5000 平台启动波形 中可以看出,以低端控制直流电压换流器 VSC1 解 锁时刻为基准,1560 ms 后,控制功率换流器 VSC2、 VSC3 解锁; 2621 ms 后,逆变站换流器 LCC 解锁并 建立直流电压;2753 ms 后直流电流产生,系统开始 输送功率。



图 9 1+3 方式启动波形

特高压混合级联直流输电系统停运顺序与启动 顺序相反,整流站降功率闭锁后,逆变站高端 LCC 停运,然后闭锁低端控功率 VSC,最后闭锁低端控直 流电压 VSC。从图 10 HCM5000 平台停运波形中可 以看出,以直流电流下降时刻为基准,445 ms 后高 端 LCC 停运;734 ms 后控功率换流器 VSC2、VSC3 停运;852 ms 后控制流电压换流器 VSC1 闭锁,系统 停运。

从试验结果可以看出,直流系统解锁/闭锁时序 正确,直流系统平稳运行,满足 GB/T 38878—2020 《柔性直流输电工程系统试验》标准^[33]要求。



4.2 阶跃试验

为验证系统阶跃性能,在1+3运行方式下,进行VSC2无功功率阶跃试验,无功功率参考值从0阶跃至112.4 Mvar,持续时间1000 ms,如图11所示。试验结果如表3所示。从试验结果可以看出,

仿真平台无功功率响应时间≤20 ms,超调量≤ 30%,满足 GB/T 38878—2020 设计要求^[33]。



表 3 无功功率阶跃试验结果

项目	超调量/%	响应时间/ms
无功上阶跃	23.3	13.2
无功下阶跃	24.6	13.4

4.3 交流故障试验

模拟1+3运行方式下,VSC1 网侧三相交流故障 100 ms。从图12 可以看出故障发生 100 ms 后,由于能量输送受阻,受端系统暂时功率盈余,直流电压升高,最大达到540 kV,故障期间直流电流最大值为6243.5 A,最小值为4597.1 A。故障特征与文献[14]描述一致。



5 结 论

上面介绍了 HCM5000 控制保护装置技术特点。 从 L/O 接口与内环控制软件设计两个方面概述了基 于 HCM5000 的特高压混合级联直流输电控制保护 系统仿真平台的改进措施。并从系统启动停运、无 功功率阶跃、交流故障特征等方面与 GB/T 38878— 2020 要求及文献描述进行了对比,验证了基于 HCM5000 的特高压混合级联直流输电控制保护系 统仿真平台仿真结果的可靠性。结果表明,基于 HCM5000 的特高压混合级联直流输电控制保护系 统仿真平台可以为系统的运行特性及控制保护策略 研究提供参考依据。

参考文献

- [1] 张文亮,于永清,李光范,等.特高压直流技术研究 [J].中国电机工程学报,2007,27(22):1-7.
- [2] 杨美娟,王先为,姚为正,等.特高压混合式 MMC 低全 桥配比下单阀组投退过程中的均压控制[J].全球能 源互联网,2018,1(5):603-610.
- [3] 张彦涛,张志强,张玉红,等.应用特高压直流输电技 术实现亚欧洲际输电方案的设想[J].电网技术,2015, 39(8):2070-2075.
- [4] 周昊,胡雪凯,周文,等.波形畸变引起换相失败的评估 方法[J].河北电力技术,2022,41(4):40-45.
- [5] 张朝峰,张伟晨,饶宇飞,等一种抑制多馈入特高压 直流换相失败的投旁通控制策略[J].电力建设, 2022,43(6):56-65.
- [6] 王婷,苏玉香,沈晓群,等. 抑制 HVDC 换相失败送端 过电压的参数优化[J].电气应用,2022,41(2):70-74.
- [7] 朱仁龙,周小平,罗安,等.基于电压时间换相面积预测的换相失败抑制方法[J].电力系统自动化,2022, 46(3):156-163.
- [8] 王涛,肖繁,曹森,等.换相失败交流系统临界电压计 算[J]. 湖北电力, 2019,43(4):1-7.
- [9] 宋金钊,李永丽,曾亮,等.高压直流输电系统换相失 败研究综述[J].电力系统自动化,2020,44(22):2-13.
- [10] 邹常跃, 韦嵘晖, 冯俊杰, 等. 柔性直流输电发展现 状及应用前景[J]. 南方电网技术,2022,16(3):1-7.
- [11] 徐政.柔性直流输电系统[M].北京:机械工业出版 社,2013.
- [12] 胡宏,陈浩,丁浩寅,等.特高压混合级联多端直流输 电系统的协调控制策略研究[J].电力工程技术, 2021,40(4):42-51.
- [13] 刘泽洪,马为民,王绍武,等.混合级联特高压直流输
 电系统方案设计及动模试验验证[J].电网技术,
 2021,45(3):1214-1222.
- [14] 刘泽洪,王绍武,种芝艺,等.适用于混合级联特高压 直流输电系统的可控自恢复消能装置[J].中国电机 工程学报,2021,41(2):514-524.
- [15] 徐政,王世佳,张哲任,等. LCC-MMC 混合级联型直流 输电系统受端接线和控制方式[J]. 电力建设,2018, 39(7):115-122.
- [16] 樊鑫,郭春义,杜夏冰,等.特高压混合级联直流输 电系统抑制逆变站后续换相失败的无功功率调控方 法[J].电网技术,2021,45(9):3443-3452.
- [17] 陈倩,王国腾,徐政,等.含混合级联直流系统的多馈 入直流系统换相失败恢复协调控制策略[J].南方电 网技术,2022,16(2):41-49.
- [18] NIU C, YANG M J, XUE R, et al. Research on inverter side AC fault ride-through strategy for hybrid cascaded multi-terminal HVDC System [C]. 2020 IEEE 4th

Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), Wuhan, China, 2020:800-805.

- [19] 董芷函,王国腾,徐政,等. 白鹤滩—江苏特高压混合 级联直流系统运行特性分析方法[J].电力自动化设 备,2022,42(6):118-125.
- [20] 许冬,李探,梅念,等. VSC 与 LCC 混合级联直流输 电系统暂态电流抑制方法[J].全球能源互联网, 2020,3(2):166-171.
- [21] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京:中 国电力出版社, 2021.
- [22] 姚为正. 换流阀及控制保护[M]. 北京:机械工业出版社, 2021.
- [23] 汤奕,郑晨一. 高压直流输电系统换相失败影响因素研究综述[J]. 中国电机工程学报,2019,39(2):499-513.
- [24] 杨硕,郑安然,彭意,等.混合级联型直流输电系统 直流故障特性及恢复控制策略[J].电力自动化设 备,2019,39(9):166-172.
- [25] 范子强,许朋见,吴庆范,等.DPS-5000 直流输电控制 保护系统设计方案[J].电气技术,2021,22(5):78-84.
- [26] 刘旭辉,张爱玲,曹森,等.基于 HCM3000 直流控制 保护平台新型仿真系统实现与应用[J].电力系统保 护与控制,2019,47(17):180-186.
- [27] 李奇南,夏勇军,张晓林,等.渝鄂柔性直流输电系统中高频振荡影响因素及抑制策略[J].中国电力,2022, 55(7):11-21.
- [28] 周谷庆,张杰,仲浩,等.柔性直流控制系统链路延时 测量方法研究[J].浙江电力,2021,40(2):33-37.
- [29] 田培涛,范雪峰,曹森,等.海上风电柔性直流送出 紧凑型控制保护系统设计方案[J].湖北电力,2020, 44(1):11-19.
- [30] 彭勇, 臧春艳, 张利,等. 青豫直流工程中 1000 kV GIL 运行状态的检测研究[J].湖北电力,2022,46(3):23-28.
- [31] 杨建明,甘宗跃,董云龙,等.特高压柔性直流输电 阀区接地故障保护策略[J].湖北电力,2021,45(2): 73-83.
- [32] 张继红, 兰永健, 赵锐, 等. 独立运行直流微网协调 控制策略[J].湖北电力,2021,45(2):56-63.
- [33] 全国电力电子系统和设备标准化技术委员会.柔性直 流输电工程系统试验:GB/T 38878—2020[S].北京: 中国标准出版社,2020.

作者简介:

刘 晨(1992),男,工程师,研究方向为高压直流输电 控制保护技术;

肖 鲲(1983),男,高级工程师,从事特高压直流工程 设计工作;

李传西(1988),男,硕士,研究方向为高压直流输电控制保护技术。

(收稿日期:2023-01-04)

基于 apFFT 和带约束条件的最小二乘拟合的 间谐波检测算法

王天行,舒 勤

(四川大学电气工程学院,四川 成都 610065)

摘 要:在非整周期采样的情况下,使用传统的快速傅里叶变换(FFT)对邻近基波/谐波的密集谱间谐波进行参数估 计时,由于频谱泄露的影响,间谐波检测误差较大,甚至难以判断密集谱的存在,因此,文中提出了一种基于全相位 FFT 和带约束条件的最小二乘拟合的间谐波检测算法。该算法的原理是先利用全相位 FFT 对间谐波参数进行预估, 在预估参数的基础上构造拟合函数并设置约束方式,然后使用最小二乘拟合对间谐波参数进行校正。通过对比不同 约束方式的效果,选择对幅值和相位分别进行约束为最佳约束方式。仿真实验表明,与其他基于 FFT 的算法相比,该 算法可以有效地减少间谐波参数检测误差并具有良好的抗噪性。

关键词:全相位 FFT;间谐波;最小二乘拟合;不等式约束

中图分类号:TM 933.3 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2023)02-0076-08 DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230213

Inter-harmonic Detection Algorithm Based on apFFT and Least Square Fitting with Constraints

WANG Tianxing, SHU Qin

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract: In the case of non-integer period sampling, when using traditional fast Fourier transform (FFT) for parameter estimation of dense spectral inter-harmonics adjacent to the fundamental/harmonic, the inter-harmonic detection error is relatively high due to the influence of spectral leakage, and it is even difficult to judge the existence of dense spectrum. Therefore, an inter-harmonic detection algorithm based on all-phase fast Fourier transform (apFFT) and least square fitting with constraints is proposed. The principle of the proposed algorithm is to first estimate the inter-harmonic parameters by using the apFFT, construct a fitting function and set constraints on the basis of the pre-estimated parameters, and then use the least square fitting to correct the inter-harmonic parameters. By comparing the effects of different constraint methods, the best constraint method is selected to constrain the amplitude and phase respectively. Simulation experiments show that, compared with other FFT-based algorithms, the proposed algorithm can effectively reduce the detection error of inter-harmonic parameters and has good noise immunity.

Key words: apFFT; inter-harmonics; least squares fit; inequality constraints

0 引 言

电能是人类社会使用最广泛、最重要的能源之一。随着科学技术的进步以及社会的发展,人们对 输电线路和电力系统的稳定性、可靠性有了越来越 高的要求。但是随着近年来大力发展风电、光伏等 新能源,以及越来越多非线性负载被接入电力系 统^[1-2],电力系统的谐波和间谐波问题变得日益严重。大量的谐波和间谐波极大地危害着电力系统的安全和稳定。谐波和间谐波会造成继电保护装置和精密控制设备不正常动作,影响各种计量仪器的准确度,干扰电力通信,导致电压闪变,甚至损坏电子设备等^[3]。

目前,用于检测电网中谐波、间谐波的方法主要 有快速傅里叶变换法(fast Fourier transform, FFT)^[4]、小波变换法^[5]、独立分量分析法^[6] (independent component analysis, ICA)、神经网络 法^[7]等。快速傅里叶变换法是使用最广泛、最可靠 的方法之一,但在非同步采样的情况下会引起频谱 泄露和栅栏效应。小波变换法的优点是可以同时拥 有较高的时域和频域分辨率,但可能引起小波混叠, 降低稳定性。独立分量分析法常常做不到彻底分离 各个分量且运算量较大。基于神经网络方法需要大 量训练样本和极大的运算量。

相较于传统的快速傅里叶变换法,全相位傅里 叶变换法(all-phase FFT,apFFT)先对数据进行预处 理,然后再进行 FFT 变换。在抗噪性和抑制频谱泄 露方面相对于传统的 FFT 方法有较大的优势^[8],且 具有"相位不变性",即谱线图中各条谱线的相位值 与频率偏离值无关。不过普通的 apFFT 的抗噪性 能有限^[9],因此下面采用 apFFT 谱分析得到粗略估 计的信号参数,再利用最小二乘法原理构造拟合信 号对原信号进行拟合得到信号参数的准确值。通过 仿真实验,证明所提算法能在较低信噪比和邻近基 波/谐波的情况下准确地减少间谐波参数的检测误差。

1 apFFT 的算法原理

1.1 apFFT 的数据预处理

全相位先对数据进行预处理得到全相位数据, 再进行 FFT 变换。设对原始信号进行离散采样得 到的 N 点离散序列为 $x(n)(n = 0, \dots, N - 1)$,保留 x(0) 前面的 N - 1 个数据用于加权,则可以构造一 个矩阵如下:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{0} &= [x(0), x(1), \dots, x(N-1)] \\ \mathbf{x}_{1} &= [x(-1), x(0), \dots, x(N-2)] \\ &\vdots \\ \mathbf{x}_{i} &= [x(-i) \dots x(0), \dots, x(N-(i+1))] \\ &\vdots \\ \mathbf{x}_{N-1} &= [x(-N+1), x(-N+2), \dots, x(0)] \end{aligned}$$
(1)

再对每个向量向左进行循环移位,使 x(0)处于 第一位,可以得到一个新的矩阵:

$$\mathbf{x}'_0 = [x(0), x(1), \cdots, x(N-1)]$$

$$\mathbf{x}'_1 = [x(0), \dots, x(N-2), x(-1)]$$

$$\vdots$$

$$\mathbf{x}'_{i} = [x(0), \dots, x(N - (i + 1)), x(-i), \dots, x(-1)]$$

:

$$\mathbf{x}_{N-1}' = [x(0), x(-N+1), \cdots, x(-1)]$$
(2)

把式(2)的 N 行向量全部相加求平均值即可得 到 N 点全相位数据向量。

$$\boldsymbol{x}_{ap}(n) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \boldsymbol{x}_{i}^{\prime} = \frac{1}{N} \begin{bmatrix} N x(0), (N-1)x(1) + x(-N+1), \cdots, \\ x(N-1) + (N-1)x(-1) \end{bmatrix}^{T}$$
(3)

对全相位数据向量进行 FFT 变换即可得到全相位 FFT。

1.2 apFFT 的频谱分析原理

对于采样得到的 N 点离散单频复指数信号为

 $x(n) = A_0 e^{j(2\pi f_0 n + \varphi_0)} (n = 0, 1, \dots, N)$ (4)

式中: A_0 为信号幅值: f_0 为信号频率; φ_0 为信号初相位。 令角频率 $\omega_0 = 2\pi f_0$,并用频率间隔 $\Delta \omega = 2\pi / N$

的 β 倍表示 ω_0 ,即 ω_0 = β ・ $\Delta\omega$,代入式(4)得到

$$x(n) = A_0 e^{j(\frac{np2\pi}{N} + \varphi_0)}$$
(5)

式中, β 可以为小数。则序列x(n)的不加窗傅里叶 变换谱为

$$X(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} A_0 e^{j(\frac{n\beta 2\pi}{N} + \varphi_0)} e^{-\frac{j2\pi kn}{N}} =$$

$$\frac{A_0}{N} e^{j\varphi_0} \sum_{n=0}^{N-1} e^{\frac{j2\pi(\beta-k)n}{N}} = \frac{A_0}{N} e^{j\varphi_0} \frac{1 - e^{j2\pi(\beta-k)}}{1 - e^{j2\pi(\beta-k)/N}} =$$

$$\frac{A_0}{N} e^{j\varphi_0} \frac{e^{-j\pi(\beta-k)} - e^{j\pi(\beta-k)}}{e^{-j\pi(\beta-k)/N} - e^{j\pi(\beta-k)/N}} \frac{e^{j\pi(\beta-k)}}{e^{\frac{j\pi(\beta-k)}{N}}}$$
(6)

经变换得

$$X(k) = \frac{A_0}{N} \frac{\sin\left[\pi(\beta - k)\right]}{\sin\left[\frac{\pi(\beta - k)}{N}\right]} e^{j\left[\varphi_0 + \frac{N-1}{N}(\beta - k)\pi\right]}$$
(7)

式中, $k=0,1,\cdots,N-1_{\circ}$

根据离散傅里叶变换(discrete Fourier transform, DFT)的移位性质,式(1)中 \mathbf{x}_i 的 DFT 变换 $X_i(k)$ 与式(2)中 \mathbf{x}'_i 的 DFT 变换 $X'_i(k)$ 的关系为

 $X'_{i}(k) = X_{i}(k) e^{\frac{2\pi}{N}ik}(i,k=0,1,\cdots,N-1)$ (8) 结合式(3)和式(7),同时结合式(8)的性质可

以得到全相位傅里叶变换谱。

$$X_{\rm ap}(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} X_i'(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} X_i(k) e^{j\frac{2\pi}{N}ik} = \frac{1}{N^2} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} x(n-i) e^{-j\frac{2\pi kn}{N}} e^{j\frac{2\pi ki}{N}} =$$

$$\frac{A_{0}}{N^{2}} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{n=0}^{N-1} e^{j\varphi_{0}} e^{\frac{j2\pi(n-i)\beta}{N}} e^{-j\frac{2\pi kn}{N}} e^{j\frac{2\pi ki}{N}} = A_{0} \frac{e^{j\varphi_{0}}}{N^{2}} \sum_{i=0}^{N-1} e^{-j\frac{2\pi(\beta-k)}{N}} \sum_{n=0}^{N-1} e^{j\frac{2\pi(\beta-k)n}{N}} = A_{0} \frac{e^{j\varphi_{0}}}{N^{2}} \cdot \frac{1 - e^{-j2\pi(\beta-k)}}{1 - e^{\frac{-j2\pi(\beta-k)}{N}}} \cdot \frac{1 - e^{j2\pi(\beta-k)}}{1 - e^{\frac{j2\pi(\beta-k)}{N}}} = A_{0} \frac{e^{j\varphi_{0}}}{N^{2}} \cdot \frac{\sin^{2} \left[\pi(\beta-k)\right]}{\sin^{2} \left[\pi(\beta-k)\right]} \tag{9}$$

通过比较式(7)和式(9)可以得出:傅里叶变换 谱各条谱线所对应的相位值为 $\varphi_0 + \frac{N-1}{N} (\beta - k) \pi$,与 频率偏离值($\beta - k$)有关;而全相位傅里叶变换谱各 条谱线所对应的相位值为 φ_0 ,就是真实初相位,与 频率偏离值无关。这就是"相位不变性",这使得 apFFT 的相位检测拥有很高的精度,因为不会受到 频谱泄露的影响。而且 apFFT 的谱线值是二次方 的,因此旁瓣衰减快,主瓣更加突出,能显著减少频 谱泄露。

设峰值谱线为
$$k_{p}$$
,由式(7)和式(9)可以得到
 $\rho = \arg X(k_{p}) - \arg X_{ap}(k_{p}) = \frac{N-1}{N} (\beta - k_{p}) \pi$
(10)

因此有

$$\beta = k_{\rm p} + \frac{\rho}{\pi} \cdot \frac{N}{N-1} \tag{11}$$

所以谱线 k_p 所对应的频率 f_0 和角频率 ω_0 满足

$$\begin{cases} \omega_0 = \beta \cdot \Delta \omega \\ f_0 = \omega_0 / 2\pi \end{cases}$$
(12)

1.3 幅值和相位检测

在获得频率校正值 β 的情况下,幅值 A_0 可以由式(8)直接求出。峰值谱线 k_p 所对应的谱线值为

$$|X_{\rm ap}(k_{\rm p})| = \frac{A_0}{N^2} \frac{\sin^2 \left[\pi (\beta - k)\right]}{\sin^2 \left[\pi (\beta - k)/N\right]}$$
(13)

因此

$$A_{0} = |X_{ap}(k_{p})| \cdot \frac{\sin^{2} [\pi (\beta - k)/N]}{\sin^{2} [\pi (\beta - k)]} \cdot N^{2}$$
(14)

根据 apFFT 相位不变性,可以直接用峰值谱线 $k_{\rm p}$ 对应的相位作为信号初始相位 φ_{00} 。

1.4 密集谱识别

设单频信号分别为:

$$x_1(n) = 5 e^{j \left(2\pi \frac{f_1}{f_s}n + 30\right)}$$

$$x_2(n) = 2e^{j\left(2\pi \frac{f_2}{f_s}n + 20\right)}$$
(15)

复合信号为

$$x(n) = x_1(n) + x_2(n) \ (n = 0, 1, \dots, N - 1)$$
(16)

式中: f_1 =50.5 Hz; f_2 =53.0 Hz;采样点数 N=16;采 样频率 f_s =80.0 Hz。则可以求出频率分辨率的值为 $\Delta f = f_s / N = 5.0$ Hz,由于 $|f_1 - f_2| = 2.5$ Hz< Δf ,因此复 合信号 x(n)属于密集谱分布。

x₁(n)的 FFT 幅值谱和相位谱、apFFT 幅值谱和 相位谱如图 1 所示。图中 k 均为谱线号,谱线只出 现在频率分辨率整数倍的频率处。





对比图 1(a)和图 1(b)可以发现:apFFT 有效地 抑制了频谱泄露,主谱线更加突出;而且其相位谱在 任何谱线值处都等于实际的初相位30°,即"平坦性"。

分别对 $x_1(n), x_2(n), x(n)$ 进行 apFFT 变换, 画 出幅值谱和相位谱, 如图 2 所示。图 2(a)、图 2(b)、 图 2(c)分别对应信号 $x_1(n), x_2(n), x(n)$ 。由图可见 单频信号的 apFFT 相位谱呈明显的"平坦性"。图 2 (c)是混合信号, 峰谱线值 $k_p = 10$, 判断邻近谱线 9 和谱线 11 处是否存在密集谱的依据就是峰谱线 值对应的相位谱附近是否具有"平坦性"。由图 2 所示 k 为 9、10、11 处的相位谱波动较大, 由此可 以判断存在密集谱。而如果直接观察幅值谱很难判 断密集谱的存在。



图 2 经过 apFFT 变换的幅值谱和相位谱

2 幅值和相位的拟合修正

尽管 apFFT 理论上可以极大地减小频谱泄露 对谱线的干扰,但在实际使用中,噪声的影响依旧是 不可忽略的。在噪声干扰下,apFFT 对幅值和相位 检测的误差较大。

减弱噪声的影响可以有很多方式,比如小波去 噪^[11]、经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)去噪^[12]、奇异值分解(singular value decomposition,SVD)去噪^[13]等,但是这些方法很容易把有用 信号一起消除,而且存在去噪不彻底的情况。另一种 手段是谱线插值,但是谱线插值法会增加运算量,而 且常用的三谱线插值法常常引入更多噪声干扰。因 此采用拟合法对所得到的测量结果进行二次校正。

对于含有多个频率的复指数信号

$$x(t) = \sum A_i e^{j(2\pi f_i t + \varphi_i)}$$
(17)

式中: A_i 、 f_i 、 φ_i 分别为幅值、频率、初相位;t为时间。

先对原始信号进行 apFFT 变换得到全相位谱 线图,通过搜寻谱峰以及密集谱判别可以判断出有 用的频率个数,设为 *M*;令拟合函数为

$$\delta(t) = \sum_{i=1}^{M} a_i \cos(2\pi b_i t + c_i)$$
(18)

式中,*a_i、b_i、c_i*为待解参数,分别对应幅值、频率、初相位。令误差平方和为*J*,表达式为

$$\begin{cases} J = \sum_{t=t_1}^{t_N} \left[\delta(t) - x_{real}(t)\right]^2 \\ x_{real}(t) = \operatorname{Re} x(t) = \sum A_i \cos(2\pi f_i t + \varphi_i) \end{cases}$$
(19)

式中:x(t)为复指数信号; $\delta(t)$ 为实信号。所以 J 也 得用 x(t)的实部 $x_{real}(t)$ 与 $\delta(t)$ 做运算。

由此可知

 $J = J(a_1a_2\cdots a_M, b_1b_2\cdots b_M, c_1c_2\cdots c_M)$

根据最小二乘法的原理^[14],当J最小时的参数 $(a_1a_2\cdots a_M, b_1b_2\cdots b_M, c_1c_2\cdots c_M)$ 即所求值。根据多 元微分法,当J在各参数上的偏导数为0时可以取 到最小值。

由式(17)一式(19)可得式(20)。

$$\frac{\partial J}{\partial a_{k}} = \sum_{i=t(1)}^{t(N)} 2\left[\delta(t) - x_{real}(t)\right] \cdot \left[\sum_{i=1}^{k-1} a_{i}\cos(2\pi b_{i}t + c_{i}) + \cos(2\pi b_{k}t + c_{k})\right] + \sum_{i=k+1}^{M} a_{i}\cos(2\pi b_{i}t + c_{i}) - x_{real}(t)\right] = 0$$

$$\frac{\partial J}{\partial b_{k}} = \sum_{i=t(1)}^{t(N)} 2\left[\delta(t) - x_{real}(t)\right] \cdot \left[\sum_{i=1}^{k-1} a_{i}\cos(2\pi b_{i}t + c_{i}) - a_{k}\sin(2\pi b_{k}t + c_{k})2\pi t + \sum_{i=k+1}^{M} a_{i}\cos(2\pi b_{i}t + c_{i}) - x_{real}(t)\right] = 0$$

$$\frac{\partial J}{\partial c_{k}} = \sum_{i=t(1)}^{t(N)} 2\left[\delta(t) - x_{real}(t)\right] \cdot \left[\sum_{i=1}^{k-1} a_{i}\cos(2\pi b_{i}t + c_{i}) - a_{real}(t)\right] = 0$$

$$\frac{\partial J}{\partial c_{k}} = \sum_{i=t(1)}^{t(N)} 2\left[\delta(t) - x_{real}(t)\right] \cdot \left[\sum_{i=1}^{k-1} a_{i}\cos(2\pi b_{i}t + c_{i}) - a_{k}\sin(2\pi b_{k}t + c_{k})\right] + \sum_{i=k+1}^{M} a_{i}\cos(2\pi b_{i}t + c_{i}) - x_{real}(t) = 0$$

$$(20)$$

且对 $k = (1, 2, \dots, M)$ 均成立, 解这个线性方程组可 以得到 3M 个参数的估计值。但是这样直接求一个 3M 元方程组是极其复杂的,因此需要简化。由于 apFFT 方法对于频率已经有了很高的检测精确度, 所以 拟合函数 $\delta(t)$ 中的参数 b_i 可以直接使用 apFFT 方法求出的频率值, 记为 f_i , 即 $b_i = f_i$ 。这 样 $J = J(a_1 a_2 \dots a_M, c_1 c_2 \dots c_M)$ 就仅仅是 a_i 和 c_i 的函 数。考虑到 apFFT 方法在噪声下对幅值和相位的检测 相对误差不会超过 5%, 所以设置不等式约束条件为

$$\begin{cases} 0.95A_i < a_i < 1.05A_i \\ 0.95\varphi_i < c_i < 1.05\varphi_i \end{cases}$$
(21)

式中, A_i 和 φ_i 分别为直接使用 apFFT 方法求出的幅 值和相位值。拟合函数 $\delta(t)$ 可以表示为线性形式。

 $\delta(t) = \sum_{i=1}^{M} (a_{\rm hi} \cos 2\pi f_i t + b_{\rm hi} \sin 2\pi f_i t) \quad (22)$

式中, $a_{hi} = a_i \cos c_i$, $b_{hi} = -a_i \sin c_i$,也可以写为矩阵形式,如式(23)所示。

$$\boldsymbol{X} = \boldsymbol{F}\boldsymbol{I}$$
$$\boldsymbol{X} = [\delta(t_1) \ \delta(t_2) \ \cdots \ \delta(t_N)]^{\mathrm{T}}$$
$$\boldsymbol{I} = [a_{h1}b_{h1} \ a_{h2}b_{h2} \ \cdots \ a_{hM}b_{hM}]^{\mathrm{T}}$$
$$\boldsymbol{F} = \begin{bmatrix} \cos 2\pi b_1 t_1 \ \sin 2\pi b_1 t_1 \ \cdots \ \sin 2\pi b_M t_1 \\ \cos 2\pi b_1 t_2 \ \sin 2\pi b_1 t_2 \ \cdots \ \sin 2\pi b_M t_2 \\ \vdots \\ \cos 2\pi b_1 t_N \ \sin 2\pi b_1 t_N \ \cdots \ \sin 2\pi b_M t_N \end{bmatrix}$$
(23)

式中: $X 为 N \times 1$ 维矩阵; $I 为 2M \times 1$ 维矩阵; F 为 $N \times 2M$ 维矩阵; $t_1 \cong t_N$ 表示 N 点的离散采样时间 序列。

由最小二乘法的线性法则对I进行预估有

$$\boldsymbol{I} = (\boldsymbol{F}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{F})^{-1} \boldsymbol{F}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{X}$$
(24)

由式(22)和式(23)可得

$$\begin{cases} a_i = \sqrt{a_{\rm hi}^2 + b_{\rm hi}^2} \\ c_i = \arctan \frac{b_{\rm hi}}{a_{\rm hi}} \end{cases}$$
(25)

当满足约束条件式(21)时,*a_i*和*c_i*即为最终所得的幅值和相位值。

不过直接进行带约束条件的拟合很容易造成 "过拟合"现象^[15]。过拟合的定义为:所得到的拟合 函数能在训练数据集上获得最佳拟合,却在训练数 据集外无法很好地拟合数据。造成过拟合现象的原 因主要有: 1)样本量太少;

2) 样本噪声干扰过大;

3) 假设的数学模型不合理,或者模型无法实际 存在;

4)模型过于复杂,或者约束条件过于严苛。

对于多频率信号,其数学模型是很简明的,经过 密集谱判定后得到的模型也是符合实际的,因此在 足够样本量以及噪声干扰不过于强烈的情况下,可 以从约束条件方面对拟合法进行改善。

先只对 a_i 设置约束,对 c_i 不设置约束, b_i 仍然 直接使用求出的频率值 f_i ,即

$$\begin{cases} \min J = \sum_{i=t_1}^{t_N} \left[\sum_{i=1}^{M} a_i \cos(2\pi f_i t + c_i) - x_{\text{real}}(t) \right]^2 \\ 0.95A_i < a_i < 1.05A_i \end{cases}$$
(26)

求出 $(a_1a_2\cdots a_M)$ 即为校正后的幅值,然后再单独对 c_i 设置约束并进行拟合。

$$\begin{cases} \min J = \sum_{i=t_1}^{t_N} \left[\sum_{i=1}^{M} a_i \cos(2\pi f_i t + c_i) - x_{\text{real}}(t) \right]^2 \\ 0.95\varphi_i < c_i < 1.05\varphi_i \end{cases}$$
(27)

求出 $(c_1c_2\cdots c_M)$ 即为校正后的相位值。

3 算法仿真及结果比较

3.1 对密集谱判定以及拟合方法有效性的仿真验证 仿真信号采用的模型为

$$x(n) = \sum_{i=1}^{7} A_i e^{j(2\pi f_s^{n} + \varphi_i)}$$
(28)

式中: A_i 为信号幅值; f_i 为信号频率; φ_i 为信号初相位。 各信号分量具体参数见表格 1,其中 $n=0,\dots,N-1$,采 样频率 $f_s=5120$ Hz。根据 IEC 检测标准,应当使频 率分辨率为 5 Hz,因此 N=1024。为了得到全相位 谱,实际检测中需要保留采样数据 x(0)的前 N-1 项 用于全相位预处理。

信号的全相位幅值和相位谱如图 3 所示。由图 3 可以初步确定峰值谱线 k_p = [5 10 13 20],谱线 9、 11、19 存疑;观察相位谱图可以发现 k 为 9、11、19 处所对应的相位谱与邻近的相位谱值相差较大,即 不具备"平坦性";因此可以判断为密集谱,即峰值



信号 x(n)的全相位幅值谱和相位谱 图 3

谱线 k_n = [59 10 11 13 19 20] 共7条。先根据 apFFT 常规办法求出频率 f_i 、幅值 A_i 、相位 φ_i ;频率值不需要 校正,令拟合函数为 $\delta(t) = \sum_{i=1}^{7} a_i \cos(2\pi f_i t + c_i)$,拟 合约束为 $\begin{cases} 0.95A_i < a_i < 1.05A_i \\ 0.95\varphi_i < c_i < 1.05\varphi_i \end{cases}$ 。比较3种不同的拟合 方式,分别为: 1)同时对 a_i和 c_i进行约束并求出拟合结果 a'_i、c'_i。 2) 先只约束 a_i , 即 $\begin{cases} 0.95A_i < a_i < 1.05A_i \\ c_i \in R \end{cases}$, 求出拟合 结果 a'; ; 然后, 再代入 a'; 以及对 c; 的约束进行二次

拟合求解,即 $\left\{ \substack{a_i = a'_i \\ 0.95\varphi_i < c_i < 1.05\varphi_i},$ 求出拟合结果 c'_i ;

3) 先只约束 a_i , 即 $\left\{ \begin{matrix} 0.95A_i < a_i < 1.05A_i \\ c_i \in R \end{matrix} \right\}$, 求出拟合 结果 a';然后,不代入求出的 a',只对 c,进行约束求

解,即 $\left\{a_i \in R\right\}$ 、,求出拟合结果 $c_i^{\prime\circ}$ 、

3种拟合方式的相对误差比较结果如图 4 所 示。由于3种拟合方式均固定频率取值,因此只观 察幅值和相位检测结果的不同。

通过对比可以发现:方式1无论对任何一个分 量的检测准确度都不如另外两种方式:3种方式均 对谐波的检测有较高精度,这是因为谐波幅值较大: 对于幅值较小的间谐波成分,方式3的检测效果最 好,这是因为最小二乘法拟合在实际应用中经常会 出现"过拟合"的现象,方式1的约束条件过于严苛 反而增大了误差,方式2虽然对幅值的检测误差较 小,带入幅值的校正值会导致误差积累从而影响对 相位值的校正,方式3在拟合过程中分别放宽了对 相位和幅值的约束,从而有较高的准确度。因此采 用效果最好的方式3作为最佳约束拟合方法对 apFFT 检测后的参数进行校正。



图 4 固定频率的幅值和相位相对误差

3.2 不同检测方法的结果仿真对比

继续使用式(28)所示信号,下列各表分别在不 添加噪声和信噪比 SNR=20 dB 的情况下用 4 种算 法对该信号进行间谐波参数估计并得到相对误差. 表6中的10-12是处于同一数量级的相对误差的简 写。其中方法1为普通全相位法[16],方法2为三谱 线插值法[17],方法3为谱线方程组法[18],方法4为 所提方法,即基于 apFFT 的约束拟合法。

表 2 间谐波频率检测相对误差对比(不添加噪声)

频率/Hz	方法 1	方法 2	方法 3	方法 4
26	0.000 6	0.059 3	0.010 9	0.000 6
48	0.001 4	0.016 9	0.007 7	0.001 4
53	0.003 4	0.014 9	0.008 5	0.003 4
66	0.001 9	0.017 3	0.017 1	0.001 9
93	0.002 0	0.003 6	0.002 3	0.002 0

表 3	间谐波频率检测相对误差对比(SNR=20 dB)			
频率/Hz	方法1	方法 2	方法3	方法 4
26	0.000 4	0.059 5	0.030 1	0.000 4
48	0.001 7	0.017 6	0.014 2	0.001 7
53	0.006 7	0.015 7	0.012 7	0.006 7
66	0.002 7	0.024 5	0.014 6	0.002 7
93	0.003 5	0.006 9	0.002 9	0.003 5
表 4	间谐波幅值	检测相对误差	急对比(不添)	加噪声)
幅值/V	方法1	方法 2	方法 3	方法 4
5	0.006 0	0.048 5	0.022 1	0.003 6
7	0.003 6	0.021 3	0.021 0	0.003 0
2	0.011 1	0.053 1	0.011 1	0.010 5
3	0.021 2	0.254 8	0.019 0	0.007 2
5	0.018 1	0.019 7	0.010 7	0.005 2
表 5	间谐波幅值	检测相对误差	き対比(SNR=	= 20 dB)
幅值/V	方法1	方法 2	方法3	方法 4
5	0.009 1	0.057 8	0.029 1	0.007 4
7	0.013 8	0.032 0	0.028 3	0.002 7
2	0.022 2	0.047 3	0.014 1	0.009 6
3	0.027 4	0.254 4	0.031 4	0.002 6
5	0.010 2	0.029 2	0.018 0	0.003 0
表 6	间谐波相位	检测相对误差	急对比(不添)	加噪声)
相位/(°)	方法1	方法 2	方法3	方法 4
10	10 ⁻¹²	0.037 3	0.012 0	0.001 5
20	10^{-12}	0.046 4	0.017 3	0.009 5
40	10^{-12}	0.026 3	0.016 9	0.007 2
50	10^{-12}	0.014 5	0.025 1	0.005 4
60	10^{-12}	0.030 4	0.012 4	0.002 5
表 7	间谐波相位	检测相对误差	き対比(SNR=	= 20 dB)
相位/(°)	方法1	方法 2	方法 3	方法 4
10	0.002 2	0.036 5	0.024 8	0.005 2
20	0.015 3	0.050 3	0.018 7	0.007 5
40	0.010 4	0.048 9	0.023 7	0.007 9
50	0.017 5	0.031 5	0.021 2	0.007 4
60	0.010 5	0.038 2	0.016 2	0.005 9

通过表 2—表 7 的对比可以发现:在无噪声情况下,方法 1 对频率、幅值和相位的检测精度均显著高于方法 2 和方法 3,但是对幅值和相位的检测受噪声影响很大;方法 4 在传统 apFFT 方法基础上进行校正,克服了噪声对检测精度的影响,当信噪比为20 dB 时,与方法 2 相比,所提算法对信号幅值和相位的检测相对误差均提升了 1~2 个数量级左右。这说明,相较于传统的 FFT 谱线法,apFFT 通过抑制

频谱泄露从而提升了对信号参数的检测精度;另一 方面表明在 apFFT 基础上进行的幅值与相位的校 正是有效的。

3.3 不同强度白噪声对检测结果的影响

实际中的信号几乎都含有一定的噪声,因此算法的抗噪性也十分重要,以幅值为2的间谐波为例,通过对式(28)所示信号模型添加不同信噪比高斯白噪声进行仿真实验对比,结果如图5所示。



由图 5 可知:随着白噪声强度的增加,所提算法 对于频率值检测的相对误差始终在小范围内波动; 对于幅值和相位检测的相对误差波动大于频率检测 的相对误差波动。在信噪比低于 20 dB 的情况下, 所提算法对频率的检测精度比对幅值和相位的检测 精度高很多;当信噪比大于 30 dB,3 个参数的检测 误差才基本上稳定在一个水平。但此算法相较于其 他 3 种算法的检测精度依然是最高的,尤其是抗噪 性更加出众,即使在噪声较强的情况下,所提算法依 然能将相对误差控制在较低水平,检测精度优于其 他 3 种算法。

4 结 论

当信号中的间谐波邻近基波或者某次谐波时, 频谱泄露所带来的主瓣干扰会严重影响间谐波的检 测精度和对密集谱的判断。传统的 apFFT 虽然可 以有效抑制频谱泄露、减少主瓣干扰,但其抗噪性不 足且对幅值的检测精度不高。因此上面先使用 apFFT 对间谐波参数进行检测,在此基础上使用带 不等式约束的最小二乘法对间谐波参数进行校正。 通过仿真分析证明,所提算法能够有效判断密集谱 的存在,并且检测结果精度更高、抗噪性更强。不过 拟合算法对于频率分量较多的信号运算量会比较 大,这一点不利于实时检测,需要进一步改进。

虽然上面使用约束拟合算法对 apFFT 检测结 果进行了校正,并比较了不同约束拟合方式结果的 准确性,但是约束拟合方式很多,所研究的只是最具 代表性的3种方式,不同的拟合方式会带来不同的 结果,这一点值得深入研究。

参考文献

- [1] 刘芳,刘威,汪浩东,等. 高比例新能源电力系统振荡 机理及其分析方法研究综述[J]. 高电压技术,2022, 48(1):95-113.
- [2] 张宏伟,张振东.大规模风电场并网系统次同步振荡研 究综述[J].通信电源技术,2020,37(7):267-269.
- [3] 刘小林.IEC标准中谐波与间谐波的检测与分析[D].苏州:苏州大学,2016.
- [4] SU Taixin, YANG Mingfa, JIN Tao, et al. Power harmonic and interharmonic detection method in renewable power based on Nuttall double-window all-phase FFT algorithm[J].IET renewable power generation, 2018, 12(8):953-961.
- [5] FANG Guozhi, YANG Caishan, YANG Chao. Detection of inter-harmonic in power system based on Meyer wavelet

and FFT[J].Power System Protection and Control, 2011, 39(12): 90-93.

- [6] BELOUCHRANI A, ABED-MERAIM K, CARDOSO J-F, et al. A blind source separation technique using secondorder statistics[J].IEEE Transactions on Signal Processing, 1997,45(2):434-444.
- [7] 王小华,王莉,王力.基于神经网络的电力系统谐波及
 间谐波高精度检测[C]//第 29 届中国控制会议论文
 集.北京:中国自动化学会,2010:2334-2337.
- [8] 黄翔东.全相位数字信号处理[D].天津:天津大学, 2006.
- [9] 黄翔东, 王兆华. 全相位 FFT 相位测量法的抗噪性 能[J].数据采集与处理, 2011, 26(3): 286-291.
- [10] 黄翔东,王兆华,罗蓬,等.全相位 FFT 密集谱识别与 校正[J].电子学报,2011,39(1):172-177.
- [11] 林华伦,何小阳.基于小波去噪的加窗 FFT 电网谐波 检测[J].计算技术与自动化,2012,31(4):76-79.
- [12] 鲁铁定,钱文龙,贺小星,等.一种削弱信噪混叠的
 EMD 降噪方法[J].大地测量与地球动力学,2020,
 40(2):111-116.
- [13] 李伟,江晓林,陈海波,等.基于 EEMD_Hankel_SVD
 的矿山微震信号降噪方法[J].煤炭学报,2018,
 43(7):1910-1917.
- [14] 孟玲玲,孙常栋,韩宝如.基于最小二乘法和独立分量
 分析的间谐波检测算法[J].电力系统保护与控制,
 2012,40(11):76-81.
- [15] 李蓓蕾.多次自适应最小二乘曲线拟合方法及其 应用[D].荆州:长江大学,2014.
- [16] 王兆华,黄翔东,杨尉.全相位 FFT 相位测量法[J].世 界科技研究与发展,2007,29(4):28-32.
- [17] 牛胜锁,梁志瑞,张建华,等.基于三谱线插值 FFT 的
 电力谐波分析算法[J].中国电机工程学报,2012,
 32(16):130-136.
- [18] 张金平,李建立,段晨.计及负频率影响的新能源发电 低频间谐波检测方法[J].电测与仪表,2020,57(2): 95-100.

作者简介:

王天行(1997),男,硕士研究生,研究方向为现代信号 处理;

舒 勤(1958),男,教授,博士生导师,研究方向为电能 质量、电气工程通信与信号处理、复杂背景弱信号处理。

(收稿日期:2022-09-08)

500 kV 变电站直流电源系统级差配合特性 分析及建议

董汉彬¹,张明丽²,蒋 枝³,李淑琦¹,罗 洋¹,李 晶¹,王嘉易¹

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610041;

2. 东方电气(成都)工程设计咨询有限公司,四川成都 611730;

3. 国网四川省电力公司超高压公司,四川成都 610041)

摘 要:文中以某 500 kV 变电站直流电源系统交接试验中保护电器的越级跳闸为例对级差配合进行分析。首先,通 过梳理直流电源系统各参数间的约束关系,对该工程级差配合存在的问题进行了研究;然后,根据该工程具体设备配 置和整改难度,提出以减少直流分电柜进线段电缆截面的方法来控制短路电流水平进而实现上下级保护的级差配 合。所提整改方案实施后通过了级差配合试验。

关键词:直流电源;级差配合;直流保护电器

中图分类号:TM 721 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2023)02-0084-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230214

Characteristic Analysis and Suggestion for Stage Difference Coordination of DC Power Supply System of 500 kV Substation

DONG Hanbin¹, ZHANG Mingli², JIANG Zhi³, LI Shuqi¹, LUO Yang¹, LI Jing¹, WANG Jiayi¹
(1.State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;2.Dongfang Electric Engineering & Consulting Co., Ltd., Chengdu 611730, Sichuan, China;3.Sate Grid Sichuan Extra High Voltage Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: Taking override trip of protective device in DC power supply system of a 500 kV substation during hand-over test for example, the stage difference coordination is analyzed. Firstly, according to the constraints on parameters of DC power supply system, the problems existing in stage difference coordination is studied. And then, based on the detailed configuration and rectification difficulty, a solution is proposed to realized the stage difference coordination between upper-stage protection and lower-stage protection by reducing the DC cable section to control short-sircuit current level. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by experiments.

Key words: DC power supply; stage difference coordination; DC protective devices

0 引 言

直流电源系统为发电厂、变电站、换流站以及开 关站等电力设施的保护、监控、测量、自动化等设备 提供独立电源,同时也是全厂站失去交流电源后人 员和设备安全的最后保障,是厂站安全稳定运行的

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFF061060);国网四川省电力公司科技项目(52199723001B)

重要组成部分,直接影响到电力系统的安全稳定运行^[1-4]。直流电源系统,一般由充电装置、阀控铅酸蓄电池、保护电器、监控装置、绝缘监测装置、蓄电池 在线监测系统以及电缆等构成。为提高直流电源系统的可靠性,设计规程要求^[1]保护电器应满足级差 配合,以有效切除和隔离故障。若直流电源系统中 保护电器级差配合不当,将导致保护电器无法在短路故障时可靠且有选择地跳开故障,甚至造成越级 跳闸导致事故扩大,进而引发站用直流电全停等严 重电网事故。因此,各级直流保护电器、馈线的选型 和配置是否合理,对电力系统安全可靠运行至关重 要^[5-9]。国家电网有限公司反事故措施要求,新建变 电站施工单位应按照设计单位出具的全站直流系统 上下级差配置图和级差配合参数开展级差配合试验。

下面,以某 500 kV 变电站直流电源系统交接试 验中的一起保护电器越级跳闸的分析与整改过程为 例,通过分析梳理级差配合原理和各约束条件,结合 直流电源接线、设备导体配置等实际情况,找出该工 程中发生保护越级跳闸的具体原因;然后,在考虑工 程施工量和成本的前提下,提出采用更改电缆截面 的针对性改进措施和建议,并在后续试验中得到验 证,证明所提方案有效。

1 级差配合概况

直流电源系统主要采用直流断路器、熔断器作 为保护电器。其中,熔断器依靠熔体内熔丝在焦耳 热的作用下自身的熔断汽化来断开故障电路实现故 障隔离,并通过石英砂完成灭弧;直流断路器依靠触 头的分合断开电路,通常采用格栅实现灭弧功能。

目前,在直流电源系统中,除蓄电池组出口回路 仍然选用熔断器作为保护电器外,其余回路保护电 器已普遍采用专用直流断路器。

直流断路器分为微型断路器(miniature circuit breaker, MCB)、塑壳断路器(molded case circuit breaker, MCCB)和框架式断路器(air circuit breaker, ACB)。按照动作电流和动作时间的特性又可分为 过负荷长延时保护(反时限过流保护)、短路瞬时保 护(速断保护)、短路短延时保护。一般微型断路器 只具有二段式保护特性,即过负荷长延时保护和短 路瞬时保护^[10-12]。

在级差配合的设计中,直流保护电器应考虑正 常工作条件下的负荷电流和短路条件下的短路电 流,相关计算规则详见文献[1]。除蓄电池出口回 路外,各级直流馈线断路器建议选用具有速断保护 和反时限过电流保护的二段式直流断路器。在不满 足上、下级选择性配合的要求时,可采用带短路短延 时保护功能的三段式直流断路器。由于直流断路器 动作时间要短于熔断器熔断时间,在二者串联使用 的方案中,一般将熔断器装设在直流断路器的上级, 以保证保护的选择性。

2 直流电源系统配置

2.1 系统概况

涉及的 500 kV 变电站新建工程,站址海拔约为 2500 m,是当地清洁能源外送的重要支撑。该站直 流电源系统采用"两蓄三充"的配置模式。其中蓄 电池为 800 Ah 阀控铅酸蓄电池,充电装置为高频开 关充电模块,直流供电网络采用分层辐射形供电方 式,直流母线采用两段单母线接线,两段直流母线之 间设置有联络开关。正常运行中,联络开关为分闸 状态。其中一蓄一充运行模式下单段母线(图中略 去跨接的1组充电装置)的系统示意如图1所示,图 中:AC/DC 为充电装置;S 为直流断路器;F 为熔断 器;L 为电缆。



在该工程交接试验中,通过专用仪器的开关短 路模式实现直流电源系统的上、下级级差配合的测 试。表1为该工程直流系统各级保护设备配置情况 和部分实测数据。

2.2 越级问题分析

测试过程,在直流分电柜出现了越级跳闸的现象,即试验中模拟第四级回路短路故障时,第三级直流分电柜的断路器越级跳闸,未实现保护设备的选择性,不满足级差配合的要求。

由表1该变电站的直流系统保护设备配置型号 及相关实测参数情况可知,第四级负荷柜的保护断 路器额定电流值为3A和6A两种规格,短路瞬时 保护脱扣电流分别为36A和72A,其出口处短路 实测电流最小值为360A,最大值为640A。而第三 级直流分电柜的保护断路器额定电流值为25A,短 路瞬时脱扣动作电流为330A。

可以看出,下级(第四级负荷柜)保护出口处短 路电流均大于上级(第三级直流分电柜)保护断路 器的短路瞬时保护的脱扣电流,导致下级保护出口 短路时,上级保护和下级保护将同时进入速断区,无 法形成保护配合,造成了上级保护的断路器动作,扩 大了停电范围。

表1 直流系统保护设备配置

保护层级	保护电器名称	保护电器额定电流 <i>I</i> _n /A	保护电器短路瞬时 保护动作实测电流/A	本级出口短路实测电流 /A
	蓄电池出口熔断器	630	—	_
枭一级	充电机出口断路器	200	2000	—
第二级	直流馈电屏馈线断路器	100	1000	—
第三级	直流分电柜馈线断路器	25	330	—
第四级	35 kV 继电器小室设备屏馈线断路器	3	36	360
	35 kV 继电器小室设备屏馈线断路器	6	72	400
	220 kV 继电器小室设备屏馈线断路器	3	36	360
	220 kV 继电器小室设备屏馈线断路器	6	72	400
	500 kV 继电器小室设备屏馈线断路器	3	36	360
	500 kV 继电器小室设备屏馈线断路器	6	72	400

3 级差配合原则

图 2 为直流电源系统级差配合的流程图。根据 文献[1]可知,在级差配合环节中,断路器的额定电 流 *I*_n、保护整定电流 *I*_{dz}的选择与直流负载情况(回 路长期工作计算电流)和直流短路电流相关。其 中,直流负载为各类控制、动力负荷,其配置情况 为工程给定条件。因此,计算并调整直流电源系 统中对应短路点的短路电流,是开展级差配合的 重要内容。



图 2 直流电源系统级差配合流程

由于影响直流电源系统短路电流变化的因素较 多,针对不同系统接线、蓄电池开路电压、内阻测量 方法、直流设备非线性度、各电源设备反馈电流达 到峰值时间、分布电容等特性与考量因素,中国电力 行业标准 DL/T 5044—2014、国际电工委员会标准 IEC 61660 及美国标准 IEEE Std 946—2004 均提出 各自不同的直流短路电流计算方法^[13-15]。在此,以 文献[1]的短路电流算法为依据,*I*,的计算公式为

$$I_{\rm k} = \frac{U_{\rm n}}{n(r_{\rm b} + r_{\rm 1}) + r_{\rm c}}$$
(1)

式中: I_k 为短路电流,kA; U_n 为直流电源系统标称电 压,V;n为蓄电池组内单体电池个数; r_b 为蓄电池单 体内阻, $m\Omega$; r_1 为蓄电池组连接条电阻, $m\Omega$; r_c 为连 接电缆或导线电阻, $m\Omega$ 。

系统标称电压 U_n 在该工程中为 220 V,电缆电 阻 $r_c = \rho L/S$,其中 L 为电缆长度,取决于电缆的敷设 路径; S 为电缆截面积; ρ 为电阻系数。直流电源系 统中电缆应采用铜芯耐火电缆,铜导体电阻系数为 ρ 为 0.018 4 $\Omega \cdot mm^2/m_o$ 可以看出,直流电源系统 的电缆截面选择关系着系统的短路电流水平,进而 极大地影响着保护的选择和配合。

另一方面,电缆的截面应该满足电缆的长期允 许载流量和回路允许电压降两个约束条件,保证电 缆正常长期运行和负荷设备的正常工作电压范围 (见表 2)。电缆截面与这两个约束条件间的计算公 式详见文献[1]附录 E.1.1 和 E.1.2。否则,电缆截 面过小会导致电缆自身压降偏大,无法向终端设备 提供满足设备正常运行所允许的的直流电压。

因此,从级差配合的角度出发,电缆截面大小在 满足电压降要求的前提下应尽量选择与计算值接近 的标准电缆截面,不应被过分放大。

根据上述分析,综合本新建工程的系统测试 数据、工程整改难度和整改成本等因素,提出通过 减小直流分电柜进线段电缆截面(原电缆截面为

表 2 变电站主要负荷设备的允许电压范围

					_
设备名称	范围	110 V 系统电压范围/V	220 V 系统电压范围/V	技术标准	
断路器合闸线圈	$(85\% \sim 110\%) U_n$ 可靠合闸	93.5~121.0	187~242	GB 50150—2020	
断路器分闸线圈	(65%~110%)U _n 可靠分闸, <35%U _n 不应分闸	71.5~121.0,<38.5	143~242,<77	GB 50150—2020	
继电保护装置	(85% ~ 110%) $U_{\rm n}$	93.5~121.0	187~242	GB/T 14285—2016	
安全自动装置	(85% ~ 110%) $U_{\rm n}$	93.5~121.0	187~242	GB/T 14285—2016	
通信用 DC/DC 变换装置	(80% ~ 120%) $U_{\rm n}$	88.0~132.0	176~264	DL/T 1074—2019	
UPS 装置	(80% ~ 120%) $U_{\rm n}$	88.0~132.0	176~264	DL/T 1074—2019	

35 mm²)以增大该直流回路阻抗的方法来降低该回路的短路水平,从而实现直流电源系统保护设备的 级差配合,并同时满足负荷回路允许压降和电缆载 流量要求。

4 短路电流计算与电缆选择

变电站各分电柜负荷电流如表 3 所示。根据文 献[1]附录 E.1 和 E.2 并结合表 3,直流电源系统中 的电缆截面应该满足电缆的长期允许载流量和回路 允许电压降两个约束条件,并按式(2)进行计算(其 中,按允许压降要求选择的电缆截面一般大于按载 流量要求选择的电缆截面)。

$$I_{\rm pc} \ge I_{\rm cal}$$

$$S_{\rm cac} \ge \frac{\rho \cdot 2LI_{\rm ca}}{\Delta U_{\rm p}}$$
(2)

式中: I_{pe} 为电缆允许载流量; I_{cal} 为回路长期工作计 算电流,可根据负载设备类型查表计算; S_{cac} 为电缆 计算截面; ρ 为电缆导体的电阻系数,铜导体的 ρ 为 0.018 4 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m};L$ 为电缆长度; I_{ca} 为允许电压降 计算电流,可根据负载设备类型查表计算得出的回 路长期工作计算电流 I_{cal} 和回路短时工作计算电流 I_{ca2} ,取其中较大者进行计算; ΔU_p 为回路允许压降。

序号	名称	直流分电柜每 段远期负荷/W	直流分电柜每 段直流负荷/A
1	35 kV 保护小室直流分电柜	2800	12.72
2	220 kV 保护小室直流分电柜	3700	16.82
3	500 kV 保护小室直流分电柜	3250	14.77

根据文献[1]附录 E,直流柜至直流分电柜回路的允许压降 $\Delta U_{\rm P}$ 为 3% $U_{\rm n}$ ~ 5% $U_{\rm n}$ 。

通过代入直流分电柜进线段电缆的相关参数,可计算出按允许压降控制的该段电缆的计算截面 S_{eac} 大于 8.44~14.06 mm²。

根据 GB 50217—2018《电力工程电缆设计标准》^[16],可查得按负荷电流条件控制的该段电缆的计算截面 S_{cac} 大于 4 mm²。

根据上述计算结果,并在与设计单位充分讨论 后,考虑到工程现有物料、改造难度、供货时间等实 际情况下,在整改方案中尽可能选择与计算值接近 的标准电缆截面。因此,建议将直流分电柜进线段 原截面为 35 mm² 的电缆更换为截面为 16 mm² 的 电缆。

整改后,再次对更换电缆后的直流电源系统开 展保护级差配合测试。经测试,第四级保护实测短 路电流已降至 300 A 左右;第三级(分电柜)保护的 各直流断路器与第四级(设备屏)保护的直流电路 器未发生越级跳闸。经级差试验的验证,通过适当 减小电缆截面以实现直流电源系统保护电器级差配 合的整改方案是有效的。

5 结 论

直流电源系统保护电器的级差配合与短路电 流、电缆截面、负荷设备需求等互相制约,其最终的 正确性需经过试验进行验证,并应根据工程实际情 况选择适宜的方案。

上面以某 500 kV 新建变电站的直流电源系统 保护级差配合为案例,分析梳理了其交接试验中级 差不配合的原因,并结合实测参数和上、下级保护器 件的配置,提出了减小直流分电柜进线段电缆截面 的整改方案,所提方案在后续试验中得到了验证。

参考文献

[1] 能源行业发电设计标准化技术委员会.电力工程直流 电源系统设计技术规程:DL/T 5044—2014[S].北京: 中国计划出版社,2014.

- $\begin{bmatrix} 2 \end{bmatrix}$ 刘妮妮.变电站直流电源系统绝缘检测及校验研 究[D].合肥:合肥工业大学,2019.
- 刘佳.微型直流断路器电弧仿真模型优化研究[D]. [3] 上海:上海电机学院,2019.
- 金能,林湘宁,徐宁,等.应对直流电源丢失问题的中 [4] 压变电站二次系统性能提升方案及远方冗余保护新 判据研究[J].中国电机工程学报,2018,38(18): 5479-5489.
- 朱晓瑾,顾静鸣,李秉宇,等.发电厂直流电源系统选择性 [5] 保护方案分析[J].河北电力技术,2016,35(5):37-41.
- [6] 葛飞.保定南部地区直流电源系统改造策略优化及应 用研究[D].保定:华北电力大学,2016.
- 关守姝.电力直流电源系统空气开关级差配合的研 [7] 究[D].北京:华北电力大学,2015.
- 唐宝锋,张骥,李亮玉,等.变电站直流系统网络设计优化 [8] 及关键问题研究[J].河北电力技术,2018,37(6):50-53.
- 陆洪建,刘志远,杨晨,等.一种变电站直流电源级差配 [9] 合实现方法[J].宁夏电力,2021(4):60-64.
- [10] 李锋.微型断路器在高压开关二次回路中的应用[J]. 高压电器,2002,38(1):21-23.
- [11] 李晶,陈轲娜,罗洋,等.基于 Thevenin 模型的蓄电池 内阻监测装置的现场校验方法研究[J].电测与仪表,

(上接第21页)

- [13] ZHOU W H, YANG H Y, YANG H, et al. A statistical submodule open-circuit failure diagnosis method for MMCs enabling failure detection, localization and classification[C]//2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), Anaheim, CA, USA, IEEE:2356-2361.
- [14] XU K S, XIE S J, YAN Y, et al. A fast fault diagnosis method for submodule failures in modular multilevel converters [C]//2017 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Cincinnati, OH, USA, IEEE: 1125-1130.
- [15] 罗程,赵成勇,张宝顺,等.MMC 控制系统时序逻辑与 子模块故障监测[J].电力自动化设备,2015,35(5): 83-88.
- KHALEGHI M, IMAN-EINI H, FARHANGIZ S, et al. [16] Detection and localization of Hopen-circuit fault in modular multilevel converter [C]//2020 11th Power Electronics, Drive Systems, and Technologies Conference (PED-STC), Tehran, Iran, IEEE:1-6.
- [17] WANG L, CHENG G, BURENU T, et al. Automation and

2021,58(11):194-200.

- [12] 白忠敏.电力工程直流系统设计手册(第二版) [M]. 北京:中国电力出版社,2008.
- [13] 孙茗,於崇干.直流短路电流计算方法的中外标准差 异分析[J].电力勘测设计,2018(10):50-54.
- [14] Short-circuit currents in d.c. auxiliary installations in power plants and substations: IEC 61660.3 [S/OL]. [2022 - 08 - 20]. http://webstore.iec.ch/publication/ 5704.
- [15] Recommended practice for the design of DC auxiliary power systems for generating stations: IEEE Std 946 [S/OL]. [2022 - 08 - 20]. https://ieeexpbore.ieee. org/dolument/1453057.
- [16] 中国电力企业联合会标准化管理中心.电力工程电缆 设计标准:GB 50217-2018[S].北京:中国计划出版 社,2018.
- 作者简介:

董汉彬(1987),男,高级工程师,研究方向为高压开关 设备及直流电源技术研发与运维;

张明丽(1987), 女, 高级工程师, 研究方向为发电厂设计; 蒋 枝(1989),男,工程师,研究方向为变电站二次运 维技术。 (收稿日期:2022-08-18)

control design of overvoltage protection for sub-modules in modular multilevel converter [C]//2017 IEEE 2nd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC), Chengdu, China, IEEE: 1048-1052.

- [18] 李慧,张鹏,刘思嘉.MMC环流抑制策略的暂态分 析[J].电力系统保护与控制,2021,49(2):30-38.
- 张浩,刘欣和,王先为,等.柔性直流输电系统 MMC 换 [19] 流阀闭环充电策略[J].电力系统保护与控制,2019, 47(4): 134-142.
- [20] 张婕,曾国辉,赵晋斌,等.基于改进冒泡排序的模块 化多电平换流器电容电压均衡策略[J].电力系统保 护与控制,2020,48(6):92-99.

作者简介:

刘 凡(1978),男,博士,高级工程师,研究方向为输电 线路防灾减灾技术与特高压运维检修技术;

卜祥航(1987),男,博士,高级工程师,研究方向为电网 防灾减灾关键技术:

付峥争(1994),女,博士,工程师,研究方向为输电线路 故障暂态特性分析。

(收稿日期:2022-10-11)

叶根法兰螺栓松动位移变化仿真分析与 监测方案优化

邬伟骏¹,林家敏¹,魏东苑¹,程庆阳²,王东利²,李洪任²

(1. 国家电投集团福建建宁电力有限公司,福建建宁 354500;

2. 陕西中科启航科技有限公司,陕西 咸阳 712023)

摘 要:为确保风力发电机安全的运行,叶根法兰螺栓发挥着至关重要的作用。文中结合实际工程,建立了风力发电 机组叶根法兰螺栓连接模型,提出一种基于螺栓松动位移变化的仿真分析方法,以优化螺栓在松动状态下的法兰位 移监测方式。结合现场某机组叶根法兰位移变化进行了测试与仿真比对,显示结果相一致。所做研究可指导螺栓松 动监测的传感器方案布置与优化,为实时监测和远程预警风力发电机法兰螺栓运行状态提供参考。

关键词:风力发电机;叶根法兰;螺栓松动;传感器方案布置与优化

中图分类号:TK 83 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2023)02-0089-06

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230215

Simulation Analysis on Displacement by Bolt Looseness of Blade Root Flange and Its Monitoring Scheme Optimization

WU Weijun¹, LIN Jiamin¹, WEI Dongyuan¹, CHENG Qingyang², WANG Dongli², LI Hongren²
(1. Fujian Jianning Electric Power Co., Ltd. of China Power Investment Corporation, Jianning 354500,
Fujian, China; 2. Shaanxi Zhongke Qihang Technology Co., Ltd., Xianyang 712023, ShaanXi, China)

Abstract:Bolts of blade root flange play a vital role in ensuring safe operation of wind turbines. Combined with the actual project, based on the basic theory of bolt connection and the traditional simulation analysis method, the bolt connection model of blade root flange is established, and a simulation analysis method based on displacement change of bolt looseness is presented to optimize the monitoring mode of flange displacement under bolt looseness. The displacement change of blade root flange of a wind turbine is tested and compared with the simulation, and the results come to the same thing. This research can provide a direct guidance for sensor layout and optimization of bolt looseness monitoring, and provide a reference for real-time monitoring and remote warning of bolt looseness state of wind turbines.

Key words: wind turbine; blade root flange; bolt looseness; layout and optimization of sensorsn

0 引 言

近年来,全球风电产业高速发展,中国已经成为 全球风力发电规模最大、增长最快的市场^[1]。随着 风电领域的不断发展,风电装机容量逐年上升,单台 风力发电机的发电功率越来越高,造成了目前风力 发电机塔架高度逐渐升高,风力发电机叶片逐渐增 大,这对整个风机的安全运行提出了挑战。螺栓作 为风电机组的主要连接方式之一,应用在叶轮、轮 载、齿轮箱等诸多关键部位,关系到整个风电机组的 安全可靠运行^[2]。其中,高强螺栓具有承受载荷 大、抗疲劳性能好的优势,被广泛应用在风电机组主 要连接构件中,通常会安装在兆瓦级风机的塔筒法 兰之间、叶根和轮毂的主轴之间、主机架主要的部件 之间等重要部位^[3]。叶根处的高强度螺栓承受的 载荷很复杂,因此该部位经常发生螺栓断裂的问题, 给企业带来极大的经济损失,对运行维护人员造成 了一定的安全风险。

通过对现有风电塔事故研究分析表明,风机叶

根法兰螺栓松动是导致风机倒塌的主要因素^[4-6]。 经资料调研,导致法兰螺栓松动的因素主要有以 下方面^[5,7-9]:1)风机主要运行部件安装存在偏差; 2)螺栓未紧固到位;3)螺栓材料特性不合格。因 此,及早发现螺栓的松动情况有利于预防风机倒塌 事故。常规的预防方法是通过离线方法对螺栓松动 情况进行人工定时抽检,判断法兰盘里是否出现单 个或多个螺栓松动的情况^[5,10-12]。离线监测方法主 要有扭矩法和声弹性法两大类,尽管该方法可详细 检查到螺栓松动情况,但由于每座风机塔的螺栓数 量颇多,常规方法费时费力,不具有时效性。因此对 风力发电机组开展螺栓运行状态在线实时监测的研 究具有十分重要的意义。

当前,螺栓松动在线监测方法主要包括压电主 动传感法^[3-14]、压电阻抗法^[15-18]、图像处理法^[19-21]、 光栅光纤法^[22]、基于声弹性原理的超声波检测 法^[23-24]等。在线螺栓松动监测方法由于可以实现 对螺栓运行状态在线监测,近几年得到了快速的发 展并在实际工程中得到大量应用。但大多数螺栓松 动监测方法仅针对单一螺栓松动情况,风机发电机 结构复杂、螺栓数量众多,使用目前的螺栓松动在线 监测方法实现整个风力发电机组的监测需要耗费大 量的资源,成本高。为此,亟待发展叶根法兰螺栓松 动情况仿真分析与监测方案优化方法,以降本增效。

经现场调研,风电机组叶片螺栓存在疲劳断裂 现象,通过对叶片连接系统进行有限元分析,发现叶 片金属法兰是影响螺栓疲劳寿命的重要因素之 一[25]。文献[26]将虚拟仿真技术应用于风机机械 松动故障仿真分析,建立了可再现风机系统故障机 理的定量模型,为基于虚拟样机的旋转机械故障振 动可行性提供了依据。文献[27]利用有限元分析 的方法对结构中全部螺栓进行了分析,建立了有限 元分析模型,对整个螺栓组强度进行了分析研究。 文献[28]选取了两个高强度螺栓作为试验对象,分 析出了螺栓的受力情况。但上述仿真分析并未与实 际工程进行紧密结合,并未将仿真分析结果应用于 具体实际工程,也未对叶根法兰螺栓监测布置方案 提供优化设计指导。下面针对叶根法兰螺栓松动的 位移变化情况进行有限元仿真,提出一种基于叶根 法兰螺栓松动位移变化的仿真分析方法,通过监测

法兰位移与法兰连接螺栓松动状态监测方法相结 合,实现对螺栓运行状态的实时监测,为螺栓群松动 监测传感器方案布置与优化提供指导。

1 仿真模型建立

有限元建模采用通用有限元软件 ANSYS Mechanical 完成。基于当前风电行业常用的内圈变 桨结构,建立某机型叶根法兰位移螺栓松动位移变 化的有限元仿真模型。叶根法兰区域为多个部件的 装配件,其中部件结构复杂、连接关系繁多,建立的 有限元仿真模型包括以下关键内容。

1.1 结构部件

结构部件包含与法兰位移仿真结果有关的部件,如轮毂、变桨轴承、螺栓、螺帽、叶根法兰、叶根等。为了提高计算效率及实现模型参数化,简化轮毂、变桨轴承等部件中对法兰位移仿真结果无影响的局部细节,如轮毂用球壳、变桨轴承滚道形状用圆形等来近似。建立的仿真实体模型如图1所示。当图1的坐标系为柱面坐标系时,x轴代表径向方向,z轴代表轴向方向;当图1的坐标系为直角坐标系,y轴方向按照右手螺旋定则方式规定其方向。



图 1 叶根法兰位移仿真的实体模型

1.2 有限元模型

为兼顾计算精度与效率,轮毂、变桨轴承、叶根、 螺帽、螺栓头等均采用带增强应变的 SOLID185 单元、 全六面体方式进行网格划分;内圈螺栓与外圈螺栓的 杆身采用 BEAM188 单元模拟;变桨轴承滚珠采用 LINK180 单元模拟;各部件的连接或部件各部分的连 接则采用 170、174 单元,且根据连接部分在实际工作 中的连接状态,建立合适的接触关系(如绑定接触、 标准接触);另外,采用170、174单元在叶根中心与 叶根法兰外端建立加载点,施加叶根载荷。建立的 用于叶根法兰位移仿真的有限元模型如图2所示。



图 2 叶根法兰位移仿真的有限元模型

1.3 材料参数

各部件采用的弹性模量 *E*、泊松比μ、剪切模量 *G*等分别为:

1)轮毂球墨铸铁件

 $E = 1.69 \times 10^5$ MPa; $\mu = 0.275$

2) 变桨轴承、螺栓、螺帽、叶根等钢件

 $E = 1.69 \times 10^5$ MPa; $\mu = 0.275$

3) 叶根(玻璃钢件)

 $E_x = 8400 \text{ MPa}, E_y = 10\ 200 \text{ MPa}, E_z = 28\ 500 \text{ MPa}$ $\mu_x = 0.38$, $\mu_y = 0.30$, $\mu_z = 0.30$

G_{xy} = 3500 MPa, *G_{yz}* = 5580 MPa, *G_{xz}* = 5580 MPa *x*、*y*、*z*方向参照图 1 所示的柱坐标系。

1.4 模型参数化

仿真模型的建模(含实体建模、网格划分、连接 关系建立)、螺栓组件(螺栓规格、螺栓数量、螺栓 预紧力)选取、加载求解、法兰位移提取等,采用 ANSYS Mechanical 的 APDL(ANSYS 参数化设计语言) 实现,适用于不同机组、不同法兰位移传感器测距等。

1.5 结果提取

一般地,在叶根四周均匀布置4个传感器,通过 每个传感器上两测点的位移变化,反映该传感器对 应区域叶根法兰连接螺栓的松动状态,如图3所示。



图 3 叶根法兰位移提取的典型位置

有限元模型中法兰位移的提取位置间距,与传 感器测点的间距(约6 mm)对应。法兰位移实际上 包含了叶根变形,去除叶根变形后可以得到叶根法 兰间隙。在有限元模型中,提取间距为0的位移,即 为叶根法兰间隙。

2 仿真分析

2.1 约束及载荷施加

有限元仿真模型中,将轮毂与主轴的连接面全 约束,以模拟主轴对轮毂的支承作用。为便于分析 比较,仿真计算与分析采用叶根中心载荷,只考虑对 叶根法兰位移有较大影响的载荷 M_x 、 M_y ,忽略其他 次要载荷如 M_z 、 F_x 、 F_y 、 F_z 。仿真计算的载荷工况如 表 1 所示,其中叶根载荷坐标系参照图 1 所示直角 坐标系。

内圈螺栓(叶根-内圈变桨轴承连接螺栓)的数量为72,规格为M36;外圈螺栓(外圈变桨轴承-轮 载连接螺栓)的数量为64,规格为M36。螺栓的正 常预紧力为515 kN。

表 1 仿真计算与分析的载荷工况

丁辺	叶根载荷/	叶根载荷/(kN・m)		外圈螺栓
上7년 -	M_x	M_y	预紧力	预紧力
1	4356	0	$1.0F_{y}$	F_y
2	4356	0	$0.5F_y$	F_y
3	4356	0	$0.1F_{y}$	F_y
4	0	4356	$1.0F_{y}$	F_y
5	0	4356	$0.5F_y$	F_y
6	0	4356	$0.1F_y$	F_y

2.2 螺栓预紧力下的法兰位移

图 4 为在螺栓预紧力单独作用下的叶根法兰位 移(位移提取间距为 6 mm)。在螺栓预紧力作用 下,叶根法兰已经产生了压缩位移。在正常螺栓预 紧力下,法兰压缩位移为 12~14 μm。

不同螺栓预紧力产生的叶根法兰位移不同。当 有螺栓松动时,叶根法兰的位移会增加。传感器通 常是在停机状态下安装的,测量到的叶根法兰位移 是测量状态对于安装状态的相对值。因此,在叶片 某些简单受载条件(如叶片静止向下),当传感器测 量的法兰位移增加,则可判断传感器所在区域发生 了螺栓松动。正常预紧力作用下的叶根法兰位移、 法兰间隙情况如图 5 所示,两者相差约 3 μm。仅受 螺栓预紧力作用情况下,传感器测距越小,叶根法兰 位移值包含的叶根变形越小,叶根法兰的位移越接 近间隙。



图 5 正常螺栓预紧力作用下叶根法兰位移及间隙

2.3 各工况下的法兰位移

图 6—图 7 为各工况下的叶根法兰位移图。

各工况下的传感器位移测量值是测量状态对于 安装状态的叶根法兰位移相对值。与此对应,计算 提取的各工况下叶根法兰位移,是"预紧力+叶根载 荷状态"对于预紧力状态的位移变化。各工况下的 叶根法兰受拉侧,有螺栓松弛(如预紧力很小或完 全丢失)时会产生很大的压缩位移。另外,叶根载 荷 M_{*}、M_{*}的方向交变,叶根法兰有螺栓松弛时,会产 生很大的位移变化。在机组运行中,传感器测量的 法兰位移若出现很大压缩值或位移变化,表明传感 器所在区域有螺栓松驰。受叶片重力、叶轮旋转等 影响,叶根载荷 M, 的方向及大小交变剧烈,使叶根 前缘、后缘交替地受拉或受压;另外叶根载荷 M, 使 叶根迎风侧、主轴侧受拉或受压。因此叶根前缘、尾

缘、迎风侧、主轴侧等位置,适宜布置传感器测量法 兰位移。





图 7 工况 4~6 下的叶根法兰位移

叶根法兰的位移、间隙的差异仍然很小。以工 况3为例,差异不超过2µm,如图8所示。



仿真与实测对比分析 3

针对现场某机组进行叶根法兰螺栓松动情况的

法兰位移仿真分析与测试试验。螺栓编号及传感器 布置方式如图 9 所示。位移传感器布置位置:13102 在螺栓 2 号、3 号间;13402 在螺栓 7 号、8 号间; 13302 在螺栓 32 号处;13202 在螺栓 35 号、36 号间。

该叶根法兰的主要信息为:叶片重量为 12.19 t; 连接螺栓的内圈螺栓(叶根-内圈变桨轴承连接螺 栓)的数量为 56,规格为 M36;外圈螺栓(外圈变桨 轴承-轮毂连接螺栓)的数量为 92,规格为 M36;叶 片朝下,叶根载荷为叶片自重。因无法获取详细的 设计参数,此次仿真模型采用的螺栓预紧力、材料参 数、模型尺寸等,与前述仿真模型描述的相同。



图 9 现场某机组的叶根法兰螺栓编号

图 10 和图 11 分别为螺栓松动情况下的法兰位 移仿真值、测试值。图 10 中不同曲线表示在对应编 号螺栓释放预紧力后对应的法兰位移,图 11 表示在 逐步释放螺栓预紧力过程中,两个测点位置的法兰 位移输出。





螺栓松动情况下,叶根法兰典型位置的位移仿 真值、测试值如表2所示。

从表2仿真与测试结果对比可以看出:在叶片 自重载荷不变情况下,螺栓松动后,松动区域的法兰 位移随之增加;松动数量越多,法兰位移增加越大, 且仿真与测试的位移变化基本接近。



图 11 某机组叶根法兰松螺栓的位移测试曲线

表 2 某机组叶根法兰松螺栓的位移值

松动螺栓	桂咸嬰危墨	位移变化值/µm		
	按您确证且	测量值	仿真值	
3~7号	13102	8.0	7.1	
3~8号	13402	7.0	7.1	
全部	13402	19.5	18.4	

注:其他测试数据,受现场因素所致误差影响未采用。

4 结 论

上面利用所提仿真分析方法对螺栓松动情况下 叶根法兰位移变化情况进行了研究,提出了螺栓松 动状态下法兰位移监测优化方式,如传感器布置、螺 栓在预紧力或外载荷等不同状态的松动状态判断; 并对现场某机组叶根法兰位移变化进行了实测与仿 真比对。结果显示,所建立的叶根法兰位移变化仿 真模型的分析结果与现场实测相一致,为以后的应 用研究提供了重要参考依据。主要结论如下:

1) 仅受螺栓预紧力作用情况下, 传感器测距越 小, 叶根法兰位移值包含的叶根变形越小, 叶根法兰 的位移越接近间隙。

2)在机组运行中,传感器测量的法兰位移若出 现很大压缩值或位移变化,表明传感器所在区域有 螺栓松动。

3)叶根前缘、尾缘、迎风侧、主轴侧等位置,适 宜布置传感器测量法兰位移。

4) 对比结果显示, 螺栓松动后, 在叶片自重作 用下, 松动区域的法兰位移增加; 松动数量越多, 法 兰位移增加越大。

下一步,将继续进行现场机组叶根法兰位移监测应用基础研究,收集有效测试数据,持续验证和改

进所提出的仿真分析与监测方案优化方法,为法兰 位移法监测螺栓松动状态的现场应用提供理论与方 法支撑。

参考文献

- [1] 赵斌,殷聪,张闯,等.基于 RFID 技术的风电塔筒螺
 检松动智能检测系统[J].电测与仪表,2020,57(14):
 113-118.
- [2] 祝其高,张先鸣.我国紧固件行业技术发展[J].金属制品,2010(1):15-17.
- [3] 陈真. 风力发电机组高强度螺栓连接技术研究[D].重 庆:重庆大学,2011.
- [4] 何先龙, 佘天莉, 徐兵, 等. 基于塔筒振动特性识别风机塔螺栓松动的研究[J]. 振动与冲击, 2016, 35(14):112-118.
- [5] 魏泰,吴坤,黄军威.风机塔筒螺栓放松检测技术[J].
 机械与电子,2013 (8):78-80.
- [6] 龚元明,吴长水.高强度螺栓试验与测试系统的开发[J].上海工程技术大学学报,2011,25(1):27-30.
- [7] 缑百勇,陆秋海,王波,等.利用固有频率异常值分析法 检测螺栓拧紧力[J].振动与冲击,2015,34(23):77-82.
- [8] 余坚,谢寿生,任立通,等.拉杆转子装配振动检测分形 研究[J].振动与冲击,2014,33(14):84-88.
- [9] 李允公,孔祥娜,高玉勇.基于两被联件振动信号概率 密度和 PCA 的螺栓松动识别方法研究[J].振动与冲 击,2015,34(1):63-67.
- [10] 李源,曾宇,陈昌林.不同单元类型风机塔筒振动特性 比较研究[J].东方电机,2012(5):43-46.
- [11] RACHID Y, ISMAIL E B, TRITSCH J B, et al. Dynamic study of a wind turbine blade with horizontal axis[J].European Journal of Mechanics-A/Solids,2011, 20(2):216-225.
- [12] MURTAGH P J, BASU B, BRODERICK B M. Mode acceleration approach for rotating wind turbine blades[J]. Journal of Multi-Body Dynamics, 2001, 21(8):241-252.
- [13] WANG F, CHEN Z, SONG G. Smart Crawfish: A concept of underwater multi-bolt looseness identification using entropy-enhanced active sensing and ensemble learning[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021,149:107186.
- [14] WANG C, WANG N, HO S C, et al. Design of a novel wearable sensor device for real-time bolted joints health monitoring [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018,5(6):5307-5316.

- [15] 杜飞,张子涵,徐超.法兰螺栓松动的超声导波监测方法[J].压电与声光,2019,41(5):679-684.
- [16] XU J, DONG J, LI H, et al. Looseness monitoring of bolted spherical joint connection using electro-mechanical impedance technique and BP neural networks [J]. Sensors, 2019, 19(8): 1906.
- [17] Park G, Daniel J I. Structural health monitoring using piezoelectric impedance measurements [J]. The Royal Society, 2007, 10(1098): 373-392.
- [18] 王丹生.基于反共振频率和压电阻抗的结构损伤检测[D].武汉:华中科技大学,2006.
- [19] 蔡红梅,张转芳,张光利.基于图像处理的螺栓松动智能 监测方法研究[J].计算机仿真,2015,32(10):94-97.
- [20] 沈浩,江臣,陈宇文,等.基于深度学习的钢桁架螺栓 病害智能识别方法[J].南京工业大学学报(自然科 学版),2020,42(5):608-619.
- [21] 叶宏鹏.基于图像处理的动车轴端螺栓检测方法的研 究[J].北京:北京交通大学, 2018.
- [22] KHOMENKO A, KORICHO E G, HAQ M, et al. Bolt tension monitoring with reusable fiber Bragg-grating sensors[J].The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2016, 51(2):101-108.
- [23] 冉启芳,费如星,邓朝栋,等.用超声波方法测量螺栓 应力[J].固体力学学报,1982(1):64-69.
- [24] 孙国峰.基于超声波技术的螺栓紧固轴力测量应用研 究[D].杭州:浙江工业大学,2012.
- [25] 刘作辉,田凤帅,庄恒东.叶根金属法兰对风电机组叶 片螺栓疲劳性能的影响分析[J].风机技术,2020, 62(4):80-84.
- [26] 彭连兵,刘荣娥,胡树山.虚拟样机仿真技术用于风 机机械松动故障的仿真分析[J].风机技术,2012, 54(2):82-85.
- [27] KIM J, YOON J C, KANG B S. Finite element analysis and modeling of structure with bolted Joints[J].Applied Mathematic Modelling, 2007, 5(31):895-911.
- [28] SARRAJ M, BURGESS I W, DAVISON J B. Finite element modelling of steel fin plate connections infire[J].
 Fire Safety Journal, 2007, 42(6):408-415.

作者简介:

邬伟骏(1991),男,工程师,研究方向为新能源发电; 林家敏(1996),男,助理工程师,研究方向为新能源发电; 魏东苑(1996),女,助理工程师,研究方向为新能源发电。

(收稿日期:2022-08-31)

2023年第6届亚洲能源和电气工程会议

2023年第6届亚洲能源和电气工程会议 (ACEEE 2023)将于2023年7月21-23日在成都举办。本次会议由电子 科技大学主办,电子科技大学机械与电气工程学院承办,该会议将成为相关领域学者讨论和探索能源科学和电 气工程领域最新研究成果的理想平台。

征稿范围

会议主题包括但不限于: 节能与能量转换 燃料电池技术 等离子技术 可再生能源 太阳能/水能/风能 转换器和逆变器 故障诊断 接地和保护系统 高压电力线 核能

配电 电力系统稳定性和控制 电力系统规划、电力管理 电力工程和教育、电力经济学 需求管理电力池 功率流分析 电能质量 能源管理系统 能源政策和法规

能源定价 投资协调 优化技术 电力经济学 电力工程与教育 电力市场放松管制 电力行业的问题 零售电力市场 更多主题: http://www.aceee.net/cfp.html

出版和检索

被接收并注册的文章将出版到会议论文集,收录到IEEE Xplore,并向往年一年提交Ei Compendex and Scopus检索。 ACEEE 2018-2022 会议论文 集已被IEEE Xplore 数据库收录, 并已被Eicompendex 和 Scopus 检索。

投稿指南

全文(做报告并出版)或摘要(只做报告不出版)可通过投稿系统(点击)或邮箱aceee@vip.163.com投递。

组委会-2023年

国际咨询委员会

- Frede Blaabierg, Aalborg University, Denmark · Gianfranco Chicco, Politecnico di Torino, Torino, Italy
- · Matti Lehtonen, Aalto University, Finland
- · Diaa-Eldin A. Mansour, Egypt-Japan University of Science and Technology, Egypt
- · Ernane A.A.Coelho, Universidade Federal de Uberlândia (UFU), Brazil
- 大会主席
- Yang Han, University of Electronic Science and Technology of China (UESTC), China
- · Chao Yang, Tsinghua Sichuan Energy Internet Research Institute, China
- 大会联合主席
- Lijie Ding, State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, China
- · Xia Lei, Xihua University, China
- Guodong Chen, Shanghai Electric, China · Jinbin Zhao, Shanghai University of Electric Power, China
- 本地组织委员会主席
- · Bin Lin, University of Electronic Science and Technology of China (UESTC), China · Shuheng Chen, University of Electronic Science and Technology of China
- (UESTC), China · Tianyong Luo, University of Electronic Science and Technology of China
- (UESTC), China
- · Siyu Zhou, University of Electronic Science and Technology of China (UESTC), China
- · Fan Yang, Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd of China Power Engineering Consulting Group, China

程序委员会主席

- Josep M. Guerrero, Aalborg University, Denmark
- · Chenghong Gu, University of Bath, UK
- · Jiawei Chen, Chongqing University, China
- · Yongjun Chen, Yangtze University, China

- 程序委员会联合主席
- · Pengfei Hu, Zhejiang University, China · Xiang-qian Tong, Xi'an University of Technology, China
- · Fei Li, Hefei University of Technology, China
- 宣传主席
- · Tao Huang, Politecnico di Torino, Italy
- · Amr S. Zalhaf, University of Electronic Science and Technology of China, China
- · Yaoqiang Wang, Zhengzhou University, China
- · Yongqiang Chen, University of Electronic Science and Technology of China
- (UESTC), China
- · Xin Zhao, Northwestern Polytechnical University (NPU), China · Donghai Zhu, Huazhong University of Science and Technology, China
- · Jing Lyu, Shanghai Jiao Tong University, China
- · Shiwei Xia, North China Electric Power University, China · Binbin Li, Harbin Institute of Technology, China
- 出版主席
- · Yuyan Wang, Southwest University, China
- · Li Zhang, Hohai University, China
- · Zhilei Yao, Shanghai Maritime University, China
- · Fangwei Xu, Sichuan University, China
- 工业界联络主席
- · Weihua Luo, Southwest Branch of State Grid Corporation of China, China
- · Qunhai Huo, Chinese Academy of Sciences, China
- · Qionglin Li, State Grid Henan Electric Power Research Institute, China
- · Qinfei Sun, State Grid Beijing Electric Power Research Institute, China
- · Tianlong Xiong, Tsinghua Sichuan Energy Internet Research Institute, China
- · Lin Xu, Sichuan Electric Power Research Institute, China Treasurer · Xiaojun Meng, Hohai University, China
- 重要日期 承力 投稿截止日期: 2023年5月30日 会议通知日期: 2023年6月20日 电子神 越大学 机械与电气工程学院 电子神被大学 注册截止日期: 2023年6月30日 联系我们 Ms. Ainmire Chang **IEEE** 邮箱: accee@vip.163.com 四川電力技术 电力自动化设备

"源网荷储"统筹规划、科学有序、 创新发展等方面的发展及应用 征稿启事

在中国适时推进加快构建新发展格局的政策背景和"双碳"战略目标指引下,建设清洁低碳、安全高效的新型能源体系,提高能源供 给保障能力成为转变经济发展方式、保障国家能源安全的重要一环。

新型能源体系的构建,是全面推进碳达峰、碳中和的重要举措,新型电力系统是能源高质量发展、中国现代化经济体系转型升级的重 要载体。在国家发展大局中,"经济一能源一环境"三方关系正在向"新发展格局—新型电力系统一碳达峰碳中和"目标同步演化,也对 当前能源与电气工程领域提出了新的挑战。针对新型能源体系构建研究、新型电力系统的转型路径以及电源侧、电网侧、负荷侧、储能侧 等相关领域的支撑技术,《四川电力技术》开展"新型能源体系构建与新能源高质量发展的研究及应用"专题探讨,诚邀广大专家、学者 和专业人士投稿!

一、征稿范围(包括但不限于)

- (1)构建新型能源体系对新能源高质量发展的作用
- (2)新能源发展现状及关键技术研究进展
- (3) 以新能源为主体的新型电力系统路径优化
- (4)新型能源体系构建中"源、网、荷、储、共性关键支撑"的技术应用,以及在统筹规划、科学有序、创新发展等方面的发展及 应用研究
- (5)新型能源体系中的市场机制与交易模式
- (6)新型储能与氢能技术
- (7)综合能源联合优化及多能互补

二、截止时间

2023年6月15日

三、投稿要求

(1)论文应具有原创性,未公开发表,未一稿多投,不涉及署名争议,不涉及侵犯他人知识产权和泄露国家机密的内容,作者对论 文内容的真实性和客观性负责。

(2)摘要250~300字为宜,须包含四要素,即目的、方法、结果、结论,同时应着重说明文章的创新点。

(3)论文引言中研究目的清晰明确,详细介绍国内外研究背景,对现有其他研究者的工作进行客观的评述;阐述自己的观点,并对 自己的研究思路做一总体介绍。论文研究设计和方法叙述清楚,数据合理并被正确地分析和解释;比较所提出的方法和现有方法的优 缺点。

(4) 正文部分要求层次清晰、重点突出、论述严谨、文字简练,避免长篇公式推导,字数以不超过6000字(包括图表)为宜

(5)结论部分应概括文章研究工作,给出创新性、指导性结论。

(6)来稿请用Word排版,格式、摘要、作者信息请参考《四川电力技术》投稿网站首页论文模板。

(7)请保留论文图片、曲线和表格原始文件,必要时提交。

四、投稿方式

请登录《四川电力技术》投稿网站:http://scdljs.ijournals.cn/scdljs/home,投稿栏目请选择"**源网荷储的发展及应用**"专题。

五、投稿联系人

陈老师: 028-68134130

程老师: 028-69995169

罗老师: 028-69995168



广告发布登记编号:川广登字【2021】0005号 公开发行 国内定价12.00元/期