

四川电力技术

SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY

第46卷第4期

2023年8月

四川省电机工程学会

四川电力科学研究院

二零二三年 第四十六卷 第四期



ISSN 1003-6954



- 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

面向新型电力系统的 配电网故障检测与处置技术 征稿启事

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。

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
- (2) 适应分布式电源接入的配网继电保护技术
- (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
- (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

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。
- (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9月30日。
- (3) 投稿联系人：雷老师18602855676 程老师028-69995169 罗老师028-69995168

《四川电力技术》
编辑委员会

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 杨迎春 汪康康
肖 欣 肖先勇 苏少春
邹见效 陈 峰 胡朝华
唐万斌 梅生伟 黄 琦
董秀成 蒋兴良 韩晓言
廖学静
秘 书 李世平
程文婷

目 次

· 环保型绝缘气体与设备 ·	
环保型 C ₅ F ₁₀ O 混合气体设备研制现状与展望	
····· 夏亚龙,李富祥,兰新生,廖丽娟,易选泽,张晨萌,谢施君,刘 涛(1)	
弧后 C ₄ F ₇ N/N ₂ 混合气体复原过程研究	
····· 庚振新,张 孟,张 佳,夏亚龙,林 莘,刘祥峰(7)	
环保绝缘气体设备研发与应用进展	
····· 靳梦磊,夏亚龙,肖 淞,李 玮,唐 炬,张晓星(12)	
C ₅ F ₁₀ O 分解气体在 Cu 修饰 NiS ₂ 表面的吸附机理研究	
····· 陈学云,金广杰,许正举,崔 豪(17)	
· 高电压技术 ·	
基于傅里叶分析的高压直流输电次同步振荡控制研究	
····· 刘 影,景致远,陈贵刚,马豪杰(25)	
自并励磁系统灭磁容量计算与仿真分析	
····· 杨 玲,许其品,朱宏超,谢燕军,林元飞,李厚俊(31)	
· 电力设计优化 ·	
电力负荷预测研究综述	钱育树,孔钰婷,黄 聪(37)
模块化微型桩钻机的研制及工程应用	
····· 马 宁,林 峰,江 雷,狄锡颖,李 欣,张恒武,宋青杰,李欣伟(44)	
柔性直流输电技术在江北电网中的应用研究	雷 宇(48)
· 电力运检技术 ·	
变压器空载电流非线性变化原因研究	罗明才,马 进,刘 磊,徐会凯(54)
500 kV 输电线路导线检修作业平台固定架设计	高 亮(59)
敏感用户工业过程的过程免疫时间曲线刻画方法	
····· 马 骏,景 源,易 见,周之松,徐方维,龙晨瑞(63)	
220 kV 线路并联电抗器工程应用研究	
····· 孙健杰,袁明哲,殷攀程,张 治,陈 翔(69)	
· 经验交流 ·	
四川电力辅助服务市场建设的思考	马瑞光,王潇笛,刘洁颖,马天男(75)
毕节新能源送出电网故障分析及送电能力提高措施分析	
····· 明 杰,王国松,梅 涛(81)	
一起 10 kV 谐振接地系统连续故障分析	
····· 卫佳奇,袁明哲,陈 翔,令狐静波,曹 柯,许立志(85)	
一起 110 kV 电流互感器跳闸事故原因分析	
····· 刘圆方,国金明,陆晓彬,胡 林,郑荣锋,吴拓剑,袁瑞宜(91)	
封面图片由田海提供	

四川电力技术

双月刊 1978 年创刊
中国标准连续出版物号:
ISSN 1003-6954
CN 51-1315/TM
2023 年第 46 卷第 4 期(总 286 期)
主管单位:四川省电力公司
主办单位:四川省电机工程学会
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:cdsdljs@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
[期刊基本参数] CN 51-1315/TM * 1978 *
b * A4 * 94 * zh * P * ¥ 12.00 * 3000 * 17
* 2023-08

CONTENTS

• Environmentally Friendly Insulating Gases and Equipment •

Research and Consideration on Equipment Development of Eco-friendly C₅F₁₀O Mixed Gases
..... XIA Yalong, LI Fuxiang, LAN Xinsheng, LIAO Lijuan, YI Xuanze, ZHANG Chenmeng, XIE Shijun, LIU Tao(1)

Research on Recovery Process of C₄F₇N/N₂ Gas Mixture at Post Arc
..... GENG Zhenxin, ZHANG Meng, ZHANG Jia, XIA Yalong, LIN Xin, LIU Xiangfeng(7)

Research and Application Progress of Environmentally Friendly Insulating Gases
..... JIN Menglei, XIA Yalong, XIAO Song, LI Yi, TANG Ju, ZHANG Xiaoxing(12)

Research on Adsorption Mechanism of C₅F₁₀O Decomposition Gas on Cu-modified Monolayer NiS₂
..... CHEN Xueyun, JIN Guangjie, XU Zhengju, CUI Hao(17)

• High Voltage Technology •

Research on Control of Sub-synchronous Oscillation in HVDC Transmission Based on Fourier Analysis
..... LIU Ying, JING Zhiyuan, CHEN Guigang, MA Haojie(25)

Calculation and Simulation Analysis of De-excitation Capacity of Self-shunt Excitation System
..... YANG Ling, XU Qipin, ZHU Hongchao, XIE Yanjun, LIN Yuanfei, LI Houjun(31)

• Electric Power Design Optimization •

Review of Power Load Forecasting QIAN Yushu, KONG Yuting, HUANG Cong(37)

Development and Engineering Application of Modular Micro-pile Drilling Rig
..... MA Ning, LIN Feng, JIANG Lei, DI Xiying, LI Xin, ZHANG Hengwu, SONG Qingjie, LI Xinwei(44)

Application of Flexible DC Transmission Technology in Jiangbei Power Grid LEI Yu(48)

• Operation and Maintenance Technology •

Research on Causes of Nonlinear Variation of No-load Current in Transformer LUO Mingcai, MA Jin, LIU Lei, XU Huikai(54)

Design of Fixed Frame for Conductor Maintenance Platform of 500 kV Transmission Line GAO Liang(59)

PIT Curve Characterization Method for Industrial Processes of Sensitive User
..... MA Jun, JING Yuan, YI Jian, ZHOU Zhisong, XU Fangwei, LONG Chenrui(63)

Engineering Application Research of Installing Shunt Reactors in 220 kV Line
..... SUN Jianjie, YUAN Mingzhe, YIN Pancheng, ZHANG Zhi, CHEN Xiang(69)

• Experience Sharing •

Thoughts on Construction of Sichuan Electricity Ancillary Service Market MA Ruiguang, WANG Xiaodi, LIU Jieying, MA Tiannan(75)

Fault Analysis of Bijie New Energy Transmission Grid and Measures for Improving Transmission Capacity ... MING Jie, WANG Guosong, MEI Tao(81)

Continuous Fault Analysis of A 10 kV Resonant Earthed System
..... WEI Jiaqi, YUAN Mingzhe, CHEN Xiang, LINGHU Jingbo, CAO Ke, XU Lizhi(85)

Cause Analysis of A 110 kV Current Transformer Tripping Accident
..... LIU Yuanfang, GUO Jinming, LU Xiaobin, HU Lin, ZHENG Rongfeng, WU Tuojian, YUAN Ruiyi(91)

环保型C₅F₁₀O混合气体设备研制现状与展望

夏亚龙^{1,2}, 李富祥^{1,2}, 兰新生^{1,2}, 廖丽娟³, 易选泽³, 张晨萌⁴, 谢施君^{1,2}, 刘涛^{1,2}

(1.国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041; 2.电力物联网四川省重点实验室, 四川 成都 610041; 3.国网四川省电力公司资阳供电公司, 四川 资阳 641300; 4.国网四川省电力公司, 四川 成都 610041)

摘要:电气设备中温室气体SF₆对全球气候变暖的影响愈来愈受到重视,新型绝缘介质全氟戊酮C₅F₁₀O因优异的环保性能成为本领域的研究热点。纯C₅F₁₀O液化温度高,不宜直接在电气设备中应用,需要与液化温度较低的缓冲气体混合使用。文中通过总结C₅F₁₀O混合气体理化特性、绝缘特性、放电分解特性及其与电气设备内部常见金属材料的相容特性,发现C₅F₁₀O混合气体具有优良的分解特性;通过选择合适的混合方案,选用与C₅F₁₀O相容性良好的材料,C₅F₁₀O混合气体具备作为绝缘介质在电气设备中应用的潜力。现阶段国内外已经有环保型C₅F₁₀O混合气体绝缘设备工程示范应用案例,相关成果可为C₅F₁₀O混合气体设备的扩大应用提供支撑,助推中国能源行业绿色低碳转型。

关键词:环保绝缘气体; C₅F₁₀O混合气体; 绝缘特征; 分解特征; 相容性

中图分类号: TM 854 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2023)04-0001-06

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230401

Research and Consideration on Equipment Development of Eco-friendly C₅F₁₀O Mixed Gases

XIA Yalong^{1,2}, LI Fuxiang^{1,2}, LAN Xinsheng^{1,2}, LIAO Lijuan³, YI Xuanze³,
ZHANG Chenmeng⁴, XIE Shijun^{1,2}, LIU Tao^{1,2}

(1.State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. Power Internet of Things Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610041, Sichuan, China; 3. State Grid Ziyang Electric Power Supply Company, Ziyang 641300, Sichuan, China; 4. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: The impact of SF₆ greenhouse gas on global climate change in electrical equipment is increasingly receiving attention. The new insulating medium, C₅F₁₀O, has become a research hotspot in this field due to its excellent environmental performance. C₅F₁₀O has a high liquefaction temperature and is not suitable for direct use in electrical equipment. It needs to be mixed with a buffer gas with a lower liquefaction temperature. The physicochemical properties, insulation properties, discharge decomposition properties, and compatibility with common metal materials inside electrical equipment of C₅F₁₀O mixed gases are summarized. It is found that C₅F₁₀O gas mixture have excellent decomposition characteristics, and by selecting a suitable mixing scheme and materials that are compatible with C₅F₁₀O, C₅F₁₀O gas mixture has the potential to be used as insulating medium in electrical equipment. At present, there are engineering demonstration applications of environmentally friendly C₅F₁₀O gas mixture insulating equipment at home and abroad. The relevant achievements can provide support for the expansion of C₅F₁₀O gas mixture equipment applications and promote the green and low-carbon transformation of energy industry in China.

Key words: environmentally friendly insulating gases; C₅F₁₀O mixed gases; insulation characteristics; decomposition characteristics; compatibility

0 引言

SF_6 气体因优异的绝缘和灭弧性能被广泛应用于电力设备中^[1], 但它是迄今为止发现温室效应最强的气体^[2-3], 被联合国政府间气候变化专门委员会在多项条款中限制排放^[4-5]。近年来全球气候变暖日益严重, 积极应对气候变化、推动绿色低碳发展, 已成为全球共识和大势所趋。2020 年 9 月 22 日, 国家主席习近平在第七十五届联合国大会表示: “中国将提高国家自主贡献力度, 采取更加有力的政策和措施, 碳排放力争于 2030 年前达到峰值, 争取在 2060 年前实现碳中和”。目前全球 SF_6 年排放量已达 8100 t, 相当于约 1 亿辆新车每年产生的碳排放量。 SF_6 造成的温室效应不容忽视, 亟需寻找一种环境友好型介质替代电气设备中的温室气体 SF_6 。2022 年 8 月 24 日, 工信部等五部门联合发文《加快电力装备绿色低碳创新发展行动计划》, 明确提出要加快开展新型低温室效应环保绝缘气体等相关装备的研制。

近期学者们发现了绝缘能力极佳的新型环保绝缘介质 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$, 其全球变暖潜能值 (global warming potential, GWP) 仅为 1, 大气寿命低至 0.04 年, 表现出优异的环保性能。尽管其液化温度相对较高, 但与液化温度较低的 N_2 、 CO_2 、空气等气体混合使用, 具备作为绝缘介质替代 SF_6 的潜力^[6-8]。 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 混合气体中缓冲气体含量越多, 液化温度越低, 其绝缘性能也会降低。找到一种合适的混合方案, 既能保证设备的绝缘水平, 又能满足运行环境温度, 是混合气体工程应用的关键核心技术。另一方面, 由于气体绝缘设备不可避免地会发生一些放电缺陷, 混合气体在放电后还应该具备优良的分解特性, 其分解产物不会对设备和运维人员造成危害, 也不会腐蚀设备内部固体材料, 避免固体材料因腐蚀导致绝缘水平下降^[9-13]。

为此, 下面总结了针对不同混合方案下 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 混合气体的理化特性、绝缘特性、分解特性及其与设备内金属材料的相容性, 结合国内外环保型 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 混合气体绝缘设备示范应用案例, 发现 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 混合气体具备工程应用的潜力, 相关成果可为进一步开

发环保型 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 混合气体绝缘设备及其扩大应用提供支撑。

1 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 混合气体理化特性

1.1 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 混合气体液化温度

通过求解安托万方程, 可计算混合气体的饱和蒸气压曲线, 进而获取混合气体在不同压强下的液化温度。不同 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 分压下 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}/\text{N}_2$ 、 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}/\text{CO}_2$ 混合气体的液化温度随压强变化规律如图 1 所示。

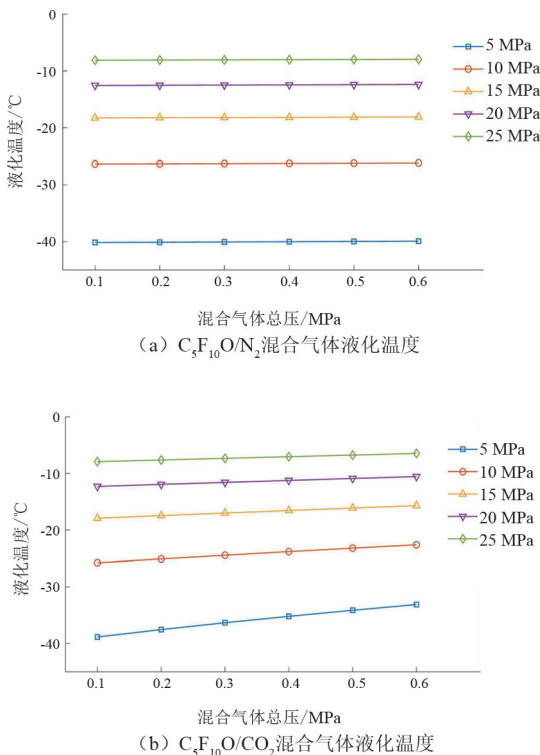


图 1 不同 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 分压下混合气体液化温度

由于 N_2 液化温度低于 CO_2 , 相同混合方案下, $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}/\text{N}_2$ 的液化温度低于 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}/\text{CO}_2$ 混合气体。相同分压下, 随着混合气体总压的升高, 一方面液化温度较高的 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 体积分数减小使得混合气体液化温度降低; 另一方面混合气体压强的升高引起液化温度上升, 两者的共同作用使得相同分压下, 混合气体的液化温度受总压的影响不大。可以看出, 当 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 分压小于 20 kPa 时, 0.1~0.6 MPa 下 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}/\text{N}_2$ 和 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}/\text{CO}_2$ 混合气体的液化温度都低于 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

1.2 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 混合气体 GWP

欧洲议会和理事会关于某些氟化温室气体的第 842/2006 号条例 (EC) 提出了混合气体的 GWP 计算

方法。由于 C₅F₁₀O 和纯 CO₂混合气体的 GWP 为 1,因此 C₅F₁₀O/CO₂混合气体的 GWP 也为 1。N₂不是温室效应气体,其 GWP 为 0,C₅F₁₀O/N₂混合气体的 GWP 小于 C₅F₁₀O/CO₂混合气体。图 2 为 C₅F₁₀O/N₂混合气体的 GWP。当 C₅F₁₀O 分压小于 25 kPa 时,C₅F₁₀O/N₂混合气体的 GWP 整体小于 0.76。C₅F₁₀O 混合气体表现出极佳的环保性能,相比于 GWP 高达 23 500 的传统温室气体 SF₆,其 GWP 下降超过 99.99%。

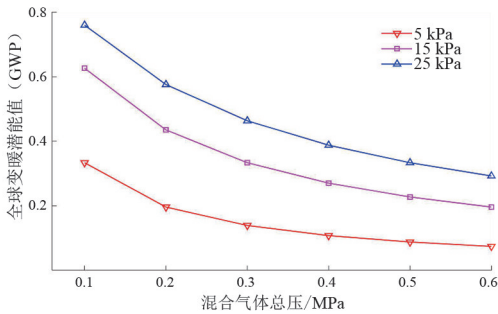


图 2 C₅F₁₀O 混合气体 GWP

2 C₅F₁₀O 混合气体绝缘特性

2.1 C₅F₁₀O 混合气体工频绝缘特性

通过试验测量球-球电极间隙 2 mm 下 C₅F₁₀O 混合气体工频击穿电压,对比混合气体与相同压强

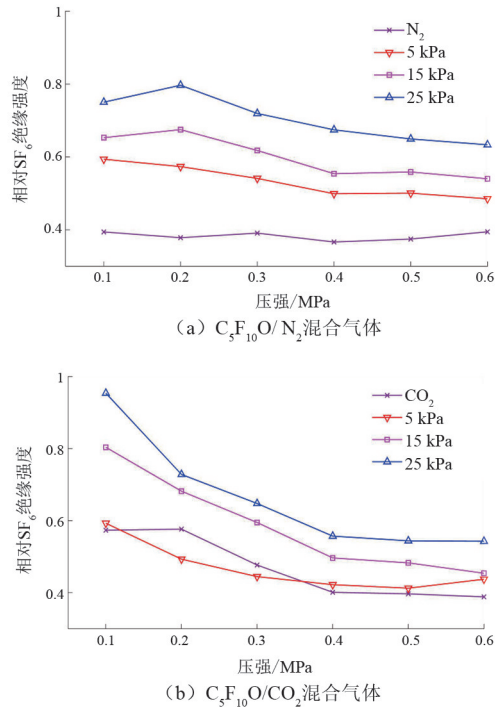


图 3 C₅F₁₀O 混合气体相对 SF₆工频绝缘强度

下纯 SF₆的绝缘强度。C₅F₁₀O 混合气体相对 SF₆绝缘强度如图 3 所示。

在混合气体压强小于 0.2 MPa 时,C₅F₁₀O/CO₂混合气体绝缘性能优于 C₅F₁₀O/N₂;0.1 MPa、分压 25 kPa 下 C₅F₁₀O/CO₂混合气体的绝缘水平达到相同压强下纯 SF₆的 95.40%。混合气体压强大于 0.2 MPa 后,C₅F₁₀O/N₂的绝缘水平高于相同工况下的 C₅F₁₀O/CO₂,但仍低于相同压强下 SF₆气体的绝缘强度;压强 0.2 MPa 时,15 kPa 分压 C₅F₁₀O 混合气体的绝缘水平仅约为 SF₆的 70%左右。

2.2 O₂对 C₅F₁₀O 混合气体工频绝缘特性影响

环保型 C₅F₁₀O 混合气体电气设备发生放电后,由于碳元素的存在会在电极表面析出黑色的固体颗粒,这些析出物破坏了电极表面光滑的结构,使得电极间的放电电压大幅降低,进而降低电气设备的绝缘水平。试验发现,在混合气体中加入适当的 O₂可有效抑制固体颗粒的析出,同时还可以提升混合气体绝缘水平。当 C₅F₁₀O 所占比例为 4.17%时,不同含量 O₂下混合气体相对 SF₆绝缘强度如图 4 所示。

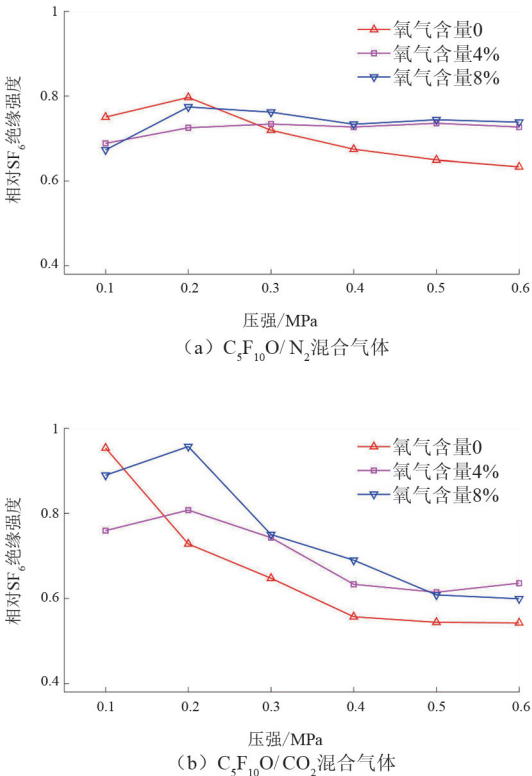


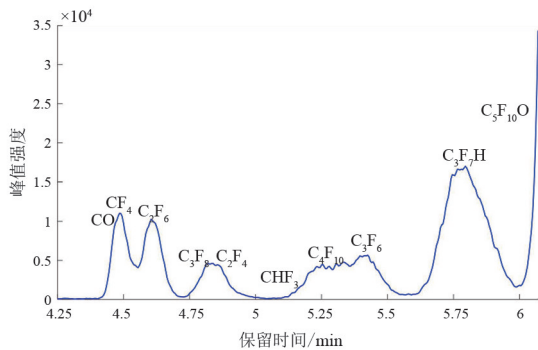
图 4 O₂对 C₅F₁₀O 混合气体绝缘水平影响规律

C₅F₁₀O 混合气体绝缘水平整体上低于相同压

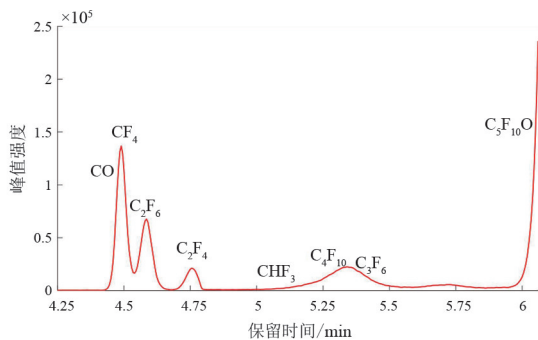
强下 SF_6 , 加入 O_2 后混合气体整体绝缘水平得到提升, 通过选择合适的混合比例并适当提高充入设备的压力, $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 混合气体绝缘水平有望达到 SF_6 相当水平。

3 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 混合气体分解特性

搭建气体放电分解试验特性平台, 分别对 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 分压依次为 10 kPa、20 kPa 和 30 kPa 以及混合气体总压为 0.1~0.6 MPa 的 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}/\text{N}_2$ 和 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}/\text{CO}_2$ 混合气体进行 20 次击穿试验, 采集击穿后的气体并利用气相色谱质谱联用仪对分解产物进行定性与定量分析, 评估 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 混合气体的稳定性, $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}/\text{N}_2$ 、 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}/\text{CO}_2$ 混合气体击穿 20 次后分解产物定性分析结果如图 5 所示。



(a) $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}/\text{N}_2$ 混合气体

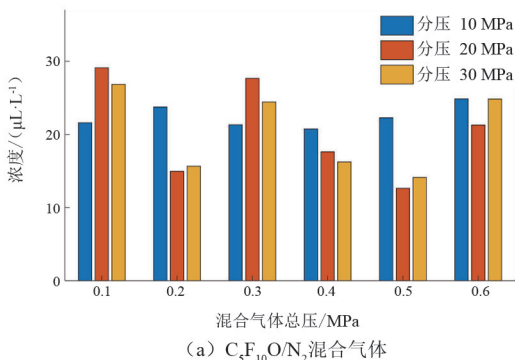


(b) $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}/\text{CO}_2$ 混合气体

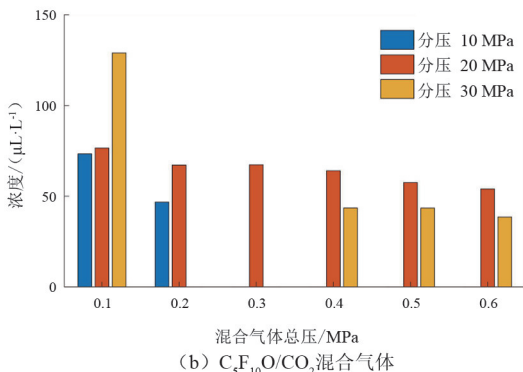
图 5 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 混合气体击穿后分解产物定性分析结果

$\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}/\text{N}_2$ 混合气体在多次击穿后主要分解产物包括: CO 、 CF_4 、 C_2F_6 、 C_3F_8 、 C_2F_4 、 CHF_3 、 C_4F_{10} 、 C_3F_6 、 $\text{C}_3\text{F}_7\text{H}$ 等。其中, C_2F_4 、 C_2F_6 、 C_3F_6 、 C_3F_8 浓度较低, 均小于 $3.5 \mu\text{L}/\text{L}$; CF_4 浓度随着 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 分压的升高不断增加, 最大值也仅为 $4.35 \mu\text{L}/\text{L}$ (分压

30 kPa、总压 0.1 MPa); CHF_3 浓度随着混合气体总压的升高整体呈现出减小的规律, 分压 20 kPa、总压 0.1 MPa 时, 浓度最高值为 $9.37 \mu\text{L}/\text{L}$ 。分解产物中 CO 的浓度最高, 在 $15\sim 30 \mu\text{L}/\text{L}$ 范围内, 如图 6(a) 所示。对于 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}/\text{CO}_2$ 混合气体, 定性分析结果显示分解产物种类更少, C_3F_8 和 $\text{C}_3\text{F}_7\text{H}$ 没有检测到, CO 浓度相对较高, 如图 6(b) 所示, 其余分解产物整体上含量要低于 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}/\text{N}_2$ 混合气体。



(a) $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}/\text{N}_2$ 混合气体



(b) $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}/\text{CO}_2$ 混合气体

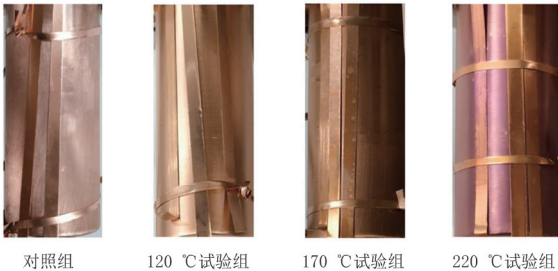
图 6 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 混合气体击穿后分解产物定性分析结果

4 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 混合气体与金属材料相容性

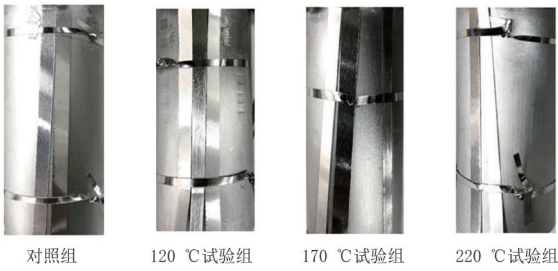
武汉大学唐炬教授团队搭建了 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 与金属材料气固界面相互作用试验平台, 测试了 $120\sim 220^\circ\text{C}$ 范围内 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}/\text{N}_2$ 混合气体与铜、铝和银等金属的气固界面相互作用, 评估了 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 与电气设备中常见金属的相容性^[14-17]。图 7 给出了 3 种常见金属铜、铝、银与 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}/\text{N}_2$ 混合气体加热老化后表面颜色变化。

对照实验组中金属铜材料为紫红色且色泽鲜亮, 试验温度为 120°C 和 170°C 时铜表面颜色逐渐

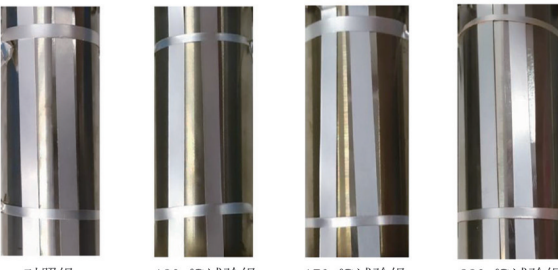
变为金黄色,其中,试验温度为 170 ℃ 时铜片表面有部分区域颜色变暗,试验温度为 220 ℃ 时铜表面呈现粉红色。试验前后金属铝、银表面的颜色并没有发生类似铜表面明显的颜色变化。进一步对其微观形貌的试验测试发现,金属铜会被 C₅F₁₀O 腐蚀,不适合在 C₅F₁₀O 混合气体绝缘设备中应用,金属铝和银具有良好的相容性,可以用作 C₅F₁₀O 混合气体绝缘设备金属材料。



(a) 试验前后金属铜表面颜色变化



(b) 试验前后金属铝表面颜色变化



(c) 试验前后金属银表面颜色变化

图 7 常见金属与 C₅F₁₀O/N₂ 混合气体接触后表面颜色

5 C₅F₁₀O 混合气体设备研制与应用

5.1 国外 C₅F₁₀O 混合气体设备示范应用

2014 年,ABB 公司以 C₅F₁₀O/空气混合气体为绝缘介质,研制出 22 kV 环保型 C₅F₁₀O 混合气体环

网开关柜,其结构如图 8 所示。2015 年,该环保型开关柜在苏黎世的一个变电站进行挂网试运行^[18-19]。

5.2 国内 C₅F₁₀O 混合气体设备示范应用

2022 年,国网四川省电力公司电力科学研究院、武汉大学等团队以 C₅F₁₀O、N₂ 和 O₂ 混合气体为绝缘介质,研制出 35 kV 环保型 C₅F₁₀O 混合气体电流互感器,并在国网资阳供电公司 110 kV 宝林变电站实现首次示范应用,如图 9 所示。截至目前 3 台互感器运行状况良好。



图 8 ABB 公司研制的 C₅F₁₀O 混合气体开关柜结构



图 9 35 kV 环保型 C₅F₁₀O 混合气体电流互感器示范应用

6 结 论

现有研究表明,环保型 C₅F₁₀O 混合气体有望作为绝缘介质在气体绝缘设备中广泛应用。研究团队

将持续跟踪目前已示范应用的 35 kV 环保型电流互感器运行情况,定期对运行后气体进行定量和定性分析,指导环保型 $C_5F_{10}O$ 混合气体设备的研制和优化。为推动 $C_5F_{10}O$ 混合气体的扩大应用,该领域还亟需开展以下工作:

1) 研究 $C_5F_{10}O$ 混合气体与电气设备中吸附剂、绝缘件等非金属固体材料间的相容性,指导研发其他新型环保气体绝缘设备提供支撑;

2) 开展基于 $C_5F_{10}O$ 混合气体特征分解产物的绝缘缺陷识别和诊断技术,为环保型 $C_5F_{10}O$ 混合气体绝缘设备运维提供指导。

参考文献

- [1] 林莘,王飞鸣,冯凯,等.高压 SF_6 断路器介质绝缘强度恢复机理研究[J].中国电机工程学报,2017,37(20): 6118-6125.
- [2] 高克利.新环保气体设计与环保 GIL 关键技术研究进展[R].沈阳:中国电机工程学会高电压专业委员会, 2019.
- [3] 肖登明.环保型绝缘气体发展前景[J].高电压技术, 2016,42(4):1035-1046.
- [4] KIEFFEL Y, IRWIN T, PONCHON P, et al. Green gas to replace SF_6 in electrical grids [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2016,14(2):32-39.
- [5] RABIE M, FRANCK C M. Assessment of eco-friendly gases for electrical insulation to replace the most potent industrial greenhouse gas SF_6 [J]. Environmental Science & Technology, 2018,52(2):369-380.
- [6] HYRENBACH M, ZACHE S. Alternative insulation gas for medium-voltage switchgear[C]. 2016 Petroleum and Chemical Industry Conference Europe (PCIC Europe). IEEE,2016:1-9.
- [7] STOLLER P C, DOIRON C B, TEHLAR D, et al. Mixtures of CO_2 and $C_5F_{10}O$ perfluoroketone for high voltage applications[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017,24(5):2712-2721.
- [8] 王小华,傅熊雄,韩国辉,等. $C_5F_{10}O/CO_2$ 混合气体的绝缘性能[J].高电压技术,2017,43(3):715-720.
- [9] 唐炬,唐博文,李伟,等.环保绝缘气体 $C_5F_{10}O$ 分解及复原性能研究现状及展望[J].中国电机工程学报, 2022,42(3):1210-1223.
- [10] 周朕蕊,韩冬,赵明月,等.电晕放电下 $C_5F_{10}O$ 混合气体的分解特性[J].电工技术学报,2021,36(2): 407-416.
- [11] 张然植. $C_5F_{10}O$ 气体放电分解组分在 Cu(110) 表面吸附特性研究[D].沈阳:沈阳工业大学,2021.
- [12] 唐炬,代靓君,李晨,等.环保型 $C_5F_{10}O$ 绝缘介质过热分解后的自还原特性[J].中国电机工程学报,2020, 40(21):7123-7132.
- [13] 李伟,张晓星,肖淞,等.环保型绝缘介质 $C_5F_{10}O$ 放电分解特性[J].中国电机工程学报,2018,38(14): 4298-4306.
- [14] LI Yalong, ZHANG Xiaoxing, XIA Yalong, et al. Study on the compatibility of eco-friendly insulating gas $C_5F_{10}O/N_2$ and $C_5F_{10}O/Air$ with copper materials in gas-insulated switchgears[J]. Applied Sciences, 2020, 11(1):197.
- [15] ZENG Fuping, Feng Xiaoxuan, LEI Zhicheng, et al. Thermal decomposition mechanism of environmental-friendly insulating gas $C_5F_{10}O$ on Cu(111) surface[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2021, 41: 1455-1469.
- [16] LI Yi, ZHANG Xiaoxing, CHEN Dachang, et al. Theoretical study on the interaction between C_5F_7N and Al(111), Ag(111): A comparative study[J]. Applied Surface Science,2019,464:586-596.
- [17] SHE Congdong, TANG Ju, CAI Rijian, et al. Compatibility of $C_5F_{10}O$ with common-used sealing materials: An experimental study[J]. AIP Advances, 2021,11(6): 65220.
- [18] HYRENBACH M, ZACHE S. Alternative insulation gas for medium-voltage switchgear[C]. 2016 Petroleum and Chemical Industry Conference Europe (PCIC Europe). IEEE,2016.DOI:10.1109/PCICEurope.2016.7604648.
- [19] HYRENBACH M, HINTZEN T, MÜLLER P, et al. Alternative Gas Insulation in Medium-voltage Switchgear[C]//23rd International Conference on Electricity Distribution, June 15-18, 2015, Lyon:0587.

作者简介:

夏亚龙(1989),男,博士(后),高级工程师,研究方向为 SF_6 及其混合气体特性、新型环保绝缘气体设备研制与应用;

李富祥(1973),男,硕士,教授级高级工程师,长期从事电网发展规划、环保化学、物资检测、通信信息等专业管理工作;

兰新生(1979),男,硕士,教授级高级工程师,从事电网环境保护和化学专业技术及管理工作。

(收稿日期:2023-04-13)

弧后 C_4F_7N/N_2 混合气体复原过程研究

庚振新¹, 张 孟¹, 张 佳², 夏亚龙³, 林 莘¹, 刘祥峰¹

(1. 沈阳工业大学, 辽宁 沈阳 110870; 2. 国网甘肃省电力公司电力科学研究院, 甘肃 兰州 730070;

3. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

摘要: C_4F_7N/N_2 混合气体是目前潜在替代 SF_6 的绝缘介质之一。 C_4F_7N/N_2 混合气体分解与复原过程的研究, 对于深入了解该混合气体的熄弧性能具有重要意义。首先, 模拟 C_4F_7N/N_2 混合气体在 0.3~30 kK 热平衡条件下分解产物粒子浓度的变化; 然后, 确立 C_4F_7N/N_2 混合气体的分解路径及粒子种类并计算出各反应的正、逆向速率常数; 最后, 引用 0.1 MPa 下 C_4F_7N/N_2 混合气体弧后温度衰减曲线, 作为模拟弧后 C_4F_7N/N_2 混合气体复原过程中的温度变化数据, 通过 Chemkin 软件计算弧后 C_4F_7N/N_2 混合气体各粒子的复原过程。模拟结果表明: 弧后温度在 10 kK 以上时 C_4F_7N 和 N_2 在 8~10 ms 内完全分解, 以 C、N、F、 CF_2C 、CFCF、NF、CN 等粒子和自由基的形式存在; 弧后温度降低至 2 kK 左右, N_2 复合至摩尔分数约 70% 左右, 而 C_4F_7N 未见复合。

关键词: C_4F_7N/N_2 混合气体; 气体复原; 弧后; 反应速率常数; 粒子浓度

中图分类号: TM 835 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2023)04-0007-05

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230402

Research on Recovery Process of C_4F_7N/N_2 Gas Mixture at Post Arc

GENG Zhenxin¹, ZHANG Meng¹, ZHANG Jia², XIA Yalong³, LIN Xin¹, LIU Xiangfeng¹

(1. Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, Liaoning, China; 2. State Grid Gansu

Electric Power Research Institute, Lanzhou 730070, Gansu, China; 3. State Grid Sichuan Electric

Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: C_4F_7N/N_2 gas mixture is one of the potential substitutes for SF_6 insulating medium at present, and the study on decomposition and recovery process of C_4F_7N/N_2 gas mixture is of great significance for further understanding of arc extinguishing performance of this mixture. Firstly, the variation of decomposition species concentration of C_4F_7N/N_2 gas mixture at 0.3~30 kK thermal equilibrium is simulated. Then the decomposition paths and species of C_4F_7N/N_2 gas mixture are established and the forward and reverse rate constants of each reaction are calculated. Finally, the post arc temperature attenuation curve of C_4F_7N/N_2 gas mixture under 0.1 MPa is used as the temperature change data in recovery process of C_4F_7N/N_2 gas mixture at post arc, and the Chemkin software is used to calculate the recovery process of each decomposition species of C_4F_7N/N_2 gas mixture at post arc. The simulation results show that when the post-arc temperature is above 10 kK, C_4F_7N and N_2 completely decompose in 8~10 ms, and exist in the form of C, N, F, CF_2C , CFCF, NF, CN and other particles and free radicals, and when the post-arc temperature drops to about 2 kK, N_2 recombines to about 70% mole fraction, while C_4F_7N does not recombine.

Key words: C_4F_7N/N_2 gas mixture; gas recovery; post arc; reaction rate constant; particle concentration

0 引言

C_4F_7N 气体具有优良的绝缘性能和环保特性,是目前潜在替代 SF_6 的绝缘介质之一^[1-3]。由于 C_4F_7N 液化温度较高^[4],一般需与缓冲气体混合使用。

近几年国内外学者对 C_4F_7N 及其混合气体的分解机理展开了研究,文献[5-8]对 C_4F_7N 混合气体的热力学参数进行了研究,计算了不同比例下的定压比热、饱和蒸汽压、质量密度等参数。文献[9-11]对 C_4F_7N/N_2 混合气体的分解机理进行了研究,通过建模计算了不同温度下 C_4F_7N 和 N_2 的分解情况。研究发现 N_2 作为缓冲气体,在高能电场或局部过热的条件下,避免了 C_4F_7N 的大量分解。文献[12-15]研究了 C_4F_7N/N_2 混合气体的部分分解路径,结合过渡态理论,计算了分解反应的速率常数。近些年国内外学者对绝缘气体的分解体系研究逐渐完善,但对于绝缘气体的复原过程却鲜有报道。

考虑到液化温度、绝缘强度等因素的影响,下面在 C_4F_7N/N_2 混合气体局部热力学平衡计算的基础上,开展弧后 C_4F_7N/N_2 混合气体的复原过程研究。首先,确立 C_4F_7N/N_2 混合气体的反应粒子种类,计算出热力学平衡状态下 0.3~30 kK 温度范围内的粒子浓度;然后,确定 C_4F_7N/N_2 混合气体反应路径并计算各反应的反应速率常数,引用 0.1 MPa 下 C_4F_7N/N_2 混合气体弧后的温度衰减曲线作为模拟弧后 C_4F_7N/N_2 混合气体复原过程中的温度变化数据,通过 ANSYS 软件计算弧后 C_4F_7N/N_2 混合气体粒子复原过程的摩尔分数变化;最后,与热力学平衡状态的粒子摩尔分数进行对比与分析并总结。

1 反应粒子种类

首先,考虑 C_4F_7N/N_2 混合气体可能生成的粒子种类,并对粒子进行几何结构优化及能量的计算,这是计算热力学平衡条件下粒子浓度变化和弧后混合气体复合过程的第一步。 C_4F_7N/N_2 混合气体可能生成的粒子共 52 种,如表 1 所示。

通过仿真软件构建 52 种粒子的分子模型,用 B3LYP 密度泛函的方法在 6-311+G(d,p) 基组水平上对分子进行结构优化。在得到最优分子几何结构的基础上,采用更高水平的 CCSD(T)/def2-TZVPP

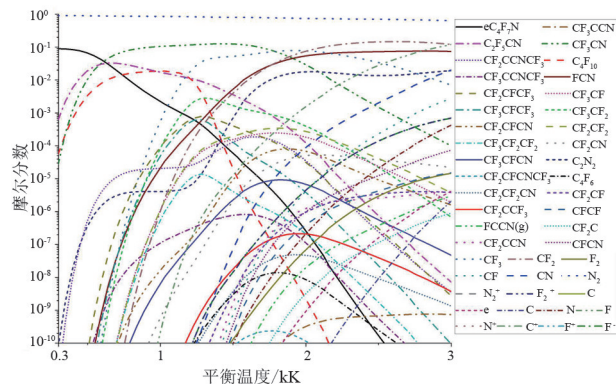
方法计算最优分子结构的最低能量以及熵、焓等参数。

表 1 C_4F_7N/N_2 生成粒子种类

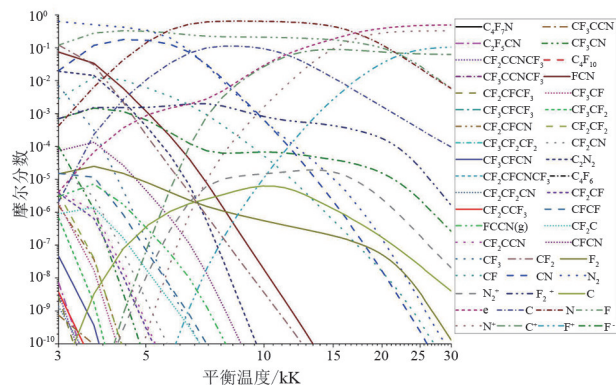
粒子	物质
分子	C_4F_7N 、 N_2 、 CF_3CCNCF_3 、 FCN 、 CF_3CF_3 、 CF_2CFCF_3 、 CF_3 、 CF_3CFCN 、 CN 、 NF_3 、 CF_3CFCF_3 、 CF_3CCF_3 、 $CF_2CFCNCF_3$ 、 C_3F_8 、 CF_3CCN 、 $CF_3CFCNCF_2(g)$ 、 CF_2CCNCF_3 、 CF_2CFCN 、 CF_2CCN 、 NF 、 CF_2CCF_3 、 $CFCF$ 、 CF_3CF 、 CF_2CF 、 CF_2CF_2CN 、 $CFCN$ 、 NF_2 、 CF_2CN 、 CF_2CF_2 、 CF 、 $FCCN(g)$ 、 CF_2 、 $CF_3CF_2CF_2$ 、 CF_3CF_2 、 C_4F_{10} 、 CF_2C 、 C_2N_2 、 C_4F_6 、 C 、 N 、 F 、 CF_3CN 、 C_2F_5CN 、 CF_4
离子	e^- 、 N_2^+ 、 F_2^+ 、 C^+ 、 C^- 、 N^+ 、 F^+ 、 F^-

2 热平衡状态下粒子浓度计算

为了研究弧后 C_4F_7N/N_2 混合气体复原过程,先计算了热力学平衡状态下混合气体的分解情况。假设局部热力学平衡(local thermodynamic equilibrium, LTE),用牛顿-拉夫森算法^[16]将等离子体系统的吉布斯自由能降至最小,模拟在 0.3~30 kK 温度范围内 0.1 MPa 下 9% C_4F_7N 与 91% N_2 混合气体分解后各粒子的摩尔分数,如图 1 所示。



(a) 0.3~3 kK 温度下粒子浓度变化



(b) 3~30 kK 温度下粒子浓度变化

图 1 热力学平衡状态下粒子浓度变化

图 1(a)中可以看出: C_4F_7N 分子在 0.5~0.7 kK

温度下就开始分解,在不到 3 kK 的温度下,基本上已经分解殆尽,与文献[17]计算结果基本一致;而 N_2 在 3 kK 的温度下开始分解,在 6 kK 左右开始大量分解,与文献[18]结果基本一致;在 0.3~3 kK 温度范围内, C_4F_7N/N_2 混合气体的粒子组分主要由 C_2F_5CN 、 C_4F_{10} 、 CF_3CN 、 CF_3 、 CFN 等组成。

C_4F_7N 分解过程中, C_4F_{10} 、 C_2F_5CN 、 CF_3CN 等粒子最早出现,随着温度继续升高,生成的粒子继续发生分解,在温度达到 30 kK 时的粒子基本为小分子粒子及带电粒子,如 N^+ 、 C^+ 、 N^+ 、 C 、 N 等自由基粒子,如图 1(b)所示。

3 反应路径与速率常数

确定反应路径并计算其正向速率常数和逆向速率常数是研究弧后 C_4F_7N/N_2 混合气体复原过程的关键步骤。下面根据 C_4F_7N 和 N_2 的分子结构,确立了 C_4F_7N/N_2 混合气体可能发生的 67 种反应路径及生成粒子种类后,计算各反应的速率常数。

对于有过渡态的反应,采用过渡态理论(transient-state theory, TST)计算反应速率常数^[19]。以反应式 $CF_3 + CF_3CFCN \rightarrow CF_4 + CF_2CFCN$ 为例,当 C1 与 F2 的化学键发生断裂且 F2 与 C9 产生化学键的过程中,扫描出反应中存在过渡态,如图 2 所示。

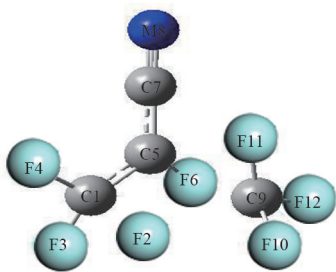


图2 过渡态分子结构

将过渡态按照粒子的计算方式进行结构优化和高基组的能量计算。将 Gaussian 软件中结构优化后的过渡态及生成物 CF_4 和 CF_2CFCN 的输出文件进行能量校正后,将输出文件放入 kisthelp 软件中。通过设置温度,可以计算出该温度下过渡态到生成物的速率常数。设置的温度范围为 0.3~30 kK,温度间隔 0.1 kK。计算特定温度下的正向速率常数的公式为

$$k_{TST}(T) = \kappa \sigma \frac{k_b T}{h} \left(\frac{RT}{P_0} \right)^{\Delta n} \exp\left(\frac{-\Delta G^{0,\neq}}{k_b T} \right) \quad (1)$$

式中: T 为温度; $k_{TST}(T)$ 为正向速率常数; k_b 为玻尔

兹曼常数; P_0 为标准大气压 (0.1 MPa); h 为普朗克常数; R 为理想气体常数; $\Delta G^{0,\neq}$ 为反应的标准吉布斯自由能; Δn 表示气相双分子反应为 1 或单分子反应为 0; κ 为振动的缩放系数; σ 为反应路径简并度^[15]。反应的平衡常数 K_c 可由式(2)得到。

$$K_c = \left(\frac{1}{RT} \right)^{\Delta \lambda} \exp\left(\frac{\Delta S^0}{R} - \frac{\Delta H^0}{RT} \right) \quad (2)$$

式中, ΔS^0 和 ΔH^0 分别为反应中从反应物 CF_3 和 CF_3CFCN 到生成物 CF_4 和 CF_2CFCN 完全转变过程中发生的熵变和焓变; $\Delta \lambda$ 为某一组分从反应物到过渡态过程中净化学计量系数的改变量,反应物为单原子反应时, $\Delta \lambda = 0$,反应物为双原子反应时, $\Delta \lambda = -1$,这里计算多数采用单原子反应。

用正向速率常数 $k_{TST}(T)$ 除于平衡常数 K_c ,可得到逆向速率常数 k_i 。计算出该反应不同温度下的逆向速率常数后,将逆向速率常数拟合为 $k_i(T)$

$$k_i(T) = AT^n \exp(-E_a/RT) \quad (3)$$

式中: A 为前因子; n 为温度指数; E_a 为反应活化能。用这 3 个参数可以确定不同温度下的逆向反应速率常数,正向速率常数也用此方法进行拟合。

对于反应式中没有过渡态的反应即无势垒反应,采用变分过渡态理论(variational transient-state theory, VTST)的方法计算反应速率。通过 Gaussian 软件将反应中反应物断裂的化学键设置为柔性扫描,步长为 0.1 Å,设置 50 步柔性扫描。反应物的化学键从连接到断裂分解为生成物的过程中,每一步长的变化都可以获得该状态下的分子结构。将每步长下的分子结构进行相同方法的结构优化及高基组的单点能计算,通过上述计算过渡态与生成物的反应速率常数的方法,可得到该步长下不同温度的速率常数。

根据 VTST 理论,一个温度下反应的速率常数应为不同步长计算的速率常数的最小值,所以应当筛选所有计算的温度中该温度下不同步长的速率常数的最小值。将不同温度下的速率常数最小值按照式(2)的方法拟合,可获得无势垒反应的 3 个反应速率常数 A 、 n 、 E_a 。

4 弧后温度设定

为了模拟弧后 C_4F_7N/N_2 混合气体的复原情况,引用 0.1 MPa 下 C_4F_7N/N_2 混合气体电流过零后的电弧温度衰减曲线^[20-21],如图 3 所示,将此温度作为

C_4F_7N/N_2 混合气体复原时的仿真温度。将弧后温度衰减曲线分为 3 个阶段:第一阶段为 0~0.05 ms 内的快速衰减区,温度从 17 kK 迅速衰减到 8 kK 左右;第二阶段为 0.05~1.00 ms 的缓慢衰减区,温度从 8 kK 逐渐衰减到 3 kK 左右;第三阶段为 1.00~6.00 ms 的平稳衰减区,温度从 3 kK 逐渐降低至 2 kK 左右。

在确定反应路径及速率常数、反应产物和弧后温度变化的基础上,通过 Chemkin 软件设定反应体系的初始混合比为 9% C_4F_7N 与 91% N_2 、压力为 0.1 MPa 等参数,最后可求得 C_4F_7N/N_2 混合气体反应后各粒子摩尔分数随时间的变化曲线。

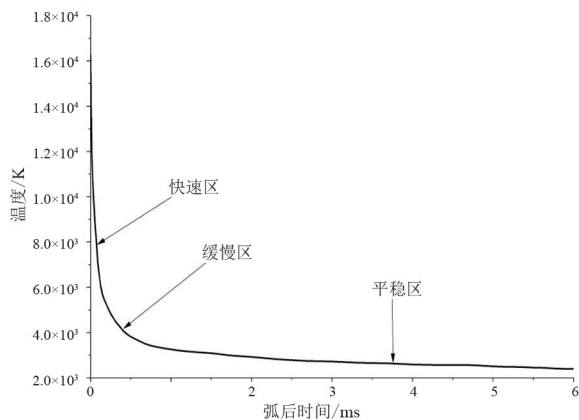


图 3 弧后温度与时间关系

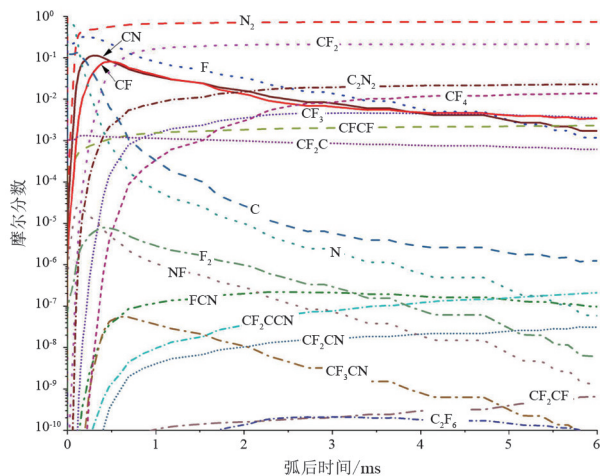
5 结果与分析

模拟 C_4F_7N/N_2 混合气体弧后的复原过程,计算求得混合气体的粒子如图 4 所示。 C_4F_7N/N_2 混合气体在弧后的第一阶段 10^{-8} ms 内就已完全分解为 CF_3CFCF_3 、 CF_3CCF_3 、 CF_3CCN 、 CF_2CFCN 、 CF_2CCN 等大分子粒子;大分子粒子在 10 kK 以上的高温下也很难稳定存在,最终以 C、N、F、CFCF、 CF_2C 等粒子和自由基的形式存在。C、N、F 等原子在更高温度下会变成带电粒子,如 C^+ 、 N^+ 、 F^+ 等,由于模拟 C_4F_7N/N_2 混合气体弧后的复原过程中未能考虑电离反应,因此在弧后温度 8 kK 以上时基本只有 C、N、F 粒子存在。

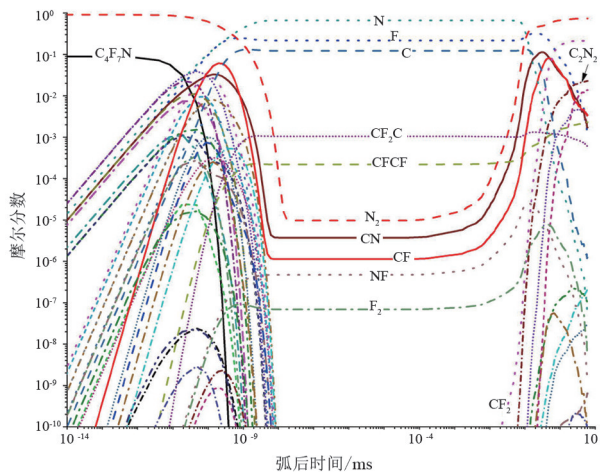
随着弧后温度逐渐降低,在弧后的第二阶段约 8 kK 时粒子开始复合, N_2 、CF、CN 等粒子迅速大量复合至摩尔分数 10% 以上, CF_2 、 C_2N_2 、 CF_3 、 CF_4 等粒子也随之开始复合,而 C、N、F 粒子的摩尔分数开始下降。

在弧后的第三阶段即 2~3 kK 时, N_2 大量复原至摩尔分数 70% 以上; CF_2 、 C_2N_2 、 CF_4 等粒子大量复

合至摩尔分数 1% 以上。由于 CF_2 粒子主要由 CF 和 F 复合生成; C_2N_2 主要由 CN 复合生成; CF_3 、 CF_4 粒子主要由 F、CF、 CF_2 粒子的复合生成;因此 CF、CN 等粒子的摩尔分数开始下降,C、N、F 粒子的摩尔分数下降至 10^{-6} 以下。



(a) 粒子浓度随时间线性坐标的变化关系



(b) 粒子浓度随时间对数坐标的变化关系

图 4 混合气体粒子浓度变化

通过对图 4 中 C_4F_7N/N_2 混合气体的复合结果进行分析, N_2 、 C_2N_2 、 CF_2 等粒子相比于 CF、CN、NF 等粒子更加稳定,而 CF、CN、NF 等粒子又比 C、N、F 粒子稳定。文献[13-14]通过实验检测 C_4F_7N/N_2 混合气体分解后的产物主要有 N_2 、 CF_3 、 CF_4 、 C_2N_2 等粒子,模拟弧后 C_4F_7N/N_2 混合气体复原过程的产物与实验结果基本一致。除此之外,图 4 中还有 FCN、 CF_2CCN 、 CF_2CN 、 CF_2CF 等粒子的复合,而由于这些粒子的摩尔分数低于 10^{-6} ,因此在实际检测中由于摩尔分数太低而未被检测到。

6 结 论

通过确立 C_4F_7N/N_2 混合气体的分解路径,对

各反应的正、逆向速率常数进行计算。引用弧后 C_4F_7N/N_2 混合气体的温度衰减曲线, 计算了 C_4F_7N/N_2 混合气体各粒子浓度随时间的复原情况, 并结合热力学平衡条件下各粒子浓度随温度变化的分解情况展开分析, 可以得到如下结论:

1) C_4F_7N 在温度 0.5~0.7 kK 时开始分解, 2.5 kK 时分解完全; N_2 在 3 kK 的温度下开始分解, 在 10 kK 以上的高温下会大量分解。可见 C_4F_7N 分子不耐高温, 较容易分解, 而 N_2 分子较为稳定。

2) 在电弧温度高于 10 kK 的情况下, C_4F_7N 和 N_2 粒子将会快速分解, 且分解后的大分子粒子在该温度下也很难存在, 会快速分解成 CFCF、 CF_2C 、FCN 等小分子粒子以及 C、N、F 等自由基粒子。

3) 弧后温度随时间降低至 2 kK 左右, N_2 将会快速复原至摩尔分数 70% 以上, 而 C_4F_7N 虽具有较强的电气性能, 但在高温下容易分解且极难复合, 若多次使用 C_4F_7N/N_2 混合气体熄弧会使 C_4F_7N 的浓度含量降低, 从而影响混合气体的绝缘性能。

参考文献

- [1] 颜湘莲, 高克利, 郑宇, 等. SF_6 混合气体及替代气体研究进展[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1837-1844.
- [2] WANG W Z, RONG M Z, SPENCER J W. Nonuniqueness of two-temperature Guldberg-Waage and Saha equations; influence on thermophysical properties of SF_6 plasmas[J]. Physics of Plasmas, 2013, 20(11): 113504.
- [3] TANAKA Yasunori, SUZUKI Katsumi. Development of a chemically nonequilibrium model on decaying SF_6 arc plasmas[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(4): 2623-2629.
- [4] 周朕蕊, 韩冬, 赵明月, 等. SF_6 替代气体分解特性的研究综述[J]. 电工技术学报, 2020, 35(23): 4998-5014.
- [5] 钟建英, 王强, 林莘, 等. SF_6 在微水微氧下放电分解机理的研究[J]. 高压电器, 2020, 56(5): 1-7.
- [6] 林莘, 钟建英, 王强, 等. 气体绝缘介质 C_4F_7N 在 Al (110) 表面吸附特性的研究[J]. 高压电器, 2021, 57(3): 83-88.
- [7] 张震, 林莘, 余伟成, 等. C_4F_7N/CO_2 和 C_4F_7N/N_2 混合气体热力学物性参数计算[J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 250-256.
- [8] 张立松, 叶明天, 庞磊, 等. C_4F_7N 混合气体电弧等离子体热力学参数计算[J]. 高电压技术, 2020, 46(1): 362-368.
- [9] 张晓星, 陈琪, 李祎, 等. 环保型绝缘介质 C_3F_7CN/CO_2

的分解机理[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(24): 7174-7182.

- [10] 傅明利, 陈曦, 陈柔伊, 等. C_4F_7N/N_2 混合气体的分解机理研究[J]. 高压电器, 2020, 56(7): 1-7.
- [11] 陈志国, 张辉, 逯阳. 全氟异丁腈分解反应机理[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2017, 22(1): 141-144.
- [12] 张佳. 高压断路器中环保 C_4F_7N 混合气体绝缘与熄弧特性研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2022.
- [13] 赵明月, 韩冬, 荣文奇, 等. 电晕放电下二元全氟异丁腈(CF_3)₂CFCN 混合气体的分解特性分析[J]. 高电压技术, 2019, 45(4): 1078-1085.
- [14] 唐睿, 李昊阳, 付钰伟, 等. C_4F_7N/N_2 混合气体放电分解体系研究[J]. 高压电器, 2021, 57(3): 139-144.
- [15] 李昊阳. 局部过热故障下的 C_4F_7N/N_2 混合气体分解特性研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2021.
- [16] RONG M Z, ZHONG L L, CRESSAULT Y, et al. Thermophysical properties of SF_6 -Cu mixtures at temperatures of 300-30 000 K and pressures of 0.01-1.0 MPa: Part 1. Equilibrium compositions and thermodynamic properties considering condensed phases[J]. Journal of physics D: Applied physics, 47(49): 495202.
- [17] CHEN Li, ZHANG Boya, XIONG Jiayu, et al. Decomposition mechanism and kinetics of iso- C_4 perfluoronitrile (C_4F_7N) plasmas[J]. Journal of Applied Physics, 2019, 126(16): 163303.
- [18] SUN Hao, TANAKA Yasunori, TOMITA Kentaro, et al. Computational non-chemically equilibrium model on the current zero simulation in a model N_2 circuit breaker under the free recovery condition[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2016, 49(5): 055204.
- [19] 邵先军, 袁旭初, 陈孝信, 等. 基于过渡态理论及密度泛函理论的 SF_6 主要分解产物生成路径的反应速率常数计算[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(23): 9414-9420.
- [20] ZHONG Linlin, WANG Jiayu, XU Jie, et al. Effects of buffer gases on plasma properties and arc decaying characteristics of $C_4F_7N-N_2$ and $C_4F_7N-CO_2$ arc plasmas[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2019, 39: 1379-1396.
- [21] BRAND K P, KOPAINSDY J. Particle densities in a decaying SF_6 plasma[J]. Applied Physics, 1978, 16(4): 425-432.

作者简介:

庚振新(1983), 男, 博士, 副教授, 研究方向为高压电器及气体绝缘;

张 孟(1997), 男, 硕士研究生, 研究方向为气体绝缘;

张 佳(1991), 男, 博士, 工程师, 从事电力行业工作。

(收稿日期: 2022-11-30)

环保绝缘气体设备研发与应用进展

靳梦磊¹, 夏亚龙², 肖 淞¹, 李 祎¹, 唐 炬¹, 张晓星³

(1. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430068; 2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041; 3. 新能源及电网装备安全监测湖北省工程研究中心 (湖北工业大学), 湖北 武汉 400068)

摘要: SF₆ 在中、高压气体绝缘输配电设备中被广泛使用。然而, SF₆ 作为一种强温室气体, 其全球变暖潜能值高达 CO₂ 的 23 500 倍且大气寿命长, 由于 SF₆ 气体作为绝缘气体在电气设备中的大量使用, 致使其在大气中的浓度持续增加。为践行“2030 年碳达峰, 2060 年碳中和”的减排目标, 推动电网设备选型向绿色环保领域迈进, 环保型气体绝缘介质及设备研发成为热点。近年来, 全氟化酮、全氟化腈及其混合气体凭借优良的绝缘及环保性能被广泛关注, 被认为是极具潜力的 SF₆ 替代气体。文中阐述了常见环保型气体绝缘介质的基础特性, 分析了其应用于气体绝缘输配电设备的可行性, 并介绍了近年来国内外环保绝缘气体设备的研发与应用进展; 最后, 展望了环保绝缘气体应用面临的问题及未来的发展趋势。

关键词: 环保绝缘气体; 设备研发; C₄F₇N 混合气体; C₅F₁₀O 混合气体

中图分类号: TM 835 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2023)04-0012-05

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230403

Research and Application Progress of Environmentally Friendly Insulating Gases

JIN Menglei¹, XIA Yalong², XIAO Song¹, LI Yi¹, TANG Ju¹, ZHANG Xiaoxing³

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430068, Hubei, China;
2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;
3. Hubei Engineering Research Center for Safety Monitoring of New Energy and Power Grid Equipment, Hubei University of Technology, Wuhan 400068, Hubei, China)

Abstract: SF₆ is widely used in medium and high voltage gas insulating transmission and distribution equipment. However, as a strong greenhouse gas, SF₆ has a global warming potential as high as 23,500 times that of CO₂ and a long atmospheric life, and its concentration in atmosphere continues to increase due to its extensive use in electrical equipment as an insulating gas. In order to implement the emission reduction goal of "carbon peak in 2030, carbon neutral in 2060" as well as promote the selection of power grid equipment to move towards the green and environmental protection field, developing eco-friendly gas insulating medium and equipment has become a hot topic. In recent years, perfluorone, perfluoronitrile and their gas mixture have attracted wide attention due to their excellent insulation and eco-friendly properties, which are regarded as SF₆ alternative gases with extremely potential. The basic characteristics of common eco-friendly gas insulating medium are described. Then the feasibility of application in gas insulating transmission and distribution equipment is analyzed, and the development and application progress of environmentally friendly insulating gas equipment at home and abroad in recent years are introduced. Finally, some problems and future development trends of environmentally friendly insulating gas are prospected.

Key words: environmentally friendly insulating gases; equipment development; C₄F₇N gas mixture; C₅F₁₀O gas mixture

0 引 言

采用 SF₆ 气体作为绝缘介质的输配电设备,由于可靠性高、运行维护周期长、占地面积小等优点,在各电压等级的电力系统中应用极其广泛,特别是在 110 kV 及以上电压等级的气体绝缘输配电设备中具有统治地位^[1-2]。然而,SF₆ 作为一种全球变暖潜能值(global warming potential, GWP)达到 CO₂ 的 23 500 倍的温室气体,造成了不容忽视的环境问题。事实上,它是联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)认定的迄今为止最强劲的温室气体。由于 SF₆ 气体作为绝缘气体在电气设备中的大量使用,致使其在大气中的浓度持续增加。为助力解决温室气体排放所导致的愈发严峻的环境问题,以及落实中国“2030 年碳达峰,2060 年碳中和”的目标要求,环境友好型气体及设备研发刻不容缓^[3-5]。

下面综述了常见环保绝缘气体的基础特性并介绍了近些年国内外环保绝缘气体设备的研发与应用进展,最后展望了环保型气体绝缘介质应用可能面临的问题与发展前景,并提供了相关建议。

1 常见环保绝缘气体

SF₆ 于 20 世纪 70 年代被成功制备并开始作为绝缘与灭弧介质在 GIS 等气体绝缘设备中应用^[6]。早期研究 SF₆ 替代气体主要为解决其液化温度较高的问题。1980 年,通用电气公司 J C Devins 等对 35 种潜在绝缘气体进行了性能测试,并通过饱和蒸气压特性分析了应用可行性,指出:应用在 0.2 MPa 气压时存在性能优于 SF₆ 的气体,分别是 C₄F₇N、C₂F₅Cl、CF₃-C≡C-CF₃ 和 C₂F₅CN;其他气体只有设备在更高运行温度下才具备替代 SF₆ 的潜力;综合来看 SF₆ 仍是最为理想的气体绝缘介质^[7]。此后, SF₆ 在 1997 年签署的《京都议定书》中被列为六大温室气体目录,国内外学者开始从环保角度对绝缘气体展开研究。表 1 给出了目前常见的环保绝缘气体的基础特性参数^[8]。

根据研究对象可将环保绝缘气体分为传统类与混合类:传统类包括 N₂、CO₂ 和干燥空气;混合类包括 SF₆ 混合气体,如 SF₆/N₂、SF₆/CO₂、SF₆/CF₄ 等,以及氟碳类强电子亲和性气体,包括氢氟碳化物

表 1 SF₆ 及环保绝缘气体的基础特性参数

名称	GWP (100 a)	大气 寿命/a	液化 温度/°C	相对 SF ₆ 绝缘性能 (临界击 穿场强)	半数致 死浓度 (LC50)/%
SF ₆	23 500	3200	-64.0	1	—
CO ₂	1	—	-78.5	0.35	—
N ₂	—	—	-196.0	0.38	—
O ₂	—	—	-183.0	0.33	—
CF ₄	6630	50 000	-128.0	0.41	—
c-C ₄ F ₈	8700	3200	-6.0	1.27	—
CF ₃ I	0.4	0.005	-21.8	1.2	16
HFO-1234zeE	<1	0.045	-19.2	0.85	>20.7
C ₄ F ₇ N	2090	22	-4.7	2	1.25~1.5
C ₅ F ₁₀ O	<1	0.044	26.9	1.4	2
C ₆ F ₁₂ O	1	0.014	49.0	>2	>10

(hydrofluorocarbons, HFCs)、全氟化碳(perfluorinated compounds, PFCs)、CF₃I、全氟化腈(perfluornitriles, PFNs)、全氟化酮(perfluorinated ketone, PFK)等^[9-10]。

其中传统气体在液化温度、环保特性、安全性方面表现优异,但其绝缘性能仅为 SF₆ 的 30%~38%,因此常作为缓冲气体与 SF₆ 或强电子亲和性气体进行混合使用;而全氟化碳和 CF₃I 则存在液化温度高、固体析出严重、环保性能不佳、安全性差等缺点,没有工程应用可行性^[8]。相比之下,全氟化酮、全氟化腈两类物质绝缘性能高于 SF₆ 且环保特性优异,虽然液化温度较高,但与 CO₂ 等常规气体混合使用可以满足设备最低运行温度的要求,具有在中、高压气体绝缘设备的应用潜力。

目前,诸多输配电设备生产厂家也推出了以全氟化酮、全氟化腈为绝缘介质的环保型设备,通过了型式试验并开展了示范运行及推广工作。下面主要针对国内外全氟化酮、全氟化腈环保绝缘气体的应用现状进行综述。

2 国外气体绝缘设备研发及应用

目前,国外对以环保绝缘气体为绝缘介质的多电压等级输配电设备研发都取得了一定进展。自 2015 年以来,通用电气公司与 ABB 公司基于 3M 公司的 Novec 绝缘气体,率先推出系列环保绝缘气体输配电设备,随后其他厂家也陆续开展应用。表 2 和图 1 为 3M 公司部分环保绝缘气体设备安装案例。

表 2 3M 部分环保绝缘气体设备安装案例

序号	气体类别	设备类型	时间
1	C ₅ F ₁₀ O/Air	20 kV 环网柜	2015-11
2	C ₅ F ₁₀ O/Air	22 kV GIS	2015-05
3	C ₅ F ₁₀ O/Air	150 kV GIS	2015-05
4	C ₄ F ₇ N/CO ₂	110 kV GIS 和断路器	2017-10
5	C ₄ F ₇ N/CO ₂	245 kV CT	2017-04
6	C ₄ F ₇ N/CO ₂	420 kV GIL	2017-04



图 1 3M 部分环保绝缘气体设备安装案例地图

从应用 3M 环保绝缘气体的设备安装案例情况来看,自 2015 年起,国外包含多种类型、多种电压等级的环保绝缘气体输配电设备陆续被投运使用。部分典型案例如下:

2015 年,ABB 公司成功使用 AirPlus,即 C₅F₁₀O/Air 混合气体用于瑞士苏黎世的 EWZ 公司 170 kV GIS,该 GIS 是世界上第一个采用环保绝缘气体的气体绝缘开关设备。自 2015 年以来,EWZ 公司成功运行了第一批中、高压环保绝缘气体应用的试点装置^[11]。



图 2 ABB 公司的环保型 380 kV GIS 安装在德国 TransnetBW 公司的 Weier 变电站

2016 年,通用电气公司联合 3M 公司推出了世界首台采用 C₄F₇N/CO₂ 混合气体作为绝缘介质的气体绝缘输电管道,该 420 kV/63 kA GIL 的工作绝对气压为 1.06 MPa,运行温度为 -25~40℃^[12]。首台该型 GIL 安装于伦敦南部的 Sellindge 变电站,长度

约为 300 m 的两条回路投运至今未发现异常。

2018 年,ABB 公司赢得德国输电网运营商 TransnetBW 的约 4000 万美元订单,用于升级德国巴登符腾堡州 Obermooweiler 的高压变电站。作为升级不可或缺的一部分,ABB 公司安装了世界首个环保型 380 kV GIS,该设备采用环保绝缘气体混合物,符合 SF₆ 行业标准^[13]。

日立能源(原 ABB 电网)于 2022 年 11 月宣布,将为欧洲领先的电网运营商 TenneT 在德国的埃尔茨豪森 220 MW 抽水蓄能电站提供世界首台环保型 420 kV GIS 和先进的预装式模块化并网解决方案,整个项目将于 2026 年竣工,该应用能够有效减少 SF₆ 近 2.3 t^[14]。此外,日立能源将于 2023 年中期为美国 Eversource 公司的 345 kV 变电站提供全球首台 420 kV 环保型罐式断路器,不仅能够实现远距离大容量输电,同时避免 SF₆ 气体的大量使用^[15]。



图 3 日立能源的世界首个环保型 420 kV 罐式断路器

2016 年,为开发环保型 170 kV GIS,韩国 LS 电气公司与通用电气公司签订技术合作,该 GIS 采用 C₄F₇N/CO₂/O₂ 混合气体作为绝缘介质,于 2020 年在国际认证测试所韩国电气研究院(KERI)完成了性能测试,并获得世界首个国际短路试验联盟(STL)对环保型 170 kV/50 kA GIS 的短路认证。2022 年,LS 电气获得韩国首个 170 kV 环保型 GIS 项目订单,将于 2023 年 11 月前完成 10 台该型环保 GIS 的供应,并将于 2024 年初正式投入运营^[16]。



图 4 韩国首个环保型 170 kV GIS

2021 年,S&C Electric Company 于美国芝加哥推出采用 C₄F₇N/CO₂ 气体的 38 kV 地下配电开关

柜。该开关柜与同公司使用 SF₆ 的 Vista 开关设备具有相同的性能、可靠性、额定值和占地面积,且在潜水式和中压开关柜中的总碳足迹最低^[17]。



图 5 Vista 绿色地下配电开关柜

整体上,国外对于环保绝缘气体的研发起步较早,应用面已经涵盖低、中、高多种电压等级以及 GIS、GIL、CT 等多种类型气体绝缘设备。事实上,通用电气公司、日立能源对于旗下环保绝缘气体设备研发应用的路线图已制定至 2025 年,未来环保绝缘气体的应用势必会涵盖更多电压等级和种类,环保绝缘气体设备应用方兴未艾。

3 国内气体绝缘设备研发及应用

国内对于环保绝缘气体设备的研发及应用现处于起步阶段。2016 年以来,电网公司联合诸多科研院所、研究机构和设备生产厂家开展了一系列环保绝缘气体应用可行性研究及设备研发。表 3 为近年来国内部分环保绝缘气体设备的研发及应用情况^[18]。

其中,南方电网云南曲靖麒麟供电局于 2021 年 4 月 29 日在麒麟区 10 kV 幸福小区线投运的环保型气体绝缘环网柜,系国内首台采用环保气体作为“开断介质+绝缘介质”的 12 kV 环网柜在电网示范运行。该开关设备创新性采用 C₄F₇N 混合环保气体作为开断和绝缘介质的“微负压+零表压”产品路线,特别适用于高海拔、低温的区域,实现了环保气体在低充气压力下开断和绝缘技术的重大突破,有效解决了气体绝缘开关设备在微负压下的开断和绝缘问题,以及气体绝缘开关设备运行于高海拔地区的充气隔室漏气和鼓包问题,为低碳环保、坚强配电网提供安全可靠的有力支持^[19]。

上海 110 kV 宁国变电站于 2022 年 12 月 5 日顺利投运国内首台(套) 110 kV C₄F₇N 环保气体 GIS。在 GIS 设备全寿命周期内,采用的 C₄F₇N 环保气体在相同压力下绝缘性能约为 SF₆ 气体的两倍,且能够减少近 100% 的碳排放,满足电网设备安全

运行要求。该设备投运是落实“双碳”行动的又一次成功实践,标志着电力系统设备选型向环境友好类型又迈进一步,对环保组合电器设备在电力系统进一步推广应用具有重要意义^[20]。

表 3 国内环保绝缘气体设备研发及应用情况

序号	气体类别	设备类型	应用情况	时间
1	C ₄ F ₇ N/CO ₂	12 kV 环网柜	广州	2021-09
2	C ₄ F ₇ N/CO ₂	12 kV 开关柜	浙江	2021-06
3	C ₄ F ₇ N/CO ₂	12 kV 柱上负荷开关、断路器和 12 kV 环网柜	云南	2019-12
4	C ₄ F ₇ N/CO ₂	12 kV 环网柜	安徽	2021-05
5	C ₄ F ₇ N/CO ₂	10 kV 气体绝缘变压器	陕西	2021-05
6	C ₆ F ₁₂ O/CO ₂	12 kV 环网柜	通过型式试验	2018-08
7	C ₄ F ₇ N/CO ₂	126 kV GIS 用母线、隔离开关和接地开关	通过型式试验	2019-11
8	C ₄ F ₇ N/CO ₂	126 kV GIS 用母线、隔离开关、接地开关、PT 和 CT	通过型式试验	2021-01
9	C ₄ F ₇ N/CO ₂	1000 kV GIL	通过型式试验	2020-07
10	C ₄ F ₇ N 混合气体	12 kV 环网柜	云南	2021-04
11	C ₄ F ₇ N 混合气体	110 kV GIS	上海	2022-12
12	C ₅ F ₁₀ O 混合气体	35 kV CT	四川	2022-11



图 6 云南 12 kV 环保型气体绝缘环网柜



图 7 安装完成的 110 kV C4 环保气体 GIS 完整间隔

总体来看,现今国内中、低电压等级下环保绝缘气体输配电设备的研发应用颇有进展,但高电压等级下的应用多处于型式试验阶段,示范应用较少。环保绝缘气体设备的投运需要进一步积累实际应用数据与相关运维经验验证其应用可靠性,设备运行产生的有害气体处理与检测、气体与设备内部材料的相容性等可能面临的技术问题仍需进一步研究解决。

4 结 论

上面对常见环保绝缘气体的基本特性参数进行了比较,分析了其应用于气体绝缘输配电设备的可行性;介绍了目前国内外对于环保绝缘气体的示范应用情况。目前环保绝缘气体的主要应用集中在全氟化酮、全氟化腈上,尤其是 $C_5F_{10}O$ 、 C_4F_7N 混合气体。国外已经推出多种类型、多种电压等级的环保绝缘气体输配电设备并实现示范运行,国内相关应用多集中于低、中电压等级设备,高电压等级设备应用处于起步阶段。

尽管近些年对于环保型气体绝缘介质的研究取得了一些突破,但仍存在设备运行产生的有害气体处理与检测、灭弧场景需要考虑的断路器结构调整等技术问题需要解决,仍需进一步积累设备研发、实际应用与运维策略的总结,逐步排查并解决各类理论和技术问题。环保绝缘气体的应用发展需要电气、物理、化学等多学科领域的交叉融合,需要进一步联合设备制造企业、电网公司、科研院所等开展合作研发,逐步探索并实现环保绝缘气体的进一步推广应用,助力减少气体绝缘输配电设备对使用 SF_6 的依赖,最终促进电力工业“2030 年碳排放达峰,2060 年碳中和”减排目标的实现。

参考文献

- [1] 唐炬, 杨东, 曾福平, 等. 基于分解组分分析的 SF_6 设备绝缘故障诊断方法与技术的研现状[J]. 电工技术学报, 2016, 31(20): 41-54.
- [2] FU Yuwei, YANG Aijun, WANG Xiaohua, et al. Theoretical study of the neutral decomposition of SF_6 in the present of H_2O and O_2 in discharges in power equipment[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2016, 49(38): 385203.
- [3] FANG Xuekun, HU Xia, GREET Janssens-Maenhout, et al. Sulfur hexafluoride (SF_6) emission estimates for China: an inventory for 1990-2010 and a projection to 2020[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 47(8): 3848-3855.
- [4] RABIE M, FRANCK C M. Assessment of eco-friendly gases for electrical insulation to replace the most potent industrial greenhouse gas SF_6 [J]. Environmental Science & Technology, 2018, 52(2): 369-380.
- [5] ZHANG Boya, XIONG Jiayu, CHEN Li, et al. Fundamental physicochemical properties of SF_6 -alternative gases: a review of recent progress[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2020, 53(17): 173001.
- [6] COOPER F S. Gas dielectric media: US2221671A[P/OL]. 1940-11-12 [2022-12-10]. <https://patents.google.com/patent/US2221671>.
- [7] DEVINS J C. Replacement gases for SF_6 [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1980, 15(2): 81-86.
- [8] 李伟, 张晓星, 傅明利, 等. 环保绝缘气体 C_4F_7N 研究及应用进展 I: 绝缘及电、热分解特性[J]. 电工技术学报, 2021, 36(17): 3535-3552.
- [9] 张晓星, 田双双, 肖淞, 等. SF_6 替代气体研究现状综述[J]. 电工技术学报, 2018, 33(1): 2883-2893.
- [10] BRAND K P. Dielectric strength, boiling point and toxicity of gases-different aspects of the same basic molecular properties[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1982, EI-17(5): 451-456.
- [11] Hitachi Energy. World's first gas-insulated switchgear installation with eco-efficient gas mixture [EB/OL]. [2022-12-10]. <https://www.hitachienergy.com/about-us/case-studies/reference-ewz-oerlikon-substation-switzerland>.
- [12] KIEFFIL Y, IRWIN T, PONCHON P, et al. Green gas to replace SF_6 in electrical grids[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2016, 14(2): 32-39.
- [13] ABB. ABB wins \$ 40 million order for eco-efficient substation in Germany [EB/OL]. (2018-11-5) [2022-12-10]. <https://new.abb.com/news/detail/9877/abb-wins-40-million-order-for-eco-efficient-substation-in-germany>.
- [14] Hitachi Energy. Hitachi Energy to provide world's first SF_6 -free 420 kV gas-insulated switchgear technology at TenneT's grid connection in Germany [EB/OL]. (2022-11-9) [2022-12-10]. <https://www.hitachienergy.com/news/press-releases/2022/11/hitachi-energy-to-provide-world-s-first-sf6-free-420-kv-gas-insulated-switchgear-technology-at-tennet-s-grid-connection-in-germany>.

C₅F₁₀O 分解气体在 Cu 修饰 NiS₂ 表面的吸附机理研究

陈学云¹, 金广杰¹, 许正举¹, 崔 豪²

(1. 大唐青海能源开发有限公司, 青海 西宁 810001; 2. 西南大学人工智能学院, 重庆 710055)

摘要:文中利用第一性原理研究了 Cu 修饰单层 NiS₂ (Cu-NiS₂) 对 5 种 C₅F₁₀O 分解组分的吸附和传感性能, 以探索其在 C₅F₁₀O 绝缘装置运行状态评估领域的应用潜力。通过对各吸附体系的吸附参数研究发现: Cu-NiS₂ 对 C₂F₆O₃ 分子表现为化学吸附, 吸附能为 -1.05 eV, 而对 C₃F₆、CF₂O、C₂F₆ 和 CF₄ 分子表现为物理吸附。通过对各吸附体系的电子性能以及气敏恢复特性分析发现: Cu-NiS₂ 对 C₃F₆ 或 CF₂O 气体的传感性能较好, 且在室温下恢复性能较佳, 因此具备开发为 C₃F₆ 或 CF₂O 气体传感器的巨大潜力; 相反的, 由于 Cu-NiS₂ 对 C₂F₆ 和 CF₄ 的传感性能较差, 因此无法实现这两种气体的高灵敏检测。此外, 尽管 Cu-NiS₂ 对 C₂F₆O₃ 的传感性能极佳, 但其较长的恢复特性决定了只能实现对该气体的单次检测, 无法实现长期稳定使用。依据仿真研究结果提出了一种用于电力系统故障诊断的新型气敏传感材料, 即 Cu-NiS₂, 该传感材料对于评估 C₅F₁₀O 绝缘装置的运行状态具有重要意义。

关键词: C₅F₁₀O; 气体传感器; 第一性原理; Cu 修饰单层 NiS₂

中图分类号: O 647 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2023)04-0017-08

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230404

Research on Adsorption Mechanism of C₅F₁₀O Decomposition Gas on Cu-modified Monolayer NiS₂

CHEN Xueyun¹, JIN Guangjie¹, XU Zhengju¹, CUI Hao²

(1. Datang Qinghai Energy Development Co., Ltd., Xining 810001, Qinghai, China;

2. College of Artificial Intelligence, Southwest University, Chongqing 710055, China)

Abstract: The adsorption and sensing properties of Cu-modified monolayer NiS₂ (Cu-NiS₂) for five C₅F₁₀O decomposition components are studied by first-principles to explore its application potential in the field of evaluation of operating status of C₅F₁₀O insulation devices. Through the study of adsorption parameters of each adsorption system, it is found that Cu-NiS₂ exhibits chemical adsorption on C₂F₆O₃ molecules with an adsorption energy of -1.05 eV, while it exhibits physical adsorption on C₃F₆, CF₂O, C₂F₆ and CF₄ molecules. Through the analysis of electronic properties and gas sensitivity recovery characteristics of each adsorption system, it is found that Cu-NiS₂ has better sensing performance for C₃F₆ or CF₂O gas, and has better recovery performance at room temperature, so it has a great potential to be developed as a C₃F₆ or CF₂O gas sensor. On the contrary, due to the poor sensing performance of Cu-NiS₂ for C₂F₆ and CF₄, high-sensitivity detection of these two gases cannot be achieved. In addition, although Cu-NiS₂ has excellent sensing performance for C₂F₆O₃, its long recovery characteristics determines that it can only achieve a single detection of the gas, and cannot achieve the long-term stable use. According to theoretical simulation research, Cu-NiS₂ as a new type of gas-sensing material for power system fault diagnosis is proposed, which is of great significance for evaluating the operating status of C₅F₁₀O insulation devices.

Key words: C₅F₁₀O; gas sensor; first-principles; Cu-NiS₂ monolayer

0 引言

过去几十年里, SF_6 由于出色的绝缘和灭弧性能被广泛应用于气体绝缘开关设备 (gas insulated switchgear, GIS)、气体断路器 (gas circuit breaker, GCB)、气体绝缘变压器 (gas insulated transformer, GIT) 和气体绝缘传输线 (gas insulated line, GIL) 等高压绝缘设备中, 约占总用量的 80%^[1]。然而, SF_6 具有严重的温室效应, 在大气中的滞留时间超过 3200 年, 全球变暖潜能值是 CO_2 的 23 500 倍^[2]。数据显示, 过去 5 年里全球大气中的 SF_6 含量增加了约 20%, 这意味着它的排放会对人类生活环境构成的威胁将持续增加^[3]。为此, 世界各国学者均不遗余力地探索新型气体绝缘介质, 以减少甚至替代 SF_6 在电力设备中的使用^[4-5]。

经过数年的探索, 研究人员发现了几种潜在的 SF_6 替代气体, 其中包括以全氟酮 ($\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$) 为核心组分的混合替代气体^[6]。由于 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 在 0.1 MPa 下的液化温度为 26.5 °C, 因此还需混合一定的缓冲气体, 如干燥空气或 CO_2 , 以满足绝缘装置最低工作温度的要求^[7]。例如, ABB 公司开发了一些使用 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 混合物的绝缘装置, 包括 36 kV/2000 A 柜式 GIS ($\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}/\text{air}$)、145 kV/3150 A GCB ($\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}/\text{CO}_2$) 和 170 kV/1250 A GIS ($\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}/\text{CO}_2/\text{O}_2$)^[8]。此外, 国内张晓星教授团队也针对 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 的分解特性和绝缘特性开展了深入研究, 旨在研发基于 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 混合绝缘气体的高压设备^[9-10]。随着 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 在电气设备中的工程应用, 这些设备的安全运行成为电力系统关注的焦点。据报道, $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 在局部放电和过热等绝缘缺陷下, 会分解成几种气体, 包括 C_3F_6 、 $\text{C}_2\text{F}_6\text{O}_3$ 、 C_2F_6 、 CF_2O 和 CF_4 ^[11]。因此, 可以通过检测这些分解气体来反映 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 绝缘设备内部的绝缘老化程度, 实现 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 绝缘设备运行状态的有效评估。

由于纳米材料较大的比表面积和与气体分子间较强的化学反应性, 基于纳米材料的传感技术被认为是一种方便有效的气体检测技术, 而纳米材料气敏传感器一直以来都是气体传感领域的研究热点^[12]。近年来, 过渡金属二硫化物 (transition metal disulfide, TMD) 作为新型气敏材料得到广泛研究, 并展现出灵敏度高、选择性好和响应迅速等优异的传

感性能^[13]。同时, 贵金属 (如 Ni、Pd 和 Pt) 原子层夹在两个硫族元素原子层之间而形成的贵金属 TMDs 也得到了长足的发展^[14]。目前, 有关贵金属 TMDs 气敏传感技术的研究主要集中在 PtX_2 和 PdX_2 (X 为硫族原子)^[15], 而有关 NiX_2 在气敏传感领域的研究还十分有限。研究表明, NiS_2 的带隙比 NiSe_2 和 NiTe_2 的带隙小很多, 并已成功在实验室合成^[16], 这对于开发 NiS_2 为新型的气敏传感材料奠定了基础。

此外, 过渡金属表面修饰是提高纳米气敏传感材料吸附和传感性能常用的有效技术, 选择廉价且具有相当气相催化能力的金属掺杂更有利于推进其在工程应用中的研究进展^[17]。鉴于 Cu 元素在气相吸附和传感反应中表现出的突出性能^[18], 下面采用 Cu 原子作为过渡金属掺杂元素来修饰单层 NiS_2 表面^[19], 并使用第一性原理理论模拟了 Cu 修饰的单层 NiS_2 (Cu-NiS_2) 对 5 种 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 分解气体吸附和传感特性, 研究了 Cu-NiS_2 开发为气体传感器检测的 4 个重要特性指标, 即对气体的吸附构型、电子特性、传感响应以及气体解吸附特性。研究结论阐述了单层 NiS_2 开发为新型气体传感器应用于电力设备故障诊断的巨大潜力, 这对于促进 NiS_2 在气敏传感领域的扩展研究具有较大的科学意义。

1 计算细节

所做仿真计算研究是在 DMol³ 模块中实现的, 它采用 Perdew-Burke-Ernzerhof (PBE) 函数中的广义梯度近似 (general gradient approximation, GGA) 来描述反应过程的电子交换能^[20], 布里渊区的 k 点网格定位 $10 \times 1 \times 1$ ^[21]。此外, 选择由 Tkatchenko 和 Scheffler 提出的色散校正 DFT-D2 方法来处理吸附过程的范德华力和长程相互作用力^[22], 选择 10^{-5} Ha 的能量收敛容差精度、 10^{-6} Ha 的收敛阈值和 5.0 Å 的轨道截止半径进行几何优化, 以确保获得的各研究体系能量具有良好的精度^[23]。

构建 9 个 Ni 原子和 18 个 S 原子的 $4 \times 4 \times 1$ NiS_2 超晶胞作为纳米材料来进行仿真研究, 并建立了 15 Å 的真空区以消除可能的界面反应^[24]。此外, 应用 Hirshfeld 方法来分析从 Cu-NiS_2 到气体分子的电荷转移量 Q_T , 其中正值表示气体分子的失电子能力, 而负值表示气体分子的得电子能力^[25]。

2 结论与分析

2.1 分解气体和 $Cu-NiS_2$ 的基本属性

图 1 为 $C_5F_{10}O$ 典型分解气体 ($C_2F_6O_3$ 、 CF_4 、 C_3F_6 、 C_2F_6 和 CF_2O) 的几何优化结构, 它们的结构参数及键参数与之前的报道是一致的^[26]。图 2 为本征 NiS_2 表面掺杂 Cu 原子的过程。在本征 NiS_2 结构中, 测得 Ni-S 键长为 $2.27 \text{ \AA}$, 晶格常数为 $3.35 \text{ \AA}$, 这之前关于 NiS_2 的报道一致(分别为 $2.258 \text{ \AA}$ 和 $3.348 \text{ \AA}$)^[27]。构建 $Cu-NiS_2$ 的过程为, 将一个 Cu 原子放置在 NiS_2 表面的不同位置, 如中空位点 1 (H1)、中空位点 2 (H2) 和 S 原子的顶部位点 (T_s), 如图 2(a) 所示, 并分别进行几何优化, 最后确定能量最低、掺杂结合能最负的体系为最优化 $Cu-NiS_2$ 结构。基于该定义, 单个 Cu 原子在不同掺杂位点上的结合能 E_b 可通过式(1)进行计算。

$$E_b = E_{Cu-NiS_2} - E_{NiS_2} - E_{Cu \text{ single atom}} \quad (1)$$

式中, E_{Cu-NiS_2} 、 E_{NiS_2} 、 $E_{Cu \text{ single atom}}$ 分别为 $Cu-NiS_2$ 体系、本征 NiS_2 体系和 Cu 原子的能量。

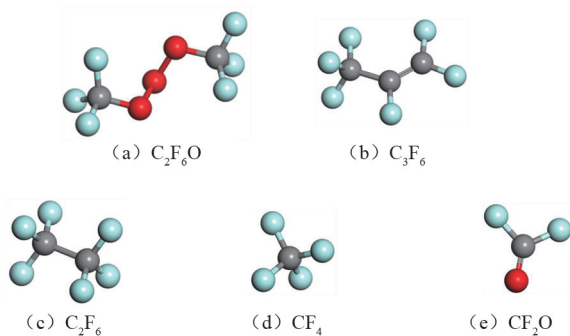


图 1 $C_5F_{10}O$ 分解气体的结构模型

完成几何优化后, 计算可得 Cu 在 NiS_2 表面 H1、 T_s 和 H2 位点的结合能分别为 -3.09 eV 、 -1.17 eV 和 -2.83 eV 。换言之, 与 T_s 或 H2 位点相比, Cu 金属更有可能被捕获在 NiS_2 的 H1 位点上。因此, 下面重点分析该种 $Cu-NiS_2$ 几何结构和电子特性, 如图 2(b) 所示。从图中可以看出, Cu 金属锚在 H1 位, 与 3 个 S 原子形成的 3 个 Cu-S 键为等长度的 $2.27 \text{ \AA}$ 。除此之外, $Cu-NiS_2$ 的形貌相比于本征 NiS_2 没有发生太大的变化, 这表明了 NiS_2 结构有良好的化学稳定性。同时, 经过震荡分析所得的 $Cu-NiS_2$ 频率范围为 $130.74 \sim 1\,093.41 \text{ cm}^{-1}$, 该频段中没有虚频的出现也表明了该材料具有良好的化学稳定性。图 2(c)

显示了 $Cu-NiS_2$ 的电荷差分密度 (charge density difference, CDD), 其中 Cu 原子围绕的玫瑰色区域表示其在掺杂过程中表现为失电子特性, 这与 Hirshfeld 分析所得到的结论是一致的, 其在 $Cu-NiS_2$ 中携带 0.257 e 的电荷量。Cu 原子的失电子特性也可能归因于相比于 S 原子更小的电负性 (S 为 2.58, Cu 为 1.90), 导致电荷从 Cu 原子转移到 S 原子。从 CDD 分布可以看出, 电子积累主要分布在 Cu-S 键上, 这些分布证实了 Cu-S 键上的电子杂化和轨道相互作用, 该作用表明了 Cu 和 S 原子之间的强结合力。

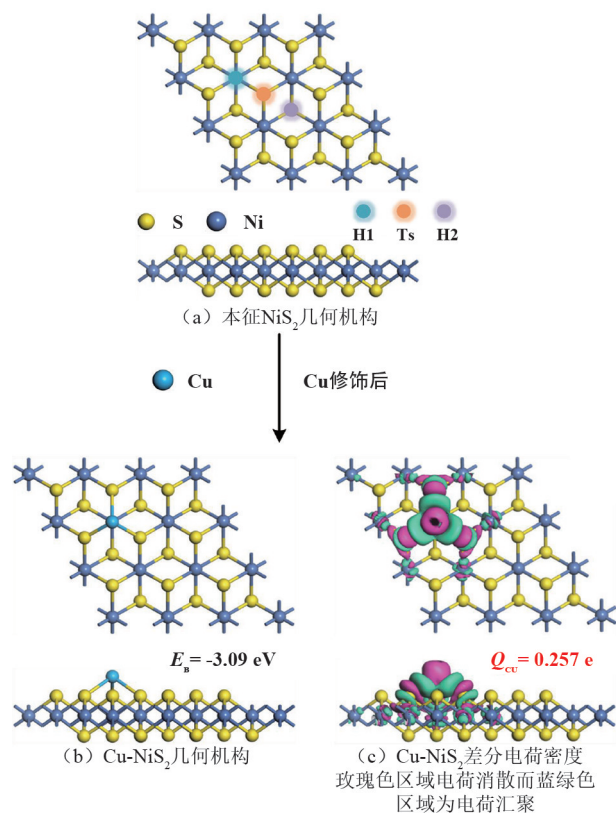


图 2 Cu 修饰 NiS_2 的过程

为研究 Cu 原子修饰 NiS_2 前后的电子性能变化, 图 3 展示了两个体系的能带结构 (band structure, BS) 和态密度 (density of states, DOS)。从本征 NiS_2 的 BS 分布中可以发现它表现出间接半导体特性, 其最小导带 (conduction band minimum, CBM) 和最大价带 (valance band maximum, VBM) 分别位于 K 点和 Γ 点, 带隙为 0.609 eV 。这些发现与文献^[27]非常一致, 其中使用 PBE 函数计算出的本征 NiS_2 带隙为 0.61 eV , 且表现为间接半导体特性。对于 $Cu-NiS_2$ 体系, 可以看到带隙为 0.398 eV , CBM 和 VBM 仍然位于不同的点。这表明 Cu 原子修饰只会缩小 NiS_2 的带隙而不会改变其间接半导体性质。其带隙的改变

可能是由于电荷从 Cu 原子转移到 NiS_2 表面,增强了其电子密度和迁移率,使得 Cu- NiS_2 系统中电子态的提升和带隙的缩小^[28]。从 DOS 分布中可以看出,Cu 3d 轨道与 S 2p 轨道在-6.4~-0.3 eV 和 0.2~1.1 eV 区间内有较为显著的重合现象。这表明两个原子在该部分能态位置是高度杂化的,即 Cu 原子与 S 之间的强轨道相互作用和电子杂化,应证了 Cu-S 键在形成过程中的强结合力。

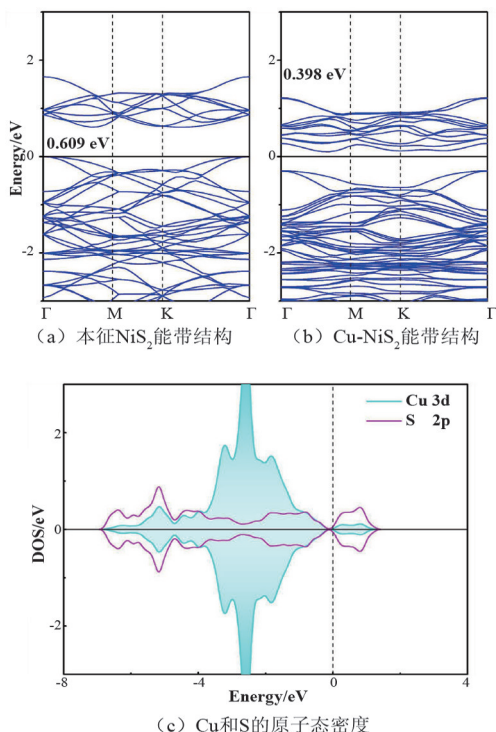


图 3 本征和 Cu 修饰 NiS_2 的电子结构

2.2 Cu- NiS_2 的气体吸附特性

$\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 分解气体的吸附过程是在最优化的 Cu- NiS_2 结构上进行的,其中气体分子被置于 Cu 原子正上方约 2.5 Å 处开始吸附过程,该过程的吸附能 E_{ad} 可由式(2)获得。

$$E_{\text{ad}} = E_{\text{Cu-NiS}_2/\text{gas}} - E_{\text{Cu-NiS}_2} - E_{\text{gas}} \quad (2)$$

式中, $E_{\text{Cu-NiS}_2/\text{gas}}$ 、 $E_{\text{Cu-NiS}_2}$ 和 E_{gas} 分别为气体吸附体系、Cu- NiS_2 体系和单个气体分子的能量。

图 4 展示了 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}$ 分解气体在 Cu- NiS_2 表面吸附的最稳定构型。从图中可以看出,与 C_2F_6 和 CF_4 相比,Cu- NiS_2 似乎对 $\text{C}_2\text{F}_6\text{O}$ 、 C_3F_6 和 CF_2O 具有更强的吸附性能并形成了新键。Cu 原子与 $\text{C}_2\text{F}_6\text{O}$ 和 CF_2O 分子的 O 原子结合形成的 Cu-O 键分别长 1.89 Å 和 2.12 Å,而与 C_3F_6 分子的两个 C 原子形成的 Cu-C 长为 2.07 Å。另一方面,Cu 原子与 C_2F_6 和 CF_4 分子的原子距离相对较长,分别为 2.90 Å 和 3.23 Å,且在

吸附过程中没有新键形成。就 5 个体系的 E_{ad} 而言, $\text{C}_2\text{F}_6\text{O}_3$ 体系为 -1.05 eV, C_3F_6 体系为 -0.70 eV, C_2F_6 体系为 -0.22 eV, CF_4 体系为 -0.14 eV, CF_2O 体系为 -0.49 eV。基于这些结果,可以得出 Cu- NiS_2 对 5 个分子的吸附性能顺序为: $\text{C}_2\text{F}_6\text{O}_3 > \text{C}_3\text{F}_6 > \text{CF}_2\text{O} > \text{C}_2\text{F}_6 > \text{CF}_4$ 。考虑化学吸附的临界值 -0.8 eV^[29],可以确定 Cu- NiS_2 对 $\text{C}_2\text{F}_6\text{O}_3$ 分子的吸附行为是化学吸附,而对其他气体的吸附行为是物理吸附。值得注意的是,由于 $\text{C}_2\text{F}_6\text{O}_3$ 体系中的吸附性能比较强,吸附反应后 $\text{C}_2\text{F}_6\text{O}_3$ 分子内部发生了显著的几何形变,其中 O-O 键也发生了断裂。

基于 Hirshfeld 分析,可分析吸附体系中的电荷转移行为,即 Cu- NiS_2 与气体分子之间的 Q_T 。同时,图 5 展示了各吸附体系的 CDD,以便更为深入地了解气体吸附体系的电子重分配情况。可以发现,Cu 原子在 5 个气体吸附体系中均带正电,即 $\text{C}_2\text{F}_6\text{O}_3$ 体系中 0.290 e, C_3F_6 体系中 0.215 e, C_2F_6 体系中 0.235 e, CF_4 体系中 0.239 e, CF_2O 体系中 0.240 e。相应地,吸附后的气体分子除 $\text{C}_2\text{F}_6\text{O}_3$ 带 0.498 e 负电外,其他气体分子均带正电,即 C_3F_6 分子带电 0.206 e, C_2F_6 分子带电 0.045 e, CF_4 分子带电 0.024 e, CF_2O 分子带电 0.147 e。相比于 Cu- NiS_2 体系中 Cu 原子的 0.257 e 正电荷相比,可以推算出:在 $\text{C}_2\text{F}_6\text{O}_3$ 体系中 Cu 原子失去电子, $\text{C}_2\text{F}_6\text{O}_3$ 分子接收电子;在其他体系中,Cu 原子接收电子而被吸附的分子失去电子。这些发现揭示了 Cu 原子与气体分子之间的电荷重新分布现象,特别是在 $\text{C}_2\text{F}_6\text{O}_3$ 、 C_3F_6 和 C_3F_6 吸附系统中,其中 Q_T 非常显著从而导致 Cu- NiS_2 的电子分布变化更为明显。从这些吸附体系的 CDD 可以看出, $\text{C}_2\text{F}_6\text{O}_3$ 、 C_3F_6 和 C_3F_6 体系中电荷聚集主要集中在新形成的键上,而 C_2F_6 和 CF_4 体系中却没有明显的电荷汇聚。这些结论应证了前 3 个体系中较强的吸附特性和新键的生成。值得一提的是,电荷聚集表明电子杂化发生的键合原子之间存在强烈的轨道相互作用,这将通过电子特性进行详细分析。

2.3 气体吸附体系的电子性能分析

这里重点介绍气体吸附系统的 BS 和 DOS 分布,以揭示 Cu- NiS_2 在吸附体系中的电子性能变化,如图 6 所示。从图 6(a)~(e) 所示的 5 个吸附体系的 BS 中,可以看到 Cu- NiS_2 的带隙在吸附不同气体分子后发生了不同程度的变化。具体而言,在 $\text{C}_2\text{F}_6\text{O}_3$ 吸附体系中,体系中出现了一条穿越费米能级的新电

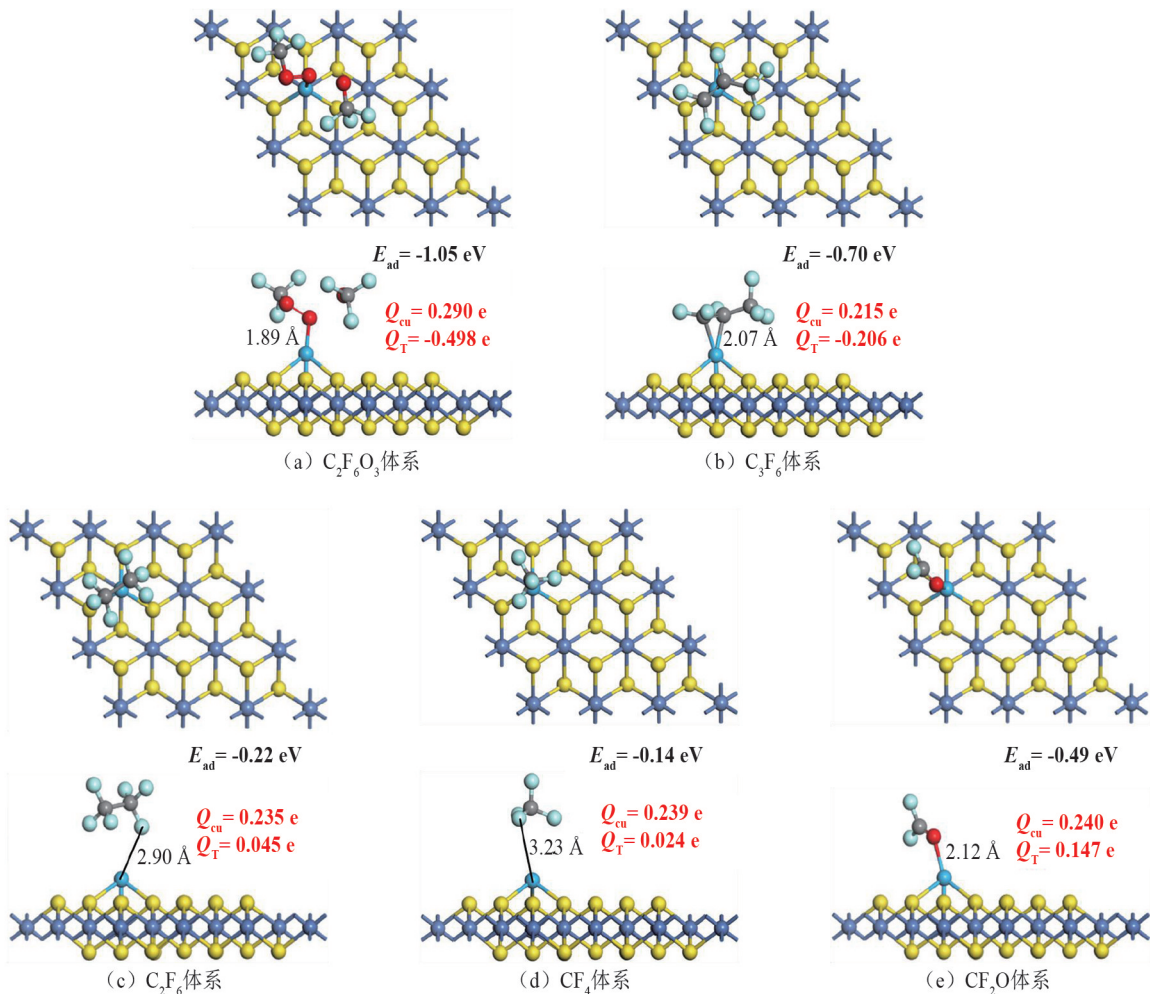


图 4 Cu-NiS₂对 5 种分解气体的最优化吸附结构

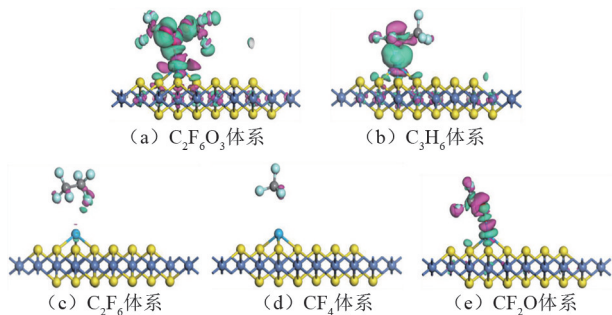


图 5 各体系的 CDD 分布

子态,使得整个体系表现出金属特性,带隙为 0 eV。另一方面,相比于 Cu-NiS₂ 体系, C₃F₆、C₂F₆、CF₄ 和 CF₂O 体系中的带隙从 0.398 eV 稍微增加到 0.422 eV、0.404 eV、0.399 eV 和 0.425 eV。基于这些结果,Cu-NiS₂在各气体系统中带隙的变化值依次为:C₂F₆O₃(0.398 eV) > C₃F₆(0.027 eV) > CF₂O (0.022 eV) > C₂F₆(0.006 eV) > CF₄(0.001 eV)。该排序结果与 E_{ad} 和 Q_T 的量级相同。考虑到 C₂F₆O₃ 体系的金属特性,可以预判吸附 C₂F₆O₃ 可以大幅提高 Cu-NiS₂ 的导电性^[30]。相反,其他 4 个气体吸附

体系中带隙的增加会导致 Cu-NiS₂ 电导率的降低。这些导电性的变化为 Cu-NiS₂ 应用于气体检测提供了基本的传感机制,该部分传感特性分析将在下一节详细介绍。结合 C₂F₆O₃ 分子的电子接收特性,可以推断 C₂F₆O₃ 的吸附等价于对 Cu-NiS₂ 的 p 型掺杂,并且由于 Cu-NiS₂ 系统的电导率显著增加,可以推导出 Cu-NiS₂ 传感材料的 p 型半导体特性。鉴于 Cu-NiS₂ 的 p 型半导体特性及其在吸附 C₃F₆、C₂F₆、CF₄ 以及 CF₂O 分子时的电子接收特性,可以推导出这些气体的吸附等价于给 Cu-NiS₂ 带来的 n 型掺杂,因此其电导率会降低、带隙会增加^[31]。此外,由于这些系统中的 Q_T 不同,因此气体吸附后改变的带隙也不同。

图 6(f) — (h) 展示了 C₂F₆O₃、C₃F₆ 和 CF₂O 体系的轨道 DOS 分布图。从 C₂F₆O₃ 体系的轨道 DOS 中可以发现 Cu 3d 轨道与 O 2p 轨道在 -6.8 ~ -0.6 eV 和 0 ~ 0.9 eV 高度重叠。这揭示了 Cu 和 O 原子之间存在显著的轨道杂化现象,证实 CDD 分布中密集

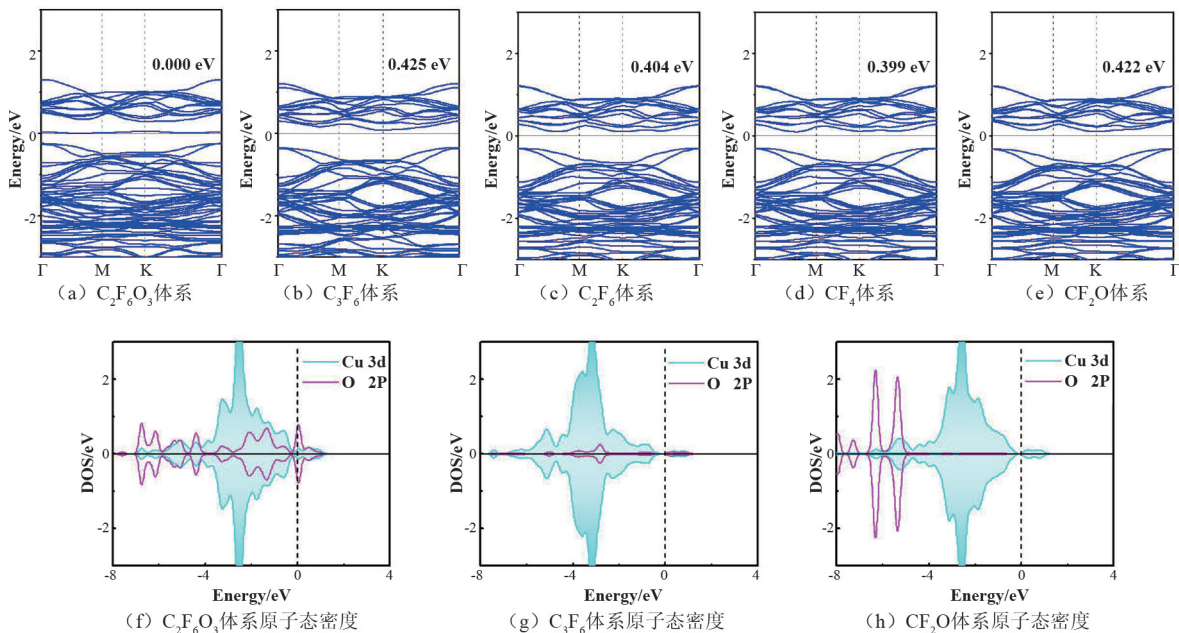


图 6 各吸附体系的 BS 及 DOS 分布

的电子聚集现象和 Cu-O 键上的强结合力。此外,在费米能级处产生的新电子峰表明了该吸附体系的金属特性,这与 $C_2F_6O_3$ 体系的 BS 分析结果是一致的。此外,Cu 3d 轨道在 C_3F_6 系统中与 C 2p 轨道在 -4.9 e、-3.7 e、-2.8 e 和 0.3 e 处发生了显著的杂化现象,并在 -6.3 eV、-5.3 eV 和 -3.1 eV 与 O 2p 轨道发生了轨道杂化;在 CF_2O 体系中 Cu-C 和 Cu-O 键的形成过程中也表现出良好的轨道杂化作用。这些轨道杂化现象的电子分布与上述 CDD 中的电荷聚集分布非常吻合。

2.4 气体传感器开发

基于上述研究结论及分析,可以发现 Cu-NiS₂ 的带隙在吸附了 5 种气体后发生不同程度的变化,这将导致 Cu-NiS₂ 体系电导率发生不同程度的改变。该结论为开发其为电阻型气体传感器提供了理论基础。因此,需进一步分析了材料带隙 B_g 和电导率 σ 之间的关系,可以通过式(3)进行计算^[32]。

$$\sigma = \lambda \cdot e^{(-B_g/2kT)} \quad (3)$$

式中: λ 为常数; T 为温度; k 为玻尔兹曼常数, $8.318 \times 10^{-3} \text{ kJ}/(\text{mol} \cdot \text{K})$ 。

从式(3)可以看出,与半导体 Cu-NiS₂ 单层相比, $C_2F_6O_3$ 体系的带隙为 0 eV 并表现为金属特性,因此在吸附 $C_2F_6O_3$ 分子后 Cu-NiS₂ 的导电性能(电导率)将大幅提升。除此之外,Cu-NiS₂ 的电导率在其他 4 种气体吸附体系中均有所降低,降低程度依次为 $C_3F_6 > CF_2O > C_2F_6 > CF_4$ 。更进一步,电阻型传

感器的传感响应 S 可以通过式(4)计算^[33]。

$$S = (\sigma_{\text{gas}}^{-1} - \sigma_{\text{pure}}^{-1})_{\text{pure}} / \sigma_{\text{pure}}^{-1} \quad (4)$$

式中, σ_{gas}^{-1} 和 $\sigma_{\text{pure}}^{-1}$ 分别为气体系统和隔离的 Cu-NiS₂ 单层的电导率。

通过式(4)可以计算出 Cu-NiS₂ 检测 C_3F_6 、 CF_2O 、 C_2F_6 和 CF_4 气体的传感响应值分别为 69.2%、59.6%、12.4% 和 2.0%。因此,可以说明 Cu-NiS₂ 对 C_3F_6 和 CF_2O 有着较为理想的传感性能,而对 C_2F_6 和 CF_4 的传感性能相对较弱。换言之,Cu-NiS₂ 更适宜开发为检测 $C_2F_6O_3$ 、 C_3F_6 和 CF_2O 气体的电阻式气敏传感器,但不适宜 C_2F_6 或 CF_4 气体的传感材料。

另一方面,气体从传感材料表面解吸附的行为,即传感器的气敏恢复时间同样是考察传感器性能指标的重要参数^[34]。研究表明,气体从传感器表面解吸附的恢复时间遵循 van't-Hoff-Arrhenius 理论,可使用式(5)进行计算^[35]。

$$\tau = A^{-1} e^{(-E_{\text{ad}}/kT)} \quad (5)$$

式中, A 为频率常数。

根据式(5)可以计算得: $C_2F_6O_3$ 、 C_3F_6 和 CF_2O 在室温下从 Cu-NiS₂ 表面解吸附的恢复时间 τ 分别为 $5.6 \times 10^5 \text{ s}$ 、0.56 s 和 $2.4 \times 10^{-4} \text{ s}$ 。因此,可以看出 Cu-NiS₂ 单分子层在室温下解吸附 $C_2F_6O_3$ 所需的时间非常漫长。换言之,在室温下解吸附 $C_2F_6O_3$ 是几乎不可能实现的。而 C_3F_6 和 CF_2O 解吸附所需的时间一方面能够满足传感材料完成气敏响应的检测时间,另一方面能够在检测过后快速解吸附而离开

$Cu-NiS_2$ 。该种特性使得 $Cu-NiS_2$ 能够作为常温下反复使用的气敏传感材料^[36]。综上,可以总结 $Cu-NiS_2$ 在室温下只能作为 $C_2F_6O_3$ 气体的单次检测传感器进行使用,而可以开发为可重复使用的 C_3F_6 或 CF_2O 气体传感器加以应用。

3 结 论

上面通过第一性原理模拟,研究了 $Cu-NiS_2$ 对 5 种 $C_5F_{10}O$ 分解气体的吸附和传感特性,以探索该种新型传感材料用以评估 $C_5F_{10}O$ 绝缘设备运行状态的应用潜力。主要结论如下:

1) Cu 原子更易于掺杂在 NiS_2 的 H1 位置,结合能为 -3.09 eV,且掺杂后的结构具有较好的化学稳定性。

2) $Cu-NiS_2$ 对 $C_2F_6O_3$ 分子表现为化学吸附, E_{ad} 为 -1.05 eV;而对于 C_3F_6 和 CF_2O 分子表现为物理吸附, E_{ad} 分别为 -0.70 eV 和 -0.49 eV;与 C_2F_6 和 CF_4 分子之间的相互作用弱, E_{ad} 分别为 -0.22 eV 和 -0.14 eV。

3) BS 和恢复特性的分析表明, $Cu-NiS_2$ 在室温下仅能作为 $C_2F_6O_3$ 气体的单次检测传感器,但可以开发为可重复使用的 C_3F_6 或 CF_2O 气体传感器。然而,鉴于较低的气敏响应特性, $Cu-NiS_2$ 不适宜开发为检测 C_2F_6 和 CF_4 气体的传感器。

该工作系统地研究了 $Cu-NiS_2$ 作为电阻型气体传感器检测 $C_5F_{10}O$ 分解气体的应用潜力,提出了新型气敏传感材料用以评估 $C_5F_{10}O$ 绝缘设备运行状态的可行性探究,研究成果可有效推动纳米传感器在输变电设备故障诊断和绝缘评估的应用进程。

参考文献

- [1] CUI Hao, ZHANG Xiaoxing, ZHANG Jun, et al. Nano-materials-based gas sensors of SF_6 decomposed species for evaluating the operation status of high-voltage insulation devices[J]. High Voltage, 2019, 4(4):242-258.
- [2] 唐炬,唐博文,李伟,等. 环保绝缘气体 $C_5F_{10}O$ 分解及复原性能研究现状及展望[J]. 中国电机工程学报, 2022,42(3):1210-1222.
- [3] LI Xingwen, ZHAO Hu, MURPHY Anthony B. SF_6 -alternative gases for application in gas-insulated switchgear[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2018, 51(15):153001.
- [4] LONG Yunxiang, GUO Liping, Shen Zhenyu, et al. Ionization and attachment coefficients in C_4F_7N/N_2 gas mixtures for use as a replacement to SF_6 [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(4):1358-1362.
- [5] 林启明,邓云坤,赵谡,等. SF_6 替代气体与空气混合的绝缘性能研究[J]. 高压电器, 2018,54(5):56-62.
- [6] GUO Ze, LI Xingwen, LI Bingxu, et al. Dielectric properties of C5-PFK mixtures as a possible SF_6 substitute for MV power equipment[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019,26(1):129-136.
- [7] LEI Zhicheng, ZENG Fuping, TANG Ju, et al. Conformation Analysis of Environmentally Friendly Insulating Gas C5-PFK[J]. IEEE Access, 2019,7:92724-92731.
- [8] LUCIANO Chenet, HYRENBACH Maik, ATTAR Echam, et al. An Enel-ABB partnership to develop an eco-sustainable alternative to SF_6 for MV switchgears, dimensionally compatible with existent apparatus using SF_6 , June 3-6,2019[C].Spain: Madrid, 2019.
- [9] 李伟,张晓星,肖淞,等. 环保型绝缘介质 $C_5F_{10}O$ 放电分解特性[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(14):4298-4306.
- [10] LI Y, ZHANG X, XIAO S, et al. Decomposition characteristics of $C_5F_{10}O$ /air mixture as substitutes for SF_6 to reduce global warming[J]. Journal of Fluorine Chemistry, 2018, 208: 65-72.
- [11] ZHANG Boya,ZHANG Ziyue, XIONG Jiayu, et al. Thermal and electrical decomposition products of $C_5F_{10}O$ and their compatibility with Cu (1 1 1) and Al (1 1 1) surfaces[J]. Applied Surface Science, 2020, 513: 145882-145892.
- [12] ZHANG Xiaoxing, WANG Jincong, CHEN Dachang, et al. The adsorption performance of harmful gas on Cu doped WS_2 : A first-principle study [J]. Materials Today Communications, 2021, 28: 102488.
- [13] GUI Yingang, CAO Wenhai, SUN Zhilin, et al. First-principle study on the structural and electronic properties of H_2S and SO_2 adsorption on Pd-doped MoS_2 monolayer[J]. Molecular Physics, 2019, 118(3): 1606462.
- [14] SAJJAD Muhammad, MONTES Enrique, SINGH Nirpendra, et al. Superior Gas Sensing Properties of Monolayer $PtSe_2$ [J]. Advanced Materials Interfaces, 2017,4(5): 1600911.
- [15] TAO Wang-Li, LAN Jun-Qing, HU Cui-E, et al. Thermoelectric properties of Janus MXY (M=Pd, Pt; X, Y=S, Se, Te) transition-metal dichalcogenide monolayers from first principles[J]. Journal of Applied Physics, 2020,127(3):035101.
- [16] WANG Chang-Tian, DU Shixuan. A unique pentagonal

- network structure of the NiS₂ monolayer with high stability and a tunable bandgap[J]. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 2020,22 (14):7483–7488.
- [17] FAN Yuehua, ZHANG Jinyan, QIU Yuzhi, et al. A DFT study of transition metal (Fe, Co, Ni, Cu, Ag, Au, Rh, Pd, Pt and Ir)-embedded monolayer MoS₂ for gas adsorption[J]. *Computational Materials Science*, 2017,138:255–266.
- [18] ARCHANA Sharma, ANU, SHAHID KHAN Mohd, et al. Sensing of CO and NO on Cu-doped MoS₂ monolayer based single electron transistor: A first principles study[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2018,7(18):2853–2860.
- [19] ZHAO B, LI C Y, LIU L L, et al. Adsorption of gas molecules on Cu impurities embedded monolayer MoS₂: A first-principles study[J]. *Applied Surface Science*, 2016,382:280–287.
- [20] ZHAI Shichao, JIANG Xiaoping, WU Dan, et al. Single Rh atom decorated pristine and S-defected PdS₂ monolayer for sensing thermal runaway gases in a lithium-ion battery: A first-principles study[J]. *Surfaces and Interfaces*, 2023,37:102735–102743.
- [21] WEI Huangli, GUI Yingang, KANG Jian, et al. A DFT Study on the Adsorption of H₂S and SO₂ on Ni Doped MoS₂ Monolayer[J]. *Nanomaterials*, 2018,8 (9): 646–657.
- [22] WANG Yao, GUI Yingang, JI Chang, et al. Adsorption of SF₆ decomposition components on Pt₃-TiO₂ (101) surface: A DFT study[J]. *Applied Surface Science*, 2018,459:242–248.
- [23] GUI Y G, SHI J Z, XU L N, et al. Au_n (n=1–4) cluster doped MoSe₂ nanosheet as a promising gas-sensing material for C₂H₄ gas in oil-immersed transformer[J]. *Applied Surface Science*, 2021, 541: 148356–148367.
- [24] ZHOU Qingxiao, JU Weiwei, SU Xiangying, et al. Adsorption behavior of SO₂ on vacancy-defected graphene: A DFT study[J]. *Journal of Physics and Chemistry of Solids*, 2017,109:40–45
- [25] ZHANG Xiaoxing, DAI Ziqiang, WEI Li, et al. Theoretical calculation of the gas-sensing properties of Pt-decorated carbon nanotubes[J]. *Sensors*, 2013, 13 (11): 15159–15171.
- [26] LI Yi, ZHANG Xiaoxing, CHEN Dachang, et al. Theoretical study on the interaction between C5-PFK and Al (111), Ag (111): A comparative study[J]. *Applied Surface Science*, 2019,464:586–596.
- [27] KHALATBARI H, VISHKAYI S Izadi, OSKOUIAN M, et al. Band structure engineering of NiS₂ monolayer by transition metal doping[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11 (1): 1–10.
- [28] ZHANG Yuefeng, YANG Ruijie, LI Hao, et al. Boosting Electrocatalytic Reduction of CO₂ to HCOOH on Ni Single Atom Anchored WTe₂ Monolayer[J]. *Small*, 2022,18(44):2203759–2203768.
- [29] HUANG Jialiang, CHU Jifeng, WANG Zhenyu, et al. Chemisorption of NO₂ to MoS₂ Nanostructures and its Effects for MoS₂ Sensors[J]. *ChemNanoMat*, 2019, 5(9):1123–1130.
- [30] MA Dongwei, JU Weiwei, LI Tingxian, et al. The adsorption of CO and NO on the MoS₂ monolayer doped with Au, Pt, Pd, or Ni: A first-principles study[J]. *Applied Surface Science*, 2016, 383: 98–105.
- [31] LI Yi, ZHANG Xiaoxing, SONG Xiao, et al. Theoretical evaluation of the interaction between C5-PFK molecule and Cu (1 1 1)[J]. *Journal of Fluorine Chemistry*, 2018,208:48–54.
- [32] CHEN Dachang, ZHANG Xiaoxing, TANG Ju, et al. Theoretical study of monolayer PtSe₂ as outstanding gas sensor to detect SF₆ decompositions[J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2018,39(9):1405–1408.
- [33] CUI Hao, GUO Yixin, ZHAO Qi, et al. Pd-doped PtSe₂ monolayer with strain-modulated effect for sensing SF₆ decomposed species: a first-principles study[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2022, 18: 629–636.
- [34] 唐媛尧,李明斌,程洁,等. 基于自组装金纳米颗粒的化学电阻传感器[J]. *微纳电子技术*, 2021, 58(7): 604–611.
- [35] CUI H, FENG Z, WANG W, et al. Adsorption behavior of Pd-doped PtS₂ Monolayer upon SF₆ decomposed species and the effect of applied electric field[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2022,22(7):6764–6771.
- [36] ZHOU Qian, ZHANG Guozhi, TIAN Shuangshuang, et al. First-principles insight into Pd-doped ZnO monolayers as a promising scavenger for dissolved gas analysis in transformer Oil[J]. *ACS Omega*, 2020, 5 (28): 17801–17807.

作者简介:

陈学云(1996),男,助理工程师,研究方向为电气设备运行维护;

金广杰(1997),男,助理工程师,研究方向为电气设备运行维护;

许正举(1994),男,助理工程师,研究方向为电气设备运行维护;

崔 豪(1991),男,博士,讲师,研究方向为电力设备故障诊断及绝缘评估。(收稿日期:2023-03-28)

基于傅里叶分析的高压直流输电次同步振荡控制研究

刘影, 景致远, 陈贵刚, 马豪杰

(电子科技大学机械与电气工程学院, 四川 成都 611731)

摘要:当高压直流输电遭受短时扰动时, 电气量变化产生的电磁转矩变化量所包含的电气负阻尼转矩, 加剧了汽轮发电机的转速变化, 使得输电线路中产生次同步振荡现象。文中通过傅里叶分析方法计算出电网次同步振荡频率, 在汽轮发电机的转子转速控制系统中通过调节励磁系统锁相环的频率合成, 减小励磁电流波动, 生成一个新的附加电磁转矩量, 使最终的电气阻尼转矩分量为正, 实现对转子转矩控制。仿真结果表明, 在电网出现短时扰动时, 汽轮发电机的转速没有出现大波动, 实现了对次同步振荡的有效抑制。

关键词:高压直流输电; 汽轮发电机; 傅里叶分析; 次同步振荡

中图分类号: TM 715 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2023)04-0025-06

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230405

Research on Control of Sub-synchronous Oscillation in HVDC Transmission Based on Fourier Analysis

LIU Ying, JING Zhiyuan, CHEN Guigang, MA Haojie

(School of Mechanical and Electrical Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, Sichuan, China)

Abstract: When high voltage direct current (HVDC) transmission is subject to short-term disturbance, the variation of electromagnetic torque caused by the change of electric parameters includes the component of electric negative damping torque, which intensifies the variation of turbo-generator speed and causes sub-synchronous oscillation in transmission lines. The frequency of sub-synchronous oscillation is calculated by Fourier analysis method. In the rotor speed control system of turbine generator, the fluctuation of excitation current is reduced by adjusting the frequency synthesis of phase locked loop in excitation system, and a new additional electromagnetic torque is generated, so that the final electrical damping torque component is positive, and the rotor torque is controlled. The simulation results show that the speed of turbine generator does not fluctuate greatly when power grid is disturbed in a short time, and the sub-synchronous oscillation is effectively suppressed.

Key words: HVDC transmission; turbine generator; Fourier analysis; sub-synchronous oscillation

0 引言

高压直流输电与传统交流输电方式相比, 能够输送大容量的电能且输送距离不受限制, 在发生故障时具有快速发现并将其恢复以及可以多次进行降压启动和再启动的优点^[1-2]。除此以外, 高压直流输电系统所使用的架空线路成本低、

传输电能效率也较高。但是高压直流输电的次同步振荡现象^[3-4]严重影响电力系统的安全运行, 大幅降低系统的稳定性。高压直流输电系统的次同步振荡现象是在机械子装置与电气子装置的相互作用下引起的。次同步振荡对汽轮发电机转子影响很大, 如果不加以抑制措施, 会对转子造成损坏, 严重时甚至使转子断裂^[5]。

目前对高压直流输电系统次同步振荡的分析主要采用前期的检测分析和检测后的精确分析方法。

文献[6]提出了等效电阻电抗值分析法;文献[7]提出了发电机相互作用分析法。这两种方法主要是用来判断电力系统中哪些汽轮发电机发生了次同步振荡现象。文献[8-9]的方法需要有汽轮发电机组轴系运行时的参数,并通过对轴系运行方式调整实现对次同步振荡的控制,该方法响应速度快,但只能对整个电力系统的次同步运行情况做出比较粗略的评估,而且分析结果与运行结果偏差较大。文献[10]提出了复合力矩分析法。文献[11]提出了本征值分析法。这一类方法要求有汽轮发电机组轴系运行时的详细参数而且还要有比较详细的数学模型,运算方式比较复杂,运算速度很慢。

傅里叶分析可以通过提取的各个交流侧信号、直流侧信号以及转速信号,得到各信号的频域特性,通过对比各信号的频域特性,可较快得知轴系次同步振荡的频率。因此,下面在傅里叶分析的基础上,从高压直流输电系统变流装置电气特性出发,计算系统的次同步振荡频率,通过调节汽轮发电机的励磁系统输出,实现次同步振荡控制。

1 次同步振荡产生机理

高压直流输电系统中汽轮发电机产生的电能是通过变流器转换以直流的形式传输。图 1 为搭建的换流站电路结构模型。当高压直流输电系统的换流站与汽轮发电机在距离上十分接近时,在发电机的转子上施加一个干扰量 $\Delta\omega$,在各设备上的电气量变化过程如图 2 所示。

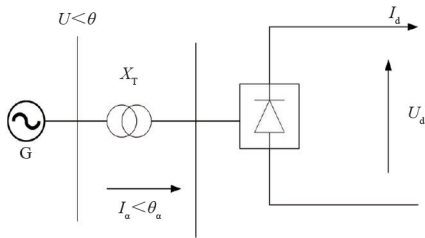


图 1 换流站的电路结构模型

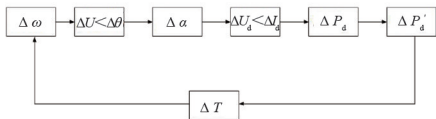


图 2 各设备的电气量变化过程

如图 2 所示,发电机转子转速的变化会使交流输电线路电压的大小 U 和相角 θ 发生改变,从而使施加的干扰量随着交流输电线路传递到换流站线路

上。换流站中三相桥式全控整流电路的触发延迟角发生 $\Delta\alpha$ 变化,引起直流输电线路电压 U_d 和电流 I_d 的变化,使直流输电有功功率发生变化,变化值为 ΔP_d 。电网的功率波动又会影响发电机的转子转矩,产生转矩波动 ΔT 。发电机的转子速度发生变化,最终形成越来越强的轴系振动危害转子本体安全^[12]。转速偏差 $\Delta\omega$ 与电磁转矩 ΔT_e 的相位如图 3 所示,横坐标 $\Delta\delta$ 为功角偏差。

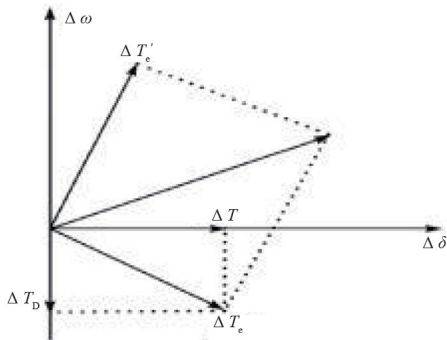


图 3 电磁转矩与转速偏差相位

图 3 中,当 ΔT_e 相位滞后于 $\Delta\omega$ 相位 90° 至 270° 之间时,电气阻尼转矩 ΔT_b 为负,可能导致系统不稳定。如果能够有一个附加电磁转矩,使得新的电磁转矩位于第一象限 $\Delta T'_e$,就会使得电气阻尼转矩为正,从而达到抑制次同步振荡的目的。

2 基于傅里叶分析的次同步振荡抑制

把变流装置的三相电压以傅里叶级数和的形式表示如式(1)所示。

$$\begin{cases} u_a = \sum_{m=1}^{\infty} B_m \cos m\omega_0 t \\ u_b = \sum_{m=1}^{\infty} B_m \cos m(\omega_0 t - \frac{2\pi}{3}) \\ u_c = \sum_{m=1}^{\infty} B_m \cos m(\omega_0 t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (1)$$

式中, ω_0 为输电线路工作频率。

在变流装置的整流过程中,三相电压在式(1)中的系数 B_m 为

$$B_m = \sin \frac{m\pi}{2} \cdot \cos \frac{m\pi}{6} \cdot \cos \frac{m}{2} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \frac{1}{m} \quad (2)$$

当变流装置两端的交流输电线路和直流输电线路存在次同步振荡时,此时交流输电线路每一相的电压 u_a 、 u_b 、 u_c 都是不对称的,它们的数学表达式为

$$\begin{cases} u_a = \sum_{s=-1,0,1} \sum_{n=1}^{\infty} B_m \cos \omega_n t \\ u_b = \sum_{s=-1,0,1} \sum_{n=1}^{\infty} B_m \cos(\omega_n t - \frac{2s\pi}{3}) \\ u_c = \sum_{s=-1,0,1} \sum_{n=1}^{\infty} B_m \cos(\omega_n t + \frac{2s\pi}{3}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $S = -1, 0, 1$, 分别表示负序、零序、正序; ω_n 为次同步振荡频率。

由上述式(1)一式(3)可以得到三相不对称的交流电压在经过变流装置后, 它的电压 u_d 为

$$u_d = \sum_{s=-1,0,1} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{B_m}{2} \cdot \left\{ \begin{aligned} & \left[1 + 2\cos \frac{2(m+s)\pi}{3} \right] \cdot \cos[(\omega_0 + m\omega_n)t] + \\ & \left[1 + 2\cos \frac{2(m-s)\pi}{3} \right] \cdot \cos[(\omega_0 - m\omega_n)t] \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

仅考虑负序电压和正序电压时, 在交流输电线路流过次同步振荡频率 ω_n , 会在直流输电线路感应出频率为 $\omega_0 + m\omega_n$ 和 $\omega_0 - m\omega_n$ 的电压分量, 其中: 频率分量 $\omega_0 + m\omega_n$ 超过同步频率的分量, 这种频率分量会逐渐被抑制; 而 $\omega_0 - m\omega_n$ 频率分量会经过交流输电线路传输到直流输电线路, 汽轮发电机组的转子将会出现频率为 $\omega_0 - m\omega_n$ 的频率分量, 影响发电机的正常工作。通过傅里叶分析, 可计算出发电机转子的振荡频率, 该频率就是要抑制的频率。

针对要抑制的次同步振荡频率, 设置相应的滤波装置参数, 并使用汽轮发电机的励磁激励方法, 设置励磁机的移相器参数。以发电机转速偏差信号作为输入信号, 经滤波装置和移相器调整后, 将其作为励磁电压调节器的附加控制信号, 进而产生一个附加电磁转矩, 使得调节后的电磁转矩变化量与转速偏差的相位差小于 90° , 最终使系统具有正的阻尼转矩, 从而达到抑制次同步振荡的效果。

移相器主要包括同步单元、移相单元、脉冲形成及放大单元。移相触发是根据输入控制信号的大小, 改变输送到晶闸管的脉冲触发角, 以控制晶闸管整流电路的输出, 从而调节发电机的励磁电流。其中同步单元, 要求加在整流电路晶闸管的触发脉冲与加在晶闸管阳极电路上的电压在频率和相位上步调一致。即触发脉冲在晶闸管承受正向电压时发

出, 才能使晶闸管导通。触发脉冲受次同步振荡的影响, 会造成励磁电流波动。

励磁机的移相器采用锁相环结构实现对调节频率的同步跟踪, 该结构由相位比较器、低频滤波器和压控振荡器组成, 如图4所示。

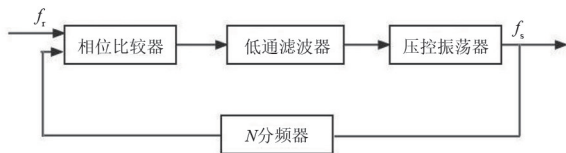


图4 锁相环的频率合成原理

首先, 将频率为 $\omega_0 - m\omega_n$ 的频率分量经低通滤波去除由于一个周期信号中含有高次谐波而可能产生的多余过零点。再经过零检测电路将信号变成方波信号 f_r , 这个方波信号频率和系统电压频率相同。然后将这个方波信号送到图4的相位比较器的一个输入端作为比较基准。另外, 由压控振荡器产生频率为 f_s 的方波信号, 经一个分频器 N 分频后送到相位比较器的另一端与 f_r 相比较。如果被测信号的频率 f_r 发生变化, 则 N 分频器的输出频率 f_s 也随之变化。这样就通过锁相环实现对调节频率的同步跟踪, 达到了压控振荡器产生抑制次同步振荡频率的目的。

3 仿真分析及结果

首先对 IEEE 次同步振荡第一标准模型^[13]进行仿真, 模型中将汽轮发电机中汽轮机和发电机分别等效为硬连接的 LPA 质量块和 LPB 质量块。该系统的额定功率为 60 Hz, 待研机组侧端电压为 26 kV, 额定容量为 892.4 MVA。对得到的相电压瞬时值波形进行傅里叶分析, 如图5所示, 可以看到电网系统谐振频率约为 39.67 Hz。

对次同步振荡标准第一模型得到的 LPA 质量块和 LPB 质量块之间转矩的波形进行快速傅里叶变换分析, 如图6所示。从图6可见转子的振荡频率约为 20.34 Hz, 此频率与该模型其中一个扭振模态的频率 20.21 Hz 较为接近, 可以发现, 转子的振荡频率与发电机输出电压的振荡频率之和约为该模型的工频值(60 Hz)。

使用 PSCAD/EMTDC 软件结合上述 IEEE 次同步振荡第一标准模型对高压直流系统次同步振荡现

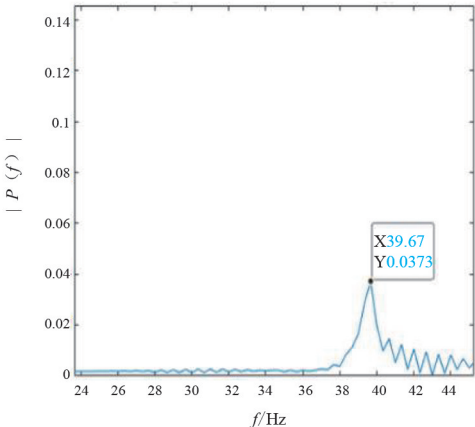


图 5 相电压频域

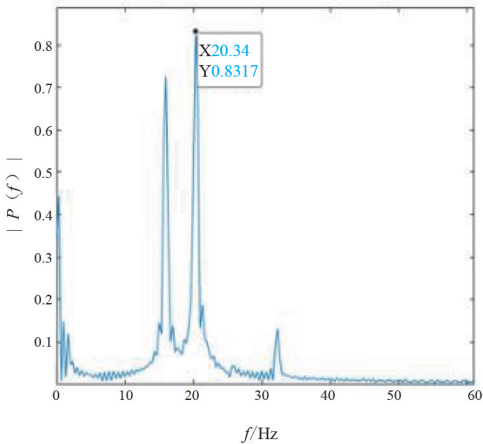


图 6 LPA 与 LPB 之间转矩频域

象进行仿真。以软件范例中自带的高压直流输电模型为基础,在高压直流输电系统的交流输电线路中加入同步发电机模型。高压直流输电系统次同步振荡整体模型如图 7 所示。

图 7 中发送端系统的额定电压为 345 kV,线路电阻为 2160 Ω,线路电感为 0.151 0 H;接收端系统的额定电压为 230 kV,线路电阻为 24.81 Ω,线路电感为 0.036 5 H,频率都是 60 Hz。整流侧同步发电机模型如图 8 所示。

图 8 中,同步发电机的输出电压为 382 kV,额定容量为 892.4 MVA。发电机轴系模型的参数与 IEEE 次同步振荡第一标准模型的参数一致,故该系统的扭振模态与第一标准模型扭振模态一致。引发次同步振荡现象是通过在高压直流输电系统整流侧的母线上施加三相短路故障实现。总仿真时长为 6 s,在 1.5 s 时发生短路,短路持续时间为 0.075 s。图 9 为高压直流输电系统的交流侧电压与直流侧电压。图 10 为汽轮发电机的转矩变换。

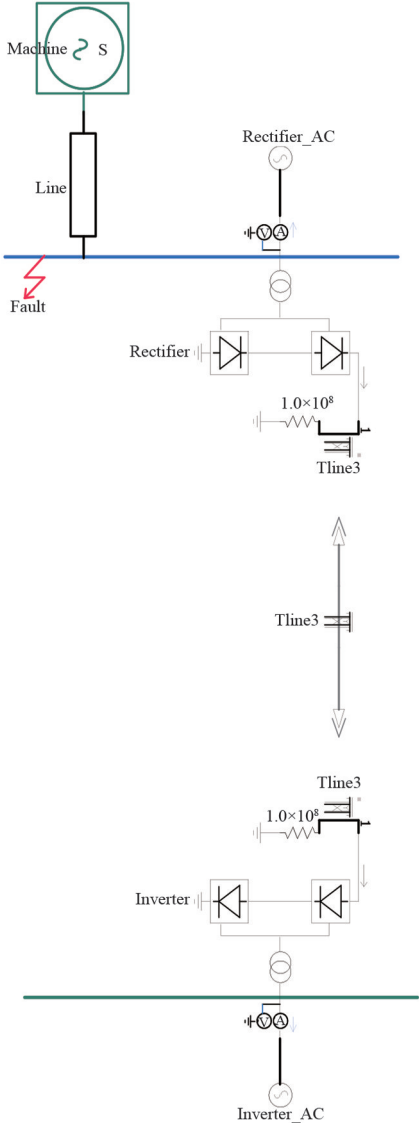


图 7 高压直流输电系统的次同步振荡模型

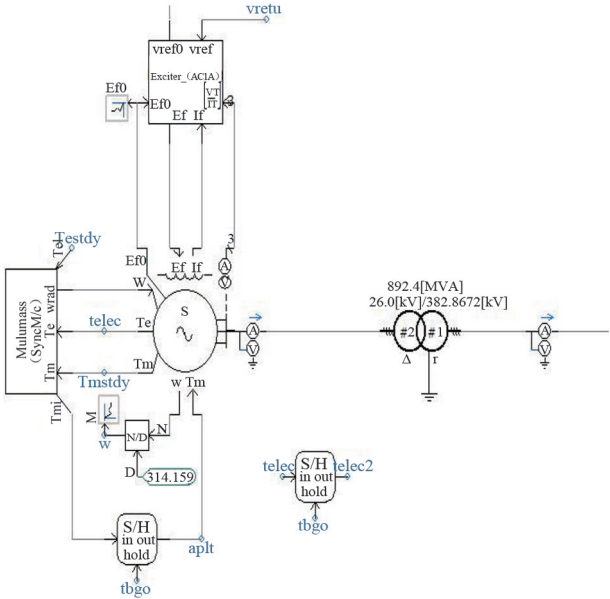
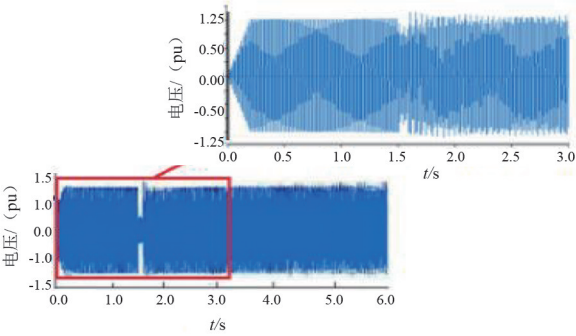
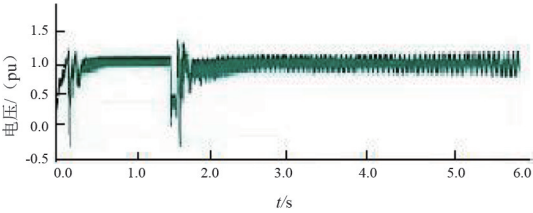


图 8 同步发电机模型



(a) 交流测电压



(b) 直流测电压

图 9 交流侧电压与直流侧电压

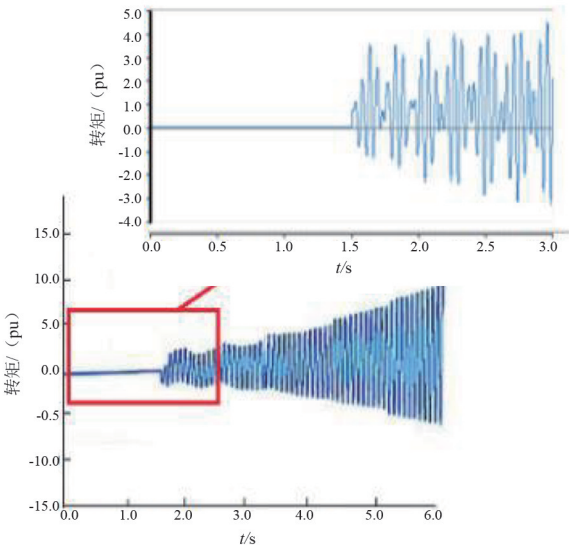


图 10 汽轮发电机的转矩变化

从图 10 可以看出,在 1.5 s 引发的三相短路使高压直流输电系统发生了次同步振荡,汽轮发电机的转矩在 1.5 s 之后就变得不稳定起来且呈扩散的趋势。如果不加入一些抑制措施,可以预想到汽轮发电机的轴系必将损坏。

利用复转矩系数法与时域仿真法相结合,对上述建立的模型进行电气阻尼分析:首先,向待研究电机转子施加一个频率为 ω_n 的小幅脉动转矩扰动,待系统稳定后,分别截取一个周期内的角速度增量和电磁转矩增量;然后,分别对这两个量进行快速傅里

叶变换分析,由此分别获得这两个量的幅频特性曲线图和相频特性曲线图;最后,由式(5)可得到相应扰动频率下的电气阻尼系数。

$$K_D(\omega_n)=\text{Re}(\Delta T_e/\Delta\omega) \tag{5}$$

式中, $K_D(\omega_n)$ 为不同频率下的阻尼系数。

经计算,扰动频率为 20.21 Hz(扭振频率)的电气阻尼系数为-23.833,扰动频率为 24.00 Hz 的电气阻尼系数为 4.86。这证明了在扭振频率扰动信号下电气阻尼系数为负,后续加入抑制措施后,电气阻尼系数可作为评判次同步振荡是否被抑制的标准。

图 11 和图 12 分别显示了电磁转矩和转速偏差在扭振频率处的相位点,电磁转矩相位滞后转速偏差相位 133°。

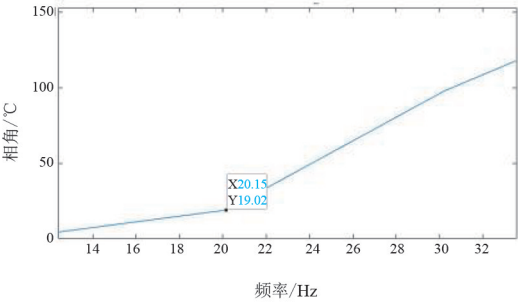


图 11 20.21 Hz 下的转速偏差相频特性

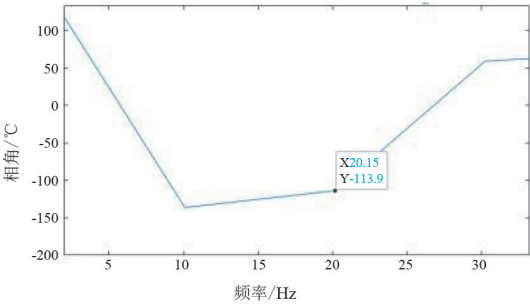


图 12 20.21 Hz 下的电磁转矩相频特性

当发生次同步振荡时,汽轮发电机的转速连续变化,所以相应的频率也在一定范围内变化。次同步振荡的频率一般为 5~60 Hz,所以在搭建次同步振荡抑制模型时,通过傅里叶分析得出了所搭建模型在三相短路故障下所引发的次同步振荡频率值也在这个范围。因此,在仿真中首先将搭架模型所产生的次同步振荡信号通过一阶低通滤波器和一阶高通滤波器,提取该频率段的信号。再将提取出的频率 5~60 Hz 的信号经过中心频率为次同步振荡频率值的带通滤波器,送入励磁系统的锁相环频率合

成电路,调节励磁系统的输出电流,使汽轮发电机的转子转速稳定,加入次同步振荡抑制结构后的汽轮发电机的转子转矩变化如图 13 所示。

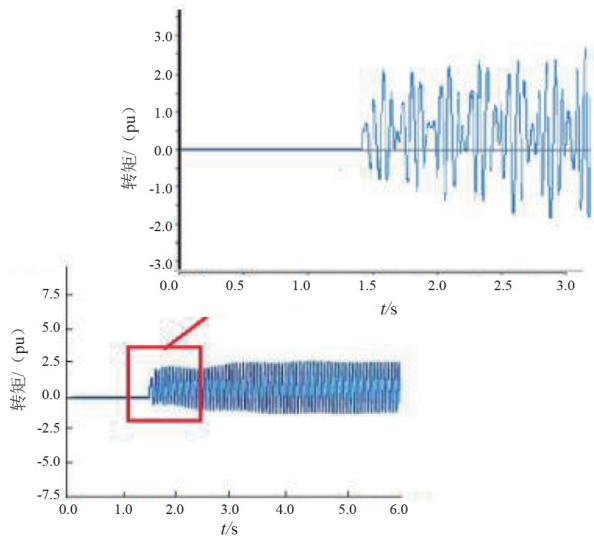


图 13 加入次同步振荡抑制的转子转矩

从图 13 中可以看出,加入次同步振荡抑制后,汽轮发电机的转子转矩相比于未加入次同步振荡抑制时明显减小,转速没有出现太大波动,也没有呈现出扩散的趋势,说明所提方法可以抑制高压直流输电系统次同步振荡。

4 结 论

当高压直流输电系统的电气设备发生故障或者输电线路遭受扰动时,汽轮发电机转子因为外界的干扰在发电机的内部装置中会出现次同步振荡,对高压直流输电系统以及汽轮发电机的转子本体造成威胁。上面采用傅里叶分析方法计算得出输电系统发生扰动时的次同步振荡频率,在汽轮发电机的转子转速控制系统中通过调节励磁系统中锁相环的频率合成,减小励磁电流的波动,同时生成一个新的附加电磁转矩量,使得最终的电气阻尼转矩分量为正,实现对转子转矩控制。对电力电子器件的控制除了考虑励磁系统,还可以考虑换流站中的电力电子器件,这也是后续需要研究的方向。

参考文献

[1] 陈龙龙,魏晓光,等.大容量可控关断的直流输电用电

流源型换流器研究综述[J].中国电力 2021,54(1):25-36.

[2] MOHAMMADI Fazel, ROUZBEHI Kumars, HAJIAN Masood, et al. HVDC circuit breakers: a comprehensive review [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021,36(12):13726-13739.

[3] 王敏华,康积涛,裴超志.高压直流输电次同步振荡时域仿真分析与控制[J].四川电力技术,2014,(4):18-22.

[4] DAMAS Robin Noel, SON Yongju, YOON Myungseok, et al. Subsynchronous oscillation and advanced analysis: a review[J]. IEEE Access, 2020,8:2169-353.

[5] 党存禄,严占想,陈蕾.高压直流输电次同步振荡轴系扭振分析[J].自动化仪表,2017,38(11):22-26.

[6] BOGLIETTI Aldo, CAVAGNINO Andrea, LAZZARI Mario. Computational algorithms for induction motor equivalent circuit parameter determination—Part I: resistances and leakage reactance[J].IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(9):3723-3733.

[7] 张剑,肖湘宁,高本锋,等.双馈风力发电机的次同步控制相互作用机理与特性研究[J].电工技术学报,2013,28(12):142-149.

[8] 詹荣荣,赵寒,杜丁香,等.发电机轴系特性动态模拟的可行性探讨[J].电气应用,2012,31(21):70-74.

[9] 刘代祥,汪立.发电厂次同步振荡(SSO)问题的解决方法[J].四川电力技术,2012,35(2):78-84.

[10] 倪以信,王艳春,陈寿荪,等.多机系统 HVDC 引起的轴系扭振的扫频——复数力矩系数分析[J].电力系统及其自动化学报,1991,3(2):44-55.

[11] 周佩朋,宋瑞华,李光,等.基于附加比例谐振控制的风机次同步振荡抑制方法[J].中国电机工程学报,2021,41(11):3797-3806.

[12] 王彤彤,文俊,靳海强,等. HVDC 换相失败引发次同步振荡现象分析[J].电气应用,2020,39(1):30-36.

[13] 李希哲,田录林.基于第一标准型含直驱风电场并网引发系统次同步振荡特性的分析[J].西北水电,2018(1):81-85.

作者简介:

刘影(1984),女,博士,副教授,研究方向为智能电网、信号与信息处理;

景致远(1999),男,硕士研究生,研究方向为电子信息、智能电网、电力系统及其自动化;

陈贵刚(1996),男,硕士研究生,研究方向为电力系统及其自动化。

(收稿日期:2023-05-06)

自并励励磁系统灭磁容量计算与仿真分析

杨 玲,许其品,朱宏超,谢燕军,林元飞,李厚俊
(国电南瑞科技股份有限公司,江苏 南京 210006)

摘要:为保证发电机发生短路等故障时,灭磁系统能够安全、迅速地给发电机灭磁,并将发电机转子绕组中的磁场能量消耗在灭磁回路耗能元件中,文中通过求解同步发电机的五绕组微分方程并计及饱和,采用 Matlab 编写程序模拟空载误强励、负载误强励、负载三相金属性短路等工况下的灭磁过程,以某电厂参数进行仿真分析计算,并对照实际详细数学分析说明仿真计算结果精确可靠,可用于各种机组的灭磁容量设计,并为未来智能化励磁灭磁系统分析提供技术支持。

关键词:五绕组微分方程;空载误强励;负载误强励;三相短路;灭磁容量

中图分类号:TM 34 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2023)04-0031-06

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230406

Calculation and Simulation Analysis of De-excitation Capacity of Self-shunt Excitation System

YANG Ling, XU Qipin, ZHU Hongchao, XIE Yanjun, LIN Yuanfei, LI Houjun
(NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, Jiangsu, China)

Abstract:In order to ensure the safe and quick de-excitation of generator by de-excitation system in case of short circuit and other faults of generator, and consume the magnetic field energy in rotor winding of generator in energy consuming elements of de-excitation circuit, the five-winding differential equation of synchronous generator is solved considering saturation, and the de-excitation processes under no-load false forced excitation, load false forced excitation and load three-phase metallic short circuit are simulated by Matlab. Taking the parameters of a power plant for simulation and calculation, the results are verified to be accurate and reliable according to actual and detailed mathematic analysis, which can be used to design de-excitation capacity of various units and provide technical support for the analysis of intelligent de-excitation system in the future.

Key words: five-winding differential equation; no-load false forced excitation; load false forced excitation; three-phase short circuit; de-excitation capacity

0 引言

同步发电机在运行中,当发生定子绕组匝间短路、定子绕组相间短路、定子接地短路等故障时,继电保护装置就快速地将发电机从系统中切除,但发电机的感应电势却依然存在,继续供给励磁电流,故将会发生导线的熔化和绝缘材料的烧损,甚至烧坏铁芯。因此,当发生上述发电机故障时,在继电保护动作将发电机断路器跳开的同时,还应迅速地给发电机灭磁。灭磁系统的作用就是当发电机内部与外

部发生上述事故时迅速切断发电机的励磁,将发电机转子绕组中的磁场能量快速消耗在灭磁回路耗能元件中。

现行标准^[1]规定了灭磁容量的计算工况,包括空载误强励、负载误强励及机端三相金属性短路。文献[2]根据 SiC 电阻的伏安特性及灭磁回路拓扑结构,在理想情况下对励磁电流与灭磁时间的函数关系进行了推导并给出了 SiC 电阻耗能公式,同时分别对空载误强励和机端三相短路两种极端灭磁工况的灭磁电阻耗能作出了理论分析。文献[3]运用电力电子软开关技术实现快速灭磁,并利用储能元

件存储灭磁过程中的部分磁场能量。文献[4]增加了辅助逆变器的高新技术应用,同时对跨接器回路进行了改进,采用多重冗余触发电路电子跨接器。文献[5]提出了一种线性电阻与非线性电阻组合灭磁的方式。文献[6-7]通过 SIMULINK 工具的基本模块求解同步发电机的微分方程,从而进行灭磁仿真。

下面通过差分法求解同步发电机的五绕组微分方程,计及磁路饱和,利用 MATLAB 程序对灭磁系统进行精确仿真^[8],研究发电机空载误强励、负载误强励及机端三相金属性短路时的灭磁容量计算。

1 同步发电机 Park 方程

为准确模拟灭磁系统的工况,需要计及发电机转子的阻尼效应。对于凸极发电机而言,需要建立 5 个回路的方程,5 个回路分别为定子三相绕组的 d 轴分量、定子三相绕组的 q 轴分量、转子绕组、直轴(d 轴)阻尼绕组、交轴(q 轴)阻尼绕组。为方便分析,认为转子以同步转速旋转,转子角速度标么值为 1,则回路方程可表示为^[10]:

$$\left. \begin{aligned} U_d &= -r i_d + \dot{\psi}_d - \psi_q \\ U_q &= -r i_q + \dot{\psi}_q + \psi_d \\ U_f &= r_f i_f + \dot{\psi}_f \\ 0 &= r_D i_D + \dot{\psi}_D \\ 0 &= r_Q i_Q + \dot{\psi}_Q \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \psi_d &= -x_d i_d + x_{ad} i_f + x_{ad} i_D \\ \psi_q &= -x_q i_q + x_{aq} i_Q \\ \psi_f &= -x_{ad} i_d + x_f i_f + x_{ad} i_D \\ \psi_D &= -x_{ad} i_d + x_{ad} i_f + x_D i_D \\ \psi_Q &= -x_{aq} i_q + x_Q i_Q \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: U_d 、 U_q 、 i_d 、 i_q 分别为定子绕组的 d 、 q 轴电压、电流分量; U_f 、 i_f 分别为磁场绕组的电压、电流; i_D 、 i_Q 分别为 d 、 q 轴阻尼绕组的电流; r 、 r_f 、 r_D 、 r_Q 分别为定子绕组、转子绕组、 d 轴阻尼绕组、 q 轴阻尼绕组的电阻; x_d 、 x_q 分别为发电机的直轴、交轴同步电抗; x_{ad} 、 x_{aq} 分别为发电机的直轴、交轴电枢反应电抗; x_f 、 x_D 、 x_Q 分别为励磁绕组、直轴阻尼绕组、交轴阻尼绕组的自电抗; ψ 为各绕组磁链; $\dot{\psi}$ 为磁链对时间的导数 $d\psi/dt$ 。

灭磁时,磁场断路器断开,接入灭磁电阻,转子与灭磁电阻形成通路。灭磁时的电路方程^[6]表示为

$$0 = i_f r_f + R i_f + \frac{d(L_{fs} + L_{ad}) i_f}{dt} \quad (3)$$

$$\frac{di_f}{dt} = -\frac{R i_f + i_f r_f}{L_{fs} + L_{ad}}$$

式中: R 为灭磁电阻,可以为线性电阻或非线性电阻,也可为组合电阻(非线性与线性组合或者其他组合),这里选取为非线性电阻,因此非线性电阻的电压降 $R i_f = C_R i_f^\beta$, C_R 为非线性电阻位形系数, β 为非线性电阻系数; L_{fs} 为磁场漏感,基本为常数; L_{ad} 为与定子磁链的主电感,受磁路饱和影响,是励磁电流的函数。由于回路电感变化不大,转子电阻较小,因此当灭磁初始电流一定时,转子电流变化率与 $R i_f$ 有关, $R i_f$ 越大,变化率越大,即灭磁时的衰减速度越快。因此若想提高灭磁速度,需要 $R i_f$ 尽可能地保持在最大值。

发电机的精确分析要求考虑磁路饱和效应对电机模型的影响。而为了节省材料,同步发电机运行在额定条件时,定子和转子就已经处于浅度饱和状态,因此励磁电流和励磁电压的计算需要考虑磁路饱和。

通过查询发电机空载特性饱和曲线,选取线性段数据 10 点及非线性段上 10 点,共 20 点,对数据进行二项式拟合,可根据实际情况增减,点数越多,拟合越准确。求解拟合后的方程找到饱和段与不饱和段的分叉点,令该点对应电流值为 i_{point} ,将曲线分为线性段和非线性段,用式(4)表示。

$$U_0 = \begin{cases} L i_f & i_f \leq i_{point} \\ A i_f^2 + B i_f + C & i_f > i_{point} \end{cases} \quad (4)$$

式中: L 为动态电感; U_0 为饱和段与不饱和段分叉点对应的机端电压值; A 、 B 、 C 为拟合系数。

若没有发电机空载特性饱和曲线,那么空载特性可用通用表达式^[7]表示为

$$U_0 = \begin{cases} 1.1 i_f & i_f \leq 0.823 \\ \frac{1.95 i_f}{0.95 + i_f} & i_f > 0.823 \end{cases} \quad (5)$$

2 灭磁仿真模型验证

以某水电站的参数为例进行仿真,主要参数见表1。

表1 机组参数

项目名称	参数	项目名称	参数
额定功率/MW	600	转子电阻/ Ω	0.125 4
额定电压/kV	20	直轴瞬态短路时间常数 T_d' /s	3.031
额定电流/A	19 245	直轴超瞬态短路时间常数 T_d'' /s	0.099
额定功率因数(滞后) $\cos \Phi$	0.9	交轴超瞬态短路时间常数 T_q'' /s	0.098
额定频率/Hz	50	直轴瞬态开路时间常数 T_{d0}' /s	10.602
直轴同步电抗 X_{du} (不饱和值)/(pu)	1.057	直轴超瞬态开路时间常数 T_{d0}'' /s	0.135
直轴瞬变电抗 X_{ds} (不饱和值)/(pu)	0.933	交轴超瞬态开路时间常数 T_{q0}'' /s	0.102
直轴瞬变电抗 X_{du}' (不饱和值)/(pu)	0.314	定子绕组短路时间常数 T_a /s	0.41
直轴瞬变电抗 X_{ds}' (饱和值)/(pu)	0.295	定子漏抗 X_{σ} /(pu)	0.144
直轴超瞬变电抗 X_{du}'' (不饱和值)/(pu)	0.233	定子绕组电阻 (75 $^{\circ}\text{C}$)/ Ω	0.001 118
直轴超瞬变电抗 X_{ds}'' (饱和值)/(pu)	0.221	励磁变副边电压/V	970.0
交轴同步电抗 X_q (饱和值)/(pu)	0.700	灭磁电阻残压/V	1 700.0
交轴瞬变电抗 X_{qu}' (不饱和值)/(pu)	0.745	空载励磁电流/A	1 728.5
交轴同步电抗 X_{qs}' (饱和值)/(pu)	0.700	空载励磁电压/V	180.3
交轴超瞬变电抗 X_{qu}'' (不饱和值)/(pu)	0.247	额定励磁电流/A	3 078.5
交轴超瞬变电抗 X_{qs}'' (饱和值)/(pu)	0.232	额定励磁电压/A	456.5

该电厂灭磁电阻采用碳化硅电阻,非线性系数 $\beta=0.39$, $C_R=48.3$ 。根据 DL/T 294.4—2019《发电机灭磁及转子过电压保护装置技术条件 第4部分:灭磁容量计算》标准要求,发电机灭磁仿真的工况只考虑发电机空载误强励、负载误强励及机端三相金属性短路3种严重工况。一方面由于现场极少出现此3种工况,另一方面由于现场灭磁电压和灭磁电流的监测手段限制无有效数据进行对比,所以为验证模型的准确性,只有根据理论计算进行对比。

对同步发电机初始条件为空载态、定子三相突然短路进行数学分析^[11],此时励磁电流包含3个分量,见式(6):第一个分量是由励磁电压所产生的的

稳态分量;第二个分量是以直轴瞬态短路时间常数 T_d' 衰减的非周期自由分量;第三个分量是以定子绕组短路时间常数 T_a 衰减的基频周期分量。

$$i_f \approx i_{f0} \left(1 + \frac{X_d - X_d'}{X_d'} e^{-\frac{t}{T_d'}} - \frac{X_d - X_d'}{X_d'} e^{-\frac{t}{T_a}} \cos t \right) \quad (6)$$

通过计算短路后励磁电流的第一个波峰值来对比公式与仿真模型。

1) 理论计算:式(6)中若转速不变,不考虑饱和及阻尼绕组,且认为短路瞬间时间 $t=0$,则励磁电流出现第一个波峰值的时间为0.01 s,其稳态值 $i_{f0}=1729$ A,将表1中参数代入计算可得短路后励磁电流 i_f 第一个波峰值约为10 538.8 A。

2) 仿真模型:同时改变计算模型的初始条件,不考虑饱和及阻尼绕组,仿真波形如图1所示,短路后0.01 s励磁电流达到第一个波峰,波峰值为10 550 A,与理论计算值基本一致。因此可以认为所使用的模型具有较高的准确性。

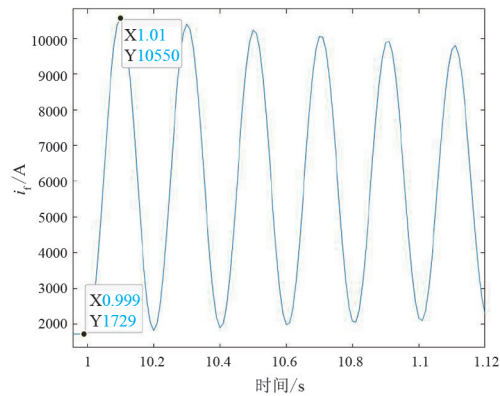


图1 空载三相短路灭磁仿真

3 各工况下的灭磁仿真分析

3.1 空载误强励工况

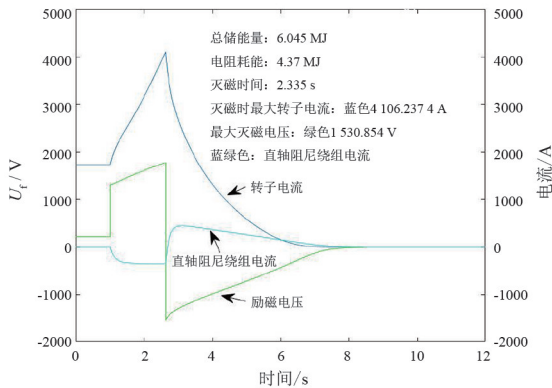
采用通用的饱和特性表达式进行仿真计算。当发电机运行在额定空载工况时,突然失控误强励,在机端电压达到1.3倍额定值后延时0.300 s跳灭磁断路器,同时将灭磁电阻接入灭磁回路进行灭磁。此时边界条件为定子电流 d 、 q 轴分量为0, q 轴绕组磁链为0,无 q 轴阻尼绕组电流和磁链,阻尼绕组电流为0,交轴绕组电流为0。

空载时考虑阻尼绕组的条件下, $i_d=i_q=0$,由于 q 轴电流为0,且 q 轴阻尼无外加电势,因此 $i_q=0$, $\psi_q=\psi_Q=0$ 。因此回路方程式(1)、式(2)变为:

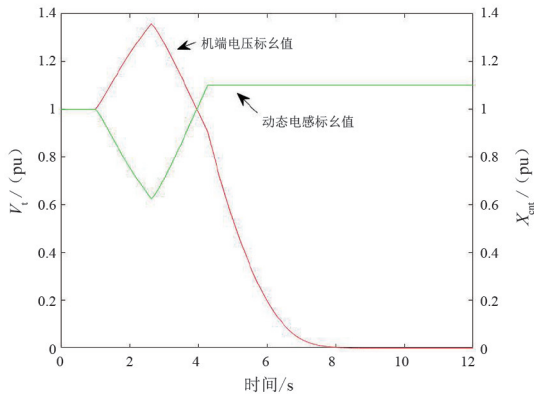
$$\left. \begin{aligned} U_d &= \dot{\psi}_d \\ U_q &= \psi_d \\ U_f &= r_f i_f + \dot{\psi}_f \\ 0 &= r_D i_D + \dot{\psi}_D \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} \psi_d &= x_{ad} i_f + x_{ad} i_D \\ \psi_f &= x_{fd} i_f + x_{ad} i_D \\ \psi_D &= x_{ad} i_f + x_{Dd} i_D \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

DL/T 294.4—2019 中要求的空载误强励灭磁容量计算工况为:对于凸极发电机,整流桥控制角为 0°,发电机定子电压为 1.3 倍额定值,延时 0.300 s 跳磁场断路器^[1]。经过仿真计算,结果如图 2 所示。由图 2(a) 显示:灭磁电阻耗能为 4.773 2 MJ,这里所指的灭磁时间是从空载额定励磁电流达到 10%空载额定励磁电流的时间,为 1.108 s;灭磁时最大转子电流为 4 106.24 A;最大灭磁电压为 1 645.77 V。由图 2(b) 可以看出,假设稳态时的动态电感标么值为 1,当发生误强励时,磁路饱和越来越大,对应动态电感变小,灭磁后动态电感逐渐恢复到不饱和值。



(a) 转子电流、励磁电压直轴阻尼绕组电流



(b) 机端电压与动态电感

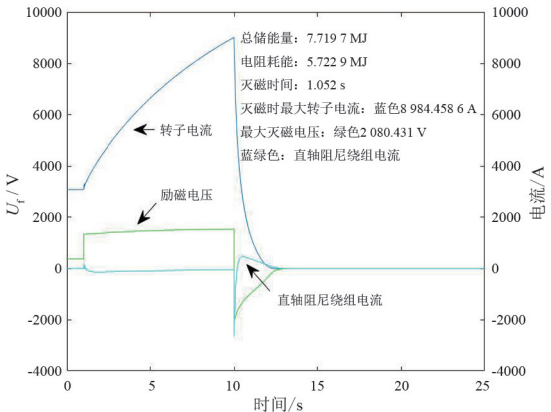
图 2 空载误强励灭磁仿真模型

3.2 负载误强励工况

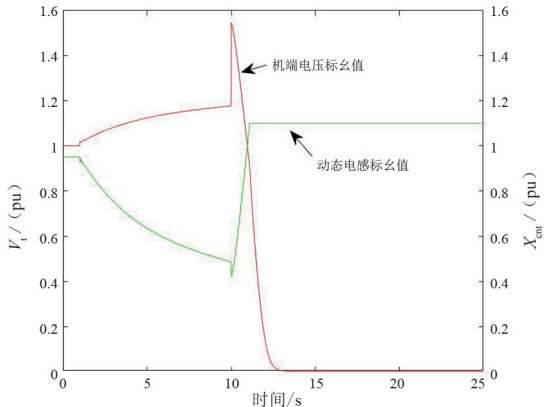
当发电机运行在额定负载工况时,突然失控误

强励,由于发电机并列在网上,当电网比较强时可认为机端电压一直为额定电压,当电网较弱、机组较大时,需要考虑机端电压会升高的情况。因此判定条件为:在发电机定子电流达到热稳定极限、转子电流达到热稳定极限,跳灭磁断路器,同时将灭磁电阻接入灭磁回路进行灭磁;或机端电压达到 1.3 倍额定值后,延时 0.300 s 跳灭磁断路器,同时将灭磁电阻接入灭磁回路进行灭磁。发生负载误强励时需要考虑两种情况:机端电压不升高,此时灭磁时的容量相对较小,这里不再赘述;机端电压因误强励而升高时,需要考虑并网电抗的影响。负载误强励造成磁场断路器分断后,可以认为与空载灭磁一致。

DL/T 294.4—2019 中要求的负载误强励灭磁容量计算工况为:负载额定工况运行,励磁控制角突然变为 0°,定子过电压保护或定子过负荷保护或转子过负荷保护动作分断磁场断路器^[1]。对于凸极发电机,发电机定子电压达 1.3 倍额定值,延时 0.300 s 保护动作。经过仿真计算,结果如图 3 所示。由图 3(a) 显示,灭磁电阻耗能为 5.722 9 MJ,灭磁时间为 1.052 s,灭磁时最大转子电流为 8 984.46 A,最



(a) 转子电流、励磁电压直轴阻尼绕组电流



(b) 机端电压与动态电感

图 3 负载误强励灭磁仿真模型

大灭磁电压为 2 080.43 V。由图 3(b)可以看出,当发生误强励时,磁路饱和越来越大,对应动态电感变小,灭磁后动态电感逐渐恢复到不饱和值。

并网断路器断开,发电机变为空载态,由于电枢反应突然消失,而励磁绕组的磁链不能跃变,转子中要感应出电流来抵制定子磁链的变化^[9-11],因而励磁电流将产生一个变化量使得励磁电流突然减小。由于空载时, $U_d=\dot{\psi}_d$,即 U_d 与励磁电流和直轴阻尼绕组电流的变化量正相关,因此灭磁瞬间机端电压会产生一个跃变。

3.3 负载三相短路工况

发电机负载工况时发生三相金属短路,将造成机端电压为 0,对于自并励系统而言,励磁电压也为 0。机端短路分为发电机内部短路及并网断路器外短路,两者区别在于:当发电机内部短路后,故障点无法切除,灭磁时相当于负载态;当发生并网断路器外短路后,断路器断开即可切除故障点,灭磁时已变为空载态。

额定负载下,发生定子短路时的物理过程:突然短路时,定子基频电流突然增大,电枢反应磁通也突然增加;励磁绕组和阻尼绕组为了保持磁链不变,都要感生出自由直流,由它产生磁通来抵消电枢反应磁通的增量。

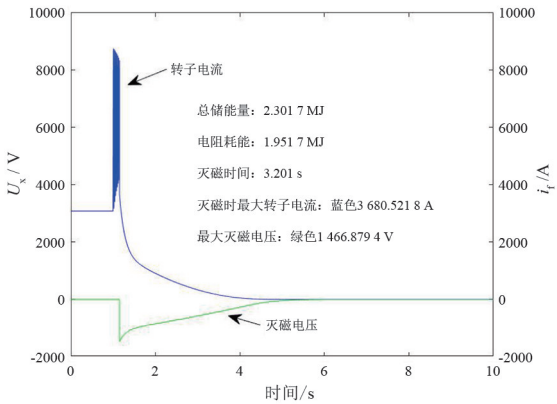
DL/T 294.4—2019 中要求机端三相金属性短路的灭磁容量计算条件为:发电机额定工况下机端三相金属性短路,延时 0.150 s 分磁场断路器灭磁^[1]。

3.3.1 短路故障点切除

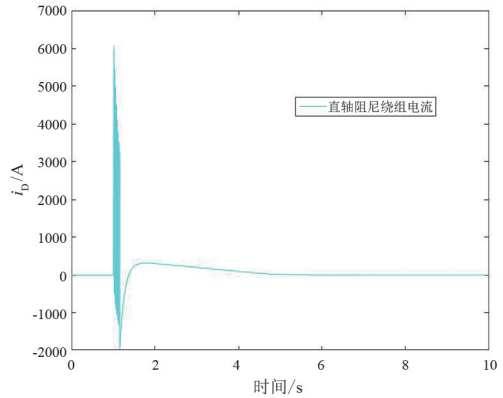
模拟该机组正常额定负载运行,1.000 s 时机端发生三相金属性短路,故障点位于并网断路器网侧。1.150 s 保护动作,跳并网断路器同时联跳励磁系统磁场断路器,故障点切除,励磁系统磁场断路器断开,灭磁电阻投入,开始灭磁。仿真波形如图 4 所示。

从图 4(a)中可以看出:短路瞬间,转子电流从额定 3078 A 增至 8737 A,然后保护动作,并网断路器断开,发电机变为空载态;由于电枢反应突然消失,而励磁绕组的磁链不能跃变,转子中要感应出电流来抵制定子磁链的变化^[9-11],因而励磁电流将产生一个变化量使得励磁电流突然减小;短路 0.150 s 后灭磁电阻投入,此时最大转子电流为 3 680.5 A,灭磁电压最大为 1 466.88 V,灭磁电阻耗能为 1.951 7 MJ。图 4(b)为直轴阻尼绕组电流波形,由于阻尼绕组在稳态时不起作用,电流为 0,而短路时,转子与旋转

磁场有相对运动,阻尼绕组产生感应电流,该电流与旋转磁场相互作用,产生阻止转子相对旋转磁场运行的转矩,随着灭磁电阻投入,转子电流下降,阻尼绕组电流开始上升,体现出阻尼作用。



(a) 转子电流与灭磁电压



(b) 直轴阻尼绕组电流

图 4 短路故障点切除灭磁仿真波形

3.3.2 短路故障点不切除

模拟该机组正常额定负载运行,1.000 s 时机端发生三相短路,故障点位于发电机侧。1.150 s 时保护动作,跳并网断路器同时联跳励磁系统磁场断路器,但由于故障点在发电机侧而无法切除,因此灭磁时短路点仍然存在,励磁系统磁场断路器断开,灭磁电阻投入,开始灭磁。仿真波形如图 5 所示。

从图 5(a)中可以看出:短路瞬间,转子电流从额定 3078 A 增至 8876 A,然后保护动作,并网断路器断开,但故障点不能切除;短路 0.150 s 后灭磁电阻投入,由于定子继续短路,定子在转子中感应的周期电流一直存在,此时最大转子电流为 8402 A,灭磁电压最大为 2024 V,灭磁电阻耗能为 6.512 9 MJ,由于定、转子耦合存在,定子绕组的能量会不断传递到转子,从而使消耗在灭磁电阻上的能量大大增加,同时定子电阻也在消耗能量;随着转子电流的减小,定子电流也在减小,最终都趋于 0。图 5(b)为直轴

阻尼绕组电流波形,短路瞬间,阻尼绕组最大电流达 6000 A 左右,体现出阻尼作用。

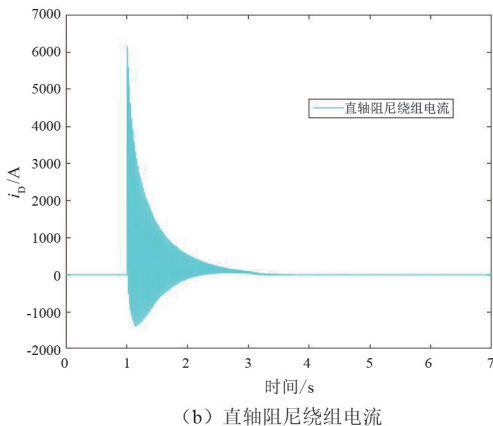
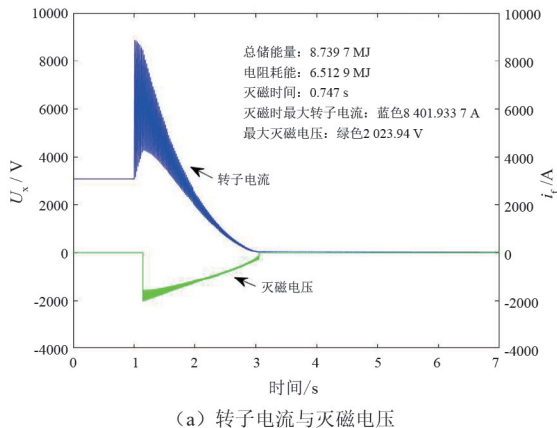


图 5 短路故障点不切除灭磁仿真波形

4 理论计算

上述 3 种工况下的仿真计算结果显示,负载三相金属性短路工况下灭磁电阻容量最大为 6.513 MJ。

根据 DL/T 294.4—2019 第 4.5 节要求,当参数不全时,灭磁电阻容量估算的计算公式^[1]为

$$E = \frac{1}{2} K_r K_s T_d' r_f (K_{dc} i_{fN})^2 \quad (9)$$

式中: E 为灭磁电阻容量,J; K_r 为灭磁电阻容量与转子磁场能量的比例,可取 0.6~0.7; K_s 为饱和系数,凸极机可取 0.6~0.7,隐极机可取 0.4~0.6; T_d' 为发电机直轴短路暂态时间常数,s; r_f 为发电机励磁绕组热态电阻值,可取 75℃ 时的电阻值, Ω ; K_{dc} 为电流倍数,可取 3; i_{fN} 为发电机额定负载励磁电流,A。

将机组参数代入式(8)计算可得: $E=7.942$ MJ。

由此可见,灭磁电阻容量估算值偏大,当现场参数缺失时,可参考估算值进行选择。

5 结 论

上面通过求解同步发电机的五绕组微分方程,计及饱和,采用 Matlab 编写程序模拟空载误强励、负载误强励、负载三相金属性短路等工况下的灭磁过程,以某电厂参数进行仿真分析计算,对比说明仿真计算结果精确可靠,可用于各种机组的灭磁容量设计,并为未来智能化励磁灭磁系统分析提供技术支持。

参考文献

- [1] 电力行业水电站自动化标准化技术委员会.发电机灭磁及转子过电压保护装置技术条件 第 4 部分:灭磁容量计算:DL/T 294.4—2019 [S].北京:中国电力出版社,2019.
- [2] 王帅,吴方元.大型核电机组 SiC 灭磁电阻容量的选择[J].发电设备,2018,32(1):19-23.
- [3] 王悦旸,谭亲跃,润子玉,等.基于储能电路的大型发电机组灭磁方式优化[J].大电机技术,2021(6):68-74.
- [4] 罗远旺,郭文峰,罗泽文,等.某大型水电站灭磁回路及控制技术分析[J].水电与新能源,2021,35(6):26-30.
- [5] 许其品,孙素娟,程小勇.大型发电机组灭磁方式[J].电力系统自动化,2007,31(15):70-73.
- [6] 陈贤明,王伟,吕宏水,等.1000 MW 汽轮发电机三相短路后灭磁仿真[J].电力设备,2008,9(11):24-28.
- [7] 陈贤明,朱晓东,王伟,等.水轮发电机突然三相短路后灭磁研究[J].水电厂自动化,2006,27(3):38-45.
- [8] 许其品,杨铭,徐蓉.汽轮发电机灭磁电阻选择[J].电力系统自动化,2013,37(6):125-129.
- [9] 李基成.现代同步发电机励磁系统设计与应用[M].北京:中国电力出版社,2011:334-375.
- [10] 李光琦.电力系统暂态分析[M].北京:中国电力出版社,2010.
- [11] 汤蕴缪.电机学[M].北京:机械工业出版社,2001.
- [12] 吴龙.发电机励磁设备及运行维护[M].北京:中国电力出版社,2019.

作者简介:

杨 玲(1988),女,硕士,高级工程师,从事励磁系统控制工作;

许其品(1967),男,硕士,研究员级高级工程师,从事励磁系统控制工作;

朱宏超(1981),男,硕士,高级工程师,从事励磁系统控制工作。

电力负荷预测研究综述

钱育树¹,孔钰婷^{2,3},黄 聪¹

(1.中国能源建设集团新疆电力设计院有限公司,新疆 乌鲁木齐 830002;2.新疆工程学院信息工程学院,新疆 乌鲁木齐 830023;3.新疆大学软件学院,新疆 乌鲁木齐 830091)

摘要:为适应智能电网快速响应的要求,电力负荷预测成为智能电网关键任务之一。精准的电力负荷预测响应对电力系统运行的安全性、稳定性、经济性起着至关重要的作用。首先,介绍电力负荷预测的特性及分类;随后,分析电力负荷预测的影响因素,并介绍电力负荷预测的基本步骤和性能评价指标;再将电力系统负荷预测的研究分传统预测方法、机器学习预测方法及深度学习预测方法等3类展开阐述;最后,总结所做的工作并展望电力负荷预测的未来发展方向。

关键词:电力系统; 负荷预测; 机器学习; 深度学习

中图分类号:TM 715 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2023)04-0037-07

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230407

Review of Power Load Forecasting

QIAN Yushu¹, KONG Yuting^{2,3}, HUANG Cong¹

(1.China Energy Engineering Group Xinjiang Electric Power Design Institute Co., Ltd., Urumqi 830002, Xingiang, China; 2. School of Information Engineering, Xinjiang Institute of Engineering, Urumqi 830023, Xingiang, China; 3. School of Software, Xinjiang University, Urumqi 830091, Xingiang, China)

Abstract:In order to adapt to requirements of fast response in smart grid, the accurate response of power load forecasting, as one of the key tasks in smart grid, plays a vital role in safety, stability and economy of power system operation. Firstly, the characteristics and classifications of power load forecasting are introduced. Secondly, the influencing factors of power load forecasting are analyzed and the basic steps and performance evaluation indexes of power load forecasting are introduced. Then the research of power load forecasting is divided into three categories: traditional forecasting method, machine learning forecasting method and deep learning forecasting method. Finally, the work done is summarized and the future development direction of power load forecasting is prospected.

Key words: power system; load forecasting; machine learning; deep learning

0 引 言

电力工业是国民经济发展中的重要基础性能源产业,是保证国民经济和社会持续、稳定、健康发展的关键^[1]。电力工业的发展建设对国家各行业起到至关重要的作用^[2]。随着改革开放后中国经济的高速发展,各领域的用电需求在不断激增,推动

着电力系统向数字化、智能化转型发展^[3]。

电力负荷预测是电力工业规划中的一个重要过程,其通过电力历史负荷数据和其他各类相关影响因素(如天气条件、人类活动、工业过程类型、时间和季节特征等)对未来时段的电力负荷、用电形势、用电需求、用电量等进行综合预测及推算^[4]。电力负荷的准确预测并快速响应对电力系统运行的安全性、稳定性、经济性具有重要意义。

为明确电力负荷预测的研究发展方向,需要掌

握和了解电力负荷预测研究现状,下面介绍了电力负荷预测的特性及分类、电力负荷预测的影响因素以及电力负荷预测的基本步骤;梳理并分析了电力系统负荷预测的现有研究成果并对电力负荷预测的未来发展方向进行了展望。

1 电力负荷预测特性及分类

1.1 电力负荷预测特性

在对电力负荷进行预测时,需依据历史负荷数据及其影响因素,考虑电力负荷预测时段的外在条件和用户需求,建立相关的预测模型并进行模型择优,实现对电力系统负荷的可靠预测^[5]。电力负荷预测具有以下特性:

1)不确定性:电力负荷数据受各种不可预见的情况影响是不断变化的;随着电力负荷预测技术的更新迭代,电力负荷预测的精度要求也在不断变化^[6]。

2)条件性:无论使用何种预测方法或模型进行电力负荷预测,都需要满足相应的预测条件^[7]。

3)时间性:电力负荷预测需明确需要使用到的历史负荷数据的时间范围以及需要预测的未来负荷数据的时间范围^[8]。

4)多方案性:由于电力负荷的不确定性和条件性,需要依据多个预测方案的预测结果来挑选最优的预测模型^[8]。

5)相关性:电力负荷的自身发展过程存在相关性;电力负荷与外在影响因素之间也存在相关性^[6]。

6)相似性:电力负荷在相近的年、季度、月、周、日、节假日呈现出相似的变化趋势^[9]。

7)地域多样性:不同地区的经济发展能力、气候变化、行为习惯存在差异,电力负荷在地域上存在多样性,在进行电力预测时需考虑地区的具体情况^[10]。

1.2 电力负荷预测分类

电力负荷预测的内容包括最大负荷功率、负荷电量及负荷曲线的预测^[11]。电力负荷预测可按如下依据进行分类:

1)行业:商业负荷、工业负荷、农用负荷、民用负荷以及其他负荷预测等^[12]。

2)特性:最低负荷、最高负荷、平均负荷、负荷峰谷差、高峰负荷平均、低谷负荷平均、平峰负荷平均预测^[12]。

3)时空特性:基于时间序列的负荷预测和基于

空间范围的负荷预测^[12]。

4)预测时间周期:长期负荷预测(年)、中期负荷预测(月)、短期负荷预测(日)、超短期负荷预测(时)、节假日预测(时)^[13]。

5)用户等级:一类负荷、二类负荷和三类负荷^[14]。

6)电能:用电负荷、供电负荷、发电负荷^[14]。

2 电力负荷预测影响因素分析

电力负荷是指用户在电力系统中某一时刻所需的用电功率,经常受外在因素影响。开展电力系统负荷预测不仅要考虑预测模型,同时需要考虑外在因素对电力负荷变化的影响,以达到提升预测结果准确性的目标。对电力负荷预测的客观影响因素主要有:

1)自然因素:室内外气温、空气湿度、太阳照射角、风速、降水量、气压、天气等自然环境的变化会影响用户用电行为及用电设备发生变化,造成电力负荷变化^[15]。

2)经济因素:经济因素在区域经济水准、居民收入水准两方面影响着电力负荷的变化。区域经济水准受地区的宏观政策、产业总量增长、产业结构、人口发展、电价等影响;居民收入水准对居民用户用电行为及设备所有权起决定性作用^[16]。

3)时间因素:在较长的时间尺度中,电力负荷的变化趋势随着时间的推移呈现出周期性的变化,如周末与工作日以周为单位的变化、法定节假日等长假期与短假期带来的变化、春夏秋冬等随着季节变化电力负荷存在一定的变化规律^[17]。

4)人文特点:某地区的居民密集度、住户位置、生活习俗、居民职业特点、家庭人口年龄构成等对用户用电习惯与负荷高低会产生影响^[15]。

5)突发事件:受自然灾害、人为因素不可预知的未来事件影响所导致的配电设施的临时性维修、输电线路的突然故障、变电系统故障等会造成电力负荷突变,影响电力系统的安全稳定运行,同时对电力负荷预测增加难度^[16]。

6)其他因素:例如大型赛事或演艺活动等短暂且无举办固定时间的活动会导致短期电力负荷增加;节能减排、新能源等政策实施会降低用户用电量。这些短暂性的电力负荷变化因素在开展电力负荷预测工作时需要人工经验干预^[18]。

3 电力负荷预测基本步骤

电力负荷预测需要确定预测对象,选取相应的电力负荷历史数据集,处理分析并挖掘出电力负荷数据的特征,建立合适的负荷预测模型,最后完成电力负荷预测任务^[10]。

电力负荷预测任务的性能评价指标通常有平均绝对误差(mean absolute error, MAE)、均方根误差(root mean square error, RMSE)、平均绝对百分比误差(mean absolute percentage error, MAPE)、均方误差(mean square error, MSE)、相对误差(relative error, RE)、预测精度(forecast accuracy, FA)、预测区间覆盖率(prediction intervals coverage probability, PICP)、平均区间宽度(mean prediction intervals width, NMPIW)、考虑覆盖率及宽度的综合评价指标(coverage width-based criterion, CWC)、平均误差(mean error, ME)、准确率(accuracy, ACC)^[19-25]。

电力负荷预测的基本步骤如下:

1) 确定预测的目标。针对电力负荷任务,分析确定预测的对象、要求和目的等。

2) 获取电力负荷历史数据。在明确预测目标的基础上搜集完整准确的电力负荷历史数据。

3) 数据分析及处理。结合影响电力负荷的外在因素的历史数据,分析出电力负荷预测任务的数据特征,并进行数据集的整合;对数据集进行缺失值和异常值的处理,再开展数据的归一化、标准化、特征编码、数据集划分等工作。

4) 建立合适的电力负荷预测模型。数据处理完之后,结合数据的输入特征和变化规律,建立合适的电力负荷预测模型。训练集用于训练预测模型,验证集用于验证和调优模型。

5) 模型测试及评估。在模型优化完成后,输入测试集开始模型的预测,对比预测负荷与真实负荷,通过性能评价指标对模型预测结果和表现进行定性分析,帮助研究人员从多个模型中选择出当前电力负荷任务的最优模型^[22]。

4 电力系统负荷预测方法

下面按照传统预测方法、机器学习预测方法及深度学习预测方法等对电力系统负荷预测方法进行

划分,并指出这些方法优劣及适用的环境。

4.1 传统预测方法

传统预测方法包括时间序列分析法、趋势分析法、回归分析法、指数平滑法、灰色预测模型等多种方法^[26]。

1) 时间序列分析法,分析的是随时间变化的连续的电力负荷历史数据序列,建立数学模型来描述负荷值与时间的相互关系,确定时间序列的表达式来进行时间序列的负荷预测^[27]。该方法的优点在于所需的数据量少,且预测结果具有连续性;其劣势在于只适用于短期电力负荷预测,对周期性因素考虑较多,对不确定因素如节假日、天气等考虑较少。文献[28]提升基于小波变换的时间序列分析方法来进行电力负荷预测,采用提升小波变换对用户电力负荷数据的主要特征进行提取,避免用电量数据随机和波动带来的干扰。文献[29]融合利用卡尔曼滤波算法的自适应优势,较简单地得到比较准确的状态方程和观测方程,短期电力负荷预测精度得到提升。

2) 趋势分析法又称为趋势曲线分析方法,是使用最广、研究最多的定量预测方法^[30]。趋势分析法是根据已知的历史数据来拟合一个函数,使得函数能表达未来某个时间点电力系统负荷的预测值,常用的函数类型有多项式、对数、幂函数、指数等。趋势分析法通常要求完全拟合历史数据,不考虑随机误差,预测精确度易受突发事件的影响。基于负荷曲线进行的预测方法还有负荷极值分析、电力负荷密度等,均属超短期负荷预测方法^[31]。

3) 回归分析法又称统计分析法,是确定预测值和影响因子之间关系的方法。在电力系统负荷预测中表现为分析天气、区域经济水平和产业结构等众多因素与预测值之间的关系。但单纯的回归分析不能满足日益复杂的数据和精度要求,通常会结合一些其他的数据处理方法,如文献[32]通过对海上油田各生产环节的电力负荷需求和发展趋势进行分析,采用逐步回归分析法进行电力负荷预测特征量的强筛选,并建立电力负荷预测盲数化回归模型提升电力负荷预测的精度。回归分析法的优势在于方法简单、参数较少、预测的速度较快,但对于历史数据要求较高,且无法将大量的影响因素考虑进来。回归分析法适用于中期、长期电力负荷预测的应用场景。

4) 指数平滑法与回归分析法类似,都是基于时间序列和负荷值建立预测模型,与回归分析法不同的是指数平滑法更灵活,拟合性能也更好。指数平滑法采用过去数周的同类型日的相同时刻的负荷组成时间序列数据,对时间序列数据进行加权平均,得出待预测的负荷值。文献[33]提出具有“厚近薄远”特性的指数平滑法,解决了中长期电力负荷预测中存在时间跨度大和广域分布广等难题。指数平滑法的优势在于对季节波动不敏感及对季节趋势变化不明显的时间序列数据预测效果较好;劣势在于该方法的预测结果为变化趋势,难以实现准确的定量预测。该方法适用于短期、中期、长期电力负荷预测。

5) 灰色预测模型是对含有不确定因素的系统进行电力负荷预测的方法。使用灰色预测模型时先鉴别系统的不确定因素以及不确定因素之间变化的相异程度;然后处理原始数据,寻找系统变化的规律;最后生成有较强规律的时间序列数据,以便开展电力系统中电力负荷趋势的预测。灰色预测模型的优势在于预测的计算量小、所需的负荷数据少,对指数趋势负荷预测效果较好;劣势在于该方法未考虑到其他影响因素导致负荷变化规律不具有指数性时,电力负荷预测精度随之降低。该方法适用于短期、中期、长期电力负荷预测。文献[34-36]等对灰色预测模型进行改进应用,电力负荷预测的精度和稳定性得到提升。

早期电力系统的经济结构相对简单,影响电力负荷的因素较少,传统的电力负荷预测模型能快速、准确地预测电力负荷。随着经济结构的快速发展与变化,电力负荷中非线性和不确定性使得电力负荷预测愈发困难,传统预测方法不能很好地预测结果,需要依据实际情况进行预测方法的优化改进,考虑到气候、天气等外界因素影响,实现对电力负荷的精准稳定预测。

4.2 机器学习预测方法

电力负荷预测受多种因素影响,具备一定的非线性。机器学习具有较强的非线性映射能力,能有效地处理电力负荷预测中的非线性问题。传统的机器学习方法有支持向量机、决策树、随机森林等,这些方法能使用较少的数据处理非线性问题。

1) 支持向量机(support vector machine, SVM)是寻找一个超平面来处理非线性问题,能处理分类问题和回归问题。支持向量机用于处理回归问题时被

称为支持向量回归,该模型是寻找一个超平面拟合现有数据,使得所有数据到超平面的损失值最小。支持向量机具备处理小样本、非线性问题的优势;其劣势在于支持向量机的参数量选择困难。该方法适用于超短期、短期、中期、长期电力负荷预测。文献[37]通过混沌类电磁学算法优化支持向量机的参数选择过程,算法收敛效率和寻优能力得到了提升,适用于短期电力负荷预测。支持向量机还可以通过 K-means^[38]、最小二乘支持向量机^[39]、麻雀搜索算法^[40]、海鸥优化算法^[41]等进行模型优化。

决策树(decision tree, DT)在机器学习中表示的是对象属性与对象值之间的一种映射关系,是一种可以处理分类与回归问题的方法。决策树学习时,根据训练数据与损失函数最小化的原则构建决策模型。决策树具有分类速度快、生成模式简单的优点,其劣势在于易受训练数据中对决策不相关属性的影响。该方法的适用场景为短期、长期电力负荷预测。文献[42]通过减少异质数据的干扰,降低训练数据的规模,提出基于局部相似度取小综合的相似度计算方法和加权相似度损失函数,提升训练数据的相似度,改进梯度提升决策树学习算法,进而提升电力负荷预测的性能。

3) 随机森林(random forest)是一种由决策树构成的集成算法,属于 Bagging 类型。随机森林处理回归问题时称为随机森林回归。随机森林回归模型通过随机抽取样本和特征,建立多颗互不关联的决策树,综合所有决策树的结果得出最终预测结果。通过集成多颗决策树,使得模型具有较高的精确度和泛化性能。随机森林的优势在于对异常值有较高的容忍度,且不容易出现过拟合;劣势在于当数据不平衡时会导致分类准确率降低。该方法适用于短期、中期、长期电力负荷预测。文献[43]在电力预测中采用随机森林对不同产业进行针对性建模,提升了中短期电力负荷预测的精度。将随机森林与其他机器学习的方法相结合同样能提升模型的精度,文献[44]通过将模糊聚类与随机森林回归相结合,预测北爱尔兰短期电力负荷,预测结果表明了模糊聚类与随机森林相结合的有效性。

传统的基于机器学习预测方法相比于传统的预测方法可以提升预测精度,得到较好的预测结果,但传统的机器学习方法对数据特征的挖掘还是略显不足,

面对复杂的电力系统时不能很好地预测电力负荷。

4.3 深度学习预测方法

深度学习预测方法是用神经网络作为参数结构进行优化的机器学习方法。神经网络也称人工神经网络,是一种模仿生物神经网络信息传递和处理的数学模型。该模型通过大量节点并行或串行处理输入的信息,得到一个或多个输出目标。该模式具有复杂度高、适应性强、能自适应的学习数据特征,因此被广泛使用。神经网络的基本单元是感知机,能够接收多个输入特征 $(x_1, x_2, \dots, x_n)$,经过可学习的权重 $(w_1, w_2, \dots, w_n)$ 和偏置 b 加权融合所有信息。加权融合并不能增加模型的非线性映射能力,因此通过一个非线性的激活函数 $\theta(\cdot)$ 增加模型的非线性能力。电力行业经过多年的发展已经累积了大量珍贵的数据,深度学习的自适应学习特性非常有利于拟合这些数据特征,进行电力负荷预测。目前广泛应用于电力负荷预测的神经网络有误差逆传播(back propagation, BP)神经网络、卷积神经网络、循环神经网络以及新兴的 Transformer 模型^[15]。

1) BP 神经网络是通过反向传播算法进行训练的多层神经网络。BP 神经网络分为两个过程,即信息的前向传播和误差的反向传播。前向传播中,信息从输入层开始,经过隐含层提取信息和特征,最后由输出层输出结果。反向传播中,误差通过链式求导更新每个权重和偏置。文献[45]将 BP 神经网络应用于短期电力预测,取得较好的预测结果。BP 神经网络具有较好的非线性拟合性能,与其他算法结合能取得更好的预测结果,文献[46]提出将主成分分析和 BP 神经网络相结合,提升影响因子的细粒度,降低冗余信息的干扰,提升预测精度。文献[47]发现将负荷数据与气象信息作为输入,结合猫群优化算法与 BP 神经网络能获得更好的预测结果。BP 神经网络虽然具有较强的非线性映射能力、高度的自适应和自学习能力、较强的泛化能力以及具有一定的容错能力,但 BP 神经网络的参数冗余、收敛速度慢、局部极小化问题不容忽视。BP 神经网络适用于短期、中期、长期电力负荷预测。

2) 卷积神经网络(convolutional neural networks, CNN)是带有卷积结构的深度神经网络,可以高效地处理图像数据或图像序列数据,同样可以处理电力数据。与 BP 神经网络不同的是,卷积神经网络的上下层神经元并不直接连接,而是通过共享卷积核连接,极大地减少神经网络中的参数量,避免参数冗

余。卷积运算是指将输入的特征图通过多个不同的卷积核做加权融合运算,得到新的特征图或特征序列。其中卷积核提取需要的各种特征,每个输入的特征都有权重与之相乘。权值共享方式能大幅度降低神经网络中的参数量。不同的任务使用不同大小的卷积核,小尺寸卷积核能有效降低模型的参数量,但也限制了模型的感受野,在相同参数量时堆叠多个小尺寸的卷积核性能更优。卷积神经网络适用于短期电力负荷预测。文献[48]通过全卷积网络和因果逻辑约束增强时间序列特征表达,通过多尺度卷积核提取不同时间长度的特征,进而提高模型预测电力负荷的精度和稳定性。卷积神经网络与 BP 神经网络类似,可以结合一些传统的机器学习方法提升模型的预测精度,例如文献[49]通过结合 K-means 与卷积神经网络预测短期电力负荷:首先,通过 K-means 将用户分为日相关强的类和日相关弱的类;然后,对相关性强的类采用相邻时刻的数据和日数据作为输入,对相关性弱的类,仅使用相邻时刻的数据作为输入;最后,通过 CNN 提取特征,用实验结果表明了算法的可行性。

3) 循环神经网络(recurrent neural network, RNN)是一种将输出作为下次输入一部分的神经网络模型^[50]。该模型能捕获前后输出之间的相关性,其特性也能用于电力负荷预测,但 RNN 不善于学习长期依赖,仅适用于短期依赖,即应用于短期电力负荷预测场景。文献[51]提出长短时记忆网络(long short-term memory, LSTM)有效地解决 RNN 中长期依赖问题。LSTM 增加了输入门、遗忘门和输出门。输入门决定隐藏层信息是否更新,遗忘门决定更新的隐藏层是否包含上一时刻的信息,输出门决定输出那部分信息。电力系统负荷预测任务具有时间属性,这与循环神经网络的特性相符合。文献[52]中当训练数据较少、数据中时间间隔较短时, RNN 能较好地学习数据特征并较为准确地预测电力系统负荷;但随着数据中时间间隔增长, RNN 难以达到理想的预测结果。电力负荷数据中,不同尺度的信息侧重点不同,结合不同尺度的信息能有效地提升预测的精度,如基于多尺度跳跃^[53]、利用自适应柯西变异粒子群算法^[54]等进行模型优化。卷积神经网络按步长滑动卷积核计算的方式虽然降低了参数量,但造成互不相干的特征提取无法采用矩阵运算,进而限制了模型的推理速度。循环神经网络能很好地适应电力数据的时间特性, LSTM 能自发记忆长期依赖,

但训练速度慢、训练难度高和模型的可解释性差,使得基于 LSTM 的电力预测模型还需进一步研究。

4) Transformer 模型最初提出用于解决自然语言处理中循环神经网络难以并行加速的问题^[52]。标准 Transformer 模型由编码器 (encode) 和解码器 (decode) 组成, decode 相比于 encode 多了一个多头注意力模块和规范化网络层 (layer normalization) 用于接收 encode 输出。除了 encode 的输出, decode 的输入还包括上一个 decode 的输出, 依次类推完成解码。电力负荷预测的非线性、时间性和不确定性提高了负荷预测的难度, 但 Transformer 模型能充分捕获电力负荷序列的位置、周期性、趋势和时间信息, 能有效地降低预测难度, 提高预测精度。该方法适用于短期、中期、长期电力负荷预测场景。文献[55]提出基于特征嵌入和 Transformer 的负荷预测模型, 首先通过融合负荷位置、趋势、周期性、时间和天气信息得到负荷特征向量, 再通过 Transformer 模型挖掘特征向量中的非线性时序依赖关系, 最后通过全连接预测电力负荷。Transformer 模型能有效挖掘电力负荷数据中长期的依赖关系, 进而提高电力负荷预测的精度。利用 Transformer 捕获电力负荷数据中远距离依赖关系的模型还有基于 XGBoost、GRU 的改进模型^[56-57], 可进一步提高电力负荷预测的精度和效率。

5 结 论

上面总结了电力负荷预测的特性、影响因素、预测基本步骤及性能评价, 并从传统预测方法、机器学习预测方法、深度学习预测方法等三方面梳理并分析了电力系统负荷预测的研究成果。随着新能源汽车、储能系统等技术的快速发展, 电力系统即产即用的特征将发生重大转变, 风能、太阳能等不稳定能源发电的潜力将得到极大释放, 因此电力系统负荷预测技术也应在以下几个方面进一步发展:

1) 随着储能技术的发展, 不稳定能源将得到极大开发, 电力负荷预测应细化天气、地理环境、风能和太阳能储备等因素的影响, 以获得更准确、更合理的长期预测结果, 为电力规划部门提供更有力的依据;

2) 传统方法虽然存在一定的局限性, 但在特定领域仍发挥着重要的作用, 如何更有效地结合传统方法与最新的深度学习方法仍值得研究;

3) 电力负荷受地区政策、经济影响较大, 应多

考虑研究融合时间和空间的电力负荷预测技术。

参考文献

- [1] 电力行业市场规模及发展驱动因素分析[J]. 新能源科技, 2021(6): 3-4.
- [2] 王栋. 电力系统负荷预测综述[J]. 电气开关, 2020, 58(1): 6-8.
- [3] 侯金鸣, 孙蔚, 肖晋宇, 等. 电力系统关键技术进步与低碳转型的协同优化[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(13): 1-9.
- [4] 杨博宇, 陈仕军. 电力负荷预测研究综述及预测分析[J]. 四川电力技术, 2018, 41(3): 56-60.
- [5] 汪威为, 陈超洋. 智能电网背景下的大数据处理与短期负荷预测综述[J]. 无线互联科技, 2019, 16(5): 3-5.
- [6] 姜东良, 李天昊, 刘文浩. 基于相似日和 SAE-DBiLSTM 模型的短期电力负荷预测[J]. 电气工程学报, 2022, 17(4): 240-249.
- [7] HAMMAD M A, JEREB B, ROSI B, et al. Methods and models for electric load forecasting: a comprehensive review[J]. Logistils & Snsustainable Transport, 2020, 11(1): 51-76.
- [8] 肖灿彬. 智能电网中基于深度学习的负荷预测研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2022.
- [9] 叶宗阳. 基于需求侧管理的电力用户有序用电方法研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2022.
- [10] 华恒. 基于注意力机制集成多神经网络的短期电力负荷预测[D]. 南昌: 南昌大学, 2022.
- [11] 曹少奇. 基于注意力机制融合 LSTM 的短期电力负荷预测算法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2022.
- [12] 邓永生, 焦丰顺, 张瑞锋, 等. 配电网规划中电力负荷预测方法研究综述[J]. 电器与能效管理技术, 2019(14): 1-7.
- [13] 詹曾文. 基于稀疏自注意力机制的长时间序列电力负荷预测模型研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2022.
- [14] 胡朝举, 李云霞. 关于电力负荷影响因素及智能预测方法的研究[J]. 通信电源技术, 2018, 35(2): 231-232.
- [15] 梁宏涛, 刘红菊, 李静, 等. 基于机器学习的短期负荷预测算法综述[J]. 计算机系统应用, 2022, 31(10): 25-35.
- [16] 李涛. 面向电力市场用户侧的中长期电力负荷预测研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2022.
- [17] 张雪. 基于智能优化的神经网络短期电力负荷预测[D]. 西安: 西安工业大学, 2022.
- [18] 牛文娟, 吴晨, 薛贵元, 等. 面向新型电力系统的江苏省电力市场发展路径研究[J]. 广东电力, 2022, 35(3): 1-10.

- [19] AHMAD N, GHADI Y, ADNAN M, et al. Load forecasting techniques for power system: Research challenges and survey[J]. IEEE Access, 2022, 10: 71054-71090.
- [20] ZHANG JL, WANG Y, HUG G. Cost-oriented load forecasting [J]. Electric Power Systems Research, 2022, 205: 107723.
- [21] 肖白,李学思.基于误差幅空特性分析的空间负荷预测误差评价方法[J/OL].中国电机工程学报: 1-15 [2023-02-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20230110.1701.005.html>
- [22] 王鑫恒. 电力负荷预测与优化算法的研究[D]. 济南: 齐鲁工业大学, 2022.
- [23] 杜雅楠,齐敬先,施建华,等.基于LSSVM的超短期负荷区间预测[J].计算机系统应用, 2021, 30(3): 184-189.
- [24] 龚钢军,蔡贺,杨佳轩,等.基于MIC和MA-LSTNet的超短期电力负荷预测模型[J/OL].华北电力大学学报(自然科学版): 1-13 [2023-02-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1212.TM.20230208.1101.002.html>.
- [25] 苗磊,李擎,蒋原,等.深度学习在电力系统预测中的应用[J].工程科学学报, 2023, 45(4): 663-672.
- [26] 刘炬,刘闯,徐达,等.基于综合气象指数的EA-SNN组合负荷预测模型[J].山东电力技术, 2022, 49(8): 10-14.
- [27] 张凌云,肖惠仁,吴俊豪,等.电力系统负荷预测综述[J].电力大数据, 2018, 21(1): 52-56.
- [28] 张帆,张峰,张士文.基于提升小波的时间序列分析法的电力负荷预测[J].电气自动化, 2017, 39(3): 72-76.
- [29] 石文清,吴开宇,王东旭,等.基于时间序列分析和卡尔曼滤波算法的电力系统短期负荷预测[J].自动化技术与应用, 2018, 37(9): 9-12.
- [30] 白靖.电力系统负荷预测方法在配电网规划中的实践探析[J].通信电源技术, 2016, 33(2): 123-124.
- [31] 杨丕波,何祖斌.配电网节点数据综合统计与分析[J].贵州电力技术, 2015, 18(1): 19-20.
- [32] 王艳松,赵惺,李强,等.基于油气开采的海上油田中长期电力负荷预测[J].中国石油大学学报(自然科学版), 2021, 45(2): 127-133.
- [33] 夏家盛,吉培荣.负荷预测指数平滑法“厚近薄远”规律研究[J].电力学报, 2019, 34(1): 23-29.
- [34] 魏明奎,周全,蔡绍荣,等.基于BFGS-FA优化的分数阶灰色模型的中长期负荷预测[J].广西大学学报(自然科学版), 2020, 45(2): 270-276.
- [35] 徐英,李满君,段振兴,等.基于灰色关联分析的短期电力负荷预测系统[J].电子设计工程, 2022, 30(20): 185-188.
- [36] 张子阳,王珂珂.基于灰色关联和麻雀搜索算法的电力负荷预测[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2022, 41(3): 283-288.
- [37] 王茜,李皓然,王新娜,等.基于混沌类电磁算法优化支持向量机的短期负荷预测[J].计算技术与自动化, 2019, 38(4): 15-18.
- [38] DONG X, DENG S, WANG D. A short-term power forecasting load method based on k-means and SVM[J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2022, 13(11): 5253-5267.
- [39] ZHAO Z Y, ZHANG Y, YANG Y J, et al. Load forecasting via grey model-least squares support vector machine model and spatial-temporal distribution of electric consumption intensity[J]. Energy, 2022, 255: 124468.
- [40] LI J, LEI Y, YANG S. Mid-long term load forecasting model based on support vector machine optimized by improved sparrow search algorithm[J]. Energy Reports, 2022, 8: 491-497.
- [41] ZHANG S, ZHANG N, ZHANG Z, et al. Electric power load forecasting method based on a support vector machine optimized by the improved seagull optimization algorithm[J]. Energies, 2022, 15(23): 9197.
- [42] 谷云东,马冬芬,程红超.基于相似数据选取和改进梯度提升决策树的电力负荷预测[J].电力系统及其自动化学报, 2019, 31(5): 64-69.
- [43] 乔黎伟,王静怡,郭炜,等.基于随机森林算法的中短期用电量预测[J].电力科学与技术学报, 2020, 35(2): 150-156.
- [44] 李焱,贾雅君,李磊,等.基于随机森林算法的短期电力负荷预测[J].电力系统保护与控制, 2020, 48(21): 117-124.
- [45] 赵东雷,李丹华,库巍,等.基于神经网络的电力系统短期负荷预测[J].华北电力技术, 2017(9): 22-27.
- [46] 杜莉,张建军.神经网络在电力负荷预测中的应用研究[J].计算机仿真, 2011, 28(10): 297-300.
- [47] 王克杰,张瑞.基于改进BP神经网络的短期电力负荷预测方法研究[J].电测与仪表, 2019, 56(24): 115-121.
- [48] 许言路,武志锴,朱赫炎,等.基于多尺度卷积神经网络的短期电力负荷预测[J].沈阳工业大学学报, 2020, 42(6): 618-623.
- [49] 吕志星,张斌,王沈征,等.基于K-Means和CNN的用户短期电力负荷预测[J].计算机系统应用, 2020, 29(3): 161-166.
- [50] SHERSTINSKY A. Fundamentals of recurrent neural network (RNN) and long short-term memory (LSTM) network[J]. Physica D Nonlinear Phenomena, 2020, 404(8): 132306.

模块化微型桩钻机的研制及工程应用

马 宁¹, 林 峰², 江 雷², 狄锡颖², 李 欣², 张恒武², 宋青杰¹, 李欣伟¹

(1. 北京三一智造科技有限公司, 北京 102202; 2. 国网湖南省电力有限公司, 湖南 长沙 410004)

摘要:目前,山区输电线路基础施工以人工挖孔工艺为主,存在施工效率低、安全风险高的问题,不能满足日趋严格的电力安全生产要求。文中根据 20 余年的旋挖钻机生产经验,结合山区地形复杂、运输困难、岩石抗压强度大等施工痛点,研制出重量轻、拆装简单、入岩能力强的山地模块化微型桩钻机,并根据山区“土薄,岩厚且硬”的地质特点,提出了相应的施工工艺,初步解决了实际的施工难题。所研发的山地模块化微型桩钻机,不仅提高了山区输电线路工程中基础施工的机械化程度,而且为山区电力线路工程施工提供了技术和工艺参考。

关键词:山区; 输电线路; 桩基础; 模块化; 微型钻机

中图分类号:TH 17 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2023)04-0044-04

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230408

Development and Engineering Application of Modular Micro-pile Drilling Rig

MA Ning¹, LIN Feng², JIANG Lei², DI Xiyang², LI Xin², ZHANG Hengwu², SONG Qingjie¹, LI Xinwei¹

(1. Beijing Sany Intelligent Manufacturing Technology Co., Ltd., Beijing 102202, China;

2. State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410004, Hunan, China)

Abstract: At present, the basic construction of transmission lines in mountainous areas is mainly based on manual hole digging technology, which has the problems of low construction efficiency and high safety risk, and cannot meet the increasingly strict requirements of power safety production. Based on the experiences in production of rotary drilling rigs more than 20 years, and combined with the construction pain points such as complex mountainous terrain, difficult transportation and high rock compressive strength, a modular micro-pile drilling rig with light weight, simple disassembly and assembly, and strong rock penetration ability is developed. Based on the geological characteristics of "thin soil, thick and hard rock" in mountainous areas, the corresponding construction methods for modular micro-pile drilling rig are proposed, which preliminarily solves the actual construction problems. The successfully developed modular micro-pile drilling rig for mountainous areas not only improves the mechanization of foundation construction in mountainous transmission line project, but also provides a technical and construction method reference for power line engineering construction in mountainous areas.

Key words: mountainous area; transmission line; pile foundation; modularization; micro-drill

0 引言

“十四五”电网建设与发展规划强调,要加速建设特高压骨干输电网络,输电线路工程仍有较大发展前景。传统电力线路工程中的杆塔桩基础施工一直依靠人工挖孔作业,施工速度慢、安全风险高^[1],

基金项目:国网湖南省电力有限公司科技项目(5216A721003G)

因此对输电线路基础施工机械化的要求日益迫切。近年来,得益于电厂、变电站桩基工程中旋挖钻机的高效施工^[2-3],国内研究人员开始重视旋挖钻机在电力线路桩基础机械化施工中的应用前景研究^[4-5],尤其是 DR125T 型掏挖钻机、电建钻机等机械设备在输电线路基础施工中取得了良好应用效果^[6-9]。但针对山区地形复杂、硬岩地层较多等情况,上述机械设备存在整机重量大、运输不便、岩层

施工效率低等问题。

针对山区条件下输电线路基础的机械化施工难题,下面以设备重量轻、模块化拆装、入岩能力强为目标,结合岩石破碎装置开发、施工工艺研究等手段,研制出了新型山地模块化微型桩钻机,并在实际工程中取得了一定的施工效果。

1 输电线路基础工程发展趋势及机械化施工现状

1.1 输电线路基础工程发展趋势

输电线路工程桩基础施工受地形、地质和施工设备等条件的影响较大。在桩基础设计形式方面,输电线路工程桩基础在“微型桩、群桩”^[10-11]、桩型优化^[12]方面研究成果较多;在施工工艺方面,以岩石基础施工工艺、施工方案优化^[13]、桩身质量控制及控制^[14-15]研究为主;机械化施工方面,以小型施工机械和辅助设备研发^[16-17]为主,比如用水钻成孔方法在输电线路中岩石基础的应用、振动锤和全护筒在部分易坍塌地层中的施工应用等。而山区输电线路工程桩基础因在山腰或山顶施工,施工过程面临设备运输成本高、施工效率低、施工能力弱等诸多不利因素影响;因此桩型设计向“小桩、群桩”方向优化,在设备和工艺方面,小型、模块化施工设备研发^[16]和硬岩施工工艺创新是国内设备厂家和电力工程施工公司的研究方向。

1.2 输电线路基础工程机械化施工现状

2008年,国家电网直流建设分公司与北京送变电公司联合研制了DR125T型掏挖钻机^[6],并在 ± 800 kV向上直流特高压工程中投入应用,应用效果良好,体现了非常高的施工效率和安全性。但是该钻机仅在直径1.5 m以上的掏挖基础上应用时技术经济性比较好,且存在自重较大、现场移运困难、临时占地量大等缺点。

2014年,国网冀北电力有限公司研究出轻型化、组合式的掏挖基础开挖设备^[7],适用于1000 mm及以下直径、人工掏挖难以实现、大型设备无法通行或距离交通道路较远地区的线路工程桩基础施工。该钻机主结构采用组合式、外设动力及操控装置;单件质量小于300 kg,便于组装及拆卸;并考虑基础节能的设计,掏挖钻机的最大钻孔直径为1000 mm,最大钻孔深度为8.5 m。该钻机提高了掏挖基础施工

效率,降低了施工成本,保证了施工质量及安全性;但设备掏挖深度小,难以满足施工需求。

2021年,国网湖南省电力有限公司与泰信机械联合研制生产了电建桩机专用设备KR50D^[9],适应于电力杆塔桩基础施工。该设备具备整机重量轻、整体运输、爬坡能力强、重心低、稳定性高等特点,且下车履带可伸缩,方便窄路通过;采用组合钻入岩、加强型结构,取得了较好的效果。但该设备仅满足平地、丘陵、部分山地地形施工,整机未进行模块化设计,无法进行高山施工情况下的索道运输,且硬岩地层施工能力十分有限。

2 山地模块化微型桩钻机

所研制的模块化微型桩钻机重量轻且具有硬岩破碎能力,能够满足高山地区输电线路工程所面临的索道运输、破碎硬岩工况,对高山地区输电线路工程机械化施工意义重大。

2.1 设备组成及参数

山地模块化微型桩钻机整机由五大模块组成,如图1所示,分别为桅杆动力、钻杆、驾驶室、底盘、配重,且各部分质量均低于2 t,满足山区电力施工中型索道的运输能力。采用的三一重机事业部技术

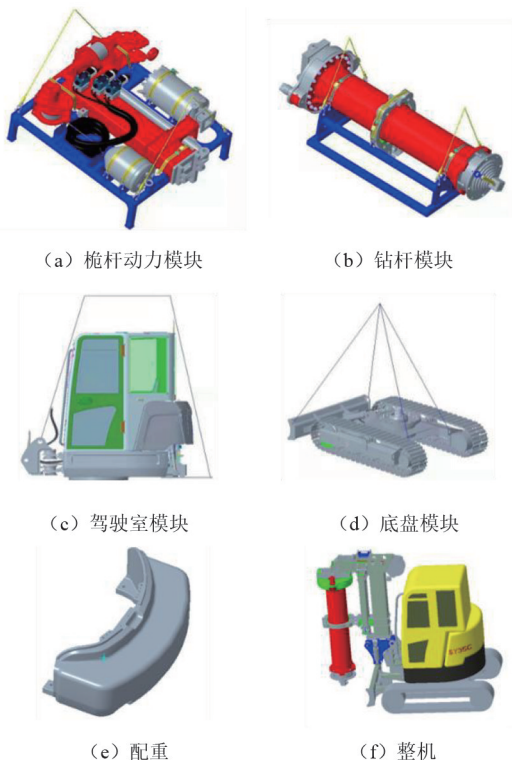


图1 山地模块化微型桩钻机结构组成

表 1 山地微型桩钻机与其他钻机性能对比

对比角度	山地微型桩钻机	DR125T 型掏挖钻机	轻量化、组合式掏挖钻机 ^①	KR50D 电建桩机
山地运输适用性	分体式运输,适用性更强	整体运输、山区适用性差	分体式运输,适用性强	整体运输
地层适用性	满足中风化以下的硬岩地层施工,适用性更广	扭矩 150 kN·m,有一定中风化硬岩施工能力	原状土、强风化岩石地质	仅适用于土层、全风化地层、软岩
山地地形施工便利性	针对山地地形开发	平地、丘陵全地形	平原、丘陵及山区	满足平地、丘陵全地形,以及部分山地地形施工
整机质量	6.88 t	29.00 t	约为 2.92 t,单构件最大质量 300 kg	配置不同,分别为 6.1 t、6.5 t、7.0 t
施工孔径、钻深	0.3~0.6 m 群桩 钻深 12.0 m	最大孔径 2.0 m 最大钻深 11.5 m	最大孔径 1.0 m 最大钻深 8.5 m	孔径最大 1.2 m 钻深 12.0 m

注①:轻量化、组合式掏挖钻机为国网冀北电力有限公司与北京送变电公司研制的轻量化钻机^[7]。

成熟的挖掘机底盘,重心低、稳定性高;各模块之间多采用销轴式连接,便于拆分和装配。

设备施工时,底盘、驾驶室、配重和桅杆动力模块始终固定连接,钻杆模块、钻具和破碎锤装置则根据实际施工进行选择。在土层中施工,选择钻杆模块和钻具;在硬岩地层施工,则需要切换至硬岩破碎锤装置。

山区索道运输在输电线路建设中应用广泛。山地模块化微型钻机利用索道机构,通过门架葫芦实现快速拆卸和安装。山地模块化微型钻机整机质量为 6.88 t,各模块质量低于 2 t,整机尺寸为 3700 mm×1720 mm×2800 mm(长×宽×高),最大爬坡角度为 25°,能够在不碾压破坏山区道路的情形下行驶转场。山地模块化微型钻机拆装过程如图 2 所示。首先,当运输或自行行驶至山脚时,利用汽车吊进行拆分;然后,利用中、重型索道,按照底盘、驾驶室、桅杆动力等模块运输顺序,运输至山顶或山腰;最后,依托索道门架葫芦的升降,实现快速的拼装和拆卸。

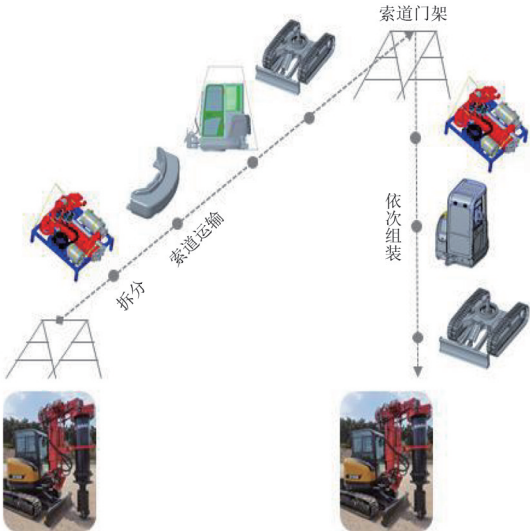


图 2 山地模块化微型钻机拆装示意

受钻机尺寸的影响,山地模块化微型桩钻机的发动机、主泵、主阀部件集成在驾驶室模块中,行走马达和回转马达集成在底盘模块中,其整机工作状态最大高度为 3880 mm,回转半径为 2000 mm,最大爬坡角度为 25°,其他技术参数如表 2 所示。经过土层施工测试,该钻机可以满足山区常规土层施工的性能要求。

表 2 山地模块化微型钻机技术参数表

项 目	参 数
动力头最大输出力矩/(kN·m)	10
最大转孔直径/mm	400~600
最大钻孔深度/m	10~12
最大加压力/t	2
主卷扬最大提升力/t	2
副卷扬最大提升力/t	1
转速/(r·min ⁻¹)	25~45
工作状态最大高度/mm	3880
运输状态高度/mm	2800
运输状态宽度/mm	1720
运输状态长度/mm	3700
整机质量/t	6.88

2.2 硬岩破碎锤装置和施工工艺

硬岩施工效率低是山区输电线路桩基础的施工痛点,山地模块化微型钻机结合冲击碎岩装置原理,设计了破碎锤挂载装置,当土层施工过渡为岩层施工时,模块化微型钻机通过门架葫芦,拆卸钻杆模块和钻具,快速切换为破碎锤装置。破碎锤装置由过渡法兰、对接法兰、送气回转器、钻杆、冲击器、潜孔锤、空压机等组成,如图 3 所示。

根据实际施工需求,结合钻机性能参数、破碎锤参数,在桩径 600 mm 的桩孔中论证了梅花孔分布形式、直径、孔距,及其对 600 mm 直径的牙轮筒钻环切效率等影响。山地模块化微型钻机硬岩地层施

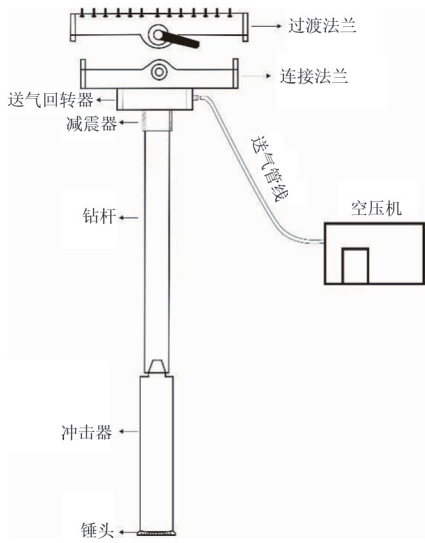


图3 山地模块化微型钻机硬岩破碎锤装置

施工工艺如图4所示。对150 mm梅花孔、200 mm梅花孔、305 mm单孔对比分析,如表3所示。考虑到梅花孔施工易发生串孔且定位难,最终选择305 mm破碎锤单孔施工,施工工艺如下:

- 1)在600 mm桩孔中,先使用305 mm破碎锤施工,配合空压机清渣,形成中心孔。
- 2)利用牙轮筒钻进行环切破碎。前述305 mm破碎锤施工后,一方面在成孔时将对孔周岩石形成微小裂隙破坏,有利于600 mm压裂筒钻施工时破碎岩石;另一方面,除去牙轮环切槽宽度,仅剩余30 mm的环状区域,总体上更有利于600 mm牙轮筒钻进行施工,提高施工效率。

表3 600 mm桩径3种梅花孔施工方案的关键参数对比

孔直径/ mm	孔数量/ 个	孔间距/ mm	距孔壁 距离/mm	牙轮环切 槽宽/mm	优缺点对比
150	4	90.5	55	120	定位难、孔数多、 效率低
200	3	59.8	50	120	孔距小、易串孔
305	1	—	150	120	存在动力不足 风险

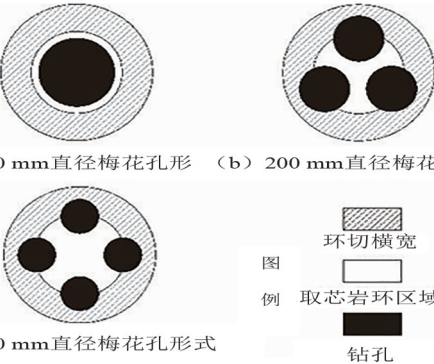


图4 山地模块化微型钻机硬岩地层施工工艺

3 山地模块化钻机工程应用

所研发的山地模块化微型桩钻机已完成土层中的现场测试,并在试验场地完成了硬岩施工测试。

2022年1月,山地模块化微型桩钻机在湖南省娄底市新化县完成了土层中的施工验证,现场照片如图5所示。该处地层0~4 m为残积土,4 m以下为中风化岩石。在残积土、全风化地层中,桩径600 mm情况下,山地模块化钻机利用体开斗施工,成孔时间32 min。机器组装快速、运转灵活、施工顺利;成孔质量好,无斜孔。相较文献[9]中土层人工掏挖成孔约1.5~2.0 m/h的速度,山地模块化钻机不仅降低了施工风险,而且极大地提高了施工效率,取得了较好效果。针对破碎锤装置的测试,试验过程中采用试验台固定的形式,对抗压强度为20~30 MPa的红砂岩,选择305 mm成孔直径进行施工,综合钻进速度约1.2 m/h。



(a) 山地模块化微型钻机施工场景 (b) 施工时所使用的体开斗钻具



(c) 施工桩孔的质量

图5 山地模块化微型钻机现场验证

4 结 论

所研发的山地模块化微型钻机以其模块化运输、重量轻、施工灵活等特点,符合山区地形中输电线路工程的机械化施工需求,尤其是土层验证中取

(下转第74页)

柔性直流输电技术在江北电网中的应用研究

雷 宇

(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610021)

摘要: 柔性直流输电技术是一种以电压源换流器技术为基础开发的新型高压输电技术, 在改善交直流相互影响和提高电网稳定性方面具有显著作用。文中针对重庆江北电网中存在的下网负荷分布不均、金山变电站失电风险以及 220 kV 侧短路电流裕度小等问题, 分析了柔性直流输电的技术特点及在城市配电网中的工程应用, 结合重庆江北电网运行问题, 提出了交、直流两种方案解决 220 kV 电网中金山变电站 500 kV 失电后产生的过载问题, 并提出了应用柔性直流输电技术解决 110 kV 电网中 220 kV 变电站负载不均衡的问题, 为其他工程应用柔性直流输电技术提供指导。

关键词: 柔性直流输电; 电网失电; 工程应用

中图分类号: TM 721 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2023)04-0048-06

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230409

Application of Flexible DC Transmission Technology in Jiangbei Power Grid

LEI Yu

(Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Chengdu 610021, Sichuan, China)

Abstract: Flexible DC transmission technology is a new type of high-voltage transmission technology developed based on voltage source converter technology, which plays a significant role in improving the interaction between AC and DC and improving the stability of power grid. The technical characteristics of flexible DC transmission are firstly analyzed in response to the uneven distribution of offline loads, the risk of power loss in Jinshan substation, and the small margin of short-circuit current on 220 kV side in Chongqing Jiangbei power grid. Then, a detailed discussion is carried out on flexible DC transmission technology and its engineering application in urban distribution networks. Finally, based on the research on operation problems of Chongqing Jiangbei power grid, two solutions of AC and DC are proposed to solve the overload problem caused by 500 kV power loss in Jinshan substation in 220 kV power grid. The application of flexible DC transmission technology is also proposed to solve the problem of unbalanced load in 220 kV substations in 110 kV power grid, which provides a guidance for the engineering application of flexible DC transmission technology.

Key words: flexible HVDC transmission; power loss of power grid; engineering application

0 引 言

柔性直流输电 (voltage sourced converter based high voltage direct current transmission, VSC-HVDC) 是一种以换流器为基础的新型高压输电技术^[1-2]。它将半控型电力电子器件升级为全控型电力电子器件, 具有响应速度快、可控性好、运行方式灵活、可向无源网络供电、不会出现换相失败及易于构成多端

直流系统等优点^[3-5]。柔性直流输电技术在孤岛送电、海上风电直流送出等方面具有独特的优势, 对新型电力系统建设中大规模新能源消纳和电网智能化、数字化发展建设具有重要作用^[6-9]。

20 世纪 90 年代, Boon-Teck Ooi 等人第一次提出了高压直流输电的电力网络建设理念^[10-11]。1997 年瑞典首次进行了柔性直流输电技术在工程中的应用^[12]。2010 年西门子公司提出了基于模块化多电平换流器的柔性直流输电技术, 并首次在美

国的 Transbay Cable 工程中应用成功^[12]。同时, ABB、Alstom 公司也相继提出了类似结构的级联两电平(cascaded two-level, CTL)、MaxSine 型有源滤波器等换流阀设计^[13],截至 2021 年年底,柔性直流输电工程在全球的投运量已经超过了 50 个,总变电容量达到了 60 GW。在国外广泛应用柔性输电技术的背景下,中国的柔性直流输电技术也迎来迅速发展,2006 年,国内研究机构把握行业发展趋势,提出了基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)技术的柔性直流输电工程应用研究。2011 年 7 月,国内第一个柔性直流输电项目在上海南汇投入运行^[14-15],线路总长度约 8 km,南汇风电场通过该工程接入上海电网验证了柔性直流系统在风电接入中的作用。随着鲁西背靠背工程、舟山多端柔性直流输电工程、昆柳龙直流工程以及广东柔性直流背靠背工程的相继运行,柔性直流输电工程在中国的运用更加广泛。

现有柔性直流输电工程运行情况表明,在直流侧发生故障时是否具备较强的生存能力是评估柔性直流输电系统性能的重要依据。调研分析可知,尤其是在多端直流输电运行场景下,直流断路器速度慢以及直流故障对现有电网有较大影响等因素是导致直流断路器在电压高、容量大等运行场景下使用较少的主要原因^[16-18]。因此,实际应用场景下的直流输电技术仍有待进一步的研究。

重庆江北电网供区为江北区、渝北区、北部新区以及两江新区,该地区电网的负荷密度大、重要性高,事故发生后的停电影响较大。然而目前江北电网还存在变电站下网负荷分布不均匀、已有变电容量利用不充分、金山变电站存在失电风险以及 220 kV 侧短路电流裕度小等问题,给该地区的电网安全运行带来了挑战。

大电网中柔性直流输电技术的灵活运用,对于解决交流和直流之间的干扰困境,增强电力网的稳定运行能力有着十分重要的作用。下面分析了柔性直流输电技术的原理和特点,详细论述了柔性直流输电技术在城市配电网中的应用问题;结合背靠背柔性直流输电技术特点,提出了交、直流方案以解决重庆江北电网中 220 kV 电网思源—金山 500 kV 线路发生 $N-2$ 故障后的电流过载问题;在 110 kV 电网中应用柔性直流输电技术解决 220 kV 变电站负载不均衡的问题;通过技术经济对比验证了柔性直流

输电方案的经济性和良好效果。

1 柔性直流输电的技术特点

1.1 技术原理

柔性直流输电技术分别通过开通时间和关断时间控制电力电子器件的运行方式,使电流源换流器按照既定方式工作,同时幅值参数和相角参数在输出电压中的数值也会相应改变控制交流测的有功、无功功率^[19],以实现功率在线路中正常输送的同时电网能够平稳运行,由此可以高效地解决现有输电技术所具有的某些内在缺陷。在柔性直流输电系统中,换流器是最重要的组成部分,主要包括两电平换流器、二极管箝位型三电平换流器和模块化多电平换流器等。

1.2 技术特点

1) 运行模式多样、控制性能良好。在弱交流系统中,柔性直流输电的送电优势明显,在面对无源系统时也能够提供较高质量的送电服务,其巨大优势在分布式发电并网、电力系统互联和市区供电等方面作用巨大。

2) 换相失败风险低。电网故障发生时,柔性直流输电可以对交流系统故障进行全穿越,并且能够提供动态无功补偿给电网,促进电网的安全稳定运行。

3) 谐波含量小。电压源换流器只有很少的谐波含量,所以没有必要设置单独的滤波器,极大地节省了设备的装置空间。

另外,柔性直流输电在灵活潮流分布、运行稳定性、有功和无功的解耦等方面也有诸多优势。

2 柔性直流输电的工程应用分析

2.1 柔性直流在城市配电网中的应用

目前在城市配电网中普遍采用高压分区、中压开环的运行模式,严重影响了配电网的稳定性和系统设备的使用时间。采用灵活的柔性直流输电技术将隔离的高、中压配电网连接起来,构建起交、直流混合配电网,既能够使电力系统的可靠性得到增强,又能够有效地解决系统设备的低效率利用问题,还能为负荷中心的电力系统提供有效的无功支持。国内已投运柔性直流输电工程如表 1 所示。

表 1 国内投运柔性直流输电工程

工程名称	投运年份	容量/ MW	直流电压/ kV	应用场景
上海南汇	2011	20	±30	新能源并网
舟山五端	2014	400,300, 100×3	±200	新能源并网
鲁西背靠背工程	2016	1000	±350	电网柔性互联
张北直流工程	2020	3000,1500	±500	无源网络供电
昆柳龙直流工程	2020	5000,3000	±800	远距离输电
白鹤滩直流工程	2022	4000	±800	远距离输电

通过工程验证和技术积累,柔性直流输电技术在配电网中实际应用的稳定性不断提高,如昆柳龙直流工程采用的是常规直流与柔性直流混合联接方案,满足了电网实际运行需求的同时提高了工作效率。但实际应用证明,在柔性直流输电网络中不可靠因素仍然存在,功率组件的旁路故障是最为普遍的一种,电气设备的不可靠连接以及二次板卡失效是最常见的原因,其次是取能电源故障。可通过增加抗电磁干扰装置、改进工艺提升元件质量等方式降低功率模块旁路发生概率。因此,城市配电网中的柔性直流输电技术应用仍有待进一步改进以降低故障发生率。

2.2 柔性直流输电容量限制

柔性直流输电的容量上限是由其所处的电压级别以及所传输的电流所决定的。前者的影响因素很大程度上依赖于 IGBT 等元件的电压耐受能力以及变换器的结构等;后者则主要受传输线的抗热性能制约,一般情况下,同样横截面积的架空线所能传输的电流要大于电缆。直流电压等级提升需要增加换流阀的串联模块数量,并可能需要适度增加控制保护系统的复杂性。现已建成厦门±320 kV 柔性直流工程额定功率为 1000 MW,额定电流为 1563 A。全球已建成并投运的柔性直流输电系统传输容量和传输电压之间的关系曲线如图 1 所示。

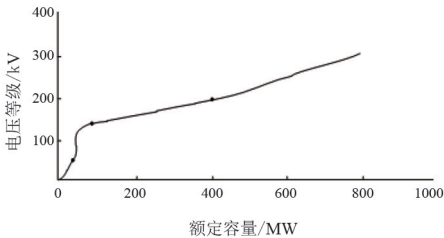


图 1 柔性直流工程输电容量与电压等级的关系

2.3 直流输电线路造价

由于直流电缆对绝缘性能的需求较少,所以其生产成本不会比交流电缆高。总的来说在同样的绝缘等级下,电缆所能承受的直流电压大约是交流相电压的 1.5~2.0 倍,所以可以在直流系统中直接使用交流电缆,对双极直流电缆进行价格估计时,以单相交流电缆的价格作为参考并加倍即可。另外,柔性直流输电也可以采用架空线路,张北柔性直流工程即采用架空线路进行直流输电。在后续多端直流系统构建时,可以通过加装断路器提高直流系统的可靠性与稳定性。

2.4 柔性直流工程规模与投资

交流滤波器、交流变压器、直流电容器与换流器及其通风冷却设备等是换流站的主要设备。从已有直流输电项目建设情况推断,交直流换流站电压等级、电流水平等因素与其建设成本之间并无直接联系,所以可以将换流站的投资成本统一按照 1000 元/kVA 来进行计算。若是百兆瓦级的柔性直流在国内生产推广,换流站每千伏安的投资将进一步下降,柔性直流的应用将更加广泛。

根据渝鄂背靠背工程研究结果,该工程推荐采用±500 kV 柔性直流方案。渝鄂柔性直流背靠背换流站额定功率可优化提高到 1250 MW,其 4 个换流单元将具备 5000 MW 输送能力。具体参数如表 2 所示。

表 2 投资与规模统计表

项目	南通道	北通道
站址及占地面积	杉树园站址, 80 000 m ²	龙泉换流站合建, 70 000 m ²
背靠背换流站 工程造价/亿元	28.4	25.7
单位造价/(元·kW ⁻¹)	1419	1285

3 柔性直流输电在江北电网中的应用设计

3.1 江北电网运行问题

重庆江北电网服务于江北区、渝北区、北部新区及新成立的两江新区(82%面积)4 个行政区,供电面积达 1 541.3 km²,区域内大部分地区为主城区,经济发展快、居民密度大、负荷强度高,电网负荷重要性高,事故发生后的停电影响较大。地区基本情

况如表 3 所示。

表 3 江北电网概况

项目	数量
地区总人口/万人	157
现有用电客户/万户	72
变电站/座	28
变电容量/MVA	3240
线路数/条	377
线路总长/km	3213
开闭所/座	173
配电房/座	850

分析江北电网的运行情况主要存在以下几个方面的问题:

1) 变电站下网负荷分布不均匀,已有变电容量利用不充分

500 kV 层面,2017—2020 年石坪变电站所供 220 kV 负荷共计约 1600~1750 MW;金山变电站 220 kV 下网负荷即达到 930 MW,且随着负荷的增长下网负荷逐年上升。而因 220 kV 侧接入电源容量较大,思源片区 500 kV 下网压力相对较小,2017—2020 年思源变电站 220 kV 下网负荷约为 550~950 MW。明月山变电站所供区域负荷也较小,2017—2020 年下网负荷约 110~520 MW。

220 kV 层面,翠云、人和、大竹林、高屋等变电站的负载较重,容载比常年处于 1.3 以下,不能满足主变压器 $N-1$ 供电的需要。而悦来、礼嘉以及大云变电站,负载率均较低。

2) 金山变电站存在失电风险

金山变电站通过金山—思源同塔双回 500 kV 线路与 500 kV 主网相连,当金山—思源 500 kV 线路发生同塔双回倒塔故障,金山变电站将失电,金山—思源 500 kV 线路上的潮流将通过思源—悦来—翠云—金山 220 kV 线路转供。当金山变电站下网负荷过大时,思源—悦来、悦来—翠云线路都将出现过载。

3) 220 kV 侧短路电流裕度小

思源变电站、石坪变电站 220 kV 侧的短路电流均较大,其中思源变电站 220 kV 侧三相短路电流为 44.08 kA,石坪变电站 220 kV 侧三相短路电流为 40.09 kA。金山变电站投产初期,与思源变电站合环运行,思源中压侧短路电流达 49 kA,接近断路器最大开断电流 50 kA,需将草街电站解环至铜梁—

板桥供区运行来降低短路电流。

3.2 220 kV 电网柔性直流输电方案

在 220 kV 电网中应用柔性直流输电技术,主要考虑在不明显增加短路电流的基础上,解决金山变电站 500 kV 失电后产生的过载问题。

当思源—金山 500 kV 线路发生 $N-2$ 故障后,思源—悦来—翠云 220 kV 通道将出现过载现象,思源—悦来断面潮流、悦来—翠云断面潮流以及思源变电站下网负荷都将超过了主变压器容量。若合上思源、石坪、金山变电站之间任何 220 kV 线路,如石坪—高屋或翠云—石坪线路合上运行,则思源变电站中压侧短路电流将超过 50 kA。

为解决上述问题,提出了以下两种方案。

1) 交流方案

建设金山—石坪 500 kV 双回输电线路,线路长度约 20 km/回,方案线路分布如图 2 所示。

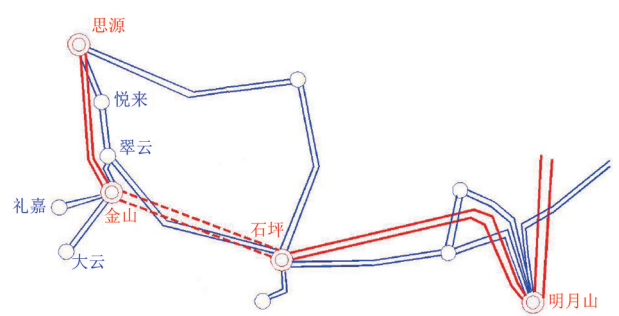


图 2 新建金山—石坪交流输电通道

2) 柔性直流方案

在石坪—翠云已有 220 kV 线路上加装柔性直流背靠背输电装置,方案线路分布如图 3 所示。

增加金山—石坪 500 kV 输电通道后,如需暂缓建设金山第三台主变压器,可考虑通过断开金山—翠云双回 220 kV 线路,解开金山与思源的电磁环网。这时,当金山—思源 500 kV 线路发生 $N-2$ 故障之后,系统的潮流分配是合理的,并且各线路和主变压器都没有过负荷。

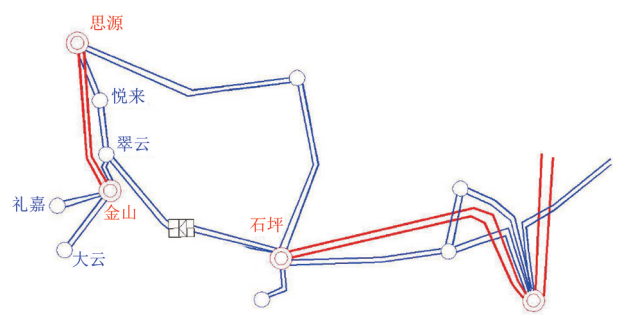


图 3 在石坪—翠云通道装设柔性直流输电装置

在翠云—石坪已有的 220 kV 线路上加装柔性直流背靠背输电装置后,将石坪—翠云断面送电容量置于 500 MW,当石坪变电站发生主变压器 $N-1$ 的情况下,可利用柔性直流输电装置的快速功率调制功能,将石坪—翠云断面的送电容量降低,以保证石坪变电站主变压器不过载。当思源—金山发生 $N-2$ 故障后,潮流如图 4 所示。

从图 4 中可以看出,由于新增了 220 kV 线路通道,使得故障发生后思源、石坪变电站均可以对金山变电站的负荷形成支援,所有的线路及主变压器均不会发生过载现象。

交、直流方案比较结果如表 4 所示。

表 4 交直流方案比较

对比项	交流方案	直流方案
潮流分布	能满足正常及思源—金山 $N-2$ 情况下送电要求	能满足正常及思源—金山 $N-2$ 情况下送电要求
短路电流影响	使全网 500 kV 三相短路电流有不同程度的增加,其中思源变电站短路电流增加约 10 kA,金山、石坪变电站短路电流增加约 15 kA	不明显增加电网的短路电流
投资	约 28 亿元	约 5~10 亿元
实施的难易	由于没有走廊,需建设 500 kV 电缆通道,实施难度较大	在已有线路上增加柔性直流装置,实施难度相对较小

3.3 110 kV 电网柔性直流输电方案

在 110 kV 电网中应用柔性直流输电技术,主要

考虑在不明显增加短路电流的基础上,解决 220 kV 变电站负载不平衡的问题。

1) 翠云—悦来片区

翠云变电站常年负荷较重,还存在转供大竹林、人和、高屋变电站负荷的可能,而悦来变电站负荷较轻。随着望乡输变电工程的投产,空港—翠云双回 110 kV 线路将接入悦来站,形成空港—望乡—悦来—翠云双回 110 kV 线路。因此,可考虑在悦来—翠云 110 kV 通道加装柔性直流背靠背装置,充分利用悦来空置的变电容量解决翠云重载问题,线路分布如图 5 所示。

2) 人和—大云—翠云片区

翠云、人和变电站常年负荷较重,容载比长期处于较低状态,而大云变电站负荷较轻,可考虑在大云和万年变电站之间新建柔性直流背靠背输电通道,同时将万年变电站负荷改由人和变电站供电,可缓解翠云、人和变电站的供电压力,充分利用大云变电站的容量。线路分布如图 6 所示。

在石坪—翠云通道装设柔性直流背靠背输电装置后的电网潮流如图 7 所示。由潮流计算结果可知,在江北 110 kV 电网建设柔性直流背靠背输电工程,可充分利用 220 kV 轻载变电站的变电容量,缓解 220 kV 重载变电站的下网压力,使各模块在正常工作时负荷得到平衡,从而提高系统的安全性和经济性。

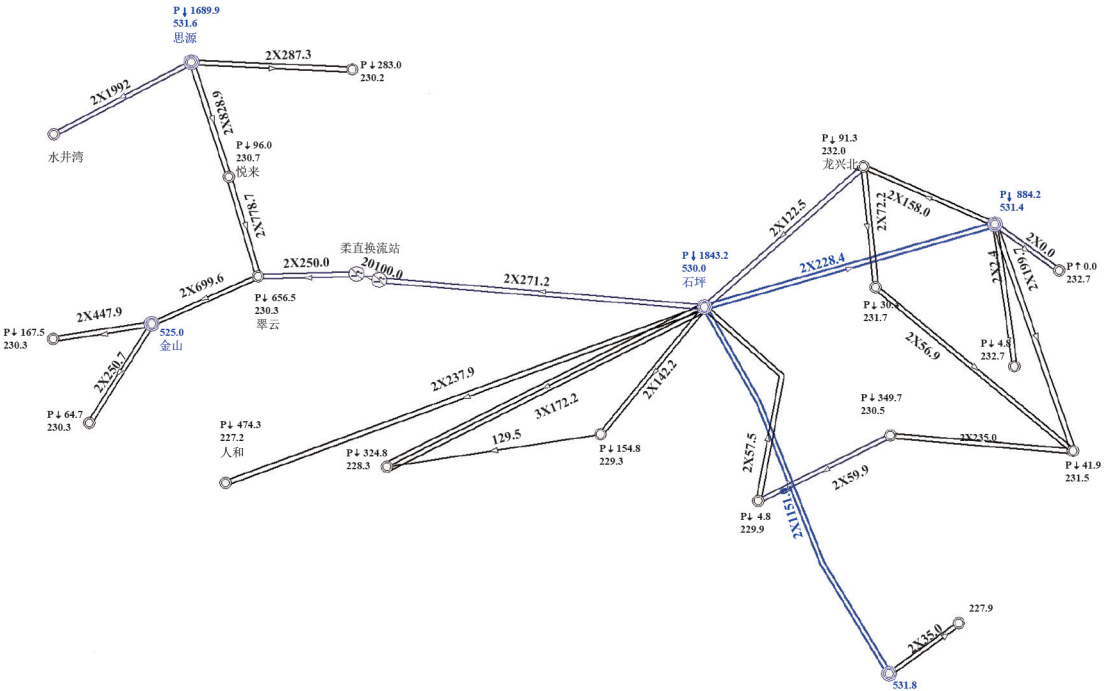


图 4 采用柔性直流方案的江北电网潮流(局部)

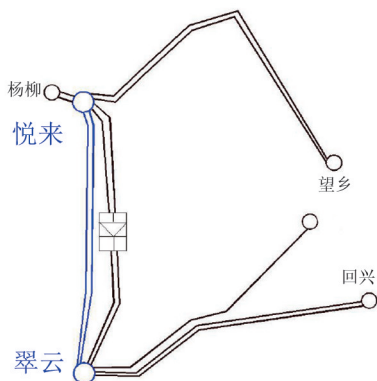


图5 在悦来—翠云线路上加装柔性直流装置

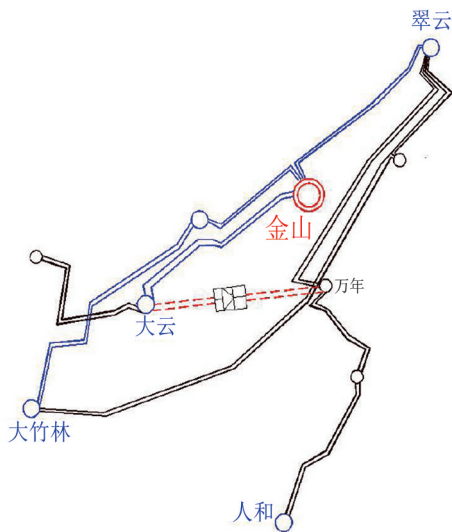


图6 新建大云—万年柔性直流背靠背通道

3.4 方案效果分析

在 220 kV 电网中,在石坪—翠云已有 220 kV 线路上加装柔性直流背靠背输电装置后,可通过功率调制降低送电容量来保证石坪主变压器不过载。并且当思源—金山 500 kV 发生 $N-2$ 故障后通过负荷支援,所有的线路及主变压器均不会过载。相比于交流方案,柔性直流方案在达到预期目标的同时不明显增加电网短路电流,投资规模更低,经济效益更好,且更容易实施。

在 110 kV 电网中,通过在悦来—翠云 110 kV 通道加装柔性直流背靠背装置,实现了悦来变电站空置变电容量的充分利用,同时解决了翠云变电站重载问题,将万年变电站负荷改由人和变电站供电后,充分利用大云变电站容量,缓解了翠云、人和变电站的供电压力。

4 结 论

上面介绍了柔性直流输电技术的原理和特点,研究了柔性直流在城市配电网中的应用问题,并在分析江北电网面临问题的基础上,提出了柔性直流输电在江北电网中的应用方案。主要结论如下:

1) 柔性直流输电技术能够高效用于新能源接入、孤岛电网以及分布式电源入网等方面,在城市配电网中使用柔性直流输电技术既能够使电力系统的

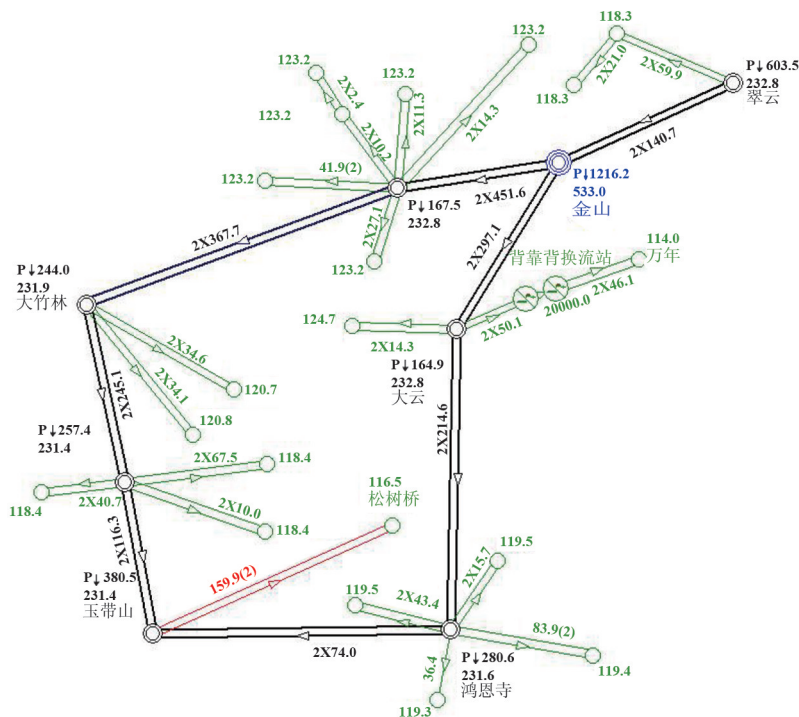


图7 石坪—翠云装设背靠背装置后江北电网 110 kV 及以上潮流(局部)

(下转第 80 页)

变压器空载电流非线性变化原因研究

罗明才¹, 马进², 刘磊³, 徐会凯³

(1. 国网四川省电力公司自贡供电公司, 四川 自贡 643000; 2. 国网四川省电力公司广元供电公司, 四川 广元 628000; 3. 成都理工大学核技术与自动化工程学院, 四川 成都 610059)

摘要: 变压器空载试验是诊断变压器铁芯故障的重要试验。文中通过对一台 35 kV 三相双绕组变压器空载试验以及在不同试验接线情况下空载试验数据的分析, 研究了小容量高电压等级变压器空载试验时试验电压从 0 升高至规定试验电压过程中空载电流呈现先上升后下降再陡增的非线性变化现象。试验研究分析表明导致此类变压器出现该现象的主要原因是试验电压三相不平衡。变压器中性点接地时, 零序电流是造成此现象的主要原因, 而非传统文献认为的电容电流, 研究结论对分析判断变压器空载电流变化具有参考意义。

关键词: 变压器; 空载电流; 非线性变化; 零序电流

中图分类号: TM 406 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2023)04-0054-05

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230410

Research on Causes of Nonlinear Variation of No-load Current in Transformer

LUO Mingcai¹, MA Jin², LIU Lei³, XU Huikai³

(1. State Grid Zigong Electric Power Supply Company, Zigong 643000, Sichuan, China; 2. State Grid Guangyuan Electric Power Supply Company, Guangyuan 628000, Sichuan, China; 3. College of Nuclear Technology and Automation Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China)

Abstract: The no-load test of transformer is an important test for diagnosing core faults in transformers. Through the no-load test of a 35 kV three-phase double-winding transformer and the analysis of no-load test data under different test wiring conditions, the no-load test of a small-capacity high-voltage transformer is studied to show a non-linear variation in no-load current from zero to the specified test voltage during the no-load test, and the analysis of the test research shows that the main cause of this phenomenon in such transformers is the three-phase unbalance of test voltage. When the neutral point of transformer is grounded, the zero-sequence current is the main cause of this phenomenon, rather than the capacitance current considered by the traditional literature. The research results are of reference significance for the analysis of no-load current change in transformers.

Key words: transformer; no-load current; nonlinear variation; zero-sequence current

0 引言

变压器空载试验是判断变压器铁芯有无故障的重要试验。空载试验时一般采用低压侧加压, 试验电压通过调压器从 0 均匀升高至规定试验电压^[1-3]。在此过程中, 部分变压器空载电流呈现先升后降再升, 并在试验电压接近规定试验电压时出

现陡增的现象。许多文献认为空载电流随试验电压升高而下降现象是变压器电容电流造成的^[4-5]。但在低容量高电压变压器空载试验中, 变压器内部电容电流很小, 不足以使空载电流产生明显变化, 因此需对低容量高电压变压器空载电流非线性变化的原因具体分析。

针对上述问题, 下面以一台 35 kV 三相双绕组变压器为试验对象, 通过改变调压器接线方式改变

输入电压不平衡度进行空载试验,分析论证所提低容量高电压变压器在试验电压升压过程中变压器空载电流非线性变化的原因,并提出空载试验的改进措施。

1 问题分析

以一台 1990 年 1 月出厂的型号为 S7-50/35/0.4 的电力变压器为试验对象,研究变压器空载电流非线性变化的原因。变压器联结组标号为 Yyn0,额定空载损耗为 270 W,额定负载损耗为 1060 W,阻抗电压为 6.21%,额定电流为 0.824 A/72.1 A。

空载试验时采用低压侧加压,通过三相调压器从 0 加压至 400 V 额定电压,试验接线如图 1 所示,调压器中性点与电源侧和变压器侧中性点均相接。

由于试验方法为三相空载试验,试验电压值以三相线电压平均值为准,测得空载电流和各相电流曲线如图 2 所示。由图 2 曲线可知在试验电压为 20 V 到 260 V 的区间里,随着试验电压升高空载电流出现了明显的先降后升的非线性变化现象,与理论值有明显偏差^[1]。目前绝大多数文献认为这是电容电流的平衡作用使得空载电流出现了上述现象^[4-6],但仍需对变压器空载试验电流成分进行具体分析。

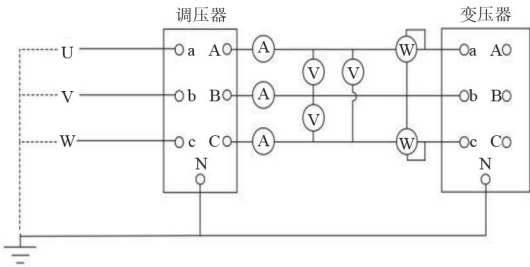


图 1 空载试验接线

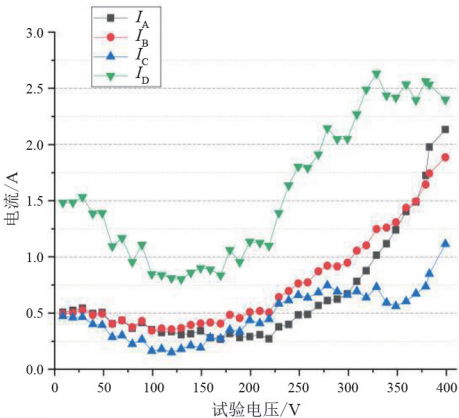


图 2 初次试验空载电流变化曲线

在空载试验时,由于变压器工作在低功率因数状态,空载电流以滞后于施加电压近 90°的感性电流为主。采用功率分析仪测得空载试验电流成分如图 3 所示。电感电流 I_L 会随着试验电压的升高而升高,当接近额定电压 U_N 时, I_L 会出现非线性的陡增现象;而电容电流 I_C 与试验电压为线性关系。变压器空载功率因数很低,电流有功分量较小,无功分量较大。因此忽略电阻电流影响,空载电流近似为电感电流与电容电流的矢量和,二者相位相差 180°。空载试验过程中电流是呈现感性的^[7-8],所以有 $I_{\text{空载}} \approx I_L - I_C$ 。当设备电容值偏大时,在升压过程中会由于 I_C 平衡 I_L 的作用^[9],出现随着试验电压升高空载电流不增反降的现象,如图 3 中蓝色曲线所呈现。

为了验证上述解释,使用 KD6800 自动抗干扰精密介损测量仪分别对变压器的绕组间电容及介质损失角正切值进行了测量,数值如表 1 所示。

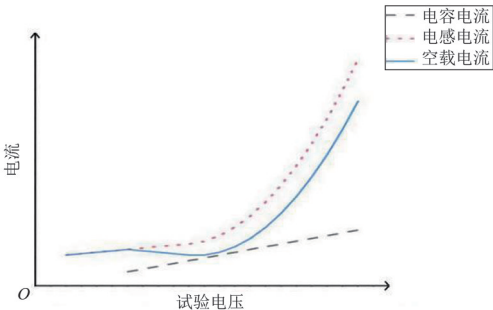


图 3 空载试验电流成分

表 1 变压器绕组间电容量数据

电容	测量部位	试验电压/ kV	电容量/ pF	Tan δ/%	测量方法
C_{H-g}	高压绕组	5	956.00	1.056	反接线
	对地	8	950.33	1.165	反接线
C_{H-L}	高压绕组对 低压绕组	5	429.00	1.331	正接线
	低压绕组 对高压绕组 组及地	0.5	2291.00	1.012	反接线

通过表 1 的数据对试验电压为 100 V (即低压绕组对地电压 U_{L-g} 为 100 V) 时变压器空载状态下内部电容电流进行粗略估算^[10]。

1) 根据变压器变比可求得高低压绕组间电位差 U_{L-H}

$$U_{L-H} = \frac{U_{HN}}{U_{LN}} U_{L-g} - U_{L-g}$$

式中: U_{HN} 为高压绕组额定电压,35 kV; U_{LN} 为低压绕组额定电压,400 V。求得 U_{L-H} 为 8.650 kV。

2) 低压绕组对地电容值 C_{L-g}

$$C_{L-g} = C_{L-Hg} - C_{H-L} = 1862 \text{ pF}$$

3) 流过低压绕组的电容电流 I_{L-Hg}

$$I_{L-Hg} - U_{L-g} \omega C_{L-g} + U_{L-H} \omega C_{H-L} = 0.001 \text{ A}$$

对变压器的绕组间电容值进行测量,采用低压侧短接加压、高压侧短接接地的方式。相当于低压侧整个绕组处在同一高电位,高压绕组电位为 0。但空载试验时,低压侧绕组与高压绕组上的电位分布均自上而下降低,电位在中性点处近似为 0,因此绕组间电容电流大小也应小于此计算值,且此测量法测量的电容值为三相总电容值,单相电容电流应小于估算值的三分之一,即小于 0.3 mA。根据实验数据可知,100 V 时空载电流最低为 0.168 A,0.3 mA 的电容电流应不足以使空载电流产生如图 2 所示的明显的下降。由此确定,电容电流并非空载电流下降的最主要原因。

空载试验电源大多为三相调压电源,并非绝对的三相平衡,势必存在零序电流。故通过在中性线上串入电流表来检测变压器中性点电流,试验接线如图4所示,调压器中性点与电源侧和变压器侧中性点均接地。

通过测量,获得在升压过程中中性点电流的变化曲线,如图 5 所示。

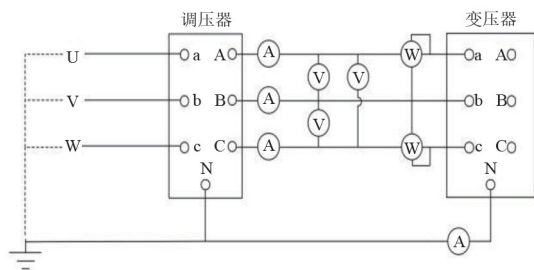


图4 测量中性点电流的试验接线

对比图 5 和图 2,发现空载电流变化曲线与零序电流变化曲线具有一致性。初步推测零序电流的非线性变化才是导致空载电流出现下降现象的主要原因。

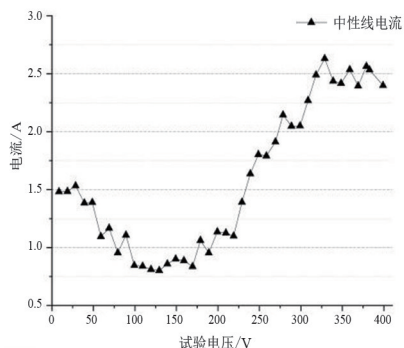


图 5 中性点电流变化曲线

2 试验验证

导致零序电流的因素有很多,包括变压器输入电压的不平衡、三相负载的不平衡等都会导致零序电流的出现^[11-12]。因此对 10 ~ 260 V 电压区间空载运行的调压器三相不平衡度进行测量,三相不平衡度变化曲线如图 6 所示。

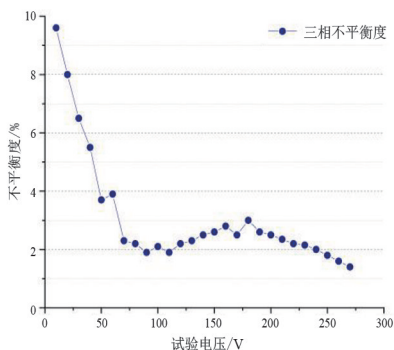


图 6 调压器三相不平衡率变化曲线

通过图 6 曲线可知所用自耦式调压器三相输出电压不平衡率最大超过了 10%, 使输出的三相电压幅值差异大, 这会导致零序电流较大。

为验证零序电流是空载电流下降的主要因素,将变压器侧中性点悬空进行空载试验。试验接线如图 7 所示,试验数据如图 8 所示。

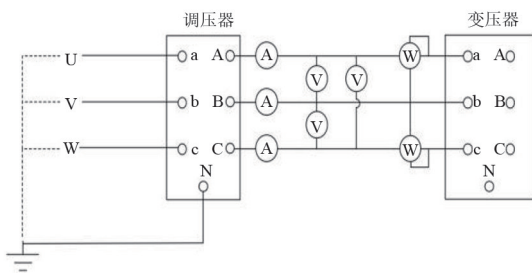


图7 中性点悬空时空载试验接线

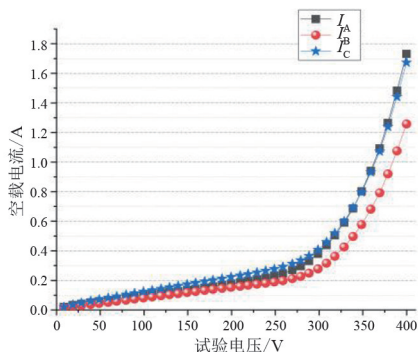


图 8 中性点悬空时空载电流变化曲线

根据图 8 数据可知,将中性点断开后零序电流

无法流通,空载电流整体变化曲线正常,并未出现先升后降的情况,且各相空载电流相较于中性点接地时的数据,幅值均大幅下降。因此基本确定零序电流是导致空载试验电流非线性变化的主要原因而不是电容电流。

变压器输入电压的不平衡是造成零序电流的原因之一。为便于进一步验证所提推测,选择将试验电压幅值调到三相一致,在一定程度上降低零序电流的幅值。因此将试验电源重新设计,将共同调节幅值的三相调压器更换为三个并联的、可以单独调节幅值的单相调压器,试验接线如图 9 所示,使三相试验电压幅值趋于一致,尽可能降低零序电流。

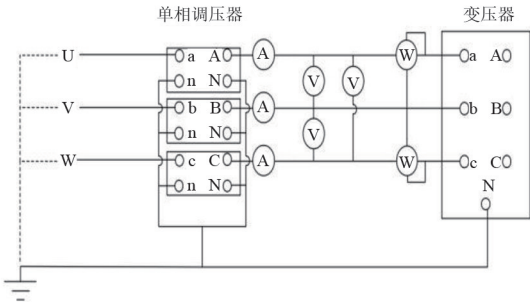


图 9 单相调压器并联加压空载试验接线

同样以调压器输出电压 20 ~ 260 V 之间的试验数据进行对比。三相试验电压平衡后测得的空载电流的变化曲线如图 10 所示。

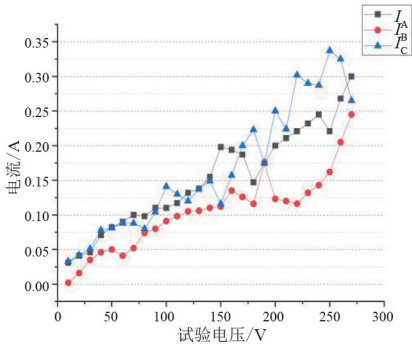


图 10 三相试验电压平衡后空载电流变化曲线

由于测量空载电流时数据波动,取三相空载电流平均值分析,图 11 为平衡电压后三相空载电流平均值变化曲线。由图 11 中空载电流曲线的总体趋势可知,随着试验电压的升高空载电流随之升高,在此试验电压区间中,没有出现空载电流随试验电压升高下降的现象。并且,在试验电压为 250 V 时,三相空载电流平均值由三相试验电压不平衡时的 0.636 A 下降到了 0.264 A。

三相试验电压平衡后测得的中性点电流变化曲线如图 12 所示。

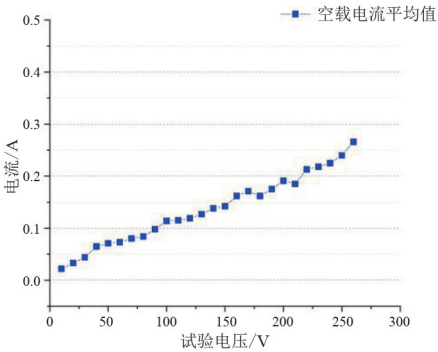


图 11 三相平衡电压下空载电流平均值变化曲线

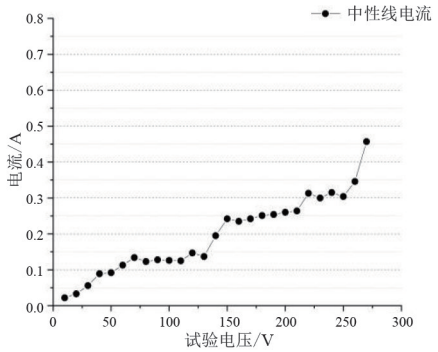


图 12 三相平衡电压后中性点电流变化曲线

图 12 中仍然存在零序电流的原因有多种,试验中虽然保证了试验电压幅值的平衡,但试验电压各相的相位差以及变压器本身的磁路限制^[13-19]等也会使得中性点电压不平衡,导致出现中性点偏移和零序电流。

另外,由于在进行试验升压过程中电压并非定值,且低于额定电压,变压器磁心并未工作在饱和区,磁路中的主磁通随试验电压的升高而随之变化^[20],进而导致激磁阻抗也随之变化。对空载试验来说,激磁阻抗为主要负载^[21],此处激磁阻抗变化也就意味着负载变化,而这个激磁阻抗的变化可能也是导致零序电流出现的原因。

3 结 论

1) 通过空载试验数据分析及试验验证,在低容量高电压变压器电压三相不平衡且中性点接地的情况下出现的空载电流随试验电压先升后降再升现象,可能是试验电压三相不平衡导致的零序电流造成的,而非电容电流。

2) 对于联结组别为 Yyn0 的电力变压器进行空

载试验时,应注意调压器试验电压三相不平衡问题,若三相电压不平衡严重,为提高空载电流试验准确性,建议采取中性点悬空的接线方式进行空载试验。

3)对大容量变压器空载电流测试时出现的空载电流随试验电压先升后降再升现象是否电容电流或零序电流造成仍需进一步试验研究验证。

参考文献

[1] 陈天翔,王寅仲,温定筠. 电气试验(第3版)[M]. 北京:中国电力出版社,2016.

[2] 王晓刚,李儒,蚁松. 大型电力变压器空载试验电源问题浅探[J].变压器,2003(6):29-31.

[3] 韩克俊,赵永亮,王琛. 一台110 kV 变压器空载损耗问题的分析及处理[J].变压器,2015,52(1):80-82.

[4] 胡启凡. 变压器试验技术(第1版)[M]. 北京:中国电力出版社,2010.

[5] 朱苗. 高压试验中变压器试验问题及故障处理方法探究[J].通讯世界,2019,26(9):289-290.

[6] 阮炜,李林达,杨家辉,等. 高电压小容量变压器空载电流偏大原因分析[J].变压器,2016,53(5):71-72.

[7] 戴钧,吕晨凌,曹玲燕. 变磁通调压电力变压器空载电流分析[J].电气制造,2014(2):36-38.

[8] 张惠娟,韩叶,申晨,等. 配电变压器励磁电流无功补偿研究与应用[J]. 电工技术学报,2015,30(S1):428-433.

[9] 丁莉敏. 电阻、电感、电容组合电路的矢量分析[J].电子世界,2014(5):40-41.

[10] 谢金平. 方家山核电工程辅助变压器电压不平衡的分析与对策[J]. 电网技术,2012,36(11):264-270.

[11] 黄绍平. D, yn11 联结组配电变压器运行特性的理论

分析[J].变压器,1996(7):12-15.

[12] 陈浩,曲年欣. 三相低电压不平衡分析与应用浅析[C]// 陕西省电网节能与电能质量技术学会年会暨电能质量综合治理技术研讨会论文集.昆明:陕西省电网节能与电能质量技术学会,2018:167-169.

[13] 傅伟,赵莉华,梁勇,等. 多台变压器空载合闸励磁涌流及其抑制方案的研究[J].电力系统保护与控制,2015,43(1):28-33.

[14] 董景义,赵加旺,李立云,等. 一起35 kV 变压器空载损耗异常试验分析与处理[J].变压器,2014,51(4):70-73.

[15] 尹项根,曹文斌,潘远林,等. 高阻抗电力变压器涌流特性及其对保护影响的研究[J].电力系统保护与控制,2018,46(20):1-11.

[16] 王晓燕,李国保,梁庆宁,等. 立体卷铁心变压器的磁特性与空载损耗分析[J].变压器,2020,57(11):1-9.

[17] 张也,曹楠,章彬,等. 一种新的三绕组自耦变压器的非线性建模[J].电力系统保护与控制,2018,46(23):45-51.

[18] 李井阳. Yyn 型三相三柱式变压器零序电流物理意义[J].变压器,2020,57(3):23-26.

[19] 孟杰,孙银年,摆建品. 三相关体卷铁心空载试验研究及损耗分析[J].变压器,2019,56(10):69-73.

[20] 汤蕴缪. 电机学(第5版)[M].北京:机械工业出版社,2014.

[21] 李井阳. 配电变压器非全相运行空载电压深度研究[J].变压器,2019,56(9):44-46.

作者简介:

罗明才(1966),男,硕士,高级工程师,从事电力工程工作。

(收稿日期:2022-09-01)

(上接第43页)

[51] VAN HOUTDT G, MOSQUERA C, NAPOLES G. A review on the long short-term memory model[J]. Artificial Intelligence Review: An International Science and Engineering Journal, 2020, 53(8): 5929-5955.

[52] CHOWDHARY K R. Natural language processing[J]. Fundamentals of Artificial Intelligence, 2020: 603-649.

[53] 肖勇,郑楷洪,郑镇境,等.基于多尺度跳跃深度长短期记忆网络的短期多变量负荷预测[J].计算机应用,2021,41(1):231-236.

[54] 魏腾飞,潘庭龙.基于改进 PSO 优化 LSTM 网络的短期电力负荷预测[J].系统仿真学报,2021,33(8):1866-1874.

[55] 王永志,刘博,李钰.一种基于 LSTM 神经网络的电力

负荷预测方法[J].实验室研究与探索,2020,39(5):41-45.

[56] 董家富,万雄,王岩,等.基于 XGB-Transformer 模型的短期电力负荷预测[J/OL].电力信息与通信技术:1-10[2022-12-21].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1164.TK.20220908.1632.002.html>.

[57] 遆宝中,李庚银,武昭原,等.基于循环扩张机制的 ConvGRU-Transformer 短期电力负荷预测方法[J].华北电力大学学报(自然科学版),2022,49(3):34-43.

作者简介:

钱育树(1981),男,硕士,工程师,从事电力设计工作;

孔钰婷(1997),女,硕士,研究方向为数据挖掘;

黄 聪(1983),男,工程师,从事电力工程设计工作。

(收稿日期:2022-12-30)

500 kV 输电线路导线检修作业平台固定架设计

高 亮

(内蒙古电力(集团)有限责任公司内蒙古超高压供电分公司,内蒙古 呼和浩特 010080)

摘要:通过对历年来输电线路导线检修作业的分析,发现人工走线等检修存在作业风险,如作业人员在导线上无法保持平衡发生侧翻的风险、导线压接管加强预绞丝缠绕难度大等问题。为控制上述风险,文中设计了一种输电线路导线检修作业平台固定架,主要包括主骨架设计、子导线线间距调节功能设计、上下物件传递功能设计、导线上移动功能设计,并且完成了应用效果确认。通过所设计固定架能防止子导线距离过大,有效辅助作业人员完成导线上的工作,降低人员的安全风险,提高了人员在导线上的工作效率。

关键词:输电线路;检修;作业平台;固定架

中图分类号:TM 83 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2023)04-0059-04

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230411

Design of Fixed Frame for Conductor Maintenance Platform of 500 kV Transmission Line

GAO Liang

(Inner Mongolia EHV Power Supply Branch of Inner Mongolia Electric Power (Group) Co., Ltd.,
Huhehaote 010080, Neimenggu, China)

Abstract:Through the analysis of maintenance operation of transmission line conductor over the years, it is found that there are operation risks in manual wiring and other maintenance, such as the risk of rollover caused by the operators' inability to maintain balance on conductor, and the difficulty of strengthening the pretwisted wire winding of conductor crimping pipe. In order to control the above risks, a fixed frame for conductor maintenance operation platform of transmission line is proposed, and the design schemes, mainly including main skeleton, sub conductor spacing adjustment function, up and down object transmission function and conductor up movement function are given, which has completed the confirmation of application effect. The designed fixed frame can prevent the distance between sub conductors from being too large, effectively assist the operators to complete the work on conductors, reduce the safety risk and improve the work efficiency on conductor.

Key words:transmission line; maintenance; operation platform; fixed frame

0 引 言

500 kV 输电线路运行年限较长,存在导线压接管松动、脱出的风险,使得导线压接管预绞丝缠绕加强、导线的麻箍以及间隔棒更换等工作也成为常态化检修工作^[1]。目前这些检修工作均需要人工登塔走线完成。结合实际操作,通过对历年来检修工作的细致分析,发现检修中存在以下风险因素:

1) 导线压接管加强预绞丝缠绕工作一般至少需

要两人同时作业,子导线承受的重力可能导致子导线之间距离过大,不利于开展检修工作。根据实际走线发现,在人工走线时子导线间最大间距有时 would 达到1~1.2 m,远大于450 mm的子导线规定间距要求^[2]。同时作业人员存在无法保持平衡、发生侧翻的风险,这对作业人员的安全和心理是极大的考验。

2) 导线压接管预绞丝缠绕加强的检修工作难度大,既需要两个作业人员走线本领强、业务能力突出,又需要作业人员有过人的体力和耐力。而且靠人工作业来完成该项检修任务需要很长时间的高空

作业,大大增加了作业风险^[3-4]。

3)在导线压接管预绞丝缠绕加强工作中,由于每个人的身材不同,臂展也各不相同。因此,当子导线之间距离变大时,会使缠绕工作进展缓慢,甚至无法开展^[5]。

导线飞车是目前 500 kV 输电线路带电作业、维修和安装用到的辅助工具^[6],主要用途是帮助作业人员在四分裂导线上行走,便于完成简单的单人消缺维修工作,例如补销子、补螺母、复位防震锤等。但导线飞车不适用于两人同时在四分裂导线上作业,而且也不适用于完成作业面积大的复杂维修工作,例如导线压接管预绞丝加强、间隔棒更换等。

为此,下面设计研制了一种 500 kV 输电线路导线检修作业平台固定架,可以降低人员检修工作强度及作业风险,减少检修工作的时间,确保导线压接管预绞丝缠绕加强等检修工作的顺利进行。

1 固定架功能设计

所研制的 500 kV 输电线路导线检修作业平台固定架,是为了解决上述输电线路导线检修作业问题,因此需要固定架具备以下功能:

- 1)对输电线路作业点导线进行固定,防止子导线之间距离过大;
- 2)具备输电线路子导线间距调节能力,便于预绞丝缠绕;
- 3)能够实现输电线路导线上作业点的位置转移;
- 4)能够实现作业工具及施工材料的上下传递。

输电线路导线检修作业平台固定架设计主要包括主骨架设计、子导线线间距调节功能设计、上下物件传递功能设计、导线上移动功能设计,如图 1 所示。

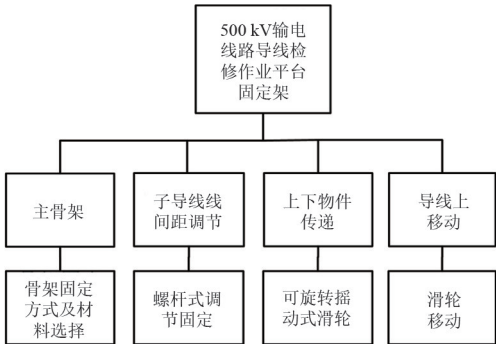


图 1 输电线路导线检修作业平台固定架设计

2 固定架设计方案

2.1 主骨架设计

1) 尺寸设计

参照 500 kV 四分裂导线间隔棒的尺寸,设计固定架主骨架的边框宽度为 700 mm,滑轮间距为 450 mm,调节高度为 450~700 mm,满足输电线路安装要求。固定架主骨架如图 2 所示。

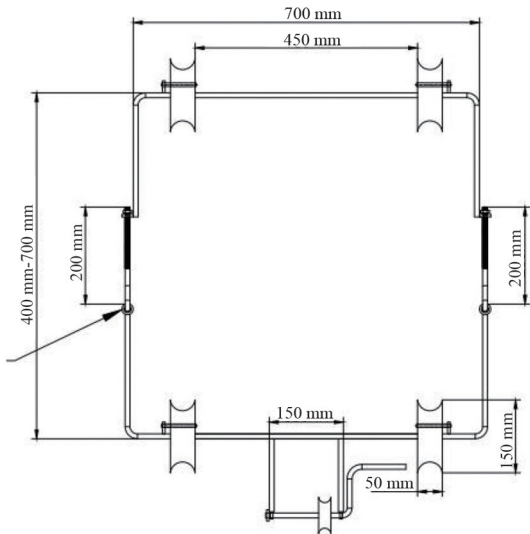


图 2 固定架主骨架

2) 作业位置固定方式设计

固定架在作业位置的固定方式有两种:销子固定、铁丝缠绕固定。

销子固定方式,是在滑轮与主骨架间横向穿入销子,利用滑轮与导线间的摩擦力,使滑轮不能转动达到固定效果。销子容易插拔,操作简单便捷。而采用铁丝缠绕固定方式,会由于导线晃动而不便于开展铁丝缠绕,并且当缠绕不够牢固时还会造成导线磨损;同时,在拆除缠绕铁丝时便捷性也较差,工作程序繁琐不易操作。

由于销子固定方式操作方便,极大地降低了高空作业的难度,所以主骨架在作业点处的固定方式选用销子固定,见图 3。

3) 材料选择

要求主骨架材料强度高、轻质、耐用性好、携带方便。对比了塑钢、钢筋、铝合金等几种材料,最终选定铝合金作为主骨架材料。

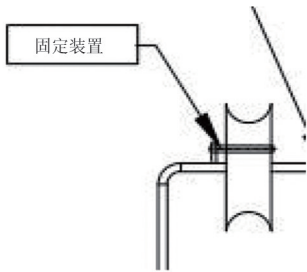


图 3 固定架固定

2.2 子导线线间距调节功能设计

固定架子导线线间距调节方式一般有两种方案:伸缩式调节和螺杆式调节。

由于作业人员在重力作用下使导线下沉形变,采用伸缩式调节方式时,工作人员难以依靠自身力量将导线收紧固定。而且在子导线的间距调整时,很难调整出适当的施工间距,对作业人员的力量及耐力要求极高。而螺杆式调节方式可以解决这一难题,使用合适长度的螺纹杆,通过两端固定并使用扳手拧紧或放松螺母来调节子导线间距。

螺杆式调节装置可以方便省力地调整出适当的施工间距,所以在固定架子导线线间距调整功能上采用螺杆式调节装置,如图 4 所示。

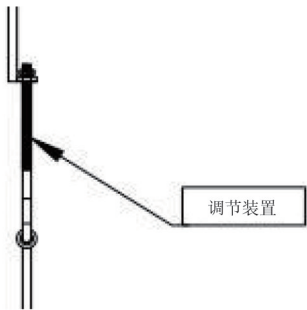


图 4 固定架子导线线间距调节装置

2.3 固定架便携功能及物件上下传递功能设计

日常在导线压接管预绞丝加强检修工作当中,采用作业人员携带传递绳上塔至导线作业点处进行检修,这样作业人员在登塔和塔上位置转移时,极大地增加了作业人员高空坠落的风险。因此设计一款便于携带且能够上下传递工具和材料的固定架尤为重要。

固定架的便携性设计,即在固定架上设计可以折叠和展开的一段主骨架,折叠装置如图 5 所示。利用主骨架螺杆式调节,可以将主骨架拆成对称的两部分。这样极大地收缩了主骨架的展开尺寸,利用工具背包可以轻松携带主骨架上塔至导线作业

点,由于固定架整体重量轻,可以大大节省作业人员体力。从而使作业人员将更多的注意力集中在登塔和塔上位置转移上,提高了作业人员的安全水平。相比于携带传递绳上下塔,此功能设计方案最优。



图 5 固定架折叠装置

固定架的物件上下传递功能设计,即在固定架的下骨架上加装可旋转的摇动式滑轮和钢丝绳。作业人员在作业处固定好固定架后,通过手摇滑轮,可以将钢丝绳下降至地面。地面工作人员将工具及材料绑扎至钢丝绳后,线上作业人员可以旋转滑轮将工具和材料传递至作业位置。固定架物件上下传递功能如图 6 所示。

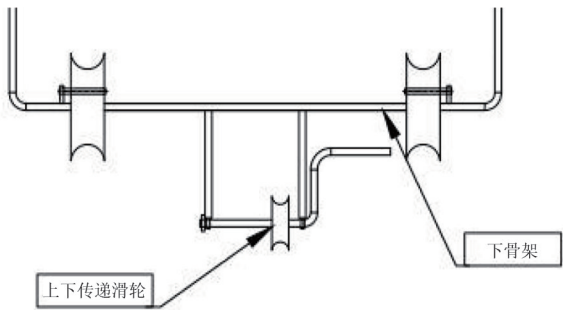


图 6 固定架上下物件传递功能

2.4 固定架在导线上移动功能设计

在传统的一相四分裂导线压接管预绞丝缠绕加强检修工作中,一个作业点完成后转移至下一个作业点,往往需要工作人员拆除传递绳并携带在身上进行转移,这样对作业人员的体力要求很高。同时,这也增加了高空作业人员在导线上位置转移过程中的风险。为了解决这一难题,给固定架设计了在导线上移动的功能,方便作业位置的转移。

该设计采用滑轮来实现固定架在导线上的移动。在固定架上、下主骨架上分别设计两个与导线同宽的滑轮,滑轮轮槽间距略大于导线直径,防止在导线上移动时磨损导线和导线滑出轮槽外,如图 7 所示。

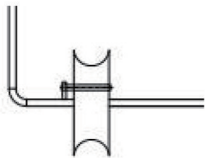


图 7 导线上采用滑轮移动

在转移时,只需作业人员将固定架推至下一个作业点固定即可开展工作。相比于传统的转移方式,固定架更好地节省了作业人员体力,降低了高空转移时的危险性。

3 输电线路导线检修作业平台固定架应用效果

利用某 500 kV 输电线路停电机,对输电线路多分裂导线检修作业平台固定架应用效果进行测试,如图 8 所示。



图 8 输电线路导线检修作业平台固定架应用效果

经测试,500 kV 输电线路导线检修作业平台固定架采用轻便型折叠材料,携带方便。采用滑轮结构,使检修作业平台作业点位置转移方便。采用销子固定方式,销子插拔较为轻松。采用螺杆式调节子导线间距,满足不同身材作业人员的需求。利用轮轴方法传递预绞丝,节省了作业人员的体力。

该固定架的设计为检修导线压接管补体接续、预绞丝缠绕加强、导线的麻箍、间隔棒更换等工作提供了新的方式,并提高了检修业务技术水平,可广泛应用于 500 kV 四分裂导线检修作业现场。

4 结 论

上面设计了一种 500 kV 输电线路多分裂导线检修作业平台固定架,可以很好地辅助作业人员完成导线压接管预绞丝加强缠绕等工作。此装置安装灵活、便于携带、操作简便,能实现导线压接管预绞丝加强作业安全高效、保质保量完成,具有广阔的应用前景。

此装置还可以用于更换导线间隔棒,利用固定架的便携性和其调节子导线线间距固定性,可以直接固定于需更换的间隔棒处;利用固定架自身可上下传递物件的优点,可以减少作业人员在登塔过程中携带传递绳环节,降低作业人员上下塔的危险。下一步将会研发采用电力驱动来实现物件上下传递及作业平台在导线上转移,便于快速、高效、安全地完成检修作业。

参考文献

- [1] 宫微.500 kV 超高压输电线路故障分析及防范措施[J].电气工程与自动化,2013,390(36):27-29.
- [2] 国家电力公司电力规划设计总院.110~500 kV 架空送电线路设计技术规程:DL/T 5092—1999 [S].北京:中国电力出版社,1999.
- [3] 彭勇,雷兴列,方玉群,等.特高压直流输电线路不停用再启动功能情况下的带电作业安全性分析[J].四川电力技术,2019,42(4):85-89.
- [4] 丁玉剑,宋刚,陈稼苗,等.500 kV 同塔双回垂直排列紧凑型输电线路带电作业试验研究[J].电网技术,2013,37(11):3281-3287.
- [5] 常政威,彭倩,张泰,等.电力作业现场可穿戴安全保障系统设计与实现[J].四川电力技术,2020,43(3):43-47.
- [6] 全国带电作业标准化技术委员会.带电作业用导线飞车:DL/T 636—2017[S].北京:中国电力出版社,2018.

作者简介:

高亮(1990),男,工程师,研究方向为输电线路运行与维护。

(收稿日期:2023-03-16)

敏感用户工业过程的过程免疫时间曲线刻画方法

马 骏¹, 景 源¹, 易 见¹, 周之松¹, 徐方维², 龙晨瑞²

(1. 中国石油天然气股份有限公司西南油气田分公司输气管理处, 四川 成都 610213;

2. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

摘要:过程免疫时间曲线是分析敏感用户工业过程对电压暂降免疫力的重要工具。针对实际生产中过程参数监测困难、用户监测意愿低导致过程免疫时间曲线难以刻画的问题,文中提出监测数据缺失或不足时典型工业过程的过程免疫时间曲线模型构建方法。首先,基于典型工业过程结构,利用敏感设备电压暂降免疫时间常数计算过程免疫时间;然后,由经验公式和二次Lagrange插值分别得到无监测数据和少量监测数据情况下过程免疫时间曲线;最后,通过对某天然气压气站大功率电驱离心式压缩机系统的分析,验证了所提方法的可行性与有效性。

关键词:电压暂降; 过程参数; 过程免疫时间; Lagrange插值

中图分类号: TM 714 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2023)04-0063-06

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230412

PIT Curve Characterization Method for Industrial Processes of Sensitive User

MA Jun¹, JING Yuan¹, YI Jian¹, ZHOU Zhisong¹, XU Fangwei², LONG Chenrui²

(1. Petro China Southwest Oil & Gasfield Company, Chengdu 610213, Sichuan, China; 2. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract: The process immunity time curve is an important tool to analyze the immunity of sensitive industrial process to voltage sag. In order to solve the problem that it is difficult to describe the process immunity time curve due to the monitoring difficulty of process parameters and low monitoring willingness of users in actual production, a method to build the process immunity time curve model is proposed for typical industrial processes with missing or insufficient monitoring data. Firstly, based on typical industrial process structure, the immunity time constant of voltage sag in sensitive equipment is used to calculate the process immunity time. Then, the empirical formula and quadratic Lagrange interpolation are used to obtain the process immunity time curves without monitoring data and with a small amount of monitoring data respectively. Finally, the feasibility and effectiveness of the proposed method are verified by the analysis of a high-power electric drive centrifugal compressor system in a natural gas compressor station.

Key words: voltage sag; process parameter; process immunity time; Lagrange interpolation

0 引言

电压暂降是最常见的电能质量扰动事件,产生原因包括短路故障、变压器投切和大型感应电动机启动^[1-3]。现代工业过程广泛使用诸如变频器(adjustable speed driver, ASD)、交流接触器(AC contactor, ACC)

基金项目: 西南油气田分公司输气管理处 2021 年科研计划项目 (20210401-08)

和可编程逻辑控制器(programmable logic controller, PLC)等电压暂降敏感设备,易因电压暂降引起工业过程中断,造成巨大经济损失^[4-6]。尽管电压暂降的发生无法避免,但提升工业过程对电压暂降的耐受能力可有效缓减敏感用户经济损失。在用户侧加装电压暂降治理装置是最主流的提升措施。针对不同过程对电压暂降耐受能力的差异,对治理装置进行优化配置可达到经济收益最大化。因此,有必要研究工业过程对电压暂降的耐受能力。

电压暂降国际联合工作组 (CIGRE C4.110) 在 2009 年发布报告推荐使用过程免疫时间 (process immunity time, PIT) 作为衡量过程对电压暂降或短时中断免疫力的统一测度^[7], PIT 定义为过程受到电压暂降或短时中断影响后, 其能维持过程参数不越限的最大持续时间。PIT 在电压暂降经济损失评估^[8-10]、电压暂降后果缓减^[11-12]、电压暂降严重度评估^[13-14]、工业用户供电方案优化和过程免疫力量化^[15-19]等方面得到应用。上述研究得以开展的先决条件是 PIT 已知, 但实际生产中 PIT 存在模糊性。

通常, 敏感用户无法为 PIT 曲线的刻画提供数据支撑, 因为电压暂降具有随机性, 其出现频次、暂降幅值和持续时间不确定, 难以有预见性地对电压暂降事件进行监测; 而建立完善的监测系统采集电压暂降期间工业过程中电量与物理量数据, 将使用户的生产成本上升。

当用户监测数据不足时, 以 PIT 为切入点针对工业过程电压暂降免疫力的研究主要从两方面开展: 过程免疫时间计算^[20-21]和过程免疫时间曲线刻画^[22-23], 即 PIT 值计算和 PIT 曲线刻画。PIT 值的计算一般基于过程中元件响应特性或元件连接方式: 文献[20]考虑工业过程元件连接方式, 利用信息响应流拓扑评估工业过程 PIT 值; 文献[21]基于元件逻辑连接关系和单个元件的响应特性, 利用甘特图计算 PIT 值。实际生产中不同工业过程之间联系复杂、过程容量大, 文献[20-21]的计算结果置信度难以保证。对 PIT 曲线的刻画, 以数据拟合和构建物理模型为主: 文献[22]使用线性插值对用户监测数据进行拟合以刻画 PIT 曲线, 其结果难以反映温度、流量等非线性变化的过程参数对电压暂降的响应特性; 文献[23]基于工业过程物理结构提出过程参数响应模型以刻画 PIT 曲线, 其等值模型结构简单, 无法推广至其他工业用户。可见, 如何保证小样本及复杂工业结构下 PIT 曲线的刻画精度, 仍是未来工业过程电压暂降耐受能力研究领域的发展方向。

综上, 当用户监测数据缺失或不足时建立具有一定精度的工业过程 PIT 曲线模型, 具有较高的经济价值和实用性。为此, 下面提出敏感用户工业过程 PIT 曲线刻画方法。首先, 基于过程中敏感设备类型及其组成结构, 计算得到不同过程结构的 PIT 值; 无过程参数监测数据时, 根据 PIT 值和过程参数变化特性得到 PIT 曲线; 仅有少量过程参数监测数据时, 利用二次 Lagrange 插值得到 PIT 曲线。最后,

通过对某天然气压气站用户工业过程的分析, 证明了所提方法的可行性。

1 过程免疫时间与过程免疫力

工业过程以电力作为动力源, 时刻与外界环境产生能量和物质交换, 以维持过程中特定工艺参数 (过程参数) 稳定在可接受范围内。研究电压暂降影响下过程参数的变化特性, 可准确衡量并掌握工业过程对电压暂降的抗扰能力。

过程参数超过控制系统设定阈值时, 相应工艺过程中断; 若多个过程之间设置有连锁保护, 单一过程的中断可能引起工业用户整个生产过程中断。因此, 可用 PIT 作为衡量工业过程对电压暂降免疫力的测度。假设过程受到电压暂降影响前稳定运行, 且电压暂降持续时间大于过程中敏感设备的耐受时间^[11], 则 PIT 曲线如图 1 所示。

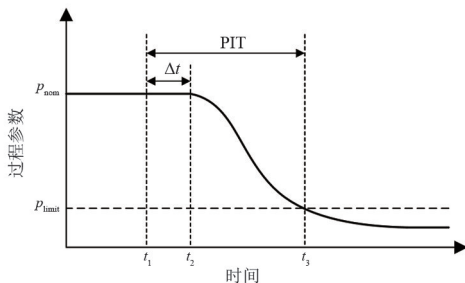


图 1 过程免疫时间曲线

图 1 中: p_{nom} 、 p_{limit} 分别为过程参数额定值和限值; t_1 为电压暂降起始时刻; t_2 为过程参数因电压暂降而偏离额定值的时刻; t_3 为过程参数超过限值时刻, 即过程中断时刻; Δt 为过程参数对电压暂降的响应时延。为防止过程因电压暂降中断, 应在 t_3 前将过程参数提升至 p_{limit} 以上, 避免触发控制系统的连锁保护, 这一过程如图 2 所示。

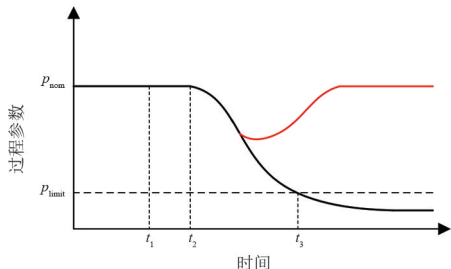


图 2 过程免疫力的提升

图 2 中, 红色曲线为进行电压补偿或提升过程储能后过程参数的变化趋势。由图 2 可知, t_3 前过程参数维持在 p_{limit} 以上, 成功穿越此次电压暂降。

提高工业过程对电压暂降的抗扰能力,合理缓减电压暂降影响,可基于 PIT 曲线确定电压暂降补偿方式、补偿深度以补偿维持时间。

2 工业过程结构与 PIT

常见的敏感设备包括个人电脑(personal computer, PC)、PLC、ASD 和 ACC。工业用户通常会采用 UPS 保护 PC 和 PLC 等控制设备,因此 ACC 与 ASD 成为对工业过程影响最大的敏感设备。工业过程的正常运行,是控制系统、驱动系统和负载(压缩机、泵、粉碎机和风机等)共同出力的结果。不同工业过程使用的负载类型不同,但驱动系统一般由 ACC、ASD 和异步电动机组成,驱动系统将电能转化为其他能量形式,直接或间接维持过程参数恒定。

典型的工业过程结构为“ACC-异步电动机-负载”和“ACC-ASD-异步电动机-负载”,后续简称为 ACC-M 和 ASD-ACC-M。将这两种结构中各元件的输出量看作相应元件的过程参数,则两种结构的 PIT 等于结构中各元件的 PIT 之和。此外,单一元件的 PIT 受其响应时间与免疫时间常数^[20](immunity time constant, ITC)影响。受试设备电压耐受曲线(voltage tolerance curve, VTC)及 ITC 的定义如图 3 所示。

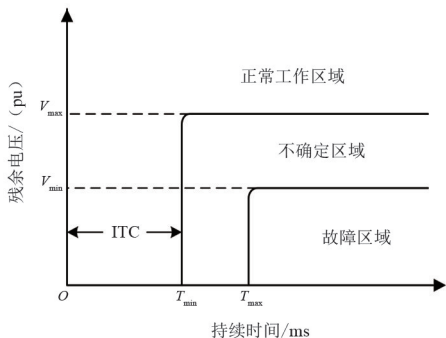


图3 ITC 的定义

图3中, $(T_{\min}, V_{\max})$ 、 $(T_{\max}, V_{\min})$ 为 VTC 中 3 个区域边界线的膝点坐标。

ACC 由电磁线圈、静铁芯、动铁芯和弹簧构成。电压暂降会导致 ACC 输入端电压 u_{ACC} 迅速下降,从而使流过电磁线圈的电流 i_{ACC} 减小,ACC 铁芯中磁通量下降,电磁力减小,最终电磁力不足以克服弹簧力的影响,导致触点断开,受控设备的电源中断。大量研究和测试表明,ACC 对电磁线圈中电压变化的响应时间近似于 0。因此,若将 ACC 动铁芯与静铁芯距离作为过程参数,可认为其 PIT 等于 ACC 的 ITC。

ASD 由整流电路、直流耦合电容和逆变电路组成。二极管和晶闸管是响应速度极快的电力电子器件,因此整流电路与直流耦合电路的响应时间近似为 0,ASD 的响应时间由直流耦合电容决定。对于给定的 ASD,有

$$V = V_{\text{sag}} + (V_{\text{nom}} - V_{\text{sag}}) e^{\frac{t}{RC}} \quad (1)$$

式中: V 为暂降期间 ASD 输出的稳态电压; V_{sag} 为暂降期间 ASD 的输入电压; V_{nom} 为整流电路输出电压; R 为 ASD 所接负载的等值电阻; C 为直流耦合电容值。

式(1)表明:发生电压暂降时,ASD 整流侧的输出电压 V_{nom} 会随输入电压降低而减小;当 V_{nom} 小于 ASD 直流耦合电容电压时,电容将通过逆变侧负载电阻放电。此时,ASD 遭受电压暂降时将经历式(1)所示的暂态过程,时间常数为 RC ,最终 V 会衰减至 V_{sag} 。对于一切采用“交-直-交”结构的工业变频调速器,上述分析均适用。

ASD 通常设有直流电压保护,当 V_{nom} 低于保护阈值时 ASD 将闭锁。因此,从暂降发生至整流电路输出电压低于保护阈值的时间为 ASD 的 PIT。当 ASD 整流电路输出电压难以获取时,可近似认为其 PIT 等于 ITC。

异步电动机通常与 ASD 和 ACC 配合使用。由于异步电动机对电压暂降的耐受能力强于 ASD 和 ACC,通常认为当异步电动机控制回路中的 ASD 与 ACC 因电压暂降失效后,异步电动机开始耐受短时中断。假设电压暂降结束时异步电动机转速未降至 0,则有

$$\begin{cases} \Delta n = \frac{T_m}{2\pi J} \int_{t_{\text{st}}}^{t_{\text{ed}}} [V_{\text{sag-M}}^2(t) - 1] dt \\ n_{\text{ed}} = n_n + \Delta n \end{cases} \quad (2)$$

式中: Δn 为异步电动机因电压暂降产生的转速变化量; T_m 为异步电动机的机械转矩; J 为惯性转矩; t_{st} 、 t_{ed} 分别为电压暂降起始时刻和结束时刻; $V_{\text{sag-M}}$ 为电压暂降影响下异步电动机端电压; n_{ed} 、 n_n 分别为 t_{ed} 时刻转速和 t_{st} 时刻前转速。

异步电动机的机端电压会引电压暂降降低,此时异步电动机电磁转矩减小,当电磁转矩小于其机械转矩 T_m 时,电动机转差率上升,转速下降。由式(2)可知,异步电动机转速下降取决于初始机械转矩、惯性转矩及电压暂降特征(暂降幅值与持续时间)。直驱异步电动机和变频异步电动机转速在电压暂降影响下的变化均满足式(2)。

将式(2)移项得

$$\frac{2\pi J\Delta n}{T_m} = \int_{t_{st}}^{t_{ed}} [V_{sag-M}^2(t) - 1] dt \quad (3)$$

求解式(3),以转速作为异步电动机过程参数,其 PIT 可由式(4)^[18]确定。

$$t_{PIT-M} = \frac{2\pi J(n_n - n_f)}{T_m(V_{sag}^2 - 1)} \quad (4)$$

式中: t_{PIT-M} 为异步电动机的 PIT; V_{sag} 为电压暂降幅值。

在异步电动机的测试和分析中,通常将其转速或转差率作为判断其运行状态的参考量,当式(4)中 J 与 T_m 难以获取时,可近似认为其 PIT 等于 ITC。综上,由 ACC-ASD-M 和 ACC-M 两种结构组成的工业过程 PIT 为

$$\begin{cases} t_1 = t_{PIT-ACC} + t_{PIT-ASD} + t_{PIT-M} \\ t_2 = t_{PIT-ACC} + t_{PIT-M} \end{cases} \quad (5)$$

式中: t_1 、 t_2 分别为 ACC-ASD-M 结构和 ACC-M 结构的 PIT; $t_{PIT-ACC}$ 、 $t_{PIT-ASD}$ 分别为 ACC 和 ASD 的 PIT。

3 工业过程 PIT 模型

3.1 无监测数据

电压暂降影响下过程参数的监测数据缺失时,可根据过程参数额定值、限值以及生产过程所处环境的环境参数建立 PIT 曲线模型。研究与测试表明,在无外界能量输入时,诸如压力、温度等过程参数的变化速率取决于其初始状态与环境参数。当 ACC-ASD-M 和 ACC-M 结构中元件因电压暂降失效后过程参数随即耗散,耗散速率与过程参数梯度呈正比^[11]。

设电压暂降发生后,过程参数 p 随时间 T 变化关系为

$$p'(T) = \frac{dp(T)}{dT} = -\lambda [p(T) - p_E] \quad (6)$$

式中: λ 为表征过程参数耗散速率的系数, λ 仅与过程结构和设备性能有关; p_E 为无设备出力时相应过程参数的环境值。

由式(6)可得 PIT 曲线模型。

$$p(T) = p_E + (p_{nom} - p_E)e^{-\lambda T} \quad (7)$$

式(7)表明:对于给定工业过程,电压暂降影响下过程参数 p 的变化速率与初值、稳态值和环境值有关;工业过程的结构、初始储能不同,其过程参数变化形式存在差异;可用 λ 表征过程抗扰能力, λ 越

大,过程对电压暂降的抗扰能力越弱。以温度、压力和流量等为过程参数的工业过程均可用式(7)描述过程参数变化特性。

由 PIT 定义可知

$$p(t_{PIT}) = p_E + (p_{nom} - p_E)e^{-\lambda t_{PIT}} = p_{limit} \quad (8)$$

式中, t_{PIT} 为给定过程的过程免疫时间。

根据式(7),有

$$t_{PIT} = -\frac{1}{\lambda} \ln\left(\frac{p_{limit} - p_E}{p_{nom} - p_E}\right) \quad (9)$$

于是

$$\lambda = -\frac{1}{t_{PIT}} \ln\left(\frac{p_{limit} - p_E}{p_{nom} - p_E}\right) \quad (10)$$

将式(5)中不同过程结构的 PIT 代入式(10)即可求出 λ ,并得到式(7)所示 PIT 曲线模型。

3.2 少量监测数据

根据用户提供的少量监测数据,可通过拟合或插值方法得到 PIT 曲线模型。由于温度、压力和流量等过程参数在短时间段内的变化是非线性的,随着用户监测样本数量的减少,拟合或线性插值结果将无法反映过程参数的实际变化特性。基于此,利用二次 Lagrange 插值^[24],保证小样本情况下所得 PIT 曲线模型的精度。

设插值节点为 T_i , $i=0,1,2,\dots,k,\dots,n$;各插值节点对应的过程参数为 p_i 。则有

$$\begin{cases} T_n = t_{PIT-n} \\ p_0 = p_{nom} \\ p_n = p_{limit} \end{cases} \quad (11)$$

式中: t_{PIT-n} 为过程免疫时间; p_{nom} 为电压暂降发生前过程参数额定值; p_{limit} 为过程参数限值。

在区间 $[T_{k-1}, T_{k+1}]$, 设二次 Lagrange 插值基函数分别为

$$\begin{cases} l_{k-1}(T) = \frac{(T - T_k)(T - T_{k+1})}{(T_{k-1} - T_k)(T_{k-1} - T_{k+1})} \\ l_k(T) = \frac{(T - T_k)(T - T_{k+1})}{(T_k - T_{k-1})(T_k - T_{k+1})} \\ l_{k+1}(T) = \frac{(T_k - T_{k-1})(T - T_k)}{(T_{k+1} - T_{k-1})(T_{k+1} - T_k)} \end{cases} \quad (12)$$

式中: k 为常数且 $k \in (1, n-1)$; $l(T)$ 为对应插值区间内二次 Lagrange 插值的基函数。

二次 Lagrange 插值结果为

$$p_k(T) = p_{k-1}l_{k-1}(T) + p_k l_k(T) + p_{k+1}l_{k+1}(T) \quad (13)$$

根据 i 个插值区间的二次 Lagrange 插值函数解出该区间下过程参数值,得到给定过程的 PIT 曲线模型。工况中,如温度、压力等过程参数随时间的变化趋势并非呈线性,式(13)通过插值区间端点和中点值,利用二次基函数进行插值能更好反映过程参数曲线的特点。当插值节点足够时,式(13)可作为分析工业过程抗扰能力及其对电压暂降响应特性的可靠参考。

4 算例分析

以中国西南地区某天然气压气站用户为例,验证所提方法的可行性与有效性。该用户主要工艺流程为压缩天然气,由大功率电驱离心式压缩机(下面简称为压缩机)的主系统与辅助系统共同维持工艺流程运转,其供电结构如图 4 所示。

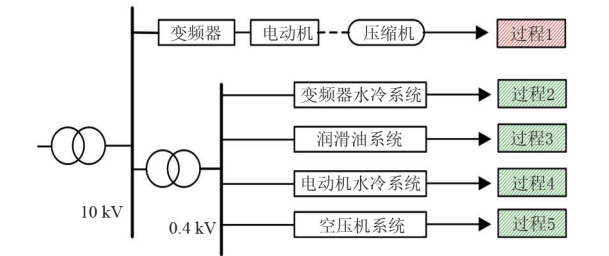


图 4 压缩机系统供电结构

图 4 中,过程 1 由压缩机主系统维持,过程 2 至过程 5 分别由压缩机 4 个辅助系统维持:变频水冷系统的润滑油系统、电动机水冷系统、空压机系统和后空冷系统。过程 1 至过程 5 的结构和过程参数如表 1 所示。

表 1 过程结构及过程参数

过程	结构	过程参数	额定值	限值
过程 1	ACC-ASD-M	压力	16 MPa	10 MPa
过程 2	ACC-M	温度	34 ℃	47 ℃
过程 3	ACC-ASD-M	压力	0.25 MPa	0.05 MPa
过程 4	ACC-M	温度	22 ℃	33 ℃
过程 5	ASD-M	压力	0.75 MPa	0.06 MPa

该用户的工艺监测系统中,存储了少量电压暂降影响下主系统过程参数数据,根据式(12)一式(13)可得过程 1 的 PIT 曲线;4 个辅助系统过程参数无可用监测数据,根据式(6)一式(10)可得过程 2 至过程 5 的 PIT 曲线。需要注意的是,该用户压缩机驱动系统中变频器可低电压穿越,因此暂降幅值不同时过程 1 的 PIT 曲线变化趋势不同;辅助系统中某一元件因电压暂降失效后将导致过程中

断,故不再考虑暂降幅值对过程 1 至过程 5 PIT 曲线变化趋势的影响。

过程 2 至过程 5 中敏感设备包括 ACC 与 ASD。结构中各设备典型 VTC 曲线^[18,25]的膝点坐标与 ITC 值如表 2 所示。

表 2 敏感设备典型 VTC 参数

种类	$(T_{\min}, V_{\max})$	$(T_{\max}, V_{\min})$	ITC
ACC	(60,0.8)	(100,0.5)	60
ASD	(10,0.8)	(50,0.7)	10
M	(500,0.47)	—	500

根据式(5),由表 1 和表 2 可知过程 2 至过程 5 的 PIT 值 $t_{\text{PIT}2}$ 、 $t_{\text{PIT}3}$ 、 $t_{\text{PIT}4}$ 、 $t_{\text{PIT}5}$ 分别为 0.56 s、0.57 s、0.56 s 和 0.51 s。过程 2 和过程 4 的过程参数均为冷却介质的供水温度,无设备出力时过程参数将分别升高至 57 ℃和 43 ℃,故过程 2 和过程 4 的环境值 $p_{\text{E}2}$ 和 $p_{\text{E}4}$ 分别为 57 和 43;过程 3 与过程 5 的过程参数分别为润滑油总管压力和空压机出口压力,无设备出力时过程参数均降低至 0,故过程 3 与过程 5 的环境值 $p_{\text{E}3}$ 和 $p_{\text{E}5}$ 均为 0。

将过程 2 至过程 5 的过程参数额定值、限值、 $t_{\text{PIT}2} \sim t_{\text{PIT}5}$ 以及 $p_{\text{E}2} \sim p_{\text{E}5}$ 代入式(10),解得相应过程参数耗散速率系数 λ_2 、 λ_3 、 λ_4 、 λ_5 分别为 0.672 3、0.354 2、0.754 8 和 0.201 9。将 $\lambda_2 \sim \lambda_5$ 代入式(7),可得相应过程的 PIT 曲线,结果如图 5 所示。

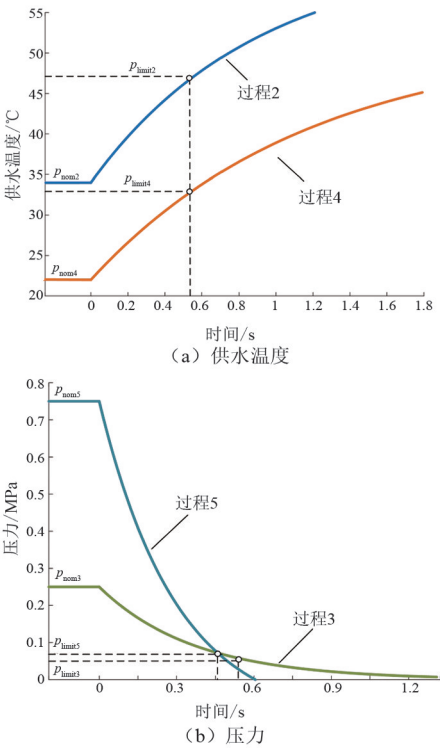


图 5 过程 2 至过程 5 的 PIT 曲线

图 5 中,电压暂降起始时刻为 0 s; $p_{\text{nom}2}$ 、 $p_{\text{nom}3}$ 、

$p_{\text{nom}4}$ 、 $p_{\text{nom}5}$ 分别为过程 2 至过程 5 的过程参数额定值; $p_{\text{limit}2}$ 、 $p_{\text{limit}3}$ 、 $p_{\text{limit}4}$ 、 $p_{\text{limit}5}$ 分别为过程 2 至过程 5 的过程参数限值。

该用户压缩机主系统包含隔离变压器、大功率变频器、高压异步电动机和离心式压缩机。根据用户提供的暂降幅值为 0.35 pu、0.56 pu 和 0.89 pu 时压缩机出口压力采样数据,利用二次 Lagrange 插值得到过程 1 的 PIT 曲线,结果如图 6 所示。

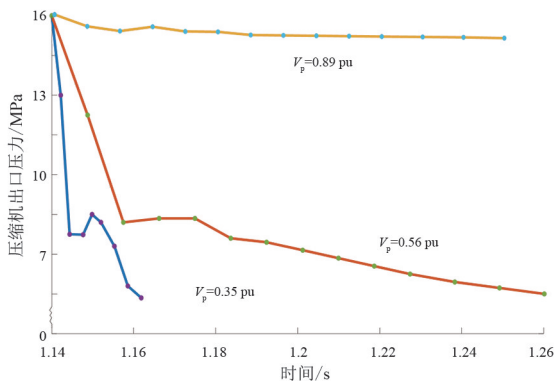


图 6 过程 1 的 PIT 曲线

图 6 中 V_p 为暂降幅值,根据该用户接入点电压暂降的幅值概率分布特征,可得到不同暂降幅值下主过程 1 的 PIT 曲线。依据该压气站用户过程工程师经验,可知图 5 至图 6 中过程 1 至过程 5 的过程参数变化特性与历史事件相符合,可反映实际生产中压缩机主系统与辅助系统过程参数对电压暂降的响应特性。

5 结 论

所提出的过程免疫时间曲线构建方法,可用于描述工业用户受暂态电压扰动时,关键工艺参数的变化特性。通过分析用户工业过程结构,采集用户关键工艺参数,可完成过程参数模型构建;或根据少量过程参数监测数据利用插值得到过程免疫时间曲线。基于所得过程免疫时间曲线中关键坐标参数,可为用户后续治理装置选型、补偿深度和补偿时间的确定奠定基础,并为同类型敏感用户建设初期供电方案的设计与规划提供客观参考。

考虑用户需求以提供个性化的电能质量定制服务,将成为未来电力市场和优质供电服务的发展方向。随着用户数据开放程度的提升,精准制定符合用户特点的供用电策略,将同时利好电网和用户。过程免疫时间曲线作为反映敏感用户工业过程对电压暂降免疫能力的便利工具,可同时反映敏感用户

的电气特性和物理属性,具有较好的研究价值。针对工业用户过程参数监测数据缺失或不足的问题,上面分别提出相应过程免疫时间曲线模型的构建方法,为采用特定工业过程结构的用户提供参考。但如何在小样本情况下,完善过程免疫时间曲线的刻画精度,以便推广至同类型用户,还需进一步研究。

参考文献

- [1] 汪颖,王曼,陈韵竹,等.基于多维关联信息的电压暂降治理需求识别[J].电网技术,2022,46(11):4391-4402.
- [2] 王璐,肖先勇,汪颖,等.基于深度神经网络的电压暂降经济损失评估模型[J].电力自动化设备,2020,40(6):156-165.
- [3] 华桦,李华强,李文峰.电压暂降治理的运营模式及其投资回报[J].电力科学与技术学报,2022,37(1):151-160.
- [4] 何英杰,支文浩,张义坤,等.典型敏感设备电压暂降耐受能力自动测试系统研究[J].电网技术,2022,46(5):1956-1964.
- [5] HE Hanyang, ZHANG Wenhai, WANG Ying, et al. A sensitive industrial process model for financial losses assessment due to voltage sag and short interruptions[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 2021, 36(3): 1293-1301.
- [6] 何函洋,肖先勇,李成鑫,等.敏感用户电压暂降损失风险评估的模糊推理模型[J].中国电机工程学报,2020,40(20):6527-6535.
- [7] CIGRE/CIREU/UIE joint working group C4.110. Voltage dip immunity of equipment in installations[R]. CIGRE, Paris, France: 2010.
- [8] 丁凯,胡畔,李伟,等.考虑信息缺失的电压暂降经济损失模糊评估方法[J].中国测试,2020,46(7):46-53.
- [9] 李春海,李华强,刘勃江.基于过程免疫不确定性的工业用户电压暂降经济损失风险评估[J].电力自动化设备,2016,36(12):136-142.
- [10] CEBRIAN J C, MILANOVIC J V, KAGAN N. Case studies of application of process immunity time in assessment of financial losses due to system faults induced industrial process interruptions[C]//Power & Energy Society General Meeting. IEEE, 2015. DOI: 10.1109/PESGM.2015.7286007.
- [11] 张逸,李为明,林芳,等.基于电气特性-物理属性的工业用户电压暂降减缓策略[J].中国电机工程学报,2021,41(2):632-642.
- [12] 张逸,张妍,张嫣,等.减缓电压暂降影响的电-气综合能源系统储气装置选址定容方法[J].电力自动化设备,2022,42(6):37-44.

220 kV 线路并联电抗器工程应用研究

孙健杰¹,袁明哲¹,殷攀程²,张 治¹,陈 翔¹

(1. 国网四川省电力公司成都供电公司,四川 成都 610041;

2. 国家电网有限公司西南分部,四川 成都 610041)

摘 要:随着城市输电系统逐步从架空线路向电力电缆方向发展,较多的220 kV线路需要配置并联电抗器以补偿线路过大的容性充电功率。考虑到目前国内220 kV线路加装并联电抗器的相关工程实践较少以及设计和施工方案缺乏明确的经验借鉴和技术指导的现状,文中结合实际工程案例,详细介绍了220 kV线路并联电抗器的工程设计原则、技术要点及运行注意事项等;对相应保护配置、启失灵和解复压回路设计以及远方跳闸功能实现等相关技术难点进行深入分析并提出相应解决方案。对指导工程现场设计施工和促进电网安全、规范运行具有重大应用价值和工程价值。

关键词:并联电抗器;高压电抗器保护;失灵回路;解复压;远方跳闸

中图分类号:TM 726 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2023)04-0069-06

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230413

Engineering Application Research of Installing Shunt Reactors in 220 kV Line

SUN Jianjie¹, YUAN Mingzhe¹, YIN Pancheng², ZHANG Zhi¹, CHEN Xiang¹

(1. State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. Southwest Branch of State Grid Corporation of China, Chendu 610041, Sichuan, Chian)

Abstract: With the gradual development of urban transmission system from overhead lines to power cables, more 220 kV lines need to be equipped with shunt reactors to compensate the excessive capacitive charging power of lines. Considering the current situation that there are few engineering practices related to the installation of shunt reactors in 220 kV lines in China, and the design and construction scheme lack clear experience reference and technical guidance, the engineering design principles, technical points and operation precautions of the installation of shunt reactors in 220 kV lines are introduced in detail in combination with actual engineering cases. Then, the relevant technical difficulties such as the corresponding protection configuration, the design of startup failure and release compound voltage circuit are deeply analyzed as well as the realization of remote tripping function. The corresponding solutions are put forward, which has great application significance and engineering value for guiding the design and construction of project site and promoting the safe and standardized operation of power grid.

Key words: shunt reactor; high-voltage reactor protection; fail protection circuit; compound voltage blocking; remote tripping

0 引 言

中国500 kV及以上的超(特)高压输电线路,距离一般长达数百公里甚至上千公里,线路容性充电功率较大,通常采取在线路首末端装设并联电抗器以解决无功平衡和过电压问题^[1-2]。

现阶段城市供电逐渐向电缆化方向发展,由于电缆对地电容较大且迁改线路较长,也会导致线路充电功率过大的情况^[3]。因此,目前有较多220 kV变电站同样需要设置并联电抗器对容性充电功率进行就地消纳,防止无功串行和影响电网的正常运行^[4-6]。

目前,220 kV线路加装并联电抗器工程在国内

的实例较少,工程实践应用缺乏典型经验可循。一方面,在 220 kV 及以下电网中,因容性无功功率相对较少,未在高压侧配置感性无功补偿装置,因此,220 kV 并联电抗器目前并无通用设计和典型设计参考;另一方面,虽然 500 kV 高压电抗器应用已然成熟,但由于其接线方式和一、二次设备配置与 220 kV 差别甚大,经验不具备借鉴性^[7]。

基于上述现状,下面将以工程实践应用为切入点,详细介绍了 220 kV 线路高压电抗器扩建过程中的工程设计原则、技术要点及运行典型经验等,并对工程技术难点进行分析研究。

1 工程设计原则

现国内 220 kV 及以下变电站加装高压并联电抗器多参照 330 kV 及以上高压并联电抗器加装方式,具体设计原则应结合现场实地勘察和变电站实际情况确定^[8-9]。

1.1 电气主接线方式

高压电抗器加装于线路侧,一般采用引下线“T”接方式并入,与间隔共用出线侧避雷器,不改变电气主接线方式,其主接线如图 1 所示。

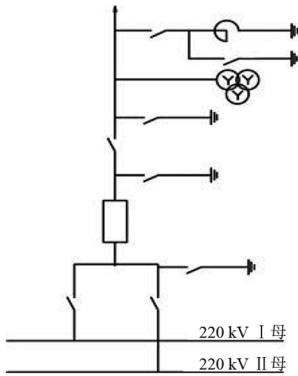


图 1 线路并联高压电抗器主接线

1.2 主要设备选择

220 kV 及以上电压等级的并联电抗器绝大多数采用油浸式铁芯电抗器。为了避免与线路电容形成并联谐振,合理选择电抗器的容量十分重要。

在设计并联电抗器的容量时,除了要考虑限制工频过电压外,还涉及到系统的稳定、无功功率平衡、自激电压和谐振等问题。因此电抗器的容量选择与安装方式要根据系统的结构、参数及运行情况等因素确定方案。

表 1 所示为单位线路长度下,电抗器容量在不同充电功率下的合理选择范围。其中,220 kV 电压

等级电抗器一般按三相设计,330 kV 及以上电压等级电抗器由于容量较大,大多数按单相设计^[9]。

表 1 单位线路长度容性充电功率和合理容量

额定线路 电压/kV	容性充 电功率/ (Mvar · km ⁻¹)	并联补偿度 75% 时 400 km 线路 所需并联电抗器 容量/Mvar	合理的单相 并联电抗器 容量/Mvar	电 抗 器 结 构
220	0.16	50	3×(0.3~0.5)	三相
330	0.40	120	3×(20~30)	单相
500	1.00	300	3×50	
750	2.40	700	3×100	
1100	5.40	1600	3×(250~300)	

1.3 二次系统配置

220 kV 并联电抗器配置双重化的主、后备保护一体电抗器电气量保护和一套非电量保护。相应 220 kV 线路两侧断路器的双套线路保护均应配置集成过电压保护功能的装置,具体配置情况见表 2。

表 2 220 kV 高压电抗器保护及相应线路保护配置

类别	高压电抗器保护	线路保护
主保护	电抗器差动保护 电抗器零序差动保护 电抗器匝间保护	光纤电流差动保护
后备保护	电抗器过流保护 零序过流保护 过负荷保护	接地保护、相间距离保护 零序过流保护
非电量/其他保护	电抗器本体内部的瓦斯、温度以及冷却系统故障	过电压及远方跳闸保护

2 技术要点

2.1 相关保护配置不合理

2.1.1 存在问题

在某 220 kV 线路高压电抗器扩建工程前期,高压电抗器的电量保护及非电量保护采用通过启动对应线路保护的远跳回路实现跳对侧断路器的设计方案。

当高压电抗器保护发远跳命令跳对侧断路器时,需经对侧断路器就地判据,满足就地判据后方可跳闸。就地判据就是保护装置启动即可跳闸,装置启动的判据是零序电流和电流变化量达到整定定值。在现有保护配置下,此方案存在以下问题:

1)在高压电抗器发生轻微故障或者高阻接地时,对侧就地判据并不能可靠启动或对侧断路器拒动,导致高压电抗器故障时不能快速脱离电源点,可

能造成电网故障扩大或者设备损坏;

2) 高压电抗器电量保护启动采用启动线路保护远跳方式跳对侧断路器时,不能区分是否启动对侧母线失灵回路,将造成对侧母线保护拒动或者误动的风险。

2.1.2 解决方案

220 kV 线路两侧断路器的双套线路保护均改造为集成过电压保护功能的装置。

集成过电压功能的线路保护远方跳闸就地判据一般有 7 个判据,即电流变化量、零负序电流、零负序电压、低电流、低功率因数、低有功功率等。各个判据均可由整定方式字决定其是否投入,任何一个判据满足时均可启动跳闸出口,更好地保证对侧断路器不会拒动^[11]。

2.2 完善高压电抗器保护解母线保护复压功能

2.2.1 存在问题

常规 220 kV 线路保护不需要接入母线保护的失灵解复压回路。通常认为线路故障即使可能经高阻接地,母线电压依然会有较明显的变化,完全可以达到失灵保护的复压开放条件。当线路并联高压电抗器后,情况则有所不同。

高压电抗器作为一种特殊变压器,属于高阻元件,其铁芯绕组阻抗极高。当电抗器末端故障时,首端的线路电压及母线电压可能变化不明显,不足以达到失灵保护电压开放的条件。同理于变压器低压侧故障时高压侧电压变化不明显的情况^[12]。

在这种情况下,高压电抗器故障且断路器失灵时可能出现失灵保护拒动的情况,进而造成事故扩大或者设备损坏。

2.2.2 解决方案

将高压电抗器保护的一组启动失灵备用接点开出至母线保护的线路失灵解闭锁开入中,增加高压电抗器保护至母线失灵保护的解复压回路,实现高压电抗器保护动作同时启动失灵、解复压的一并开出。图 2 为某 220 kV 线路高压电抗器保护解复压回路。

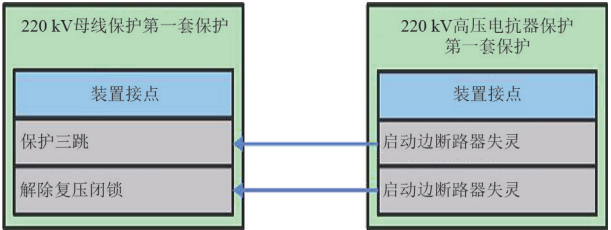


图 2 某 220 kV 线路高压电抗器保护解复压回路

2.3 线路保护

2.3.1 存在问题

在线路轻载运行时,可能因为长线路的电容效应导致线路末端产生过电压,此时需要线路保护的过电压保护功能切除线路两侧断路器。

1) 当线路正常运行时,线路电压与母线电压相同,故保护取母线或线路二次电压均不影响过电压保护正常动作。

2) 当线路本侧断路器热备用或冷备用,同时对侧断路器向线路充电时,线路电压与母线电压则存在差异。一旦线路出现过电压的情况,母线电压依然稳定不变,导致线路过电压时线路保护拒动的可能。

2.3.2 解决方案

线路过电压保护功能须采集线路侧电压才能正确判断出线路过电压状态,继而切除线路两侧断路器。

2.4 高压电抗器保护远跳功能实现方式

2.4.1 存在问题

220 kV 线路保护通过远方跳闸功能实现跳线路对侧断路器^[13]。对于配置过电压及远方跳闸功能的线路保护而言,当线路对端的母线保护、电抗器保护等动作时均可通过光纤通道发远跳信号。其中,启动远跳功能可通过 3 种开入实现,分别是远跳(远方其他保护动作)、远传 1、远传 2。

远传 1 开入经远传收信逻辑和相应的就地判据实现远跳功能,与远跳命令逻辑相同;但是远传 1 经过的就地判据条件更为多样,增加了低电流、低功率因数、低有功功率等判据可供选择,因此能够更为准确、快速地判断故障情况,有效防止断路器拒动。

远传 2 开入则不经就地判据,即本端光纤通道收到对端“远传 2”命令时,不经故障判据直接三相跳闸。所以远传 2 一般不用来远跳对侧断路器,可用作如启动对侧故障录波等信息传输功能。

在线路加装并联电抗器后,高压电抗器电量保护及非电量保护动作后如何配合线路保护实现跳线路两侧断路器是工程设计的一个关键问题。

2.4.2 解决方案

1) 高压电抗器电量保护启动远方跳闸接入相对应线路保护的远传 1 开入(要求启对侧母线保护失灵),对应线路保护自身远跳开入不变;对侧 220 kV 线路保护收远传 1 接点接入操作箱 TJR 跳对应断路

器,并利用保护动作节点启动母线保护的该线路间隔三相失灵。电量保护启动远传回路如图 3 所示。

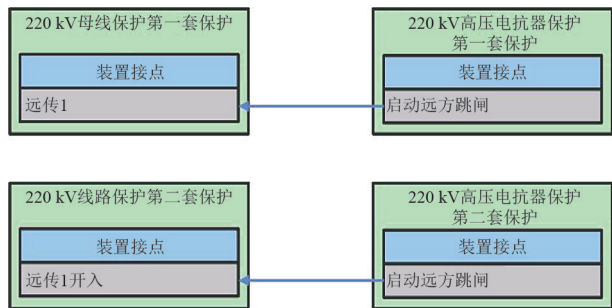


图 3 220 kV 线路高压电抗器电量保护启动远传回路

2) 高压电抗器非电量保护通过电缆接本侧线路保护装置实现非电量跳闸信号关联对应的 1、2 号线路保护的远传 1 开入(虽然规范要求不启动对侧母线保护失灵,但目前实际设备难以满足条件)。非电量保护启动远传回路如图 4 所示。

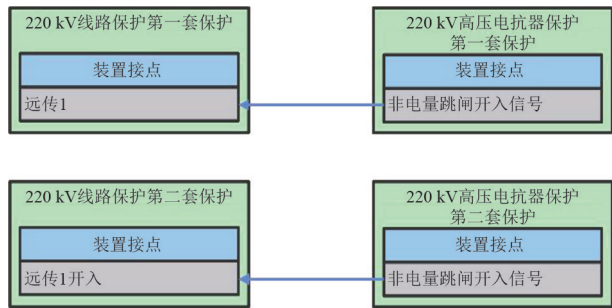


图 4 220 kV 线路高压电抗器非电量保护启动远传回路

3) 在进行线路高压电抗器保护检修时,电量保护和非电量保护均可通过退出启动远方跳闸出口软/硬压板,实现防止误跳对侧断路器及误启动对侧母线失灵开入。

2.5 母线保护模型

2.5.1 存在问题

高压电抗器电量保护启动失灵回路应关联至相应 220 kV 母线保护的本线路间隔三相启动失灵,而线路保护则关联为本线路间隔分相启动失灵^[14-15]。

此种情况下,可能存在母线保护硬件配置或软件模型不支持一个支路接收不同保护各自的启动失灵开入。对于常规站而言,母线保护的装置硬件可能缺少相应接口回路;对于智能站而言,母线保护模型则可能要求同一个间隔的 A、B、C 分相及三相启动失灵开入必须要求关联来自同一保护装置 GOOSE 控制块。

2.5.2 解决方案

根据工程实际情况,对母线保护硬件配置或程序版本和模型进行升级,以实现每个支路支持接收

两组失灵开入的能力,并且分相和三相两组启动失灵需经过独立接收软压板控制,如图 5 所示。

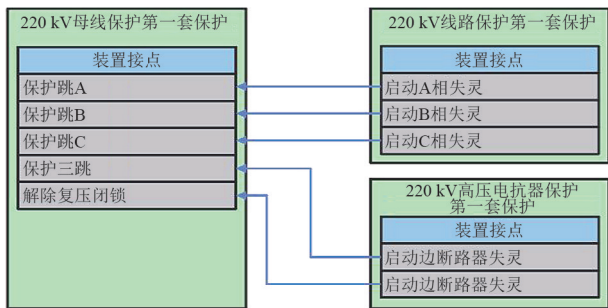


图 5 220 kV 线路间隔启动失灵回路

若更改整个母线保护模型,则与之对应的所有间隔必须全部进行传动试验;若只针对失灵开入功能模块进行程序和模型升级,保持母线保护输出控制块模型不变,则无须重复进行传动试验,升级完成后与升级前出口报文比对无误后便可投入运行。

3 运行注意事项

3.1 定值中的注意事项

220 kV 高压电抗器保护定值与其他保护的定值有很大的差异,具体体现在两个方面。

1) 各类保护装置的定值均需要人为进行整定,但高压电抗器保护仅需要整定系统参数,各种保护定值项均由装置自动生成,部分厂家通过“自动整定定值”控制字进行控制。建议采用人工整定方式以便于根据实际运行情况进行调整。

2) 220 kV 电抗器与 500 kV 电抗器结构虽然相同,但其铭牌参数所代表的含义可能不尽相同。如 500 kV 电抗器铭牌容量表示分相容量^[16],而 220 kV 电抗器铭牌容量可能表示三相容量,导致在定值整定时容易出现重大错误。

3.2 送电时光纤差动保护投退注意事项

当对侧站或本侧站对电抗器进行空载充电时,电抗器产生的感性电流与线路产生的容性电流相互补偿,线路保护感受到的电流和差流基本为 0。当线路并联电抗器时,保护逻辑有相应的考虑措施,通过合理整定线路保护的定值,可完全避免高压电抗器对光纤差动保护的影响,故不用退出线路保护的光纤差动保护。

3.3 电抗器对 220 kV 备自投装置功能的影响

220 kV 变电站的 220 kV 备自投多采用进线备自投方式,在某一进线加装高压电抗器后,可能会对备自投功能造成一定影响。

在对某变电站 220 kV 备自投进行传动试验时,通过对比备自投动作报告发现当加装高压电抗器的 A 线路主供时,拉开该线路对侧断路器,其跟跳断路器动作时间相对其他传动方式晚 78 ms,具体情况见表 3。

表 3 220 kV 备自投传动试验时动作报告

A 线路主供(并联高压电抗器)		B 线路主供(无高压电抗器)	
-4001 ms	对侧开关拉开	0000 ms	对侧开关拉开
0000 ms	整组启动	0000 ms	整组启动
2080 ms	自投启动	2002 ms	自投启动
2080 ms	跳开 A 线路	2002 ms	跳开 B 线路
2085 ms	自投动作	2002 ms	自投动作
2135 ms	合上 B 线路	2056 ms	合上 A 线路
2274 ms	母线电压恢复 进线自投成功	2195 ms	母线电压恢复 进线自投成功

两种情况的故障录波波形如图 6—图 7 所示。对比分析可以得出由于 A 线路有非线性元件电抗器,当拉开 A 线路对侧断路器时,因本侧 220 kV 母线无负载,电压不会快速下降,存在电压下降过程。两种情况下,从主供电源电压消失至备自投动作成功,所用时间分别为 6455 ms(A 线路)和 2172 ms(B 线路)。

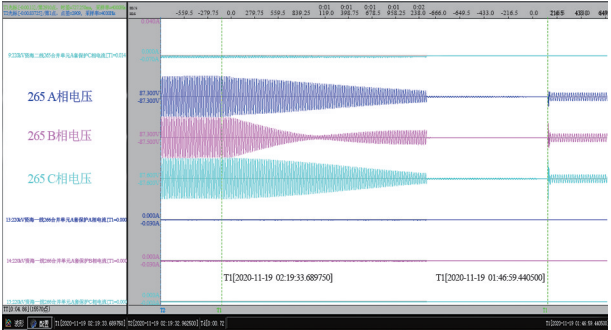


图 6 A 线路(图中 265)主供时 220 kV 备自投动作波形

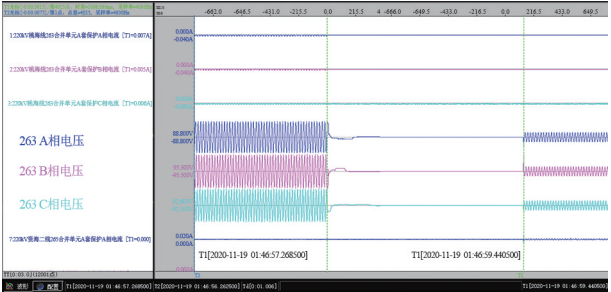


图 7 B 线路(图中 263)主供时 220 kV 备自投动作波形

由此可得 A 线路并联电抗器运行作主供电源时,由于储能元器件的存在^[17],在 220 kV 母线空载运行时将导致 220 kV 备自投动作时间延长,系统恢复正常时间迟滞。

4 结 论

上面结合国内实际工程实例,对 220 kV 线路加装并联电抗器的技术难点进行了研究分析,并针对现行规程规范中无明确要求或相关要求难以实际落实的关键问题提出了较为合理、明确的处理思路和解决方案,以期解决现场设计和施工人员的相关疑惑和困扰。

参考文献

[1] 商立群,陈琦.特高压输电线路并联电抗器补偿方案[J].中国电力,2015,48(4):95-100.

[2] 章勇高,常凯旋,苏永春.特高压接入电网的并联电抗器补偿研究[J].高压电器,2016,52(1):1-6.

[3] 黄晶晶,王坤,王蕾,等.高电缆化率城市配电网电压问题分析与治理方法[J].电力电容器与无功补偿,2019,40(6):93-98.

[4] 孙志清.220 kV 并联电抗器对全电缆电力网络运行特性的影响研究[D].广州:华南理工大学,2017.

[5] 张媛,金铭,李山,等.220 kV 限流电抗器对线路过电压的影响[J].电力电容器与无功补偿,2018,39(3):145-148.

[6] 邴冬燕,杨济川.北京城区 220 kV 降压变电站接线分析[J].华北电力技术,1995(12):8-11.

[7] 王征维,郑泉,吴文林,等.500 kV 壳式三相并联电抗器开发设计[J].变压器,2015,52(3):1-4.

[8] 电力行业电力变压器标准化技术委员会.330 kV~750 kV 油浸式并联电抗器使用技术条件:DL/T 271—2012[S].北京:中国电力出版社,2012.

[9] 全国变压器标准化技术委员会.110 kV 及以上油浸式并联电抗器技术参数和要求:GB/T 23753—2020[S].北京:中国标准出版社,2020.

[10] 符建牛,刘建华,俞尚群,等.220 kV 并联电抗器设计要点[J].变压器,2018,55(11):1-6.

[11] 荣军,欧俊延.500 kV 超高压线路新型线路保护装置的改造应用[J].电工技术,2015(2):25-26.

[12] 张伟见,宋桂娥,朱军红,等.220 kV 母线中失灵保护方案[J].电气技术,2020,21(2):138-141.

[13] 闫茂华.两侧变电站不同主接线方式下 220 kV 线路远跳功能实现方法分析[J].广西电力,2020,43(4):16-18.

[14] 李捷,丁晓兵,陈朝晖,等.220 kV 断路器失灵保护动作延时优化[J].南方电网技术,2017,11(8):65-71.

[15] 方堡垒.智能变电站二次系统检修维护新方法研究[D].济南:山东大学,2018.

[16] 中国南方电网有限责任公司生产技术部.500 kV 并联电抗器(含中性点电抗)技术规范:Q/CSG 1101004—2013[S].北京:中国电力出版社,2012.

[17] 周宗川.投退高压电抗器对系统电压产生的影响[J].宁夏电力,2009(4):16-19.

作者简介:

孙健杰(1996),男,硕士,从事继电保护工作;

(上接第 47 页)

得了较好的效果。在下一步的研发和施工验证中,应更注重瓶颈问题的解决,比如硬岩施工效率低;还需要在钻机性能、破碎锤参数、地质抗压强度三者之中找到平衡点。随着模块化微型钻机破碎锤的不断开发、测试和应用,山地模块化微型钻机将以适用范围更广、施工能力更强的优势,进一步提高山区输电线路工程的机械化程度。

参考文献

[1] 刘哲.送变电土建工程机械化施工及应用研究[D].保定:华北电力大学,2015.

[2] 张战战.旋控式全护筒钻孔灌注桩在电厂建设中的应用[J].电力科学与工程,2004(4):66-67.

[3] 许琛,张志伟,王文鹏,等.全护筒跟进旋挖钻进工艺在镇江电厂二期工程的应用[C]//中国电机工程学会电力土建专业委员会“加入 WTO 与中国电力土建技术发展”学术交流会.北京:中国电机工程学会,2003.

[4] 吴立春,李华伟,洪辉.某电厂湿陷性黄土地基处理方法的对比试验[J].工程勘察,2006(S1):220-225.

[5] 葛海明,郭纪中.旋挖式钻孔灌注桩在张家港电厂中的应用[J].工程勘察,2006(S1):144-148.

[6] 秦庆芝,朱艳君,高学彬,等.掏挖基础机械成孔设备研制及其工程应用[J].电力建设,2010(11):47-49.

[7] 袁敬中,郎福堂,罗毅,等.线路工程掏挖基础组合式成孔机械研究及应用[J].中国电业(技术版),2014(9):54-56.

[8] 鲁俊荣,宋念达,宋丹,等.特高压淮南—上海输变电工程新施工技术的应用[J].江苏电机工程,2014,33(1):60-62.

[9] 瞿宗新.山区输电线路机械化施工方案研究[J].通讯世界,2021(3):176-177.

[10] 沈伟,古银城,周战,等.浙江金华±800 kV 换流站桩基方案的探讨[C]//中国电力规划设计协会送变电设计交流会暨送变电专家委员会 2015 年工作会议.石家庄:中国电力规划设计协会,2015:152-156.

表明哲(1985),男,高级工程师,国网四川省电力公司研究生工作站企业导师,研究方向为电力系统继电保护及信号处理在电力系统中的应用;

殷攀程(1990),男,硕士,工程师,从事继电保护工作;

张 治(1976),男,工程师,从事继电保护及变电运行维护工作;

陈 翔(1991),男,硕士,工程师,从事变电运行维护工作。

(收稿日期:2022-11-10)

[11] 陈锦,吴长霖.750 kV 线路掏挖基础利用旋挖钻机成孔方法[J].通讯世界,2015(23):169-170.

[12] 钟维军.山地机械化施工基础型设计方案研究[J].电力勘测设计,2015(S2):330-334.

[13] 张爱虎,苏小青,李峰.110 kV 输电线路机械化施工方案的深化应用[J].江西电力,2018,42(2):29-32.

[14] 徐用超.输电线路岩石基础开挖方法的比较[J].建筑工程技术与设计,2017(20):1445-1446.

[15] 方月舵,郑卫锋,叶超,等.输电线路岩石嵌固基础选型及施工技术研究[J].电力勘测设计,2017(5):10-14.

[16] 袁茂书.液压振动锤在电力工程旋挖成孔灌注桩施工中的应用[J].科技创新导报,2017,14(18):85-86.

[17] 高歌,高宽红,陆烨.旋挖钻机在架空输电线路工程中的应用研究[J].科技与创新,2018(1):39-40.

[18] 陈万兵,杨增明,马耀华.输电线路桩孔基础机械开挖施工技术[J].大科技,2016(4):46-47.

作者简介:

马 宁(1982),男,博士,高级工程师,研究方向为桩基施工机械及工法;

林 峰(1970),男,正高级工程师,研究方向为输变电工程项目管理;

江 雷(1982),男,高级工程师,研究方向为输变电工程机械化施工创新应用;

狄锡颖(1985),男,高级工程师,研究方向为输电线路工程施工技术及项目管理;

李 欣(1988),男,硕士,高级工程师,研究方向为输电线路工程施工技术及项目管理;

张恒武(1967),男,高级工程师,研究方向为输变电工程机械化施工创新应用;

宋青杰(1991),男,硕士,工程师,研究方向地下空间工程机械设计;

李欣伟(1985),男,硕士,工程师,研究方向桩基施工工法。

(收稿日期:2022-09-13)

四川电力辅助服务市场建设的思考

马瑞光,王潇笛,刘洁颖,马天男

(国网四川省电力公司经济技术研究院,四川 成都 610041)

摘要:电力辅助服务市场是保障新型电力系统安全稳定高效运行的基础。中国电力辅助服务市场建设不断向纵深推进,产品种类不断丰富,分摊机制持续优化,出清规则逐步完善。但四川地区电力辅助服务市场建设相对滞后,存在产品种类与提供主体相对单一、市场成熟度相对偏低等问题。文中通过系统总结中国电力辅助服务市场的发展历程和经验,紧密结合四川资源禀赋和电网特点,对四川电力辅助服务市场建设进行了分析,并提出丰富辅助服务品种、培育新型市场主体、完善补偿分摊机制、做好市场衔接等建议,可为四川地区电力辅助服务市场建设提供支撑。

关键词:辅助服务;新型电力系统;电力市场

中图分类号:TM 712 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2023)04-0075-06

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230414

Thoughts on Construction of Sichuan Electricity Ancillary Service Market

MA Ruiguang, WANG Xiaodi, LIU Jieying, MA Tiannan

(State Grid Sichuan Economic Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: The electricity ancillary service market is the foundation to ensure the safe, stable and efficient operation of new power system. The electricity ancillary service market in China develops organically, where the product are enriched, the fee compensation mechanism is optimized, and the market clearing regulations are gradually improved. However, the electricity ancillary service market in Sichuan is relatively lagging behind, which exists the problems such as limited number of products and market entities with low market maturity. Through the systematical summary of development process and experiences, and based on the resource endowment and power grid characteristics in Sichuan, the construction of electricity ancillary service market is analyzed. Suggestions such as enriching the types of ancillary service, developing new market entities, improving compensation mechanism, and completing market framework are proposed, which can provide support for the construction of electricity ancillary service market in Sichuan.

Key words: power ancillary service; new power system; electricity market

0 引言

实现“双碳”目标,能源绿色低碳转型是必由之路,大力发展风能、太阳能等新能源是关键。但由于风电、光伏等新能源天然不具备调节能力,发电出力具有很强的波动性、间歇性和随机性,电力系统中新能源接入比例的持续提升,将给系统电力电量平衡带来巨大挑战,从而对调峰、调频、备用等电力辅助服务提出了更多需求。与此同时,随着储能、电动汽车和温控负荷等多元互动负荷的增长,具有快速响

应能力和调节能力的灵活性资源成为了系统调峰、调频和备用等辅助服务的提供者。因此,通过设计合理的辅助服务市场机制,充分调动发用两侧资源主动参与供需调节,对于消除或弱化新能源不确定性对系统安全以及经济运行的影响,构建可持续的电力保供格局具有十分重要的意义。

随着中国电力市场化改革的不断深入,售电侧市场逐渐放开,电力辅助服务市场的建设也在不断加速,多个省份和地区均已陆续出台电力辅助服务市场建设的指导性文件^[1-3]。国内已有多位学者在辅助服务市场机制方面开展了较为深入的研究,通

过定性分析和定量评估的手段,对中国各个区域电网、省级电网的辅助服务进行了总结分析,并对典型地区补偿机制的优缺点进行了较为细致的探讨^[4-7]。但从四川地区来看,目前省内电力辅助服务市场建设仍处于初期,面临着产品种类不够丰富、市场交易规则不够完善、补偿分摊机制不够合理等诸多挑战。

下面系统归纳总结了电力辅助服务市场的发展历程和经验,梳理了四川电力辅助服务市场的发展现状和建设难点,提出了加快推进四川电力辅助服务市场建设的相关建议。

1 中国电力辅助服务市场发展现状

1.1 发展历程

普遍认为,2014 年东北电网启动电力调峰辅助服务市场建设,是中国电力辅助服务市场化探索的开始。2015 年,中发 9 号文《关于进一步深化电力体制改革的若干意见》提出,以市场化原则建立辅助服务分担共享新机制,则进一步确立了电力辅助服务市场化建设方向。在此背景下,中国多个区域和省级电网在电力辅助服务市场建设方面开展了大量探索。截至 2020 年年底,电力辅助服务市场已经基本实现全国各区域、省级电网的全面覆盖^[8]。

除了电力体制改革的直接驱动外,中国电力辅助服务市场建设的提速,与近年来新能源的快速发展密切相关。以风电、光伏为代表的新能源大规模并网后,其出力的波动性、随机性直接导致电力系统调频、调峰等调节需求增加。在 2020 年中国提出“双碳”目标之后,新能源产生的调节能力需求则更加突显。2021 年 12 月,国家能源局修订发布《电力并网运行管理规定》《电力辅助服务管理办法》,为能源绿色低碳转型背景下电力辅助服务市场的建设指明了方向,势必将推动全国电力辅助服务市场不断向纵深推进。

1.2 主要特点

1) 品种设置

根据《电力辅助服务管理办法》,中国电力辅助服务可划分为基本辅助服务与有偿辅助服务。基本辅助服务一般是指根据电力系统安全稳定运行需求,发电机组和电力用户必须无偿提供的服务,如基本调峰、一次调频等。有偿辅助服务则充分考虑不同机组和电力用户自身的性能特点,以及在电力系统中实际发挥的作用,可为相关提供主体提供一

定的资金补偿的服务,如自动发电控制 (automatic generation control, AGC)、自动电压控制 (automatic voltage control, AVC)、顶峰发电 (或深度调峰)、有偿无功调节、旋转备用与黑启动等。目前,中国范围内各区域有偿辅助服务以调峰、调频和黑启动服务为主,部分区域展开了备用品种的探索与尝试。

2) 提供主体

目前,中国可提供辅助服务的主体仍以常规火电、水电等发电侧主体为主。但为了充分激励源网荷储市场化主体参与至电网灵活性调节服务中,各地区纷纷出台需求侧资源、储能设备、自备电厂、电动汽车充电网络、聚合商、虚拟电厂等新型调节资源参与调峰、调频等辅助服务的市场规则,促进电力辅助服务市场主体多元化发展。主要区域调峰辅助服务市场参与主体如表 1 所示。

表 1 主要区域调峰辅助服务市场参与主体

区域	发电侧	用电侧	新型主体
东北	火电、风电、光伏、核电、抽蓄	可中断负荷	电化学储能
西北	直调火电、水电、风电、光伏、直流配套新能源发电	负荷集成商、可调节负荷	自备电厂、新型储能
华北	火电	按需扩大辅助服务提供主体,鼓励储能设备、需求侧资源等新兴主体参与	
南方电网	火电、水电、核电、风电、光伏、光热、抽水蓄能、自备电厂等	传统高载能工业负荷、工商业可中断负荷、电动汽车充电网络等的可调节负荷	电化学、压缩空气、飞轮储能等新型储能

3) 分摊机制

不同的电力辅助服务市场组织模式,适用的费用分摊机制也不尽相同,一般可分为发电企业承担、终端用户承担、共同承担和引发负责 4 种。中国大多数地区按照“谁提供、谁获利;谁受益、谁承担”的原则,结合电网运行特性和需求,对有偿辅助服务费用进行补偿和分摊。一般情况下,发电侧按照发电量或上网电量进行分摊,用户侧按照用电量进行分摊。主要区域辅助服务费用分摊主体与模式如表 2 所示。

4) 市场出清

总体来看,中国各地区电力辅助服务市场仍独立于电能量市场,各类辅助服务产品分开报价、分别交易、分别调度。辅助服务市场产品报价一般采用卖方单向报价、集中竞争、统一价格出清的交易方式^[9],出清价格一般为成交主体报价的边际价格。部分辅助服务产品采用双边或多边协商、固定补偿

的交易方式。为避免辅助服务市场增加系统运行成本,实现经济最优,调度方一般根据按需调用、按序调用、价格优先的原则进行调用。

表 2 主要区域辅助服务市场费用分摊主体与模式		
区域	分摊主体	分摊模式
东北	火电厂及风电场、光伏电站、核电厂共同分摊	按照发电比例分摊
西北	火电厂及风电场、光伏电站共同分摊	按照发电比例分摊
华北	风电、光伏(扶贫光伏场站除外)等发电企业	按照上网电量分摊
南方电网	由发电侧并网主体、市场化电力用户等并网主体共同分摊,逐步将非市场化电力用户纳入补偿费用分摊范围	发电侧与市场用户按分摊系数共同分摊。市场化用户按用电比例,发电侧并网主体按上网电量分摊

5) 跨区衔接

目前多数区域市场设计坚持市场化导向,按照集中报价、统一边际出清的方式开展,市场主体自主自愿参与,根据“先省内、后跨省”的优先级顺序,优先满足省网(控制区)调节服务需求,再参与区域市场。然而,辅助服务交易的区域间壁垒依然存在,如存在区域价格壁垒、跨省区辅助服务交易价格普遍较低等,阻碍了跨省区资源的优化配置。后续仍需坚持全国统一电力市场的建设与全国统一辅助服务市场的建设,实现电力资源在更大范围内共享互济和优化配置,提升电力系统稳定性和灵活调节能力。

1.3 发展趋势

在“双碳”目标和能源绿色低碳转型战略的驱动下,中国新能源开发不断提速,风电、光伏装机规模持续扩大,电力系统运行管理的复杂性不断提高,对调节能力的需求量显著增加,电力辅助服务市场建设的迫切性也在不断增强。在此背景下,中国电力辅助服务市场的建设不断加速,并呈现出一些新的特点。

1) 辅助服务市场产品种类不断丰富。《电力辅助服务管理办法》对电力辅助服务进行了标准化分类,分为有功平衡服务、无功平衡服务和事故应急及恢复服务^[9]。同时为适应新型电力系统的发展需求,新增引入转动惯量、爬坡、稳定切机服务、稳定切负荷服务等辅助服务新品种。

2) 辅助服务费用分摊机制持续优化。逐步推动辅助服务费用向用户侧疏导的分摊机制,将辅助服务补偿费用由发电企业、市场化电力用户等所有并网主体共同分摊。按照“谁提供、谁获利;谁受

益、谁承担”的原则,推动为特定并网主体服务的电力辅助服务,补偿费用由相关发电侧或用户侧特定并网主体分摊^[9]。

3) 辅助服务市场出清规则有序完善。由于辅助服务市场的只要交易标的与传统电能量市场有着显著区别,目前大部分地区暂采用电力辅助服务市场独立于电能量市场出清的模式,以降低出清工作的难度。但随着现货市场等市场组织模式的快速发展,未来辅助服务市场将和电能量市场有一定的功能重叠,可由电网调度和交易机构统一组织,采用联合出清的边际价格结算辅助服务费用,以在系统全局实现电力资源的优化配置。

2 四川电力辅助服务市场建设特点

2.1 四川电力系统的基本特性

1) 电源侧

水能资源富集,水电将长期处于主体地位,如图 1 所示。截至 2021 年年底,四川电网全口径水电装机容量达到 88.87 GW,居全国首位。预计至“十五五”末,四川水电装机容量将分别增加 112 GW 和 128 GW,约占全省全口径装机容量的 71%和 63%。

新能源资源丰富,装机加速增长态势明显。四川全省新能源技术可开发量约为 120 GW(其中风电 20 GW,光伏 100 GW),主要集中在以“三州一市”为代表的西部地区。目前已开发规模相对较小,但“十四五”期规划新增装机约为 16 GW,预计 2025 年新能源装机总量可以达到约为 22 GW。

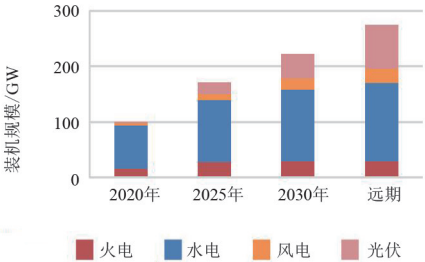


图 1 四川电源装机未来发展情况

煤少气丰,火电装机发展趋势出现明显分化。四川省内煤炭资源相对贫乏,燃煤火电发展受限。截至 2021 年年底,全省燃煤火电装机容量为 14.12 GW,仅占全省装机容量的 12.35%,且未来将不再新建单纯以发电为目的的燃煤火电机组。省内天然气储量

丰富,具有发展燃气机组的先天优势。“十四五”期燃气机组发展将明显加速,预计 2025 年装机容量可由目前的 1.19 GW 增加至 6.00 GW。

2) 电网侧

四川电网因资源大多集中于盆地周边而远离负荷中心,形成了长距离、大容量、接力式外送的特殊电网网架,电网稳定性不高。伴随新型电力系统建设,新能源装机容量逐年增长,同时随着新一批特高压直流的陆续投产,四川电网将呈现出高比例新能源及高比例电力电子设备的“双高”特性。由此带来的系统低转动惯量等问题将进一步削弱四川电网的稳定运行能力。

3) 负荷侧

全网用电负荷率低、峰谷差大,对调节能力需求高。从负荷率来看,四川平均负荷率维持在 80%左右,相较于全国 90%左右的平均水平明显偏低,电网调峰和经济运行难度较大。从负荷侧的波动情况看,四川电网因季节性制冷取暖负荷波动导致分月负荷呈夏、冬“双峰”特征;因居民生产生活方式影响又导致日内负荷呈午、晚“双峰”分布。为确保电力供需的实时平衡,四川对调节能力的需求大于其他省份。

电能消费量较低,如图 2 所示。2020 年四川省人均用电量为 3421 kWh,仅为全国平均水平的 64%,全省用电量占全省终端能源消费比例为 21.1%,较全国平均水平低近 6 个百分点。但四川正处于快速工业化、城镇化阶段,全省用电量保持年均 7.8%的增速增长。随着成渝地区双城经济圈建设推进及“双碳”目标下以电能为中心的能源消费格局加速形成,四川能源消费量与电能消费水平将迎来显著提升。

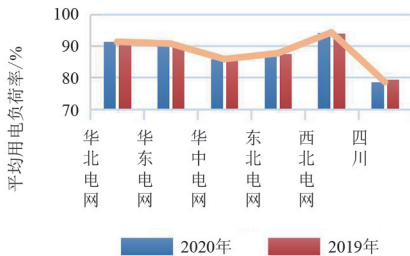


图 2 四川和全国各地区平均用电负荷率对比

2.2 四川辅助服务市场建设基本情况

如上面所述,四川新型电力系统建设面临调节需求大但调节能力不够充足的现实问题,亟需要通过加快辅助服务市场建设,充分挖掘源网荷侧各类

灵活性资源的调节潜力,以保障系统的安全经济运行,更好地服务于省内新能源的快速发展。

但目前四川尚未发布省级电力辅助服务管理细则,省内电力辅助服务市场化建设尚处于探索阶段。四川现有的市场化电力辅助服务主要有 AGC 和黑启动两个品种,相关交易细则由四川能监办于 2019 年发布。一次调频、调峰、无功功率调节、AVC、备用等辅助服务品种尚未开展市场化探索,主要依据华中能源监管局于 2020 年颁布的电厂并网运行管理和辅助服务管理的“两个细则”执行。省间市场方面,已建立四川、重庆之间的电力调峰辅助服务市场,主要参照华中能监办 2022 年发布的《川渝一体化电力调峰辅助服务市场运营规则》执行。

具体来看,四川电力辅助服务市场的建设还存在以下问题。

1) 辅助服务市场产品种类与提供主体较为单一。现阶段,四川辅助服务品种仅含调峰、调频、备用、无功调节、黑启动等常规品种,且调峰、备用、调频等辅助服务提供商仅局限于直调水电、火电等传统机组。后续需结合四川电力系统运行需求,明确各类辅助服务的市场功能定位,丰富服务品种,拓展提供主体,逐步将新能源、储能、需求侧资源、抽水蓄能等新型主体纳入辅助服务体系。

2) 市场化补偿机制不够完善,难以激励市场主体自主提供服务。现阶段,部分辅助服务品种补偿价格设计并不完全合理,如火电机组运行调峰参照华中“两个细则”深度调峰价格进行补偿,不符合四川火电深度调峰能力普遍不足的生产实际,难以激励火电机组进行灵活性改造。需进一步对各品类辅助服务补偿价格进行测算,以设定更加科学合理的补偿标准,建立更加完善的补偿机制。

3) 电力市场建设成熟度偏低,参与主体市场意识不强。近年来,四川市场化交易电量比例持续提升,但仍然以中长期电量交易为主,现货市场仍处于试点推进阶段。用户、售电公司、新型储能等市场主体的市场成熟度有待提高,相关主体的市场意识、技术手段,距离参与以电力为标的的现货交易、辅助服务交易仍相距较远。

2.3 四川电力辅助服务市场建设难点

1) 以水电为主的电源结构决定了丰枯季电网运行方式差异明显。丰水期,为保障清洁水电的高水平消纳,火电一般以最小开机方式运行;枯水期,

为了保障省内用电需求,火电一般需要满负荷发电。丰枯季电网运行方式差异巨大,水电、火电承担的角色不尽相同,增大了辅助服务市场规则设计的难度。

2)源荷分离的电力格局决定了辅助服务需求具有地区性差异。四川电源多分布于川西高原,用电负荷多分布于成都平原,省内电网呈西电东送格局,存在多个输电通道断面。受限于断面输送能力,断面内外的辅助服务需求和供给无法互相替代,辅助服务市场的设计需要充分考虑分区、分片的局部供需平衡问题。

3)水-电耦合特性导致辅助服务补偿费用测算困难。四川水电的调节能力差异较大,除大量径流式电站外,具有较好调节能力的大型水电站多为三江流域大型梯级电站,上下游水电站具有较强的水力耦合特性。在参与辅助服务市场时,上游水电站的出力变化会影响到下游水电站,导致辅助服务补偿费用的科学测算存在一定困难。

4)多种类市场衔接难度较大。以现货市场为例,受丰枯差异影响,省内电力现货市场交易在枯水期以火电现货为主,丰水期以水电现货为主,辅助服务市场与现货市场的衔接存在一定的难度。在辅助服务市场品种方面,调频与备用存在一定的复用空间,如何统筹协调各类辅助服务品种的调用和结算出清机制,也是一大难点。

3 四川电力辅助服务市场建设建议

1)丰富辅助服务品种,增强电源协调优化运行能力。加大对火电机组深度调峰、启停调峰的补偿力度,探索建立短期发电、应急备用、稳定切机、转动惯量等辅助服务品种,激励水电、火电等市场主体为系统提供更大的灵活性调节空间。处理好多品种辅助服务之间的运行结算衔接机制,分阶段、逐步建立交易品种齐全的辅助服务市场。

2)鼓励新型储能电站、虚拟电厂等新型主体参与辅助服务市场。发挥新型市场主体在消纳新能源、削峰填谷、增强电网稳定性和应急供电等方面的多重作用,明确各类新型主体独立参与深度调峰、调频等辅助服务交易的商业模式,有效扩大辅助服务提供主体。

3)持续完善辅助服务产品成本测算与补偿分摊机制。针对各类辅助服务品种,按照电力系统实

际运行需求和各市场主体实际投入成本构成情况,合理测算补偿标准,避免出现过补偿与欠补偿造成市场主体投机现象。结合电力市场化改革进展,推动辅助服务补偿费用分摊主体由发电企业逐步扩大到市场化电力用户等所有并网主体。

4)推动现货市场与辅助服务市场的融合发展。以交易规则、价格机制、出清模式等为重点,建立并完善电力辅助服务市场和电力现货市场的过渡衔接机制,以现货市场带动辅助服务市场、以辅助服务市场互补现货市场,实现现货市场与辅助服务市场的平稳融合发展,充分发挥市场在电力保供中的支撑调节作用。

4 结 论

电力辅助服务是保障电力系统安全、经济、高效运行的公共产品,但四川电力辅助服务市场建设相对滞后,应充分立足四川电源、电网和负荷特点,在丰富辅助服务品种、培育新型市场主体、完善补偿分摊机制、做好市场衔接等方面重点发力,全面加快辅助服务市场建设进度,为省内新能源的大规模开发利用、构建四川特色新型电力系统创造有利条件。

参考文献

[1] 代江,姜有泉,田年杰,等.“双碳”目标下贵州电力调峰辅助服务市场设计与实践[J].华电技术,2021,43(9):85-90.

[2] 史普鑫,史沛然,王佩雯,等.华北区域电力调峰辅助服务市场分析与运行评估[J].电力系统自动化,2021,45(20):175-184.

[3] 马晓伟,薛晨,任景,等.西北省间调峰辅助服务市场机制设计与实践[J].中国电力,2021,54(6):2-11.

[4] 周椿奇,向月,张新,等.V2G 辅助服务调节潜力与经济性分析:以上海地区为例[J].电力系统自动化,2021,41(8):135-141.

[5] 刘志成,彭道刚,赵慧荣,等.双碳目标下储能参与电力系统辅助服务发展前景[J].储能科学与技术,2022,11(2):704-716.

[6] 杜学慧.火电机组影响和制约一次调频辅助服务的原因分析[J].中国管理信息化,2020,23(16):136-137.

[7] 罗恒桓,王昊,葛维春,等.考虑报价监管的动态调峰辅助服务市场竞价机制设计[J].电工技术学报,2021,36(9):1935-1947.

[8] 袁家海,席星璇.我国电力辅助服务市场建设的现状与问题[J].中国电力企业管理,2020(7):34-38.

[9] 曾鸣,王雨晴.提升电力系统综合调节能力 支撑新型电力系统建设——解读《电力并网运行管理规定》《电力辅助服务管理办法》[J].中国电力企业管理,2022(1):8-10.

作者简介:

马瑞光(1987),男,博士,高级工程师,研究方向为能源

(上接第 53 页)

可靠性得到增强,又能够有效地解决系统设备的低效率利用问题。

2)在江北 220 kV 电网中建设柔性直流背靠背输电工程,在不明显增加短路电流的基础上,解决了金山变电站 500 kV 失电后产生的过载问题,相比于交流方案,投资更低、实施难度较小。

3)在江北 110 kV 电网中建设柔性直流背靠背输电工程,可充分利用 220 kV 轻载变电站的变电容量,缓解 220 kV 重载变电站的下网压力,实现了各分区之间的负荷均衡,提升了系统的经济性和安全性。

参考文献

[1] 王帆,刘一民,杨慧敏,等.柔性直流输电并网建模及故障分析[J].控制工程,2020,27(7):1293-1298.

[2] 汤广福,庞辉,贺之渊.先进交直流输电技术在中国的发展与应用[J].中国电机工程学报,2016,36(7):1760-1771.

[3] 饶宏,黄伟煌,郭知非,等.柔性直流输电技术在大电网中的应用与实践[J].高电压技术,2022,48(9):3347-3355.

[4] 黄素娟,吴爽,冯秋侠.柔性直流技术在配电网中的应用及运行控制[J].电工电气,2023(1):34-38.

[5] LOUREN L F N, PEREZ F, IOVINE A, et al. Stability analysis of grid-forming MMC-HVDC transmission connected to legacy power systems[J]. Energies, 2021, 14(23):8017

[6] 刘卫东,李奇南,王轩,等.大规模海上风电柔性直流输电技术应用现状和展望[J].中国电力,2020,53(7):55-71.

[7] 肖磊石,盛超,卢启付.南方电网首台机械式高压直流断路器在柔性直流输电系统挂网短路试验及仿真[J].高电压技术,2019,45(8):2444-2450.

[8] 李岩,罗雨,许树楷,等.柔性直流输电技术:应用,进步与期望[J].南方电网技术,2015,9(1):7-13.

[9] 单节杉,任敏,田鑫萃,等.基于故障电流回路特性的柔

经济、电力市场、电网规划;

王潇笛(1994),男,博士,助理工程师,研究方向为电力市场、优化运行;

刘洁颖(1990),女,硕士,工程师,研究方向为电力市场、电力电量平衡;

马天男(1992),男,博士,高级工程师,研究方向为宏观经济、电力价格、电力市场。

(收稿日期:2022-11-31)

性直流架空线路纵联保护[J].电力系统自动化,2022,46(21):152-159.

[10] 饶宏,周月宾,李巍巍,等.柔性直流输电技术的工程应用和发展展望[J].电力系统自动化,2023,47(1):1-11.

[11] LIU D, KISH G J, AZAD S P. Control strategies to improve stability of LCC-HVDC systems with multiple MMC taps[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2019,13(20):4685-4693.

[12] 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.

[13] SUN K Q, XIAO H Q, PAN J P, et al. A station-hybrid HVDC system structure and control strategies for cross-seam power transmission[J]. IEEE Transactions on power systems 2021,36(1):379-388.

[14] 蒋晓娟,姜芸,尹毅,等.上海南汇风电场柔性直流输电示范工程研究[J].高电压技术,2015,41(4):1132-1139.

[15] 刘黎,蔡旭,俞恩科,等.舟山多端柔性直流输电示范工程及其评估[J].南方电网技术,2019,13(3):79-88.

[16] 潘尔生,乐波,梅念,等.±420 kV 中国渝鄂直流背靠背联网工程系统设计[J].电力系统自动化,2021,45(5):175-183.

[17] 樊云龙,任建文,叶小晖,等.基于 MMC 的渝鄂直流背靠背联网工程控制策略研究[J].中国电力,2019,52(4):96-103.

[18] 张猛,马骢,王银岭,等.基于电路仿真法的叠装电抗器雷电冲击电压分布特性研究[J].高压电器,2020,56(12):191-195.

[19] POSTALWAIT J. Hitachi ABB power grids wins major HVDC order linking shetland islands to the UK grid[J]. T & D World, 2020,72(10):192-204.

作者简介:

雷宇(1976),女,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统控制及运行优化。

(收稿日期:2023-03-02)

毕节新能源送出电网故障分析及 送电能力提高措施分析

明杰¹, 王国松², 梅涛¹

(1. 中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610021;
2. 贵州电网有限责任公司电力调度控制中心, 贵州 贵阳 55000)

摘要: 电网稳控系统作为整个电力系统的重要保护手段, 可以避免电网故障进而引发大范围停电的情况发生, 是保证电网安全稳定运行的重要防线。首先, 分析了毕节新能源建设工程情况; 其次, 根据该区域电网2023年网架情况, 对该区域内电网交流系统进行了详细的稳定计算, 分析系统存在的稳定问题和薄弱环节; 最后, 针对不同的交流线路故障, 提出提高毕节新能源送出的措施建议, 为该区域大电网安全运行提供保障。

关键词: 电网稳控系统; 稳定计算; 变电站; 稳控策略

中图分类号: TM 732 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2023)04-0081-04

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230415

Fault Analysis of Bijie New Energy Transmission Grid and Measures for Improving Transmission Capacity

MING Jie¹, WANG Guosong², MEI Tao¹

(1. Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Chengdu 610021, Sichuan, China; 2. Power Dispatching Control Center of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550002, Guizhou, China)

Abstract: The power grid stability control system, as an important protection measure for the entire power system, can avoid power grid failures resulting in large-scale power outages, and is an important defense line to ensure the safe and stable operation of power grid. Firstly, the situation of new energy construction project in Bijie is analyzed. Secondly, based on the grid structure of its regional power grid in 2023, a detailed stability calculation is carried out for AC system of power grid in this region, and the stability problems and weak links of the system are analyzed. Finally, measures and suggestions are proposed to improve the transmission ability of new energy in Bijie for different AC line faults, which provides guarantees for the safe operation of regional power grid.

Key words: power grid stability control system; stability calculation; substation; stability control strategy

0 引言

随着大规模电网互联、远距离输电的不断发展、分布式发电的大量运用以及电力电子等设备越来越多, 电网的内部结构和运行特点变得复杂, 电网安全稳定问题日益突出, 同时电网局部产生的故障也可能导致大电网的崩溃, 造成不可估量的损失^[1-4]。因此, 及时发现故障、分析故障原因并采取相应稳定

控制措施, 可以保证大区域电网的供电可靠性, 防止电网故障后果的进一步加重。

稳控系统作为电力系统的重要防线, 保护着系统各设备在正常范围内工作。在电网发生故障失稳后, 稳控系统通过切发电机组、切负荷来减少出力和负荷, 调整功率(上升或下降), 以此来实现故障区域或更大范围电网的安全稳定控制^[5]。稳控系统有助于维持功角、电压稳定以及电网的可持续稳定供电^[6-10]。

下面分析毕节新能源送出电网安全问题。针对该区域电网网架不断变化以及发电、负荷逐步增加的情况,研究毕节区域电网出现的交流故障以及故障发生后稳定控制系统采取的措施,对有效抑制故障的进一步扩大、保障电网安全运行具有重要意义。

1 毕节新能源概况

毕节新能源以光伏发电为主,集中在乌撒区域。光伏发电集中汇集到 220 kV 光伏汇集站 1 和 220 kV 光伏汇集站 2。当地的水电汇集到 220 kV 水电汇集站。220 kV 光伏汇集站 1 和 220 kV 水电汇集站分别经 220 kV 联络线接入 500 kV 汇集站,再经 1 回 500 kV 联络线路长距离接入主网的 500 kV 变电站 3 实现与主网连接。毕节新能源送出电网如图 1 所示。

光伏群总装机容量为 460 MW,各光伏站装机容量见图 1。

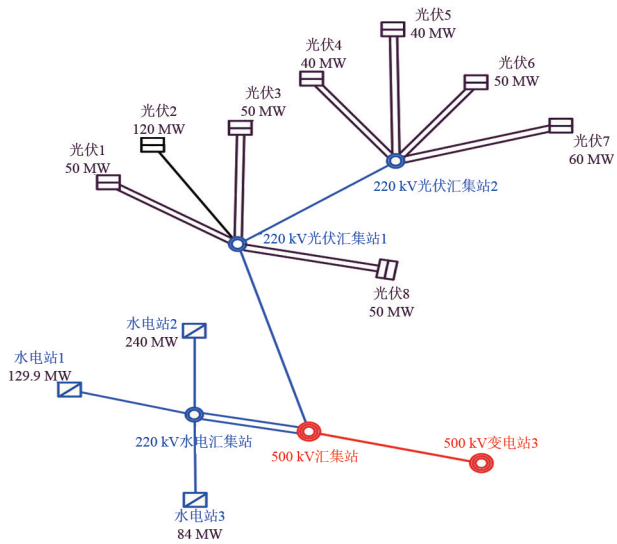


图 1 毕节新能源送出电网

2 研究方法及原则

2.1 计算原则

2.1.1 计算模型及稳定判据

- 1) 发电机模型:采用“ E_q ”和“ E_d ”电势变化的计算模型。
- 2) 负荷模型:采用 50%感应电动机+50%恒阻抗的综合负荷模型,并计入频率因子。
- 3) 直流模型:采用能模拟直流电压和电流测量环节、电流调节器、VDCOL 限制环节以及触发控制

环节的直流控制系统模型。

根据《电力系统安全稳定导则》和《南方电网安全稳定计算分析导则》,系统稳定应同时满足:

- 1) 暂态稳定。遭受扰动后,同步系统内各机组之间功角相对摇摆,经过第一、第二振荡周期不失步,作同步衰减振荡,系统中枢点电压逐渐恢复。
- 2) 动态稳定。电网在遭受大小干扰后,仍能通过自控设备维持自身长时间稳定运行,一般指在干扰后,不出现发散性或持续性的振荡。
- 3) 电压稳定。电网电压受到干扰后在一定条件下仍能维持或恢复到安全范围内,不出现电压崩溃的现象,电压稳定包括电压静态和暂态稳定。
- 4) 频率稳定。电网遭受剧烈干扰后,在电源与负载的巨大不平衡条件下,电网频率仍可维持在可接受范围内而不出现频率崩溃。
- 5) 热稳定。电网中的电力装置能经受住短路电流所引起的热效应,而不会造成装置的损害。

2.1.2 故障类型与计算时序

电网故障主要包括单相瞬时性故障、线路三相永久性故障、主变压器故障、平行线路单回三相永久性跳双回及电厂送出线路 $N-1.5$ 故障以及稳控远方切机、切负荷时间故障等。计算时序如表 1 所示。

表 1 计算时序

故障类型	计算时序
单相瞬时性故障	故障后两侧 0.1 s 故障相跳开,故障后 1.1 s 故障相重合闸成功
线路三相永久性故障	故障后两侧 0.1 s 跳开
线路单回故障跳双回故障	故障后两回线路两侧 0.1 s 跳开
主变压器故障	故障后 0.1 s 主变压器各侧跳开
双回线路 $N-1.5$ 故障	一回线路三相永久性故障后 0.1 s 线路两侧跳开;另外一回线单相瞬时性故障,故障后 0.1 s 故障相两侧断开
稳控远方切机、切负荷时间	交流故障后 0.3 s

2.2 计算方式

“ $N-1$ ”原则,又称为单一故障安全检验法则,是一种基于电网稳定运行的技术需求,具体指电网中任一电力器件在正常运行下或由于故障被切断,电网能维持稳定的工作状态且其他部件不负载运行,电压、频率都保持在安全范围内。所选取的基础计算方式突破“ $N-1$ ”原则,即在夏季考虑毕节区域水电、火电、新能源等电力均尽量满发,只要正常运行时无元件过载即可, $N-1$ 故障后出现的稳定问题则依靠安全稳定控制措施解决。

同样以“保证正常运行时无元件过载, $N-1$ 故障后出现的稳定问题依靠安全稳定控制措施解决”为原则,在 2023 年夏小多发方式下做 500 kV 及 220 kV 线路检修,具体检修方式主要包括 500 kV 汇集站升压变压器检修、500 kV 变电站 3 主变压器检修、500 kV 双回线一回线路检修、220 kV 双回线一回线路检修等。

3 交流系统故障及提高送电能力措施分析

以在 2023 年夏小多发方式下,500 kV 线路单相瞬时性故障为例,测算 500 kV 联络线和 220 kV 水电联络线两侧的相角差、测定电压及余弦电压,如图 2、图 3 所示。

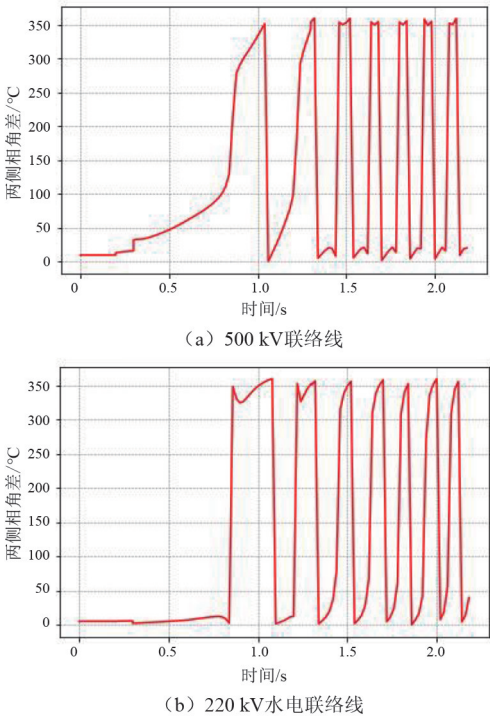


图 2 联络线两侧相角差

根据图 2 和图 3 中两侧相角差及测定电压可判断,电网内交流线路故障后出现功角失稳问题及振荡中心落在 500 kV 联络线或者 220 kV 水电联络线上。

光伏和水电打捆后送出能力受不同能源出力比例的影响,为避免功角失稳问题,列举两种方式的不同能源出力比例进行仿真,计算结果如表 2 所示。

方式 1:减小光伏出力 80 MW 以使 500 kV 联络线潮流为 820 MW,500 kV 联络线单相瞬时故障无暂稳问题。

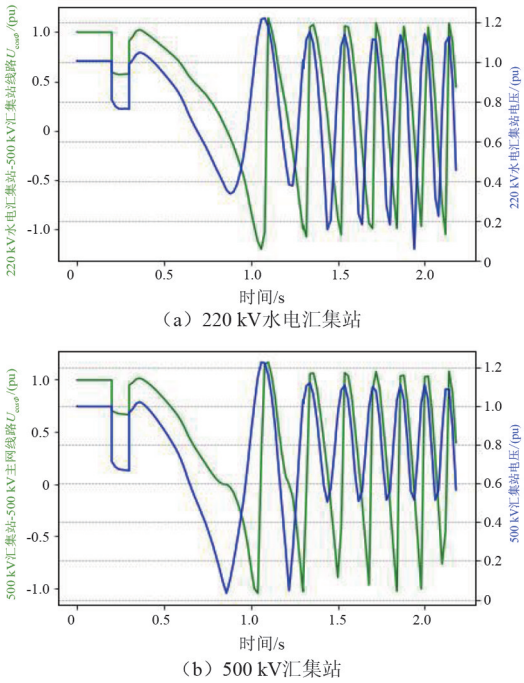


图 3 测定电压及余弦电压 $U_{\cos\phi}$

表 2 500 kV 汇集站至 500 kV 变电站 3 线路预控方式

方式	500 kV 联络线 潮流/MW	水电 出力/MW	光伏 出力/MW
方式 1	820	454	380
方式 2	779	332	460

注:表中未示出网损。

方式 2:减小水电出力 120 MW 以使 500 kV 联络线潮流为 779 MW,预控,500 kV 联络线单相瞬时故障无暂稳问题。

为提高 500 kV 联络线送电能力,通过提高光伏电站电压稳定能力来实现,考虑采用静止无功发生器(static var generator,SVG)增容、加装调相机以及新建串联补偿装置等方式。

1)SVG 增容

表 3 为以 220 kV 光伏汇集站 1、220 kV 光伏汇集站 2 作为节点,新增不同容量的 SVG 后的送电能力分析。

表 3 SVG 增容提高送电能力分析

序号	新增 SVG 容量/Mvar	撒奢线有功功率/MW	负载率/%
1	110	879.6	43.12
2	220	908.4	44.53
3	330	927.4	45.46
4	440	936.9	45.93
5	550	946.2	46.38

SVG 容量从 110 Mvar 至 550 Mvar,对应的有功功率也随之增加。通过安装和调节这些 SVG 设备,可以有效控制系统的无功功率流动,提高电力系统

的稳定性和可靠性。

2) 新建串联补偿装置,补偿度为 30%,乌撒电源可满出力。

3) 新建调相机 100 Mvar,毕节新能源可满出力。

4 结 论

上面对毕节新能源 500 kV 送出系统进行了电网稳定研究,分析了毕节新能源和水电送出 500 kV 联络线存在的稳定问题,提出了提高送电能力的措施。

参考文献

[1] 李明节.大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制[J].电网技术,2016,40(4):985-991.

[2] 杨欢欢,付超,李诗旸,等.南方电网稳定控制系统高保真传动试验方案设计与结果分析[J].南方电网技术,2022,16(5):1-8.

[3] 许涛,励刚,于钊,等.多直流馈入受端电网频率紧急协调控制系统设计与应用[J].电力系统自动化,2017,41(8):98-104.

[4] 朱锐,黎劲松,杨宝起,等.高比例新能源接入区域电网稳定控制技术探讨[J].电工技术,2021(12):46-49.

(上接第 68 页)

[13] 秦川,姜燕.基于经济等效时间考虑电压暂降的供电可靠性评估方法研究[J].电力电容器与无功补偿,2022,43(1):144-150.

[14] 林志超,罗步升,宋志坚.一种基于过程免疫时间的电压暂降后果分级指标[J].云南电力技术,2020,48(6):20-24.

[15] 肖先勇,秦铎,汪颖,等.考虑敏感设备中断概率的电网线路改造优质供电运营模式研究[J].电网技术,2023,47(2):584-594.

[16] 汪颖,李成鑫,李国栋,等.基于响应事件工艺参数免疫时间的设备电压暂降敏感特征识别[J].四川大学学报(工程科学版),2016,48(4):181-187.

[17] 刘旭娜,张文涛,魏俊,等.基于配电网过电流保护的电压暂降缓解方法[J].电气应用,2017,36(22):69-74.

[18] HUANG Anjunguo, XIAO Xianyong, WANG Ying. Evaluation scheme of voltage sag immunity in sensitive industrial process[J]. IEEE Access,2021,9:66398-66407.

[19] 罗珊珊,陈兵,汪颖,等.基于过程免疫力和优化 K 近邻估计的配网电压暂降频次估计[J].电工电能新技术,2022,41(7):25-37.

[20] 徐琳,刘畅,杨华.敏感工业过程电压暂降免疫时间评估[J].电力电容器与无功补偿,2021,42(2):110-116.

[21] 钟庆,何淇彰,陈伟坤,等.基于甘特图的过程免疫时间计算方法[J].电力系统自动化,2019,43(7):174-181.

[5] 肖友强,李玲芳,陈义宣.云南电网稳控系统的优化配置研究[J].云南电力技术,2017,45(1):118-119.

[6] 郝雨辰,江叶峰,仇晨光,等.基于多代理系统的直流微电网分区域式稳定控制方法研究[J].电力工程技术,2017,36(5):15-20.

[7] 郭剑,朱炳铨,徐泰山,等.基于历史数据聚类分析的暂态功角稳定故障筛选[J].电力工程技术,2020,39(2):75-80.

[8] SHU Y B, TANG Y. Analysis and recommendations for the adaptability of China's power system security and stability relevant standards[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems,2017,3(4):334-339.

[9] YU W J, XUE Y S, LUO J B, et al. An UHV grid security and stability defense system: considering the risk of power system communication[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2015,7(1):491-500.

[10] 郭琦,朱益华,常东旭,等.电网安全稳定控制系统远程试验方法及工程应用[J].电力系统自动化,2020,44(1):152-159.

作者简介:

明 杰(1992),男,硕士,工程师,研究方向为电力系统稳定与控制。

(收稿日期:2023-01-19)

[22] 肖先勇,谭秀美,汪颖,等.基于电气特性-物理属性-感知损失的电压暂降经济损失评估[J].中国电机工程学报,2018,38(S1):105-110.

[23] 李天楚,伍智鹏,方铭,等.基于 Larsen 推理的电压暂降下工业过程负荷损失率评估方法[J].电力系统保护与控制,2022,50(4):145-153.

[24] 胡兵,徐友才,朱瑞.现代科学与工程计算基础[M].成都:四川大学出版社,2018.

[25] IEEE recommended practice for monitoring electric power quality:IEEE Std 1159:2009[S/OL].[2022-10-05].
<http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=8796484>.

作者简介:

马 骏(1984),男,工程师,从事电气管理工作;

景 源(1981),男,助理工程师,从事电气技术管理工作;

易 见(1983),男,高级工程师,从事天然气离心式压缩机组管理工作;

周之松(1988),男,高级工程师,从事水电、压缩机管理工作;

徐方维(1978),女,博士,教授,研究方向为电能质量与电磁兼容;

龙晨瑞(1998),男,硕士研究生,研究方向为电压暂降治理技术。

(收稿日期:2022-12-05)

一起 10 kV 谐振接地系统连续故障分析

卫佳奇,袁明哲,陈翔,令狐静波,曹柯,许立志
(国网四川电力公司成都供电公司,四川成都 610041)

摘要:单相接地故障在电网中发生故障率较高,研究单相接地故障对提升供电可靠性有重要意义。文中从母线电压的角度剖析了 10 kV 谐振接地系统发生单相接地故障的特点,洞悉单相接地故障的诸多原因,进而减小单相接地故障的发生率,保证电网安全稳定运行。首先,分析系统单相接地故障接地时的暂态过程,得出了暂态电流的具体数学模型;然后,对该起故障的录波波形进行分阶段定性分析,同时使用 Matlab 仿真验证分析的正确性,并探究了在不同接地电阻下母线电压的变化规律;最后,针对谐振接地系统提出建议以减小单相故障的影响范围,具有较高的工程应用价值。

关键词:单相接地故障;谐振接地系统;间歇性接地;Matlab 仿真

中图分类号:TM 862 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2023)04-0085-06

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.202304016

Continuous Fault Analysis of A 10 kV Resonant Earthed System

WEI Jiaqi, YUAN Mingzhe, CHEN Xiang, LINGHU Jingbo, CAO Ke, XU Lizhi
(State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: Single-phase grounding fault has a high rate occurred in power grid, so its research is of great significance to improve the reliability of power supply. The characteristics of single-phase grounding faults in 10 kV resonant earthed systems are analyzed from the perspective of bus voltage, and several causes of single-phase grounding faults are known clearly, thereby reducing the incidence of single-phase grounding faults and ensuring the safe and stable operation of power grid. Firstly, the transient process of single-phase grounding fault is briefly analyzed, and the specific mathematical form of transient current is obtained. Then a qualitative analysis of the recorded waveform of fault in stages is carried out, Matlab simulation is used to verify the correctness of the analysis, and the variation rule of bus voltage under different grounding resistance is explored. Finally, several suggestions are proposed for the resonant earthed system to reduce the impact of single-phase faults.

Key words: single-phase grounding fault; resonant earthed system; intermittent grounding; Matlab simulation

0 引言

10 kV 配电网具有网架结构复杂、覆盖面广且运行环境多变等特点,作为电力系统与用户直接相连的重要环节,其安全稳定运行对提升供电企业经济效益和社会效益具有深远意义。电缆线路在城市配电网中已得到广泛应用,其发生单相接地故障的比例达 70%,分析单相接地故障在配电网研究具有重要意义^[1-5]。为满足电力系统不同供电需求,研究人员研究出了 3 种中性点接地方式^[6],同时对

不同接地方式下发生单相故障进行了详细的研究^[7-13]。

由于谐振接地系统的供电可靠性较高,故其在中国配电网中得到了广泛应用。发生单相接地故障时谐振接地系统虽可短时带故障运行,但快速精准定位故障并切除故障可避免故障影响范围扩大,保障设备及电网安全。目前已有较多文献分析单相接地故障并用于故障选线和定位。文献[14]提出了一种暂态选线和高精度稳态选线相结合的综合选线方案,克服了暂态信号不稳定、稳态信号不明显的缺陷,选线准确率高。文献[15]提出了判别金属性接

地和间歇性接地故障的新方法,一定程度上解决了能量法数值偏小、灵敏度不高的问题。文献[16]从理论上分析了谐振接地系统发生单相接地故障时的零序电压、零序电流变化规律,并提出谐振接地系统和中性点不接地系统单相接地时暂态特性相同。文献[17]对故障线路的零序电流波形和补偿方式进行分析,为研究小电流接地系统发生单相接地故障时选线和定位提供了参考。

下面首先对单相稳定接地和单相间歇性接地故障进行介绍;再对一起 10 kV 谐振接地系统连续故障的发展过程及实例波形进行分析,并通过 Matlab 仿真分析验证对实测波形分析的正确性;最后,提出了 10 kV 谐振接地系统的整改措施以减小单相接地故障的影响范围。

1 谐振接地系统单相接地故障

谐振接地系统指中性点经消弧线圈接地的系统。接地故障是电力系统中最常发生的故障,可分为稳定接地和间歇性接地。稳定接地故障主要可分为完全接地与不完全接地,其中:完全接地故障表现为接地电阻近似为 0,故障相电压为 0,非故障相电压升高为线电压值,也称为金属性接地故障;不完全接地故障常表现为电弧接地或高阻接地,接地电阻较大且接地点电压与接地电阻的大小有关,也称为非金属接地故障。在间歇性接地故障中,接地点电弧会出现间歇性重燃与熄灭现象,使电网运行方式瞬时多次改变,电磁能振荡加强。下面重点介绍对单相稳定接地和单相间歇性接地进行。

1.1 单相稳定接地故障

单相稳定金属性接地故障时,非故障线路的零序电流为

$$(3\dot{I}_0)_i = j3\omega C_i \dot{U}_0 \quad (1)$$

式中:\$(3\dot{I}_0)_i\$ 和 \$\dot{U}_0\$ 分别为非故障线路的零序电流和零序电压; \$C_i\$ 为非故障线路对地电容。由此可看出,非故障线路零序电流由本线路对地电容产生,零序电流固定超前零序电压约 \$90^\circ\$。

单相接地故障使母线电压中性点向故障相方向发生偏移,非故障相母线相电压升高至线电压值。

单相稳定金属性接地故障时,故障线路零序电流为

$$(3\dot{I}_0)_m = -\gamma \dot{I}_c + j3\omega C_m \dot{U}_0 - \frac{\dot{U}_0}{R} \quad (2)$$

$$\gamma = 1 - \frac{1}{3\omega^2 LC_\Sigma} \quad (3)$$

式中:\$(3\dot{I}_0)_m\$ 为故障线路零序电流;\$\gamma\$ 为补偿电网的脱谐度,与消弧线圈有关,消弧线圈过补偿方式下工作时,\$\gamma < 0\$;\$\dot{I}_c\$ 为全网电容电流;\$C_m\$ 为故障线路电容。通过分析可得出以下结论:1)单相接地故障时,流经消弧线圈的电流仅在故障线路故障相中流通,其两端电压为零序电压;2)零序电流在故障线路及非故障线路中均流通;3)故障线路中零序电流与零序电压的相位关系受消弧线圈的影响^[18-20]。

单相不完全接地故障时,故障相电流为

$$\dot{I}_{km} = \frac{3 \dot{U}_{km[0]}}{3R_g + 2Z_{\Sigma 1} + Z_{\Sigma 0}} \quad (4)$$

故障相电压为

$$\dot{U}_{km} = \dot{I}_{km} R_g \quad (5)$$

式中:\$R_g\$ 为过渡电阻;\$Z_{\Sigma 1}\$ 和 \$Z_{\Sigma 0}\$ 分别为正序阻抗和零序阻抗。高阻接地时,故障相电压不为 0,母线电压中性点不再向故障相方向偏移,非故障相电压大小也不再相等。

1.2 单相间歇性接地故障

间歇性接地故障是指在绝缘较弱的部位产生接地电弧的多次反复燃熄现象,具有短时多变、接地电流大的特点。故障若长时间发生将导致绝缘水平进一步降低,间歇性电弧将发展成稳定性电弧,最终发展为永久性接地故障。间歇性接地故障存在暂态过程,电流和电压也具有相应暂态特征。

对单相接地瞬间电容电流 \$\dot{i}_c\$ 进行暂态分析。

$$\begin{aligned} \dot{i}_c &= \dot{i}_{c,os} + \dot{i}_{c,st} = \\ &I_{cm} [(\omega_f/\omega \sin \varphi \sin \omega t - \cos \varphi \cos \omega_f t) e^{-\delta t} + \\ &\cos(\omega t + \varphi)] \end{aligned} \quad (6)$$

式中:\$\dot{i}_{c,os}\$ 和 \$\dot{i}_{c,st}\$ 分别为瞬时电容电流的瞬时自由振荡分量和稳态工频分量;\$I_{cm}\$ 为电容电流的幅值;\$\omega_f\$ 为瞬时自由振荡分量的角频率;\$\delta\$ 为自由振荡分量的衰减系数,其值为回路时间常数的倒数。由式(6)可知,瞬时电容电流的自由振荡分量与相角 \$\varphi\$ 有关,当 \$\varphi = \pi/2\$ 时,自由振荡分量最大;当 \$\varphi = 0\$ 时,其值最小。

同理可得瞬时电感电流 \$\dot{i}_L\$ 的表达式为

$$\dot{i}_L = I_{Lm} [\cos \varphi e^{1/\tau_L} - \cos(\omega t + \varphi)] \quad (7)$$

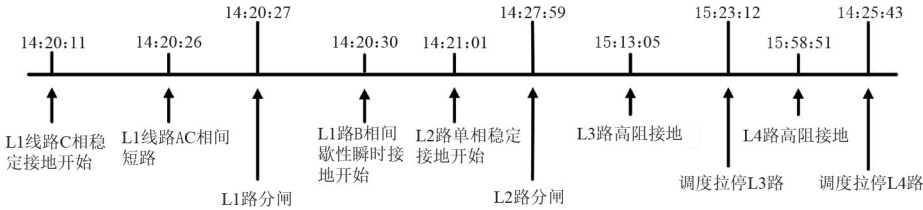


图 1 故障时序

式中: $I_{Lm} = U_{\varphi m} / \omega L$; τ_L 其为电感电路的时间常数。电感电流的幅值同样也与接地瞬间电源电压的相角 φ 有关,当 $\varphi = \pi/2$ 时,其值最小;当 $\varphi = 0$ 时,其值最大。

瞬时接地电流即为瞬时电容电流和瞬时电感电流之和,表达式为

$$i_d = i_c + i_L = (I_{cm} - I_{Lm}) \cos(\omega t + \varphi) + I_{cm}(\omega_f / \omega \sin \varphi \cdot \sin \omega t - \cos \varphi \cdot \cos \omega_f t) e^{\nu \tau_c} + I_{Lm} \cos \varphi e^{\nu \tau_L} \quad (8)$$

式中,瞬时接地电流由稳态分量与瞬时分量构成。其中第一项为稳态分量,即稳态电容电流与稳态电感电流幅值之差;瞬时分量为第二项电容电流的瞬时自由振荡分量与第三项电感电流的瞬时直流分量之和。

2 10 kV 谐振连续故障实例分析

2.1 故障前运行方式

该 110 kV 变电站主接线方式为内桥接线,有两台主变压器,均为三圈变压器 110 kV/10.5 kV/6 kV,容量为 40 MVA,故障前通过 110 kV 线路带两台主变压器供全站负荷;110 kV 并列运行,10 kV I、II 母处于分列运行状态,10 kV I 母有 5 条出线,均为电缆线路,CT 变比为 600/5。

2.2 故障发展过程分析

某日 14:20:00,10 kV L1 出线因地铁施工电缆受外力破坏,发生 C 相单相金属性接地故障,致使该 110 kV 变电站 10 kV I 段母线 A、B 相电压升高;14:20:26 进一步发展为 L1 出线 A、C 相短路故障,过流二段保护动作,二次动作值为 97 A。在系统过电压作用下,14:20:30,10 kV L2 线路的某一联络电缆中间接头 B 相绝缘薄弱点被击穿发生单相接地,一直持续至 14:27:59,调度拉停 L2 线路查找接地,接地信号消失,系统电压恢复正常。同样由于过电压作用,15:13:05,10 kV L3 线路发生高阻性单相接地;15:38:12 调度拉停 L3 线路,接地信号消

失。10 kV L4 线路某变压器电缆进线三叉处因长期受潮,有轻微的放电,绝缘逐渐在下降。因变电站 10 kV I 段母线出线间隔多次发生接地,在系统过电压的冲击下绝缘被击穿放电,16:13:51 发生单相非金属性接地故障;16:40:43 调度拉停 L4 路,接地信号消失。本次故障时序如图 1 所示。

2.3 实例故障波形分析

本次故障主要是由不同线路的单相接地导致的,图 2 至图 4 为故障录波的 10 kV I 母线电压波形(二次值)。根据波形特点可以初步判断图 2 发生了 C 相金属性稳定接地故障,由于消弧线圈对电容电流的补偿作用使得接地点处电流很小,母线故障相电压处于很低水平;图 3 发生了 B 相间歇性接地故障,接地电阻很小,属于金属性接地,由于系统的阻尼特性,使得 A、C 两相在电压恢复的过程中呈现不同的特性;图 4 发生了 A 相非金属性稳定接地故障,母线故障相电压并未下降太多,但有零序电压存在。

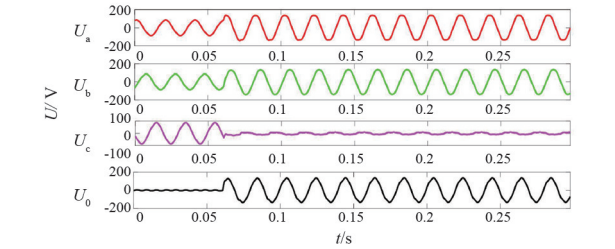


图 2 实测 C 相稳定接地故障母线波形

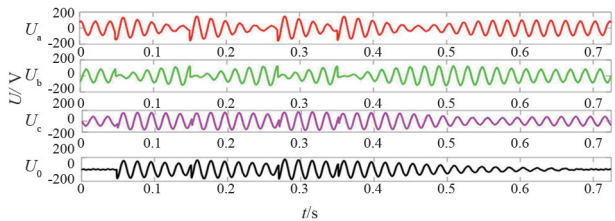


图 3 实测 B 相间歇性接地故障母线波形

3 单相接地故障 Matlab 仿真分析

为对上述结论进行验证,对 10 kV 谐振接地系

统进行仿真,模拟该系统在发生单相稳定接地故障(金属性接地)、单相间歇性接地(金属性接地)和单相非金属性接地故障时,系统母线电压的变化情况。仿真系统结构如图 5 所示。仿真模型中母线所带的 5 条出线均为电缆线路,长度依次为 12 km、5 km、15 km、10 km、7 km。使用三相故障模块设置故障类型以及故障发生的时间,假设故障均发生于 L1 线路距母线 10 km 处。消弧装置的电感值可以通过计算得出,约为 0.15 H。使用该值进行单相接地故障仿真,得出故障处电流小于 5 A,说明电感值选取较为合适。在电网实际运行中,录波器并未采集支路的电压电流,因此以母线电压波形为研究对象。

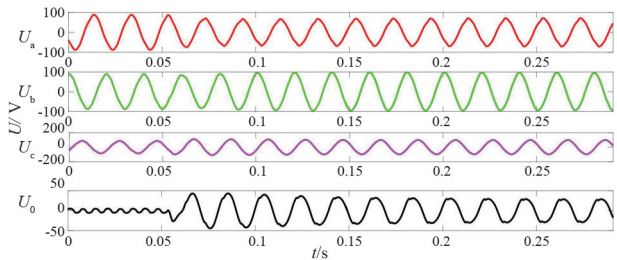


图 4 实测高阻接地母线波形

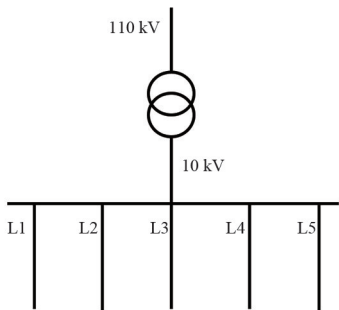


图 5 仿真系统结构

3.1 单相稳定接地故障仿真

通过三相故障模块设置单相稳定接地故障发生于 0.08 s,仿真总时长为 0.5 s,结果如图 6 所示,仿真效果与理论分析一致。当 L1 线路发生 B 相稳定接地故障时,母线 B 相电压瞬时降低,同时非故障

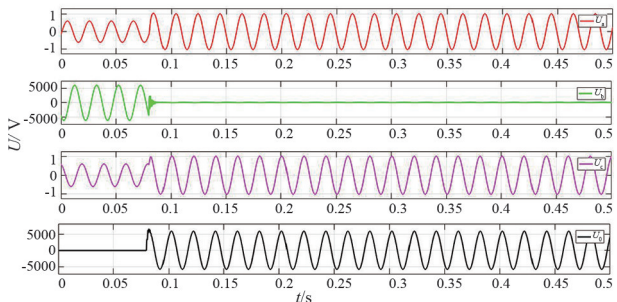


图 6 单相稳定接地故障母线波形

相电压幅值增大为线电压值,零序电压幅值为相电压值。此时线电压依然保持对称,因此谐振接地系统可短时带故障运行,有助于提高供电可靠性。

3.2 单相间歇性接地故障仿真

在三相故障模块中设置故障发生的时间以及故障持续时间,实现间歇性单相接地故障模拟。共设置了 3 次故障发生于 0.05 s、0.21 s、0.53 s,故障持续时间均为 2 ms,母线电压波形如图 7 所示。

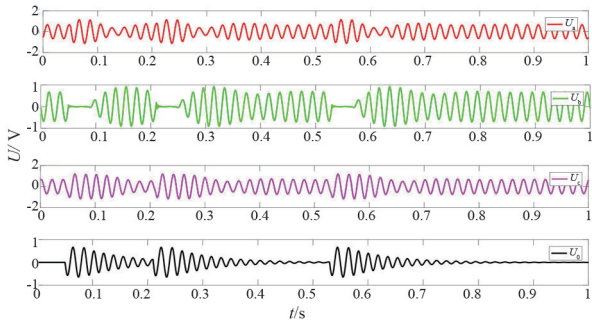


图 7 B 相间歇性接地故障母线电压波形

可以看出,当谐振接地系统发生间歇性接地故障时,故障相电压也被迅速拉低,待电弧熄灭(接地故障消失)后,故障相电压开始恢复,由于系统参数原因,电压恢复过程中存在超调的现象;同时零序电压开始衰减,其衰减的快慢与消弧装置电阻相关。图 8 为第二次间歇性接地故障时故障点处 B 相对地电流和零序电流的波形。

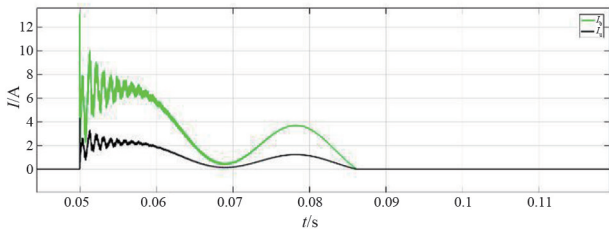


图 8 故障处 B 相对地电流波形

由图 8 可知,当发生接地故障时,故障相流过较大的高频对地电流,故障消失后对地电流也逐渐减小。瞬时分量的幅值随相角变化而改变,电容分量和电感分量可能相互叠加,给瞬时接地电流带来显著增幅。瞬时接地电流首半波的极性与零序电压首半波的极性之间存在 90°的固定关系,可利用此关系作为故障选线判据。

3.3 单相非金属性稳定接地故障仿真

通过三相故障模块在 0.3 s 时进行 3 次接地电阻分别为 100 Ω、400 Ω、800 Ω 的永久接地故障仿真,结果如图 9 所示。

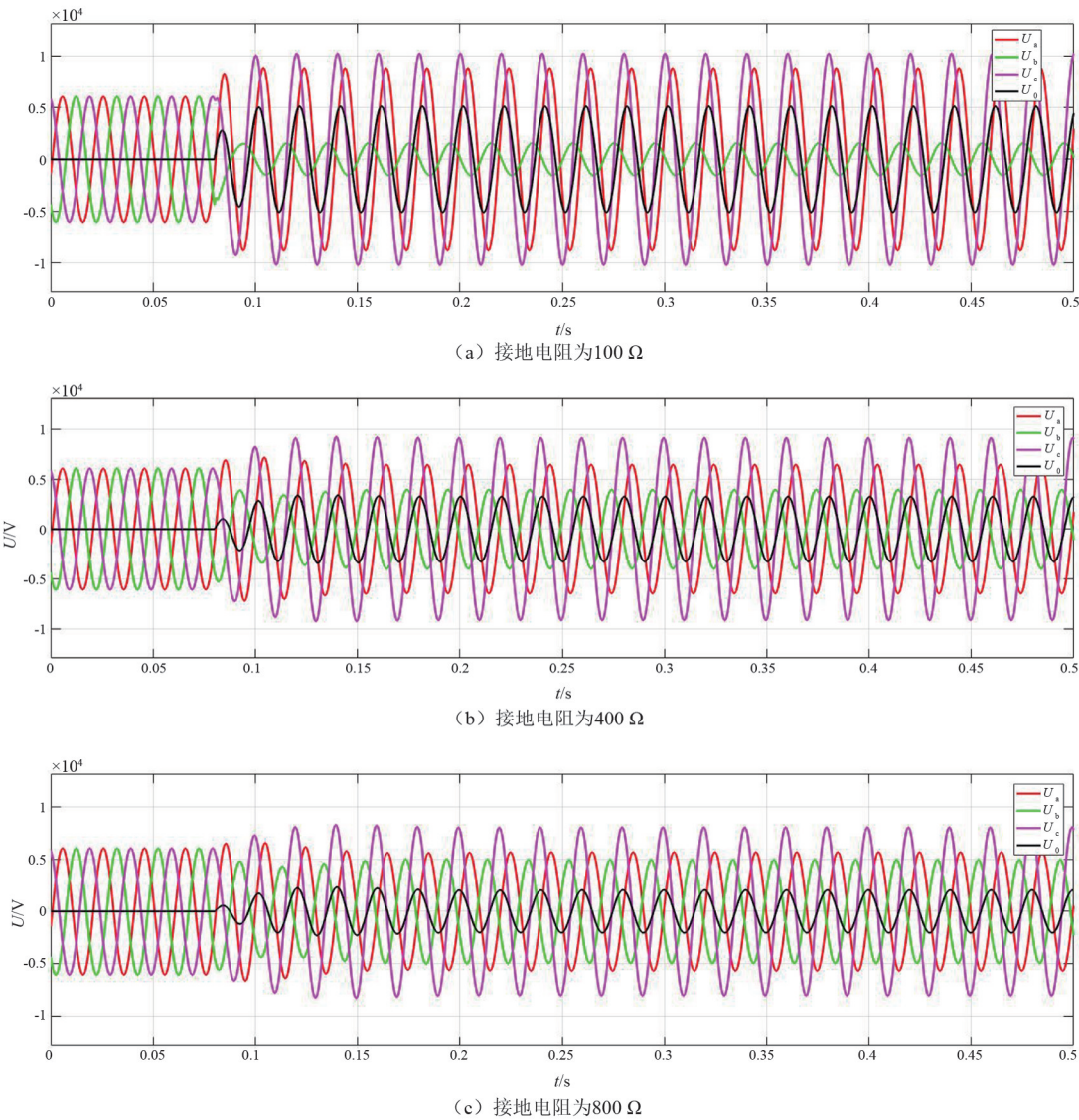


图 9 高阻接地时母线电压波形

由图 9 可知:发生单相接地故障时,随着 B 相接地电阻的增大,故障相剩余电压逐渐增大;非故障相电压的增幅呈减小趋势,且两非故障相电压的增幅不同。这是由于 B 相发生金属性短路,中性点电压会沿着 B 相发生偏移,此时 AC 两相电压是对称的;而过渡电阻的存在不仅会影响 B 相的故障电流、中性点故障电流以及中性点电压的大小,还会影响其相位,导致中性点的偏移不再沿原来 B 相的方向,使 AC 两相电压产生如图所示的现象。仿真结果与实测结果具有较好的一致性。

4 结 论

通过对一起 10 kV 系统长时间过电压引发的连续接地短路故障进行介绍,定性地分析了该故障的

录波波形;并利用 Matlab 搭建 10 kV 谐振接地系统,得出了对应故障情况下的母线电压,为以后研究小电流接地系统发生单相接地故障时选线和定位提供参考。针对 10 kV 谐振接地系统提出以下减小单相接地故障影响范围的建议:

- 1)使用合适的消弧线圈在线调挡方式,以应对间歇性接地故障;
- 2)选用适宜的故障选线策略,快速准确地切除故障线路,避免系统长时间过电压;
- 3)采用效果较好的绝缘监测装置对电缆的绝缘情况进行监视。
- 4)重视日常维护工作,在故障发生前做好预防措施与应急措施,以此来降低单相接地故障所产生的损失,确保配电网的安全、稳定运行。

参考文献

[1] 姜博,董新洲,施慎行. 基于单相电流行波的配电线路单相接地故障选线方法[J]. 中国电机工程学报, 2014,34(34):6216-6227.

[2] 董新洲,王珺,施慎行. 配电线路单相接地行波保护的原理与算法[J]. 中国电机工程学报,2013,33(10):154-160.

[3] 王珺,董新洲,施慎行. 配电线路单相接地行波保护的实现与试验[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13):172-178.

[4] 张慧芬,桑在中. 架空线单相断线接地复故障分析[J]. 中国电力,2013,46(2):65-71.

[5] 李帆,李阳林,张宇,等. 架空输电线路涉鸟故障分析与防范[J]. 中国电力,2019,52(10):92-99.

[6] 蒋文超. 中性点接地方式在电力系统中的作用及意义[J]. 中国科技博览, 2010,12(30):387-388.

[7] 薛永端,李娟,徐丙垠. 中性点经消弧线圈接地系统小电流接地故障暂态等值电路及暂态分析[J]. 中国电机工程学报,2015,35(22):5703-5714.

[8] 郭丽伟,薛永端,徐丙垠,等. 中性点接地方式对供电可靠性的影响分析[J]. 电网技术,2015,39(8):2340-2345.

[9] 张利,杨秀媛,王丽婕,等. 中性点不接地系统单相接地故障定位方法[J]. 电网技术,2017,41(12):4069-4076.

[10] 余斌,尹项根,朱维钧,等. 复合接地消弧方式接地故障分析及保护对策[J]. 中国电力,2018,51(12):72-79.

[11] 蔡德福,施通勤,周鲲鹏,等. 鄂西电网受灾原因及抗灾能力提升措施[J]. 中国电力,2019,52(5):96-103.

[12] 阎博,张昊,郭子明,等. 基于多源数据融合的电网故障

障综合分析 with 智能告警技术研究与应用[J]. 中国电力,2018,51(2):39-46.

[13] 贾鹏飞. 基于 Matlab 仿真的谐振接地系统单相接地故障分析[J]. 现代电子技术,2012(23):200-202.

[14] 董晓刚,邵玉槐,郑宇明,等. 消弧线圈接地系统单相故障选线的研究[J]. 太原理工大学学报,2005,22(2):75-77.

[15] 张新一. 电力系统间歇性接地故障识别方法的探究[J]. 山东商业职业技术学院学报,2018,91(2):99-102.

[16] 李辉,唐轶,孙常青. 谐振接地系统单相接地故障仿真分析[J]. 工矿自动化,2012(1):51-55.

[17] 陈景龙,王聪. 小电流接地系统单相接地故障分析[J]. 山东电力技术,2017,34(7):32-36.

[18] 林林,金震. 配电网单相接地故障定位研究[J]. 中国科技信息,2012,20(23):98-99.

[19] 要焕年,曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京:中国电力出版社,2009.

[20] 刘明岩. 配电网中性点接地方式的选择[J]. 电网技术,2004,28(16):86-89.

作者简介:

卫佳奇(1992),女,工程师,研究方向为电力系统继电保护;

表明哲(1985),男,高级工程师,研究方向为电力系统继电保护及信号处理在电力系统中的应用;

陈翔(1991),男,工程师,研究方向为电力系统继电保护及电力设备运行维护;

令狐静波(1993),男,工程师,研究方向为电力系统继电保护及二次系统运行状态评估;

曹柯(1985),男,工程师,研究方向为电力系统继电保护;

许立志(1981),男,工程师,研究方向为电力系统继电保护。

(收稿日期:2022-08-12)

(上接第 16 页)

[15] Hitachi Energy. Hitachi Energy collaborates with Eversource to install the first Econiq™ 420-kilovolt circuit-breaker in the US[EB/OL].(2022-8-31)[2022-12-10].<https://www.hitachienergy.com/news/press-releases/2022/08/hitachi-energy-collaborates-with-eversource-to-install-the-first-econiq-420-kilovolt-circuit-breaker-in-the-us>.

[16] Korea Electric Newspaper. LS Electric won Korea's first 170 kV eco-friendly gas insulated switchgear business [EB/OL].(2022-10-18)[2022-12-10].<https://www.electimes.com/news/articleView.html?idxno=309969>.

[17] S&C Electric Company. S&C Electric Company Introduces New Sustainable Switchgear Design[EB/OL].(2021-06-14)[2022-12-10].<https://www.sandc.com/en/news/sc-news/sc-electric-company-introduces-new-sustainable-switchgear-design>.

[18] 肖淞,石生尧,林婧桐,等.“碳达峰、碳中和”目标下高压电气设备中强温室绝缘气体 SF₆ 控制策略分析[J/OL].中国电机工程学报:1-23[2022-12-29].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20220413.0835.002.html>.

[19] 厦门华电开关有限公司.厦门华电 Airing 环保型负荷开关方案助力云南曲靖电网打造“绿色电网”[EB/OL].(2021-11-16)[2022-12-10].<https://www.huadianswg.com.cn/news/766.html>.

[20] 中国电力网.国内首台(套)110 千伏 C4 环保气体 GIS 设备在上海投运[EB/OL].(2022-12-07)[2022-12-10].<http://www.chinapower.com.cn/dww/sbdt/20221207/178540.html>.

作者简介:

靳梦磊(2000),男,硕士研究生,研究方向为环保绝缘气体。

(收稿日期:2022-12-30)

一起 110 kV 电流互感器跳闸事故原因分析

刘圆方,国金明,陆晓彬,胡 林,郑荣锋,吴拓剑,袁瑞宜
(国网四川省电力公司成都供电公司,四川 成都 610093)

摘要:文中结合一起 110 kV 电流互感器一次放电导致变压器及母线跳闸事故展开分析,通过对事故互感器的检查、试验,结合现场检查情况和故障录波对事故动作逻辑进行反复推演分析,判断出事故原因,还原事故经过,并提出合理的整改建议。

关键词:油浸式电流互感器;金属放电;事故分析

中图分类号:TM 452 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2023)04-0091-04

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230417

Cause Analysis of A 110 kV Current Transformer Tripping Accident

LIU Yuanfang, GUO Jinming, LU Xiaobin, HU Lin, ZHENG Rongfeng, WU Tuojian, YUAN Ruiyi
(State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610093, Sichuan, China)

Abstract:A transformer and bus tripping accident caused by a single discharge of 110 kV current transformer is analyzed. Through the inspection and test of the faulty transformer, and combined with the on-site inspection and fault recording, the accident action logic is repeatedly deduced and analyzed, the cause of the accident is judged, the accident process is restored, and the reasonable improvement suggestions are put forward.

Key words:oil-immersed current transformer; metal discharge; accident analysis

0 引 言

电流互感器作为电力系统中重要的一次设备,起着计量、保护等作用,其运行的可靠性直接关系到电网能否安全稳定运行^[1]。电流互感器发生故障时不但可能造成自身损坏,还会引起保护动作、设备跳闸,造成电网安全事故^[2]。因此,对于电流互感器的故障诊断工作是非常重要的,应当通过科学的诊断方式找到故障发生的原因并及时排除故障,使电力系统恢复正常运行,同时须采取合理措施避免事故再次发生。下面就某变电站一起 110 kV 电流互感器一次放电跳闸事故进行分析。

1 事故概况

事故前,220 kV 某变电站 110 kV 部分采用双母线接线,运行出线 11 回。站内共两台主变压器

(2 号、3 号)高中压侧并列运行,220 kV、110 kV 分段断路器在合位,35 kV 分段断路器在分位。3 号主变压器高压侧中性点不接地,中压侧中性点接地,中压侧零序 CT 变比为 400/5。103 间隔油浸式电流互感器型号为 LB6-110W3,2020 年 3 月出厂,2021 年 1 月投运,安装于断路器靠近 3 号主变压器侧(如图 1 所示),变比为 $2\times 800/5$,一次侧采用并联接线方式运行,即运行变比为 1600/5。

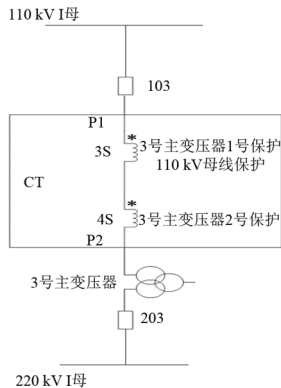


图 1 103 电流互感器运行接线方式

2021 年 2 月 23 日 15:10:50.420 时,3 号主变压器 110 kV 侧 103 CT 发生击穿故障,110 kV 母线保护动作,3 ms 后跳开运行于 110 kV I 母的 7 个间隔;68 ms 后 3 号主变压器 2 号保护比率差动动作跳开变压器另外两侧的 203 断路器、303 断路器。保护动作时序如图 2 所示。

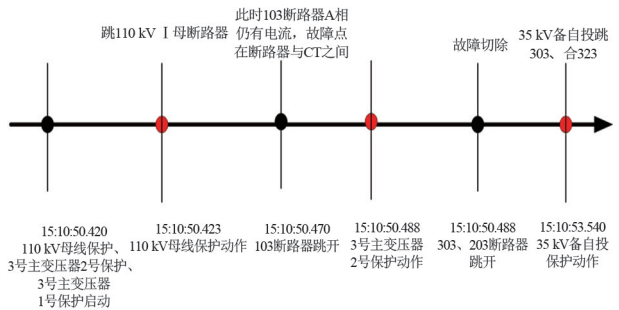


图 2 保护动作时序

2 检查诊断

2.1 外观检查

现场停电检查发现 103 电流互感器 A 相 P1 接线端有明显放电拉弧痕迹,且放电痕迹经瓷套延续至 CT 底座,如图 3、图 4 所示,在放电轨迹上对应的瓷套伞群内附着有疑似铜点。同时 P2 级端子及等电位端子附件也有电弧灼伤痕迹。油位观察窗出现裂纹,但油位正常,膨胀器未发现异常凸起,除外部放电痕迹外,外观完好。



图 3 103 电流互感器 P1 端接线座放电痕迹

2.2 试验诊断

2.2.1 化学试验

对该站 103 电流互感器取油样后进行色谱分析。结果显示,A 相乙炔含量为 2.7 $\mu\text{L/L}$ (标准值为 $\leq 2 \mu\text{L/L}$),总烃含量为 184.6 $\mu\text{L/L}$ (标准值为

$\leq 100 \mu\text{L/L}$)。B、C 两相均未检测出乙炔,总烃含量分别仅为 5.2 $\mu\text{L/L}$ 、6.4 $\mu\text{L/L}$ 。三比值结果为 0、2、0,属低温过热故障。色谱检测数据如表 1 所示。检测结果判断依据为 DL/T 722—2014《变压器油中溶解气体分析和判断导则》^[3]。



图 4 103 电流互感器底座放电痕迹

表 1 103 电流互感器油色谱数据

检测参数	A 相	B 相	C 相
检测日期	2021-02-25	2021-02-25	2021-02-25
脱气量/mL	1.5	1.4	1.2
H ₂ 含量/($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)	18.5	9.6	9.7
CO 含量/($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)	31.9	35.6	35.5
CO ₂ 含量/($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)	172.4	208.4	234.9
CH ₄ 含量/($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)	22.0	3.7	6.0
C ₂ H ₄ 含量/($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)	29.8	未检出	未检出
C ₂ H ₆ 含量/($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)	130.1	未检出	0.4
C ₂ H ₂ 含量/($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)	2.7	未检出	未检出
总烃含量/($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)	184.6	5.2	6.4
结论	不合格	正常	正常

2.2.2 电气试验

对 103 电流互感器 A 相进行电气试验诊断,实测其介质损耗为 0.286%,电容量为 762.9 pF,绝缘电阻测试以及变流比和二次直流电阻测试数据如表 2、表 3 所示。各项电气试验数据均合格。

表 2 电气试验诊断结果

试验部位	绝缘电阻/M Ω
一次对二次及地	$\geq 10\ 000$
末屏	≥ 2500
二次绕组对地	≥ 2500

2.2.3 故障录波

故障发生后,110 kV 母线保护和 3 号主变压器保护同时启动,如图 2 所示。3 ms 后,110 kV 母线保护首先动作跳开 110 kV I 母相关断路器。从图 5 可以看出 T2 时间点(即 110 kV 母线保护动作使 103 断路器跳开后)B、C 相电流变为 0,但是 A 相故

障电流并未开断。在 T2 时间点 68 ms 后,3 号主变压器差动保护动作跳开主变压器另外两侧断路器后故障电流消失。

表 3 A 相变流比及直流电阻测试

试验部位	变流比	直流电阻/mΩ
1S1-1S2	159.98(减极性)	139.2
1S1-1S3	319.62(减极性)	331.2
2S1-2S2	159.69(减极性)	139.7
2S1-2S3	318.15(减极性)	332.9
3S1-3S2	318.34(减极性)	643.5
4S1-4S3	318.53(减极性)	644.5
5S1-5S2	318.80(减极性)	644.6

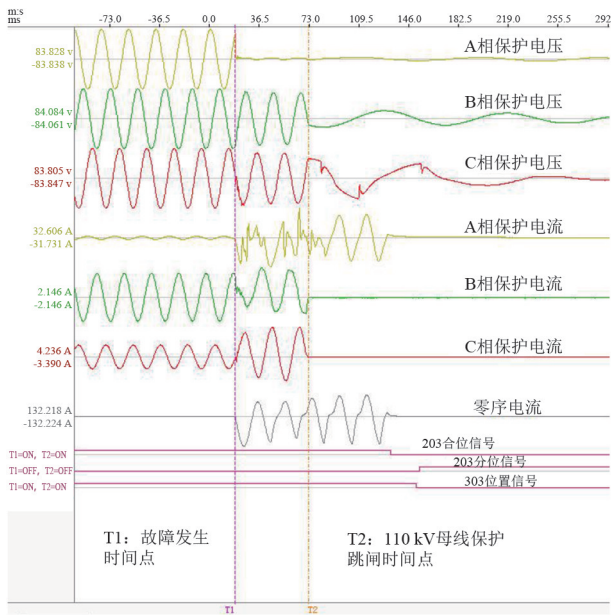


图 5 3 号主变压器中压侧故障录波

3 事故原因分析

依据电气试验结果及外观检查,初步排除互感器内部放电故障。根据图 5 故障录波分析,判断初始故障点应位于 103 电流互感器和断路器之间,在母线保护的 动作区内、主变压器保护的 动作区外 (见图 1),故在母线保护动作后,故障电流无法切除。由图 5 中 103 断路器跳闸后故障波形的最后两个周期分析,T2 时间点后:中压侧 A 相二次故障电流峰值约为 32 A,依据变比计算一次电流为 10 240 A;3 号主变压器中压侧中性点二次电流峰值约为 130 A,依据变比计算一次电流为 10 400 A。这与 A 相故障电流基本匹配,且 2 号主变压器录波无异常,判断中压侧系统无其他可分流的故障点,确定 103 断路器

CT 处故障为唯一故障点。结合图 2 外观检查判断,初始故障为 P1 端对地放电。

从故障点来看,由于故障位于主变压器保护死区范围,主变压器保护装置不应动作。经外观检查发现了 P2 处有少量放电痕迹,因此判断当故障发生后,P2 与 P1 接线板间发生了间歇性弧光短路,如图 6 所示,导致流过 CT 的电流被分流,使得主变压器保护感受到差流而动作。



图 6 103 电流互感器 P2 端放电痕迹

后续再次检查现场,发现事故互感器相邻 2 m 左右的半高层隔离开关传动连杆处有放电痕迹,如图 7 所示。同时,观察到在事故互感器接线座上残余有少量铜丝状物体,如图 8 所示;事故互感器下方地面各处散落有金属铜丝,如图 9 所示;现场存在大量鸟类,如图 10 所示。

判断整个事故过程如下:外界原因(如鸟类、大风等)导致金属铜丝状物体搭至 103 电流互感器 A 相与相邻的半高层隔离开关垂直传动拉杆间,引



图 7 传动连杆处放电痕迹



图 8 103 电流互感器 A 相 P1 接线座上残余铜丝



图 9 地面各处散落铜丝



图 10 设备上方半高层存在大量鸟类

起 P1 端对拉杆放电(见图 7)而启动 110 kV 母线保护。在此过程中,弧光闪烁至 P2 端,导致 P1、P2 间形成外部短暂通路(见图 6)而启动了 3 号主变压器保护。短暂放弧过程后,铜丝部分烧损融化喷溅至 P1 端接线座附近以及瓷套表面各处。同时,铜丝烧融后长度变短,在重力作用下向下飘落,掉至 A 相电流互感器箱沿,导致 P1 端对箱沿上部放电(见图 4),直至 3 号主变压器差动保护动作切断故障电源。

在整个放电过程中,P1、P2 接线座产生较高温度,可以观察到螺栓及接线板部分融化痕迹(见图 3、图 6);由于金属导热性较好,热量传导至 CT 内部导致内部低温过热,产生分解物。这符合油化试验分析结果。

4 处理及防范措施

为了防止类似事故再次发生,提高设备故障预防能力,保证电力系统安全稳定运行,提出如下防范措施及建议:

- 1)加强对常规户外设备巡视,特别注意场地上方设备附件及导体是否有松动情况。
- 2)对特殊环境下的户外变电站,增加驱鸟装置,增加巡视次数,注意设备上方(尤其半高层设备)是否存在异物及鸟窝等。
- 3)当电流互感器安装于断路器靠主变压器侧时,若断路器与电流互感器间发生故障,由于该故障点在主变压器保护动作范围外,因此母线保护动作跳开断路器却无法阻止主变压器继续提供故障电流,存在无法切断故障电源、扩大事故范围的可能。对于严重鸟害或环境污染等运行环境下的变电站,建议将电流互感器安装在断路器靠母线侧,以减少保护动作死区^[4]。

参考文献

- [1] 刘晓波,李月文,陈志勇,等. 220 kV 电流互感器故障分析[J]. 内蒙古电力技术, 2019,39(2):84-88.
- [2] 王卓然,赵军,冯建萍,等. 220 kV 电流互感器故障分析及处理[J]. 河北电力技术, 2017,36(2):44-46.
- [3] 电力行业电力变压器标准化技术委员会. 变压器油中溶解气体分析和判断导则: DL/T 722—2014[S]. 北京:中国电力出版社,2015.
- [4] 何得澜. 电流互感器安装方向及二次绕组分配应用[J]. 科技风, 2018(32):180.

作者简介:

刘圆方(1995),男,助理工程师,主要从事变电设备检修、安装工作;

国金明(1983),男,技师,主要从事变电设备检修、安装工作。

(收稿日期:2022-09-25)

欢迎投稿

欢迎订阅

天府永兴实验室

TIANFU YONGXING LABORATORY

新型电力系统研究中心



**面向国家战略
紧扣四川特色
助力新型电力系统从图景到现实**

· 研究中心围绕能源电力碳中和主战场开展新型电力系统的理论研究、技术创新、平台建设、人才培养。探索低碳绿色新型电力系统的四川解决方案。

交流合作
加入我们

028-60667707
office@tfyxlaboratory.cn

公益



低碳环保 绿色城市

文明城市 / 你我共行

