

四川电力技术

SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY

第47卷第5期

2024年10月

四川省电机工程学会

四川电力科学研究院

二零二四年
第四十七卷
第五期



ISSN 1003-6954



《四川电力技术》公众号



《四川电力技术》官网

- 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

非接触供（取）电技术及其应用 征稿启事

随着应用需求的发展，传统接触供电（导线或滑动接触）方式的弊端日益凸显，特别是在一些恶劣、潮湿、高压等极端环境下，接触供（取）电方式难以保障可靠灵活的电能供给，存在电火花、漏电触电、磨损磨耗、绝缘击穿等危险。基于磁场、电场、超声波和微波等方式传递能量的非接触供(取)电技术，为解决接触供电的弊端提供了可行方案。经过几十年的发展，非接触供（取）电技术在消费电子、医疗设备、家用电器、机器人、传感器、交通运输、智能电网、航空航天等领域得到大力发展与广泛应用，市场前景广阔。目前，国内外学者在非接触供(取)电技术的基础理论、关键技术和产业应用等方面开展了广泛的研究，并取得一定的突破。

为了更好地促进非接触供（取）电相关技术的应用与发展，《四川电力技术》特邀西南交通大学**麦瑞坤教授**、西南交通大学**陈阳副研究员**、国家电网有限公司**武勇高级工程师**作为特约主编，主持“非接触供(取)电技术及其应用”专题，希望与作者和广大读者一起探讨该领域国内外研究的发展趋势、应用场景和技术创新。诚邀从事相关研究的专家学者和科研人员积极投稿。

一、征稿方向（包括但不限于）

- (1) 非接触供(取)电新原理与新方法
- (2) 非接触供(取)电技术的补偿拓扑、耦合机构、建模、控制等
- (3) 复杂极端环境下非接触供(取)电技术
- (4) 非接触供(取)电在新型电力系统中的应用
- (5) 电气化交通非接触供(取)电
- (6) 物联网/传感器的非接触供(取)电

二、截止时间

2024年12月31日截稿，并在《四川电力技术》择期刊出。

三、投稿要求

- (1) 论文应具有原创性，未公开发表，未一稿多投，不涉及署名争议，不涉及侵犯他人知识产权和泄露国家机密的内容，作者对论文内容的真实性和客观性负责。
- (2) 摘要250~300字为宜，须包含四要素，即目的、方法、结果、结论，同时应着重说明文章的创新点。
- (3) 论文引言中研究目的清晰明确，详细介绍国内外研究背景，对现有其他研究者的工作进行客观的评述；阐述自己的观点，并对自己的研究思路做一总体介绍。论文研究设计和方法叙述清楚，数据合理并被正确地分析和解释；比较所提出的方法和现有方法的优缺点。
- (4) 正文部分要求层次清晰、重点突出、论述严谨、文字简练，避免长篇公式推导，字数以不超过6000字(包括图表)为宜。
- (5) 结论部分应概括文章研究工作，给出创新性、指导性结论。
- (6) 来稿请用Word排版，格式、摘要、作者信息请参考《四川电力技术》投稿网站首页论文模板。
- (7) 请保留论文图片、曲线和表格原始文件，必要时提交。

四、投稿方式

请登录《四川电力技术》投稿网站：<http://scdljs.ijournals.cn/scdljs/home>注册作者用户名和密码进行投稿，投稿栏目请选择“**非接触供(取)电技术及其应用**”专题。

五、投稿联系人

陈老师：15198096957

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 建
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
唐万斌 梅生伟 黄 琦
董秀成 蒋兴良 韩晓言
廖学静 滕予非
秘 书 贺含峰
程文婷

四川电力技术

双月刊 1978 年创刊

中国标准连续出版物号:

ISSN 1003-6954

CN 51-1315/TM

2024 年第 47 卷第 5 期(总 293 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 * 112 * zh * P * ¥ 12.00 * 3000 * 16

* 2024-10

目 次

· 新型电力系统 ·

基于模型预测控制的全功率变速抽水蓄能与 SVG 功率协调控制

..... 潘鹏宇,丁理杰,王 珍,史华勃,陈 刚,张远志,查晓明,孙建军(1)
主从结构微电网并网/孤岛运行模式平滑切换控制策略

..... 陈仁钊,陈 杨,夏 岩,杨屹立,石进辉,李惠祝,张 蕊(8)

基于改进沙猫群算法的微电网日前优化调度

..... 朱赵晴,方岑璐,夏焰坤,谢 波,孟志高,陈建华(14)

一种区块链驱动调控云数据缓存的优化算法

..... 谢 江,郭 琳,张 晶,黄思婕,李发均,唐翰源(21)

· 环保型绝缘气体与设备 ·

SF₆/N₂ 混合气体 GIS 三相共箱母线接头发热时温度分布及诊断方法的仿真研究

..... 张丕沛,赵晓楠,丛龙琦,郭晨瑞(27)

· 电力经济技术 ·

“双碳”目标下火电厂碳核算主要方法综述

..... 刘雪原,陈玉敏,魏 阳,孟 拓,刘 悦,周 奇,向银太,李 茜(34)

基于存量煤电的抽水蓄能电站容量配置与成本收益分析模型

..... 何璞玉,张玉鸿,焦 杰,任文诗,张冀嫒(44)

· 电力运检技术 ·

基于时频域瞬时特征的配电网弧光接地故障检测

..... 张 华,苏学能,任 杰,张真源(53)

基于改进层次分析法和数据挖掘的架空输电线路极端灾害风险评估模型

..... 周 林,彭宇辉,刘 暘,任成君,孙文成,张亚迪,张 杰,陈 钊,李卓雯(61)

基于混合神经网络的交直流混联电网交流线路故障定位

..... 陈伟哲,宋 弘,吴 浩,宋匡玮,田海鹏,漆梓渊(66)

电缆终端搪铅涡流检测信号小波去噪参数选择方法

..... 唐 军,邵千秋,任 亮,陈 莉,张 睿,王然然,邓 瑞,冯 伟(76)

送端换流母线电压上升影响受端换相的机理及抑制措施

..... 马 星,尹纯亚,王利超,马 健,糟伟红,段 玉(80)

基于油压监测的电力少油设备状态检修技术探讨及应用

..... 吴晓晖,汪晓华,陈 凌,舒 萍,滕予非,龙震泽,田倩倩(86)

· 经验交流 ·

沟通三跳接点引起的断路器控制回路隐性故障及其改进措施

..... 王 可,王利平,蒋星燃,王 丹(93)

基于虚实结合型仿真平台的水电机组试验研究

..... 卢旭东,何 璇,汤 雨,陈金保,肖志怀(98)

变电站一键顺控功能仿真验证平台构建及应用

..... 丁 禹,韩忠晖,吴晋波,洪 权,刘志豪,肖遥遥(106)

CONTENTS

• New Power System •

Coordinated Power Control of Variable Speed Pumped Storage Unit with Full-size Converter and SVG Based on Model Predictive Control
..... PAN Pengyu, DING Lijie, WANG Zhen, SHI Huabo, CHEN Gang, ZHANG Yuanzhi, ZHA Xiaoming, SUN Jianjun(1)

Smooth Switching Control Strategy for Grid-connected and Islanding Operation Mode of Microgrid Based on Master-slave Structure
..... CHEN Renzhao, CHEN Yang, XIA Yan, YANG Yili, SHI Jinhui, LI Huizhu, ZHANG Rui(8)

Day-ahead Optimal Scheduling of Microgrid Based on Improved Sand Cat Swarm Optimization
..... ZHU Zhaoqing, FANG Qinlu, XIA Yankun, XIE Bo, MENG Zhigao, CHEN Jianhua(14)

An Optimization Algorithm for Data Caching of Blockchain-driven Dispatching Control Cloud
..... XIE Jiang, GUO Ling, ZHANG Jing, HUANG Sijie, LI Fajun, TANG Hanyuan(21)

• Environmentally Friendly Insulating Gases and Equipment •

Simulation Study on Temperature Distribution and Diagnostic Method of Three-phase Enclosed Bus Joint Heating of GIS with SF₆/N₂ Gas Mixture
..... ZHANG Pipei, ZHAO Xiaonan, CONG Longqi, GUO Chenrui(27)

• Electric Power Techno-Economics •

Overview of Carbon Accounting Methods for Thermal Power Plants under Dual Carbon Target
..... LIU Xueyuan, CHEN Yumin, WEI Yang, MENG Tuo, LIU Yue, ZHOU Qi, XIANG Yintai, LI Qian(34)

Capacity Allocation and Cost-benefit Analysis Model of Pumped Storage Power Station Based on Stocked Coal Power
..... HE Puyu, ZHANG Yuhong, JIAO Jie, REN Wenshi, ZHANG Jiyuan(44)

• Operation and Maintenance Technology •

Arc Grounding Fault Detection in Distribution Network Based on Transient Features in Time-frequency Domain
..... ZHANG Hua, SU Xueneng, REN Jie, ZHANG Zhenyuan(53)

An Extreme Disaster Risk Assessment Model for Overhead Transmission Lines Based on Improved Analytic Hierarchy Process and Data Mining
..... ZHOU Lin, PENG Yuhui, LIU Yang, REN Chengjun, SUN Wencheng, ZHANG Yadi, ZHANG Jie, CHEN Zhao, LI Zhuowen(61)

AC Line Fault Location for AC/DC Hybrid Power Grids Based on Hybrid Neural Networks
..... CHEN Weizhe, SONG Hong, WU Hao, SONG Kuangwei, TIAN Haipeng, QI Ziyuan(66)

Wavelet Denoising Parameter Selection Method for Eddy Current Detection Signals of Lead Sealings of Cable Terminal
..... TANG Jun, SHAO Qianqiu, REN Liang, CHEN Li, ZHANG Rui, WANG Ranran, DENG Rui, FENG Wei(76)

Mechanism and Suppression Measures for Receiving-end Commutation Affected by Voltage Rise of Sending-end Converter Bus
..... MA Xing, YIN Chunya, WANG Lichao, MA Jian, ZAO Weihong, DUAN Yu(80)

Discuss on Condition-based Maintenance Technology of Oil Less Equipment Based on Oil Pressure Monitoring and Its Application
..... WU Xiaohui, WANG Xiaohua, CHEN Ling, SHU Ping, TENG Yufei, LONG Zhenze, TIAN Qianqian(86)

• Experience Sharing •

Hidden Failure of Circuit Breaker Control Circuit Caused by GST Connection and Its Improvement Measures
..... WANG Ke, WANG Liping, JIANG Xingran, WANG Dan(93)

Experimental Study on Hydropower Units Based on Virtual and Real Integrated Simulation Platform
..... LU Xudong, HE Xuan, TANG Yu, CHEN Jinbao, XIAO Zhihuai(98)

Construction and Application of Simulation Verification Platform for One-key Sequence Control Function of Substation
..... DING Yu, HAN Zhonghui, WU Jinbo, HONG Quan, LIU Zhihao, XIAO Yaoyao(106)

基于模型预测控制的全功率变速抽水蓄能与SVG功率协调控制

潘鹏宇^{1,2}, 丁理杰^{1,2}, 王 珍³, 史华勃^{1,2}, 陈 刚^{1,2}, 张远志³, 查晓明³, 孙建军³

(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. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072)

摘要:全功率变速抽水蓄能机组(FSC-VSPSU)通过背靠背变流器接入电网,具有功率快速可调、有功无功独立解耦的优点,在近年来得到了广泛关注。由于新能源场站具有波动性,通常配置静止无功发生器(SVG)来维持系统电压稳定。针对SVG易出现容量不足的状况,研究FSC-VSPSU与SVG功率协调控制。分析了FSC-VSPSU与SVG无功调节特性,提出了基于模型预测控制的功率协调控制策略。采用模型预测控制协调响应时间不同的FSC-VSPSU与SVG,通过电压灵敏度计算无功和电压的关系,建立以并网点电压、FSC-VSPSU电压偏差最小以及SVG无功储备最大为目标的模型预测控制(MPC)问题数学模型,求解得到FSC-VSPSU与SVG功率参考值。通过仿真验证了所提模型预测控制的可行性以及其相较于下垂控制的优越性。

关键词:全功率变速抽水蓄能机组; SVG; 模型预测控制; 功率协调

中图分类号: TM 46 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2024)05-0001-07

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20240501

Coordinated Power Control of Variable Speed Pumped Storage Unit with Full-size Converter and SVG Based on Model Predictive Control

PAN Pengyu^{1,2}, DING Lijie^{1,2}, WANG Zhen³, SHI Huabo^{1,2}, CHEN Gang^{1,2},
ZHANG Yuanzhi³, ZHA Xiaoming³, SUN Jianjun³

(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. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China)

Abstract: The variable speed pumped storage unit with full-size converter (FSC-VSPSU) is connected to power grid through back-to-back converters, which has the advantages of fast power adjustment and independent decoupling of active and reactive power, so it has attracted wide attention in recent years. Due to the volatility of new energy station, it is usually equipped with static var generator (SVG) to maintain the stability of system voltage, but SVG is also prone to insufficient capacity. Aiming at this situation, the coordinated power control of FSC-VSPSU and SVG is studied, the reactive power regulation characteristics of FSC-VSPSU and SVG are analyzed, and a coordinated power control strategy based on model predictive control (MPC) is proposed. Model predictive control is used to coordinate FSC-VSPSU and SVG with different response times, and the relationship between reactive power and voltage is calculated by voltage sensitivity. A mathematical model of MPC problem is established with the goal of minimum voltage deviation of FSC-VSPSU and point of common coupling, and maximum SVG reserve, and then the power reference values of FSC-VSPSU and SVG are solved. The feasibility of the proposed model predictive control and its superiority over droop control are verified by the simulation.

Key words: variable speed pumped storage unit with full-size converter; static var generator; model predictive control; power coordination

0 引言

随着风电、光伏等可再生能源发电的大规模发展,新能源在电网中的装机容量比例逐年提高,然而其出力间歇性与波动性造成的电能质量、电压和频率问题给电网运行带来巨大的挑战。多能互补发电技术成为有效解决上述问题的主要方法,包括风光储互补、风光水互补、风光火互补、水风光蓄互补等^[1]。抽水蓄能作为目前应用最广、技术最为成熟的可再生能源储能技术,对电网的调峰填谷、旋转备用等发挥巨大的作用^[2]。其中全功率变速抽水蓄能机组(variable speed pumped storage unit with full-size converter, FSC-VSPSU)通过背靠背交直变流器接入电网,具有功率快速可调、有功无功独立解耦的优点,在多能互补技术中具有一定优势,被广泛关注^[3]。由于大型新能源场站一般在较偏远地区,接点处的电网较弱,其间歇性发电易引起较大的电压波动。为提高新能源并网电压稳定性,在风光蓄互补发电技术应用中,通过协调抽水蓄能机组与新能源场站配置的静态无功发生器(static var generator, SVG)^[4-5]的无功功率输出来对系统进行无功补偿是一种有效方法。

现有无功补偿的研究主要针对单个无功补偿设备,如 SVG、抽水蓄能机组等。如文献[6]研究了 SVG 控制结构模型及其在双馈风电场中容量的选取以及主要参数的确定;文献[7]研究了 SVG 在直驱风电场的无功补偿;文献[8]考虑了电网正常和故障情况下的无功潮流特性,探讨了 SVG 在风电场无功功率控制中的作用;文献[9]对抽水蓄能电站运行特性进行了分析,提出了基于励磁电压控制器的抽水蓄能机组无功电压补偿;文献[10]分析了 FSC-VSPSU 基本结构和控制策略,提出了变流器无功优先控制策略;文献[11]对抽水蓄能机组无功调节能力进行了分析,阐述了抽水蓄能机组在抽水工况下无功调节的试验方法和结果。上述文献仅仅研究了单个设备的无功补偿作用,而由于 SVG、抽水蓄能等无功补偿设备都有无功容量的约束,系统容易出现无功补偿设备容量不足、系统突发故障不能及时补偿的情况。因此,研究 SVG 和抽水蓄能的协调控制对新能源场站无功补偿以及电网电压稳定具有一定意义。

在多个设备的功率协调控制研究中,常采用粒子群算法、遗传算法等优化算法和下垂控制策略。如文献[12]以减小风电场节点电压偏差、降低网络损耗和利用风电机组无功输出能力为目标,采用粒子群算法协调风机和 SVG 的无功出力;文献[13]以配电网节点电压总偏移指数最小为目标函数,采用改进狼群算法对 SVG 和风电机组进行功率协调;文献[14]采用传统下垂控制使每台风机根据自身下垂系数发出无功功率,但在系统不同状态下,采用的固定下垂系数并不是最优系数,使得系统电压稳定性不高;文献[15-16]在协调风电场内各机组无功出力来稳定接入点电压时,采用自适应下垂控制即变下垂系数控制,下垂系数根据其当前设备最大无功容量等进行自适应调节,使得无功容量较大的风电机组输出更多的无功功率。上述研究采用优化算法进行多设备协调可解决多目标问题,但其易陷入局部最优。采用下垂控制协调风电场内各机组功率输出,可灵活应对系统运行参数的变化,快速稳定系统电压和频率。然而在协调不同类型设备时,使用优化算法或下垂控制没有考虑不同类型设备响应时间常数的不同。若不考虑设备在时间尺度上的协调,则会给控制带来不良的效果^[17]。

近年来,模型预测控制(model predictive control, MPC)因其能在当前状态基础上预测系统未来的输出,实现有限时间段内的最优控制而备受关注^[18]。MPC 是一种先进的控制框架,已广泛应用于电力系统最优控制问题中^[19],可解决多目标和多约束的优化问题,具有控制效果良好、鲁棒性强的优点,也宜于对不同时间尺度的控制行为进行协调^[17,20]。

针对 FSC-VSPSU 与 SVG 考虑时间尺度的功率协调,下面提出了基于 MPC 的全功率抽水蓄能机组与 SVG 功率协调控制。通过 MPC 来考虑 SVG 和全功率抽水蓄能机组功率时间常数不同的特性,并引入预测信息,基于未来一定时间内的整体性能最优协调抽水蓄能机组和 SVG 功率输出,提高系统电压稳定性。

1 FSC-VSPSU 与 SVG 无功调节特性

1.1 FSC-VSPSU 无功调节特性

FSC-VSPSU 总体结构主要由水泵水轮机、发电电动机、背靠背变流器组成,其结构如图 1 所示。

FSC-VSPSU 通过背靠背变流器与电网连接,背靠背变流器控制策略通常采用电压矢量定向控制,机侧逆变器控制转速或输出有功功率,网侧逆变器控制直流侧电压和输出无功功率,因此 FSC-VSPSU 具备无功调节能力。

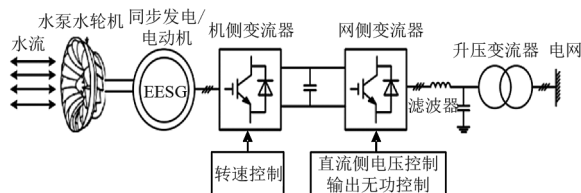


图1 FSC-VSPSU 结构

FSC-VSPSU 无功功率容量由变流器的额定容量以及机组发出有功功率决定,其无功功率极限值为

$$\begin{cases} Q_{\text{psu}}^{\max} = \sqrt{S_n^2 - P_T^2} \\ Q_{\text{psu}}^{\min} = -\sqrt{S_n^2 - P_T^2} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $Q_{\text{psu}}^{\max}$ 为 FSC-VSPSU 最大无功功率; $Q_{\text{psu}}^{\min}$ 为 FSC-VSPSU 最小无功功率; S_n 为网侧变流器额定容量; P_T 为输出的机械功率。

1.2 SVG 无功调节特性

SVG 因具有动态响应速度快、调节范围广、兼具谐波治理功能的优点,已经成为现代无功补偿装置的重要发展方向。SVG 结构如图 2 所示,其控制通常采用电压矢量定向控制,实现有功无功的解耦。SVG 的无功功率极限由其额定容量决定。

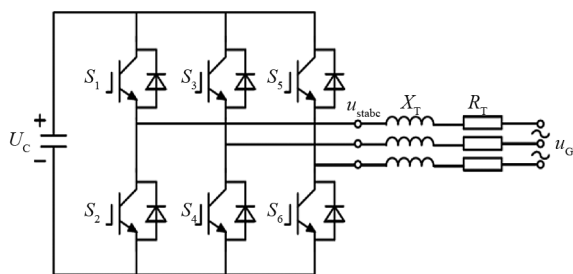


图2 SVG 结构

由于 FSC-VSPSU 具有机械特性和电气特性,SVG 只具有电气特性,FSC-VSPSU 功率时间常数相比于 SVG 较大。为实现 FSC-VSPSU 和 SVG 考虑响应时间差异的功率协调,提出采用 MPC 策略。

2 基于模型预测控制的 FSC-VSPSU 与 SVG 功率协调控制

FSC-VSPSU 与 SVG 设备群的系统结构如图 3

所示,FSC-VSPSU 和 SVG 经过一定距离连接到外部电网。所提基于 MPC 的 FSC-VSPSU 与 SVG 功率协调控制结构如图 4 所示。首先,FSC-VSPSU 有功指令直接由地调自动电压控制 (automatic voltage control,AVC) 给出;其次,通过 MPC 协调 FSC-VSPSU 和 SVG 无功输出,给出 FSC-VSPSU 的无功指令;最后,FSC-VSPSU 和 SVG 跟踪各自的有功无功指令值进行功率输出。

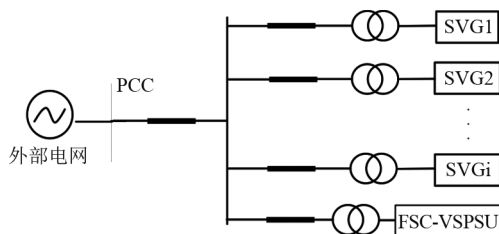


图3 FSC-VSPSU 与 SVG 设备群的系统结构

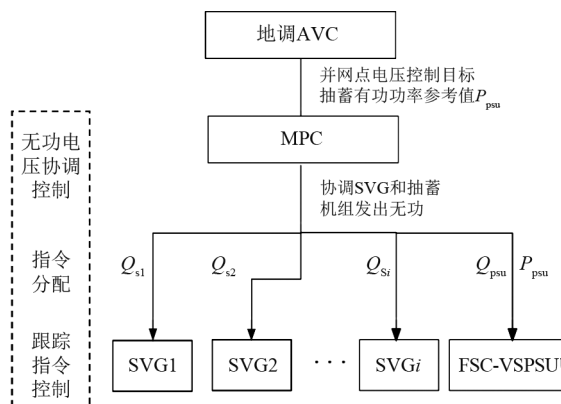


图4 FSC-VSPSU 与 SVG 功率协调控制结构

2.1 模型预测控制 (MPC)

MPC 基本原理是通过系统预测模型得到系统所有可能的状态,即系统将在某一时间段的输出,并通过性能优化指标来决定未来动作。MPC 基本上可以概括为 3 个基本要素:预测模型、滚动优化和反馈校正^[21]。

1) 预测模型:可以由当前状态和未来输入来预测系统未来某一时间段内输出的系统模型,是模型预测控制最基本的部分。

2) 滚动优化:指 MPC 在线、重复地在每个时刻都对系统进行优化控制,根据系统未来状态和目标函数、约束条件选择控制变量值。

3) 反馈校正:将当前时刻系统的实际输出作为新一轮滚动优化的初始值,在每个新的采样时刻,基于预测模型的输出值必须通过实际测量的输出功率信息进行修正,然后进行新一轮的优化。

2.2 电压灵敏度计算

所研究的 FSC-VSPSU 与 SVG 的协调控制,旨在实现电压的稳定,因此需要计算注入无功功率对节点电压的灵敏度系数。所提灵敏度系数的计算采用解析法,既可提高计算效率,又能克服可能出现的收敛问题^[22]。

系统中节点 i 注入的功率与电压的关系可表达为

$$\vec{S}_i^* = \vec{U}_i^* \sum \vec{Y}_{ij} \vec{U}_j \quad (2)$$

式中: $\vec{U}_i$ 为节点 i 的电压向量; $\vec{U}_j$ 为节点 j 的电压向量; $\vec{S}_i$ 为注入复功率; $\vec{Y}_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$,为网络导纳矩阵; $\vec{S}_i^*$ 和 $\vec{U}_i^*$ 分别为 $\vec{S}_i$ 和 $\vec{U}_i$ 的共轭。

进一步地, $\vec{S}_i^*$ 关于节点 l 注入无功功率的偏导数可表达为

$$\frac{\partial \vec{S}_i^*}{\partial Q_l} = \frac{\partial (P_i + jQ_i)}{\partial Q_l} = \frac{\partial \vec{U}_i^*}{\partial Q_l} \sum \vec{Y}_{ij} \vec{U}_j + \vec{U}_i^* \sum \vec{Y}_{ij} \frac{\partial \vec{U}_j}{\partial Q_l} = \begin{cases} -j1, i=l \\ 0, i \neq l \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\frac{\partial \vec{U}_i^*}{\partial Q_l}$ 和 $\frac{\partial \vec{U}_j}{\partial Q_l}$ 均是线性的,因此 $\frac{\partial \vec{U}_i^*}{\partial Q_l}$ 和 $\frac{\partial \vec{U}_j}{\partial Q_l}$ 具有唯一解。根据方程解,可以求出电压灵敏度系数为

$$\frac{\partial |U_i|}{\partial Q_l} = \frac{1}{|U_i|} \text{Re} \left\{ \vec{U}_i^* \frac{\partial \vec{U}_i}{\partial Q_l} \right\} \quad (4)$$

2.3 基于 MPC 的 FSC-VSPSU 与 SVG 功率协调控制

基于 MPC 的 FSC-VSPSU 与 SVG 功率协调控制主要控制思想为:首先,建立预测模型预测 FSC-VSPSU 和 SVG 的无功输出;然后,根据预测的无功通过电压灵敏度系数预测并网点电压和 FSC-VSPSU 端电压,再设计目标函数和约束条件;最后,求解 MPC 优化问题,将最优功率指令下发给 FSC-VSPSU 与 SVG。基于 MPC 的 FSC-VSPSU 与 SVG 功率协调控制如图 5 所示。

2.3.1 预测模型

考虑到通信系统与功率控制的动态响应特征,可以将 FSC-VSPSU 的功率控制环简化为一阶滞后函数^[23],即

$$\Delta Q_{\text{psu}} = \frac{1}{1 + sT_{\text{psu}}} \Delta Q_{\text{psu}}^{\text{ref}} \quad (5)$$

式中: ΔQ_{psu} 为抽水蓄能机组无功输出增量; $\Delta Q_{\text{psu}}^{\text{ref}}$ 为

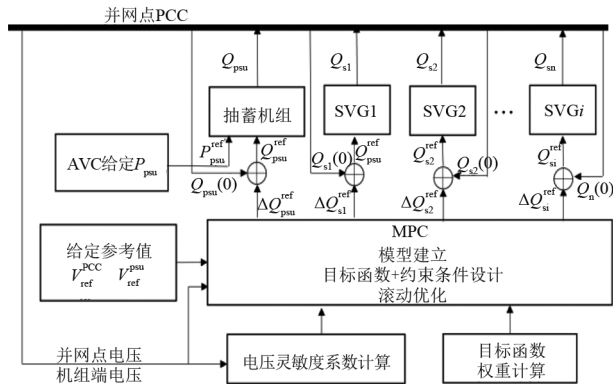


图 5 基于 MPC 的 FSC-VSPSU 与 SVG 功率协调控制

抽水蓄能机组无功输出增量参考值; T_{psu} 为抽水蓄能机组无功功率控制时间常数,通常取值为 100 ms ^[24-25]。设抽水蓄能机组当前无功输出测量值和无功输出参考值分别为 $Q_{\text{psu}}(0)$ 、 $Q_{\text{psu}}^{\text{ref}}$,则

$$Q_{\text{psu}}^{\text{ref}} = \Delta Q_{\text{psu}}^{\text{ref}} + Q_{\text{psu}}(0) \quad (6)$$

由此,可得到 FSC-VSPSU 无功出力预测模型表达式为

$$\Delta \dot{Q}_{\text{psu}} = -\frac{1}{T_{\text{psu}}} \Delta Q_{\text{psu}} + \frac{1}{T_{\text{psu}}} \Delta Q_{\text{psu}}^{\text{ref}} \quad (7)$$

同理,考虑到通信系统与功率控制的动态响应特征,可以将 SVG 的功率控制环简化为一阶滞后函数,即

$$\Delta Q_s = \frac{1}{1 + sT_s} \Delta Q_s^{\text{ref}} \quad (8)$$

式中: ΔQ_s 为 SVG 无功输出增量; ΔQ_s^{ref} 为 SVG 无功输出增量参考值; T_s 为 SVG 无功功率控制时间常数,通常取值为 10 ms 。设 SVG 当前无功输出测量值和无功输出参考值分别为 $Q_s(0)$ 、 Q_s^{ref} ,则

$$Q_s^{\text{ref}} = \Delta Q_s^{\text{ref}} + Q_s(0) \quad (9)$$

由此,可得到 SVG 无功出力预测模型表达式为

$$\Delta \dot{Q}_s = -\frac{1}{T_s} \Delta Q_s + \frac{1}{T_s} \Delta Q_s^{\text{ref}} \quad (10)$$

将式(7)、式(10)写成模型预测控制标准形式,则包含 1 台 FSC-VSPSU 和 m 台 SVG 的系统预测模型可表示为

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx \end{cases} \quad (11)$$

其中:

$$x = [\Delta Q_{s1} \Delta Q_{s2} \cdots \Delta Q_{si} \Delta Q_{\text{psu}}]^T \quad (12)$$

$$u = [\Delta Q_{s1}^{\text{ref}} \Delta Q_{s2}^{\text{ref}} \cdots \Delta Q_{si}^{\text{ref}} \Delta Q_{\text{psu}}^{\text{ref}}]^T \quad (13)$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_s} & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_s} & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & -\frac{1}{T_s} & 0 \\ & & \ddots & & \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & -\frac{1}{T_{psu}} \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_s} & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_s} & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & \frac{1}{T_s} & 0 \\ & & \ddots & & \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & \frac{1}{T_{psu}} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$C = I \quad (16)$$

式中: x 为当前状态量; u 为控制变量; y 为输出量; $\dot{x}$ 为 x 关于时间的系数。

设置采样周期为 t_s , 将上述连续状态空间方程采用前向欧拉法离散化, 得到离散状态方程为

$$\begin{cases} x(k+1) = A_d x(k) + B_d u(k) \\ y(k) = C_d x(k) \end{cases} \quad (17)$$

其中 $A_d = e^{At_s}$, $B_d = \int_0^{t_s} e^{At} B dt$, $C_d = C$ 。

式中, $x(k)$ 、 $u(k)$ 、 $y(k)$ 分别为 k 时刻的状态量、控制变量、输出量。

由此便得到了包含 1 台 FSC-VSPSU 和 m 台 SVG 系统的离散化预测模型。

2.3.2 目标函数及约束条件

建立预测模型后, 需设计目标函数和约束条件进行滚动优化。控制目标设计为并网点电压、抽水蓄能机组机端电压偏差最小以及 SVG 无功储备最大。

1) 为满足并网点电压及抽水蓄能机组端电压在合理的范围内且输出稳定, 可通过预测的抽水蓄能机组、SVG 无功出力及电压灵敏度系数预测并网点电压, 以及抽水蓄能机组端电压在未来一段时间内的大小, 并将预测电压与基准值的偏差最小作为目标函数, 则

$$J_1 = \sum_{k=1}^{n_p} (K_{PCC} \|\Delta V_{pre}^{PCC}(k)\|^2 + K_{psu} \|\Delta V_{pre}^{psu}(k)\|^2) \quad (18)$$

式中: n_p 为预测时域; $\Delta V_{pre}^{PCC}(k)$ 为 k 时刻并网点电压与基准值的差值; $\Delta V_{pre}^{psu}(k)$ 为 k 时刻抽水蓄能机组端电压与基准值的差值; K_{PCC} 、 K_{psu} 分别为并网点电压、抽水蓄能机组端电压目标的权重系数。

其中, $\Delta V_{pre}^{PCC}(k)$ 、 $\Delta V_{pre}^{psu}(k)$ 可表示为

$$\begin{cases} \Delta V_{pre}^{PCC}(k) = V_{PCC}(0) + \frac{\partial |V_{PCC}|}{\partial Q_{psu}} \Delta Q_{psu}(k) + \frac{\partial |V_{PCC}|}{\partial Q_s} \Delta Q_s(k) - V_{ref}^{PCC} \\ \Delta V_{pre}^{psu}(k) = V_{psu}(0) + \frac{\partial |V_{psu}|}{\partial Q_{psu}} \Delta Q_{psu}(k) + \frac{\partial |V_{psu}|}{\partial Q_s} \Delta Q_s(k) - V_{ref}^{psu} \end{cases} \quad (19)$$

式中, V_{ref}^{PCC} 、 V_{ref}^{psu} 分别为并网点电压、抽水蓄能机组端电压基准值。

2) 为满足系统具有应对潜在扰动事故的能力, 应使得 SVG 储备容量最大化, 即 SVG 无功出力最小, 目标函数可为

$$J_2 = \sum_{k=1}^{n_p} K_s \|\Delta Q_s(k)\|^2 \quad (20)$$

式中: $\Delta Q_s(k)$ 为 k 时刻 SVG 无功输出增量; K_s 为 SVG 无功输出权重系数。

因此, 总目标函数可定义为

$$\min J = J_1 + J_2 \quad (21)$$

下面制定约束条件, 主要包括容量约束、线路功率约束和爬坡约束。

1) 容量约束

$$\begin{aligned} Q_s^{\min} &\leq Q_s(k) \leq Q_s^{\max} \\ Q_{psu}^{\min} &\leq Q_{psu}(k) \leq Q_{psu}^{\max} \\ P_{psu}^{\min} &\leq P_{psu}^{\text{ref}} \leq P_{psu}^{\max} \end{aligned} \quad (22)$$

式中: $Q_s(k)$ 为 k 时刻 SVG 输出的无功功率; P_{psu}^{ref} 为 AVC 给定 FSC-VSPSU 输出有功功率; $Q_{psu}(k)$ 为 k 时刻抽水蓄能机组输出无功功率; $Q_s^{\min}$ 、 $Q_s^{\max}$ 分别为 SVG 可输出无功的最小值、最大值; $Q_{psu}^{\min}$ 、 $Q_{psu}^{\max}$ 分别为 FSC-VSPSU 可输出无功的最小值、最大值; $P_{psu}^{\min}$ 、 $P_{psu}^{\max}$ 分别为 FSC-VSPSU 可输出有功的最小值、最大值。

2) 线路功率约束

$$\sqrt{P_w^2(k) + Q_w^2(k)} \leq S_{w\max} \quad (23)$$

式中: $P_w(k)$ 为 k 时刻流过线路 w 的有功功率; $Q_w(k)$ 为 k 时刻流过线路 w 的无功功率; $S_{w\max}$ 为线路可输送的最大视在功率。

3) 发电功率爬坡约束、抽水功率爬坡约束

$$\begin{cases} \delta_G^L \Delta t \leq (P_{psu,t+1}^G - P_{psu,t}^G) \leq \delta_G^U \Delta t \\ \delta_P^L \Delta t \leq (P_{psu,t+1}^P - P_{psu,t}^P) \leq \delta_P^U \Delta t \end{cases} \quad (24)$$

式中: δ_G^L 、 δ_G^U 分别为抽水蓄能机组发电功率最小、最大变化速度; δ_P^L 、 δ_P^U 分别为抽水蓄能机组抽水功率最小、最大变化速度; $P_{psu,t}^G$ 、 $P_{psu,t}^P$ 分别为抽水蓄能机组 t 时刻的发电功率和抽水功率。

根据以上方法,建立了 MPC 优化问题,进一步可将其转化为标准的二次规划求解问题,并用商业 QP 求解器进行求解。

3 仿真分析

某区域含风电场、光伏电站及抽水蓄能电站,其中风电场由 20 台 2 MW 风机、1 台 3.5 MW 的 SVG 组成;光伏电站由 20 台 1.5 MW 光伏阵列、1 台 2 MW 的 SVG 组成;抽水蓄能电站含一台 3 MW 的全功率变速抽水蓄能机组。为验证所提基于 MPC 的 FSC-VSPSU 与 SVG 功率协调控制的有效性,搭建了该区域 FSC-VSPSU 与 2 台 SVG 接入电网的仿真模型,仿真参数见表 1。

表 1 FSC-VSPSU、SVG 仿真参数

参数	数值
FSC-VSPSU 容量/MW	3
SVG1 容量/MW	3.5
SVG2 容量/MW	2
并网点电压权重	100
抽水蓄能机组端电压权重	0.2
SVG 无功储备权重	0.05
X/R	2
采样周期/s	0.1

为验证所提方法的适应性,该仿真系统在 1.0 s 前 FSC-VSPSU 和 SVG 的无功功率由系统随机给定,在 1.0 s 后采用所提协调控制方法。仿真结果如图 6、图 7 所示,可见,在 1.0 s 前并网点电压和 FSC-VSPSU 电压标幺值小于 1.00 pu。在 1.0 s 后采用所提协调控制方法,FSC-VSPSU 和 SVG 无功功率由基于 MPC 的控制器给定,并网点电压标幺值稳定为基准值 1.00 pu, FSC-VSPSU 电压标幺值稳定为 1.06 pu,均有较大的改善,验证了所提基于 MPC 的 FSC-

VSPSU 与 SVG 功率协调控制策略的正确性和有效性。

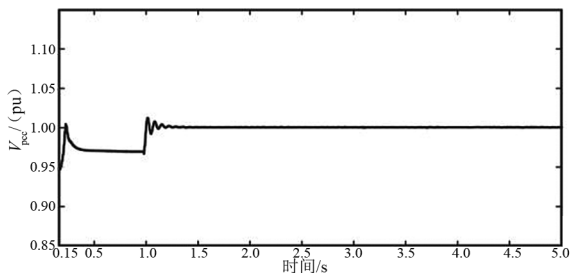


图 6 并网点电压标幺值仿真结果

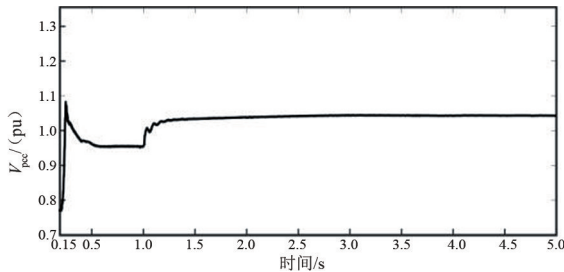


图 7 FSC-VSPSU 端电压标幺值仿真结果

图 8 为 FSC-VSPSU 与 SVG 功率输出仿真图,从图可知,1.0 s 前 FSC-VSPSU 与 SVG 随机给定无功功率输出,1.0 s 后采用所提协调控制方法,SVG1 输出无功功率 0.95 Mvar, SVG2 输出无功功率 0.47 Mvar, FSC-VSPSU 输出无功功率 1.5 Mvar, FSC-VSPSU 输出有功值由 AVC 直接给出,为 0.75 MW。SVG 无功出力均衡,留有一定的无功储备预防系统发生故障,因此验证了所提控制方法可以预留一定的 SVG 无功容量供系统紧急使用。

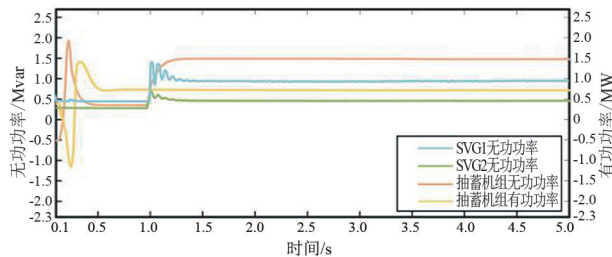


图 8 FSC-VSPSU 与 SVG 功率输出仿真

为分析所提控制策略对新能源波动的适应性,在仿真模型中加入一台风机模型通过并网点接入电网,风机 2.0 s 前风速为 8 m/s,在 2.0~4.0 s 迎来渐强风,以 5 m/s² 增大风速,4.0 s 后风速稳定在 18 m/s。由于风速变化,风机有功功率输出随之变化,风机输出有功如图 9 所示。由于风机有功变化,并网点电压也会随之变化,采用所提模型预测控制策略后,系统可根据并网点电压实际测量值滚动调整 SVG 与 FSC-VSPSU 的无功输出,使并网点电

压维持稳定。仿真结果如图 10 所示,为使在风速变化情况下并网点电压维持在 1.00 pu,SVG 与 FSC-VSPSU 输出的无功功率在 2.0~4.0 s 逐渐增加,4.0 s 后保持恒定。

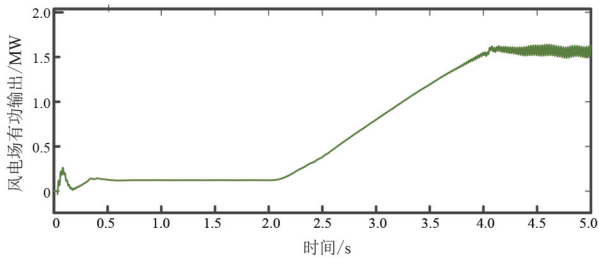


图 9 风机输出有功功率仿真

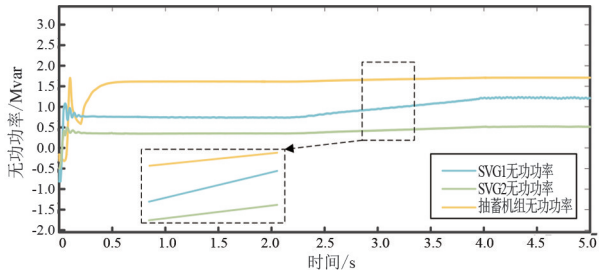


图 10 风速变化下 FSC-VSPSU 与 SVG 功率输出仿真

为验证所提协调控制方法的优越性,与传统下垂控制策略进行了对比。下垂控制策略为 FSC-VSPSU 与 SVG 通过并网点电压和各自下垂系数来确定输出无功功率,其中下垂系数与 FSC-VSPSU、SVG 容量有关。仿真算例中 FSC-VSPSU、SVG1、SVG2 下垂系数分别为 50、70、40。图 11 为系统 1.0 s 后分别采用下垂控制和所提协调控制方法下的并网点电压标幺值仿真结果,可见,采用下垂控制时并网点电压在 1.01 pu 附近波动,而采用所提协调控制方法时,并网点电压稳定为 1.00 pu,因此可以验证所提协调控制方法的优越性。

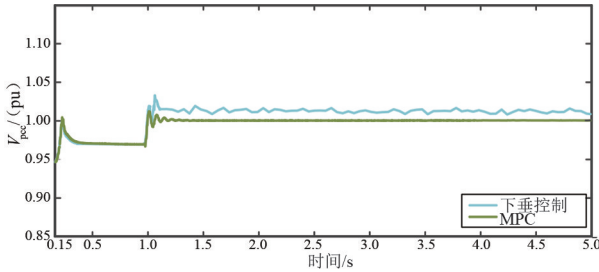


图 11 不同控制策略下并网点电压对比

4 结 论

上面分析了 FSC-VSPSU 与 SVG 的无功调节特性,并在二者的无功调节特性的基础上提出了基于

MPC 的 FSC-VSPSU 与 SVG 功率协调控制。采用 MPC 将 FSC-VSPSU 与 SVG 动态响应时间差异考虑在内,以并网点电压、FSC-VSPSU 端电压偏差最小以及 SVG 无功储备最大为控制目标,协调 FSC-VSPSU 与 SVG 的功率输出。并通过仿真验证了所提控制策略的正确性,以及其相较于传统下垂控制的优越性。

参考文献

[1] 韩晓言,丁理杰,陈刚,等.梯级水光蓄互补联合发电关键技术与研究展望[J].电工技术学报,2020,35(13):2711-2722.

[2] 李强,袁越,李振杰,等.考虑峰谷电价的风电-抽水蓄能联合系统 能量转化效益研究[J].电网技术,2009,33(6):13-18.

[3] 姜海军,戎刚,史华勃,等.全功率变速抽水蓄能机组变速变功率协同控制策略研究[J].水电与抽水蓄能,2022,8(4):31-36.

[4] 崔正湃,王皓靖,马锁明,等.大规模风电汇集系统动态无功补偿装置运行现状及提升措施[J].电网技术,2015,39(7):1873-1878.

[5] 咸红超.风电对电网的影响及无功补偿的研究[J].山东工业技术,2016(19):172-173.

[6] 付文秀,范春菊.SVG 在双馈风力发电系统电压无功控制中的应用[J].电力系统保护与控制,2015,43(3):61-68.

[7] 郭成,贯坤,郭育华.SVG 对直驱式机组风电场无功补偿的研究[J].电力电容器与无功补偿,2017,38(3):67-70.

[8] ZHENG W, BAI R Q, ZHI Y, et al. Research on application of SVG for reactive power control in wind farm[C]//2012 Power Engineering and Automation Conference, September 18 - 20, 2012, Wuhan, China. IEEE, 2012:1-3.

[9] 罗胤,赵俊杰,王坤,等.天池抽水蓄电站支持电网电压稳定措施研究[J].水电站机电技术,2022,45(4):25-28.

[10] 衣传宝,梁廷婷,汪卫平,等.全功率变速抽水蓄能机组无功优先控制策略研究[J].电力电容器与无功补偿,2021,42(1):25-31.

[11] 张建伟,张洋,董飞燕.大型抽水蓄能电站抽水工况下无功电压调节研究和试验[J].水电与抽水蓄能,2016,2(5):61-64.

[12] 王耀翔,戴朝波,杨志昌,等.考虑风电机组无功潜力的风电场无功电压控制策略[J].电力系统保护与控制,2022,50(24):83-90.

主从结构微电网并网/孤岛运行模式 平滑切换控制策略

陈仁钊¹, 陈 杨², 夏 岩², 杨屹立¹, 石进辉², 李惠祝², 张 蕊²

(1. 兴储世纪科技股份有限公司, 四川 自贡 643000; 2. 四川轻化工大学自动化与信息工程学院, 四川 自贡 644000)

摘要:对于主从控制结构的微电网系统,如何抑制切换过程中电压、频率的振荡,实现并网/孤岛运行模式间的平滑切换是一项亟待解决的技术难点。针对微电网并网/孤岛运行模式电压与频率的动态特性,提出一种基于并行运行与数值缓启动器的平滑切换控制策略。并行运行通过同步运行 PQ 控制与 V/F 控制策略,抑制了模式切换过程中的电流波动。数值缓启动器则平滑了电流内环的输入给定值,减小了切换过程中瞬时冲击电流对电流内环的影响,抑制了微电网模式切换过程中母线电压与频率的振荡。最后,基于 Matlab/Simulink 建立光储微电网系统,在并网/孤岛模式切换与负荷加载等工况下进行仿真实验,验证了所提平滑切换控制策略的有效性。

关键词:微电网; 主从结构; 并网运行; 孤岛运行; 平滑切换

中图分类号:TM 76 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2024)05-0008-06

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20240502

Smooth Switching Control Strategy for Grid-connected and Islanding Operation Mode of Microgrid Based on Master-slave Structure

CHEN Renzhao¹, CHEN Yang², XIA Yan², YANG Yili¹, SHI Jinhui², LI Huizhu², ZHANG Rui²

(1. Zonergy, Zigong 643000, Sichuan, China; 2. School of Automation and Information Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 644000, Sichuan, China)

Abstract:Addressing the critical technical challenge of mitigating voltage and frequency oscillations during the transition between grid-connected operation and islanding operation modes in microgrid systems with a master-slave control structure is imperative. Focusing on the dynamic characteristics of voltage and frequency during microgrid grid-connected operation and islanding operation mode, a smooth switching control strategy is proposed based on parallel operation and numerical soft starter. Through the synchronized PQ control and V/F control, the parallel operation effectively suppresses current fluctuations during mode transitions. And the numerical soft starter plays a crucial role in smoothing the input reference values for current inner loop, and reducing the impact of transient impulse current on current inner loop during switching process, which suppresses the oscillations of bus voltage and frequency during microgrid mode switching. Finally, a model of photovoltaic-storage microgrid system is constructed using Matlab/Simulink, and the simulation experiments, covering scenarios such as grid-connected/islanding mode transitions and load variations, verify the effectiveness of the proposed smooth switching control strategy.

Key words:microgrid; master-slave structure; grid-connected operation; islanding operation; smooth switching

0 引言

近年来,随着分布式可再生能源的大规模发展^[1],具有清洁、灵活等特点的微电网受到了广泛

的应用与关注。微电网^[2]主要由分布式电源、储能系统以及用电负荷构成,既可以与主网联网为其提供电能支撑,也可以在孤岛运行模式下确保本地负荷的不间断供电。因此微电网在提升主网电能稳定性与故障应急供能等领域发挥着显著的作用^[3]。

微电网在并网和孤岛模式下运行的能力是其提

基金项目:企业信息化与物联网测控技术四川省高校重点实验室开放基金(2023WYJ01);四川省科技计划项目(2022SZYZF01)

供电力支持作用的关键,其中的并网变流器控制可分为主从控制与对等控制两种^[4]。在电力系统运行过程中,当下微电网处于并网运行时主要采用 PQ 控制^[5],处于孤岛运行模式则采用 V/F 控制^[6]、下垂控制与 VSG 控制等策略。这些控制策略虽易于实现,但在运行模式切换过程中造成的暂态冲击与功率不平衡等问题直接影响着电力系统的安全性与稳定性^[7]。因此,平滑切换策略成为微电网在并网与孤岛运行模式切换之间平稳过渡的关键技术之一。

目前,针对微电网采用主从结构的平滑切换控制的研究已经取得了相应的成果。为解决微电网由并网运行模式切换为孤岛运行过程中主电网功率无法作为 PQ 控制的给定值问题,文献[8]通过设置限幅饱和值控制电流环输出,以实现并网/离网的平滑切换,但限幅饱和值对切换过程干扰较大,影响着切换控制器的参数选定。在此基础上,文献[9]在切换控制中加入预同步控制器,缓解了切换过程中的频率振荡,实现了柔性切换;文献[10]则提出了一种基于 PQ 控制切换为 V/F 控制的平滑切换控制策略,提升了系统处于平滑切换过程时的频率稳定性,确保了微电网与本地负荷间的功率平衡。

对于采用对等控制的平滑切换控制策略,文献[11]采用下垂控制策略实现微电网的并网/离网切换,简化了系统控制结构,但却未考虑并网过程中冲击电流较大的问题。在此基础上,文献[12]提出一种基于下垂控制的微电网运行模式平滑切换控制策略,抑制交直流负荷对微电网孤岛运行控制时系统电能质量的扰动,且在微电网处于运行模式切换时,减小瞬时冲击电流对电流内环结构的冲击。但是在实际工程应用中,下垂控制有效控制的前提是线路阻抗表现为感性,而微电网线路阻抗主要表现为阻性,使得下垂控制的应用具备局限性^[13]。因此,较为成熟且适应性更强的主从控制在当下的实际工程中受到了广泛的应用。

根据上述分析,针对主从结构的微电网并网/孤岛模式切换问题,提出一种基于并行控制与数值缓启动器的平滑切换控制策略:通过并行控制策略实现了 PQ 控制与 V/F 控制的同步运行,抑制了模式切换过程中的电流波动;通过数值缓启动器减小微电网模式切换过程中的瞬时冲击电流,实现微电网运行模式的平滑切换,并基于 Matlab/Simulink 仿真验证了所提平滑切换控制策略的有效性。

1 微电网系统结构

基于主从结构的分布式光储交直流微电网拓扑结构如图 1 所示。系统主体由分布式光伏发电系统、储能系统、交流负荷单元、公共连接点 (point of common coupling, PCC) 以及相应的控制策略组成。光伏发电系统通过 Boost 电路与 DC/AC 逆变器接入 380 V 微电网交流侧;储能系统通过储能变流器接入 380 V 微电网交流侧。微电网在不同工况下运行模式的不同,使得各分布式电源的控制策略也不尽相同。

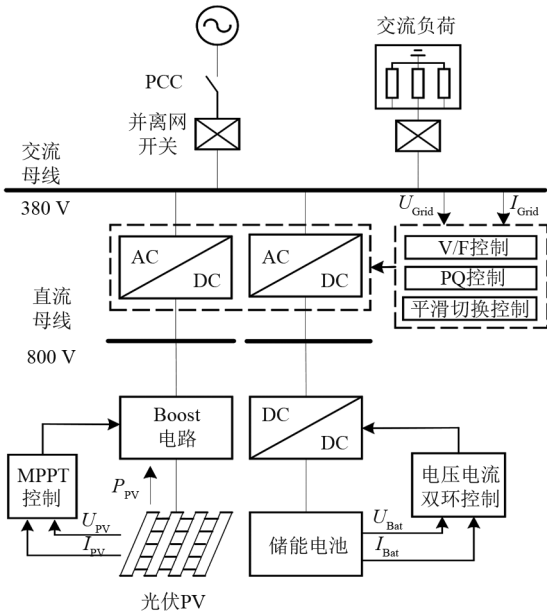


图 1 分布式光储交直流微电网拓扑结构

2 储能变流器控制策略

储能变流器将储能系统直流侧输入的直流电逆变为交流电输出至微电网交流侧,在微电网处于并网运行模式时,采用 PQ 控制策略,能够实现对其他分布式电源溢出功率的消纳,并在其他分布式电源无法满足系统所需功率时提供电能供给;在微电网处于孤岛运行模式时,则采用 V/F 控制策略,为其他分布式电源提供并网所需的电压与频率支撑。

储能系统采用的三相电压型全桥逆变器结构如图 2 所示,图中: L 为滤波电感; R 为电感等效阻抗; C 为滤波电容。储能系统经三相电压型逆变器及 LC 滤波电路,通过相应控制策略,实现微电网与主电网之间的并网/孤岛运行。

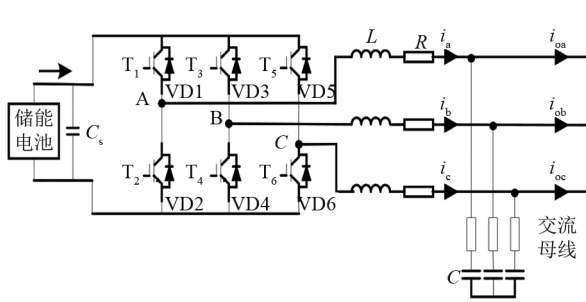


图2 三相电压型全桥逆变器结构原理

根据图2所示的电路模型,当系统三相平衡时,在a-b-c静止坐标系下,逆变器输出的三相电压方程为

$$\begin{cases} u_{ia} = Ri_{La} + L \frac{di_{La}}{dt} + u_{oa} \\ u_{ib} = Ri_{Lb} + L \frac{di_{Lb}}{dt} + u_{ob} \\ u_{ic} = Ri_{Lc} + L \frac{di_{Lc}}{dt} + u_{oc} \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_{ia} 、 u_{ib} 、 u_{ic} 为逆变器输出电压; i_{La} 、 i_{Lb} 、 i_{Lc} 为电感电流; u_{oa} 、 u_{ob} 、 u_{oc} 为负载电压。则输出的三相电流方程为

$$\begin{cases} i_{La} = C \frac{du_{oa}}{dt} + i_{oa} \\ i_{Lb} = C \frac{du_{ob}}{dt} + i_{ob} \\ i_{Lc} = C \frac{du_{oc}}{dt} + i_{oc} \end{cases} \quad (2)$$

式中, i_{oc} 、 i_{ob} 、 i_{oa} 为负载电流。根据式(1)和式(2)交流侧三相电压和电流方程,经过Park变换后得到其在旋转dq坐标轴下的电压 u_d 、 u_q 和电流 i_d 、 i_q 关系如式(3)所示,式中 ω 为dq轴的旋转角度。

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + L \frac{di_d}{dt} - \omega Li_q + u_{od} \\ u_q = Ri_q + L \frac{di_q}{dt} + \omega Li_d + u_{oq} \\ i_d = C \frac{du_{od}}{dt} - \omega u_{oq} + i_{od} \\ i_q = C \frac{du_{oq}}{dt} + \omega u_{od} + i_{oq} \end{cases} \quad (3)$$

式中: i_d 、 i_q 分别为d、q轴负载电流; u_{od} 、 u_{oq} 分别为d、q轴负载电压。

式(3)表示, u_d 和 u_q 在受控于输出电流 i_d 和 i_q 的同时,在dq轴电压之间存在着耦合的现象,同

理可知输出电流之间也存在着耦合现象。为解决上述问题,可通过研究相应控制策略对输出电压、电流进行解耦控制,提升并网/离网运行控制的精度。

2.1 并网运行模式下的PQ控制策略

微电网实现并网运行与主电网连接时,储能变流器采用PQ控制策略,根据功率输出需求设置功率控制环的参考值,在强电网下,该控制策略在实现可再生能源的最大利用率的同时,也能够为主电网提供良好的电能供给。

PQ控制主要由功率外环与电流内环组成,功率外环通过对主电网的功率解耦实现有功功率与无功功率单独控制,并网模式下的有功功率 P 与无功功率 Q 可以表示为

$$\begin{cases} P = U_d I_d + U_q I_q \\ Q = U_q I_d - U_d I_q \end{cases} \quad (4)$$

选取d轴与A相电压矢量同方向,则d轴电压分量 U_d 可视为定值,q轴电压分量 $U_q = 0$,式(4)可简化为

$$\begin{cases} P = U_d I_d \\ Q = -U_d i_q \end{cases} \quad (5)$$

PQ控制策略的功率外环方程如式(6)所示,电流内环方程如式(7)所示

$$\begin{cases} i_{dref} = \left(K_{up} + \frac{K_{ul}}{s} \right) (P_{ref} - P) \\ i_{qref} = \left(K_{up} + \frac{K_{ul}}{s} \right) (Q_{ref} - Q) \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} u_{sd} = \left(K_{ip} + \frac{K_{il}}{s} \right) (i_{dref} - i_d) - L\omega i_q + u_{od} \\ u_{sq} = \left(K_{ip} + \frac{K_{il}}{s} \right) (i_{qref} - i_q) + L\omega i_d + u_{oq} \end{cases} \quad (7)$$

式中, P_{ref} 、 Q_{ref} 分别为系统有功调节指令与无功调节指令; K_{up} 、 K_{ul} 分别为电压外环控制器的比例和积分系数; K_{ip} 、 K_{il} 分别为电压外环控制器的比例和积分系数; i_{dref} 、 i_{qref} 分别为电压控制回路输出的d轴、q轴电流分量; u_{sd} 、 u_{sq} 分别为电流内环输出的d轴、q轴电压分量。

根据上述方程搭建PQ控制策略及其对应的控制框图如图3、图4所示。

2.2 孤岛运行模式下的V/F控制策略

微电网运行于孤岛模式时,储能变流器采用V/F控制策略。V/F控制策略由dq参考框架内工作的

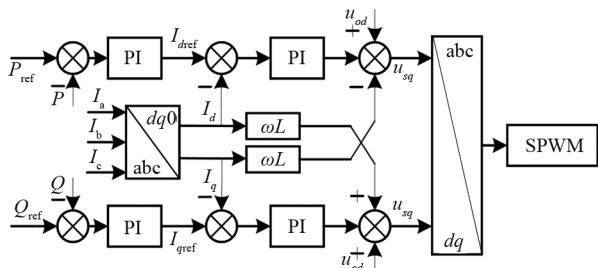


图3 PQ控制策略

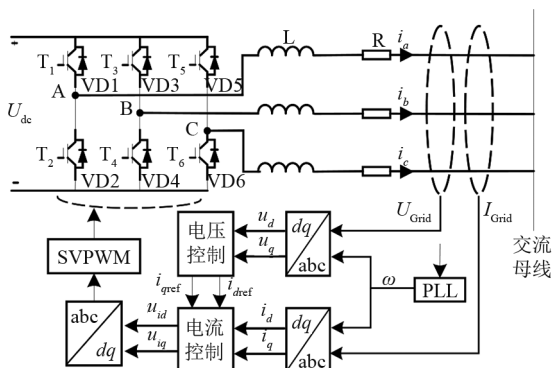


图5 V/F控制原理

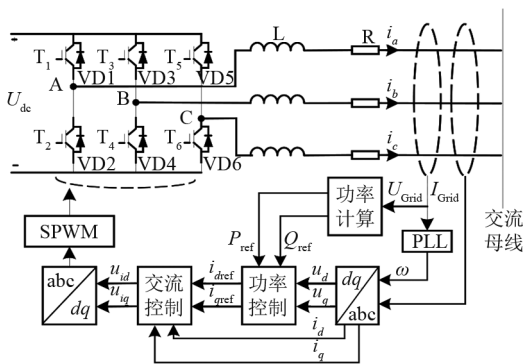


图4 PQ控制原理

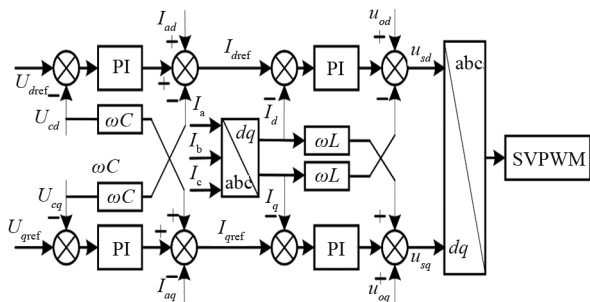


图6 V/F控制策略

两个级联控制环组成,电压外环通过施加频率参考以实现电压的独立调节,内环电流控制创建电流伺服系统实现动态自动加速运行,提升系统的动态响应能力,抑制因非线性负载扰动造成输出端电压的谐波失真,提升了系统的动态性能与稳态精度。

根据式(3)得到 V/F 控制策略的电压外环方程如式(8)所示,电流内环方程与 PQ 控制策略的电流内环方程式相同。

$$\begin{cases} i_{dref} = \left(K_{ip} + \frac{K_{il}}{s} \right) (u_{dref} - u_{ad}) - C\omega u_{aq} + i_{ad} \\ i_{qref} = \left(K_{ip} + \frac{K_{il}}{s} \right) (u_{qref} - u_{aq}) + C\omega u_{ad} + i_{aq} \end{cases} \quad (8)$$

式中: i_{ad} 、 i_{aq} 分别为系统滤波后输出电流的 d 轴、 q 轴分量; u_{ad} 、 u_{aq} 分别为系统滤波后输出电压的 d 轴、 q 轴分量。

根据上述方程搭建 V/F 控制原理框图如图 5 所示,由此可得 DC/AC 变换器的 V/F 控制策略如图 6 所示。

3 微电网运行模式平滑切换控制

在实际应用过程中,微电网可运行于孤岛或并网两种模式。根据主电网的调度需求与自身实际工况,微电网需在并网/孤岛两种运行模式之间进行切换,如何在微电网运行模式切换时,特别是在主电网

突发故障造成微电网非计划性孤岛运行,导致微电网电压与频率发生剧烈变化的情况下,确保微电网运行模式的平滑切换,是目前研究的技术热点与难点。

3.1 模式切换所需解决的关键问题

针对采用主从结构的微电网系统,为实现其在并网/孤岛运行模式下的平滑切换,需着力解决以下几个关键技术难点。

1) 主电网发生非计划性掉电,使得微电网切换为孤岛运行模式时,并网功率瞬时衰减为 0。此时在孤岛检测完成前,主控单元处于 PQ 并网控制模式,给定功率仍维持为并网参考值,造成主控单元的输出功率同本地负荷功率不平衡,使得微电网交流侧电压与频率出现闪变。

2) 传统控制策略运行在模式切换状态时,电力控制内环的输入给定值发生瞬时突变,对主控单元的输出电流造成很大的扰动。

综上所述,传统的切换控制策略在微电网发生非计划性孤岛切换时无法快速、稳定地控制输出参考值,因此,在平滑切换过程中如何保持电压幅值、相位与频率的一致性,以减轻微电网并网、离网切换时的瞬时冲击,实现微电网的柔性平滑切换成为亟待解决的问题。

3.2 并网/孤岛平滑切换控制技术

基于上述储能变流器在微电网处于不同运行模

式时采用不同控制策略的运行特性,以及微电网在模式切换控制时所需解决的关键性问题,提出一种基于并行控制与数值缓启动器的平滑切换控制策略,在维持电流内环控制结构稳定的同时,减小了瞬时冲击电流对控制系统的冲击。具体控制结构如图 7 所示。

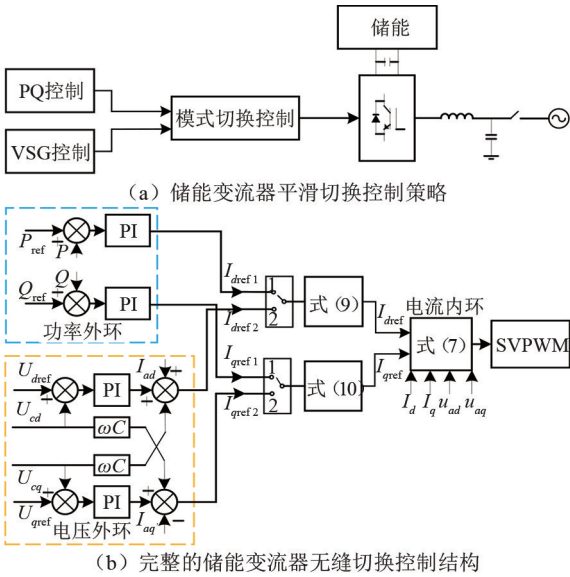


图 7 平滑切换控制结构原理

并行控制旨在并网 PQ 控制与孤岛 V/F 控制同时运行。当微电网收到模式切换控制指令时,储能变流器平滑切换控制策略只在功率外环控制与电压外环控制结构间切换,以维持电流内环控制结构的稳定,并根据切换指令输入相应电流的参考值,以确保系统在并网和孤岛模式之间实现平滑的切换。

数值缓启动器旨在将微电网模式切换前 PQ 控制回路的输出电流给定值作为缓启动器初值,将模式切换后 V/F 控制回路的输出电流给定值作为缓启动器终值,经数值缓启动器调节方程所得到的输出值作为电流解耦控制回路的给定值,实现储能变流器由 PQ 控制至 V/F 控制的平滑切换。具体数值缓启动器的调节如式(9)、式(10)所示。

$$\begin{cases} I_{dref} = I_{drefc} + \int_0^T \Delta i_{Ld} dt \\ \Delta i_{Ld} = (I_{drefc} - I_{drefi})/T \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} I_{qref} = I_{qrefc} + \int_0^T \Delta i_{Lq} dt \\ \Delta i_{Lq} = (I_{qrefc} - I_{qrefi})/T \end{cases} \quad (10)$$

式中: I_{dref} 、 I_{qref} 为缓启动器输出至电流解耦控制回路的参数给定值; I_{drefc} 、 I_{drefi} 为微电网系统在模式切换

过程前的电流参数给定值,将其作为缓启动器的输入初值; Δi_{Ld} 为步长; I_{drefi} 、 I_{qrefi} 为微电网系统在模式切换过程后的 V/F 控制策略输出的电流参数给定值,将其作为缓启动器的输入终值; T 为从初值到终值的缓启动时间。

根据式(9)、式(10)可知,此缓启动器能够使得微电网系统在并网/孤岛运行期间,针对电流解耦控制结构的输入给定值由 I_{drefc} 、 I_{qrefc} 平滑过渡到 I_{drefi} 、 I_{qrefi} ,经缓启动器调节后,减小了系统平滑切换过程中冲击电流畸变对电流解耦控制回路的影响,实现了微电网在并网/孤岛过程间的平滑切换。

4 仿真验证与分析

为了验证所提出的控制策略的有效性,搭建如图 1 所示的基于主从结构的微电网仿真模型,主从控制结构的微电网主要参数如表 1 所示。进行仿真验证时,重点围绕着微电网平滑切换难度较大的非计划性孤岛运行展开分析,进而验证所提平滑切换控制策略的有效性。图 8 为微电网中各分布式电源在系统并网/孤岛运行模式平滑切换时的输出功率仿真结果。

表 1 光储交直流微电网系统的主要参数	
参数	数值
电压外环比例系数	5
电压外环积分系数	100
电流内环比例系数	10
电流内环积分系数	150
采样频率 f /kHz	10
交流侧滤波电感 L_3 /mH	5
交流侧滤波电容 C_5 /μF	20
额定电压 U_n /V	380
标称频率 f_n /Hz	50

从图 8 能够直观地看出:微电网在 0.5 s 前处于并网运行模式,在 0.5 s 后发生非计划性脱网切换为孤岛运行模式,光伏发电系统在整个仿真过程中持续向电网输出功率 15 kW;负荷所需功率分别在 0.1 s 与 0.5 s 时加载为 5 kW 与 25 kW;主电网在 0.5 s 前消纳光伏系统冗余的发电功率,在模式切换后脱离微电网运行;储能系统为应对微电网模式切换后光伏系统无法满足加载负荷所需功率的问题,对微电网输出功率由 3 kW 提升至 10 kW,为微电网的稳定运行提供电能支撑。

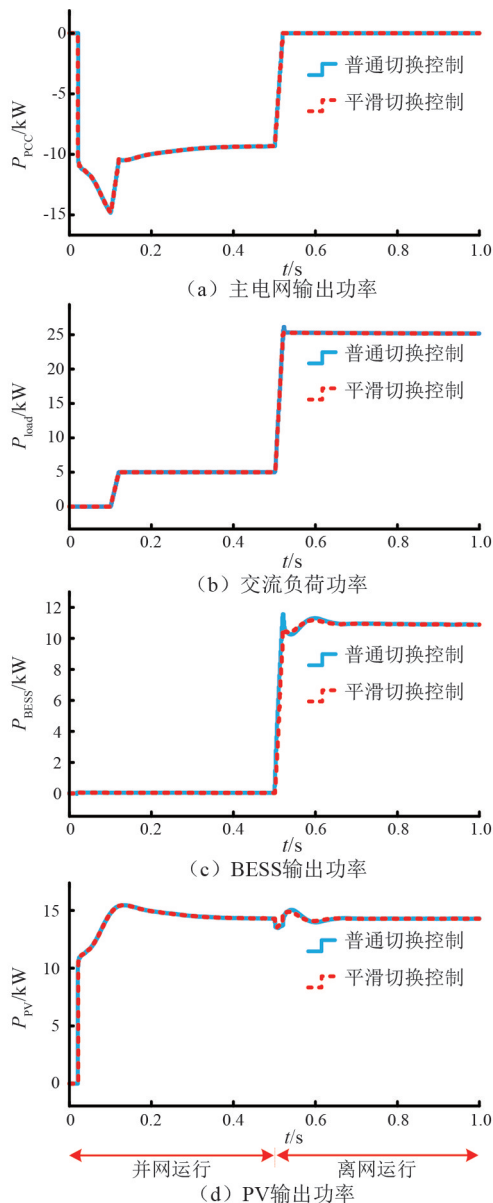


图 8 基于不同切换控制策略下的各分布式电源输出功率仿真结果

由上述仿真结果可以得出,采用平滑控制策略的微电网在并网切换为孤岛模式时,较普通切换控制而言,能够很好地平抑因切换冲击电流造成的储能系统、交流负荷以及光伏发电系统的输出功率,且控制性能优于普通切换控制策略,可以实现微电网模式切换的平滑过渡。

图 9 为在不同模式切换控制策略下的微电网与主电网间相电压与频率的对比仿真曲线。由图可知:1)在电压幅值与相位控制方面,采用平滑切换控制的微电网 ab 相间电压在模式切换后仅发生微小抖动,相位偏差值为 2° ,且在 0.02 s 后迅速恢复;而采用普通切换控制策略的光储微电网在切换过程中的电压相位偏差则为 3° 。2)在频率控制方面,采

用平滑切换控制策略的微电网在模式切换控制前后微电网频率发生轻微振荡,超调量较小,频率偏差极值为 0.06 Hz ,经过 0.10 s 快速恢复为 50 Hz ;而采用普通切换控制策略的微电网在切换前后电网频率的偏差极值为 0.09 Hz ,且频率恢复时间为 0.13 s 。因此,基于缓启动器的平滑切换控制策略较普通切换控制策略而言,在电压相位偏差抑制、频率波动抑制以及恢复方面具有明显的优越性,能够为光储微电网在模式切换过程中提供有力的电压与频率支撑,实现其运行模式的平滑切换。

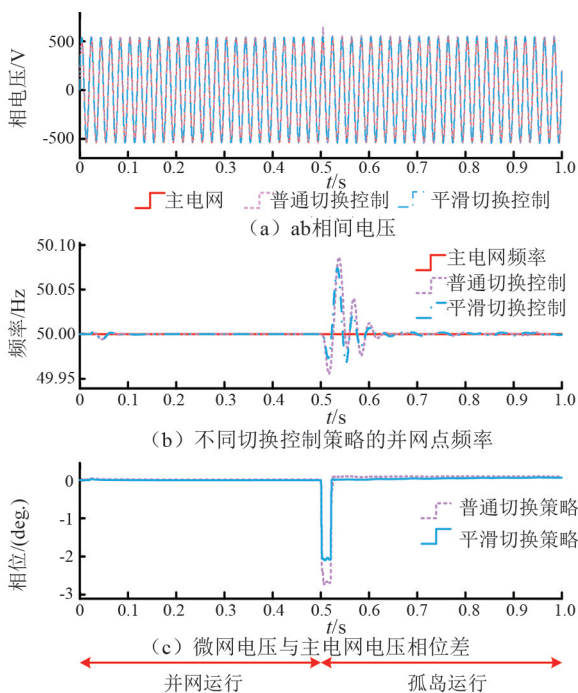


图 9 微电网与主电网电压与频率对比仿真结果

基于上述仿真分析可知,所提出的平滑切换控制策略可以有效地抑制系统运行模式切换期间的功率振荡,提供有力的电能支撑能力,实现了微电网运行模式的平滑切换。

5 结 论

上面提出了一种适应微电网并网/离网平滑切换控制策略,搭建了采用主从结构的微电网的并网/离网切换仿真模型,验证了系统理论分析的正确性与控制策略的有效性,主要结论如下:

1)引入并行控制策略,在微电网模式切换时,变更主变流器控制策略的同时维持电流内环给定电流值的稳定输入,减小因控制回路切换造成的瞬时冲击电流对电流内环结构的影响。(下转第 52 页)

基于改进沙猫群算法的微电网日前优化调度

朱赵晴¹, 方琴璐², 夏焰坤¹, 谢波², 孟志高², 陈建华²

(1. 西华大学电气与电子信息学院, 四川 成都 610039; 2. 国网四川省电力公司
成都供电公司, 四川 成都 610041)

摘要:微电网系统包括多种分布式能源, 为降低微电网综合发电成本, 提高供电的可靠性和安全性, 合理安排微电网日前调度计划, 以运行成本 and 环境保护成本最低为目标函数, 首先, 建立由水、光、微型燃气轮机、储能装置组成的微电网日前优化调度模型; 然后, 将反向学习策略和柯西变异算子融入到沙猫群算法中, 提出一种改进沙猫群算法求解上述模型; 最后, 通过与其他算法进行调度的结果对比, 结果表明改进沙猫群算法能更合理地安排各机组的出力计划, 明显降低微电网运行综合成本, 同时减少二氧化碳排放量, 实现了微电网的经济环保优化调度。

关键词:微电网; 日前优化调度; 改进沙猫群算法; 反向学习策略; 柯西变异算子

中图分类号: TM 734 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2024)05-0014-07

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20240503

Day-ahead Optimal Scheduling of Microgrid Based on Improved Sand Cat Swarm Optimization

ZHU Zhaoqing¹, FANG Qinlu², XIA Yankun¹, XIE Bo², MENG Zhigao², CHEN Jianhua²

(1. School of Electrical Engineering and Electronic Information, Xihua University,
Chengdu 610039, Sichuan, China; 2. State Grid Chengdu Electric Power Supply
Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: Microgrid systems include a variety of distributed energy sources. In order to reduce the integrated generation cost of microgrid, improve the reliability and security of power supply and reasonably arrange the microgrid day-ahead scheduling plan, taking the minimum cost of operation and environmental protection as the objective function, a microgrid day-ahead optimal scheduling model consisting of water, solar, micro gas turbine, and energy storage device is firstly established. And then, the inverse learning strategy and Cauchy variation operator are incorporated into the sand cat swarm optimization (SCSO) algorithm, and an improved sand cat swarm optimization (ISCSO) algorithm is proposed to solve the above model. Finally, by comparing the results of scheduling with other algorithms, the results show that ISCSO can arrange the output plan of each unit in a more reasonable way, which obviously reduces the comprehensive cost of microgrid operation, and at the same time reduces the carbon dioxide emission, and realizes the economic and environmental protection optimal scheduling of microgrid.

Key words: microgrid; day-ahead optimal scheduling; improved sand cat swarm optimization; inverse learning strategy; Cauchy variation operator

0 引言

全球能源危机和温室效应日益严重, 中国于2020年制定“双碳”战略目标, 并贯彻落实绿色发展

基金项目: 四川省科技计划课题(2020YFG0184)

的基本目标。随着人们的环境保护意识不断加强, 传统的发电方式已经无法满足节能减排和建设绿色电力系统的需求, 而以水轮机、光伏、蓄电池、微型燃气轮机等分布式电源构成的微电网能有效改善能源危机和环境污染问题^[1-2]。

“双碳”目标促使绿色能源在电网接入量快速

增长。随着多形态的绿色能源接入电网,因各自运行特性的不同,使得微电网调度变得更加复杂困难,而调度策略的优劣将直接影响微电网运行成本和碳排放量^[3]。合理的调度策略不但能提高电网的稳定性和经济性,有效降低电厂发电成本,还可以减少能源浪费和污染气体的排放。因此,研究碳减排目标下微电网优化调度具有重要的理论和工程价值。而实现微电网高效经济运行的关键在于如何制定策略,合理分配各参与因子的出力^[4-5]。

在实际应用中,随着系统规模和复杂性的迅速增加,特别是当涉及到更多时段、更多决策变量以及更多的不确定性因素时,问题的规模可能超过了求解器的处理能力,而启发式方法可以为模型提供更高的灵活性,能够更容易地适应模型参数的变化,还能够相对较短的时间内提供足够好的解,这对于微电网的日前调度是十分关键的。目前,粒子群、人工鱼群^[6]、蚁群^[7]及灰狼等智能优化算法在微电网调度中得到了广泛应用。文献[8]建立了微电网环保与经济调度模型,采用了改进惯性权重因子和学习因子的粒子群算法对调度模型求解。文献[9]在微电网调度模型中引入需求响应中的可转移负荷,采用了改进灰狼算法对优化模型求解。文献[10]考虑了系统运行和碳交易成本,采用了鲸鱼优化算法求解含需求侧柔性负荷的综合能源低碳经济调度模型。文献[11]建立了机场微电网的优化调度模型,采用了加入非线性变化权重因子的麻雀搜索算法求解。微电网调度是一个多约束的非线性优化问题,考虑到上述种群优化算法在求解优化调度问题时工作量大、效率低、易陷入早熟等缺点,在上述研究的基础上,提出将沙猫群优化算法加以改进后应

用于调度模型求解。沙猫群智能优化算法(sand cat swarm optimization,SCSO)是由 Amir Seyyedabbasi 于 2022 年提出的一种新型种群优化算法。无论是在地面还是地下,沙猫都能凭借它对低频噪声的检测能力来捕捉猎物^[12]。

首先,建立了一种微电网日前优化调度模型,该模型由水轮机、光伏、微型燃气轮机和储能装置组成,并较为详细地介绍了各发电单元的数学模型及各自运行约束条件,确定了以运行成本和环境保护成本最低的目标函数;然后,采用改进沙猫群算法(improved sand cat swarm optimization,ISCSO)算法求解上述模型;最后,通过算例分析比较不同调度策略的经济性和环保性,验证了所提方法的有效性。

1 微电网模型

1.1 微电网系统结构

微电网内部包含光伏、水电、微型燃气轮机及储能设备,通过能量管理中心进行智能控制和自动调度决策,微电网系统结构如图 1 所示。

1.2 分布式能源、储能发电特性

1) 光伏发电的输出受到光照强度、风速和环境温度等因素的影响,导致其具有波动性。光伏的出力模型可以表示为

$$P_{PV}(t) = P_{STC} \frac{G_{ING,t}}{G_{STC}} [1 + k(T_{c,t} - T_r)] \quad (1)$$

式中: $P_{PV}(t)$ 为 t 时刻的光伏输出功率; P_{STC} 为标准条件下光伏最大输出功率; $G_{ING,t}$ 为 t 时刻的光照强度; G_{STC} 为标准条件下光照强度; k 为功率温度系数; $T_{c,t}$ 为 t 时刻光伏电池温度; T_r 为光伏电池参考温度。

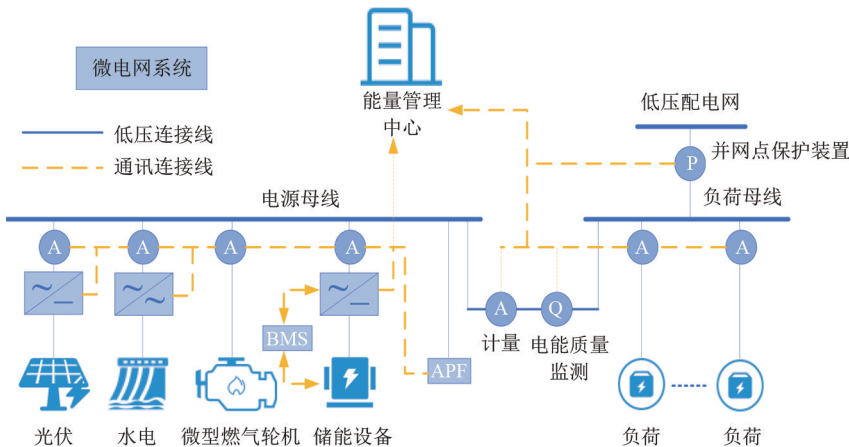


图 1 微电网系统基本结构

$$C_{PV}(t) = K_{PV,OM} P_{PV}(t) \quad (2)$$

式中: $C_{PV}(t)$ 为 t 时刻光伏的运维成本; $K_{PV,OM}$ 为光伏的运维成本系数。

2) 水电机组具备灵活的启停能力, 能够快速调整输出功率, 以适应电力需求的瞬时变化。水电的模型可以表示为

$$C_W(t) = K_{W,OM} P_W(t) \quad (3)$$

式中: $C_W(t)$ 为 t 时刻水电机组的运维成本; $K_{W,OM}$ 为水电机组的运维成本系数; $P_W(t)$ 为 t 时刻水电机组的有功输出功率。

$$C_{W,NF}(t) = K_{W,NF} U_W(t) \quad (4)$$

式中: $C_{W,NF}(t)$ 为 t 时刻水轮机的启停成本; $K_{W,NF}$ 是水轮机的启停成本系数; $U_W(t)$ 为 t 时刻水轮机的启停状态, 1 表示启动, 0 表示停止。

3) 微型燃气轮机以消耗天然气、柴油及汽油等燃料来发电。它具有高效率、可使用燃料种类多、维护成本低以及运行灵活等优点, 因此在发电领域得到广泛应用, 具有较高的发电性价比。微型燃气轮的模型可以表示为

$$\eta_{MT}(t) = 0.075 3 \left[\frac{P_{MT}(t)}{65} \right]^3 - 0.309 5 \left[\frac{P_{MT}(t)}{65} \right]^2 + 0.417 4 \frac{P_{MT}(t)}{65} + 0.106 8 \quad (5)$$

$$C_{MT,OM}(t) = K_{MT,OM} P_{MT}(t) \quad (6)$$

$$C_{MT,F}(t) = C_1 \frac{1}{V_{LH}} \frac{P_{MT}(t)}{\eta_{MT}(t)} \quad (7)$$

$$C_{MT,E}(t) = \sum_{i=1}^n (C_i \gamma_{MT,i}) P_{MT}(t) \quad (8)$$

$$C_{MT,NF}(t) = K_{MT,NF} U_{MT}(t) \quad (9)$$

式中: $\eta_{MT}(t)$ 为 t 时刻微型燃气轮机的运行效率; $P_{MT}(t)$ 为燃气轮机的有功输出功率; $C_{MT,OM}(t)$ 为 t 时刻燃气轮机的运维成本; $K_{MT,OM}$ 是燃气轮机的运维成本系数; $C_{MT,F}(t)$ 为 t 时刻燃气轮机的燃料成本; C_1 为当地天然气价格; V_{LH} 为天然气低位热值, kWh/m^3 ; $C_{MT,E}(t)$ 为 t 时刻微型燃气轮机的污染物处理成本; C_i 为处理 i 类污染物成本系数; $\gamma_{MT,i}$ 为微型燃气轮机正常运行时产生的 i 类污染物排放量; $C_{MT,NF}(t)$ 为 t 时刻微型燃气轮机的启停成本; $K_{MT,NF}$ 为微型燃气轮机的启停成本系数; $U_{MT}(t)$ 为 t 时刻微型燃气轮机的启停状态, 1 表示启动, 0 表示停止。

4) 为了确保电网的稳定运行, 太阳能发电的波动性和随机性需要通过加装储能装置来解决。蓄电

池作为一种响应速度快的储能设备, 可以将微电网所产生的多余电能储存起来。当微电网所产生的电能无法满足负荷需求时, 蓄电池能够迅速释放储存的电能, 以保持微电网系统的供需平衡, 确保电力稳定供应。这样的安排进一步提高了整个微电网系统的安全性和稳定性。蓄电池的充放电模型可以表示为

$$S_{OC}(t) = \begin{cases} S_{OC}(t-1) + P_{bat}(t)/\eta^-, & P_{bat}(t) \leq 0 \\ S_{OC}(t-1) + P_{bat}(t)\eta^+, & P_{bat}(t) > 0 \end{cases} \quad (10)$$

$$C_{bat,OM}(t) = K_{bat,OM} P_{bat}(t) \quad (11)$$

式中: $S_{OC}(t)$ 为 t 时刻蓄电池的剩余容量; $P_{bat}(t)$ 为 t 时刻蓄电池的充放电功率; η^+ 为蓄电池充电效率; η^- 为蓄电池放电效率; $C_{bat,OM}(t)$ 为 t 时刻蓄电池的维护成本; $K_{bat,OM}$ 是蓄电池的运维成本系数。

1.3 微电网目标函数及约束条件

1.3.1 目标函数

微电网调度是一个多约束的非线性优化问题, 目标函数中引入罚函数可将等式约束和不等式约束问题转换为非约束类问题, 罚函数刻画了约束条件违反的程度。

$$\min C_T = \sum_{t=1}^T (C_f(t) + C_{OM}(t) + C_{grid}(t) + C_E(t)) + \sum_k^K \sigma p(k) \quad (12)$$

$$C_{OM}(t) = C_{PV}(t) + C_W(t) + C_{MT,OM}(t) + C_{bat,OM}(t) + C_{W,NF}(t) + C_{MT,NF}(t) \quad (13)$$

$$C_{grid}(t) = C_G(t) \times C_{GP}(t) - C_S(t) \times C_{SP}(t) \quad (14)$$

$$C_E(t) = C_{MT,E}(t) + C_{grid,E}(t) \quad (15)$$

$$C_{grid,E}(t) = \sum_{i=1}^n (C_i \gamma_{grid,i}) C_{GP}(t) \quad (16)$$

式中: C_T 为微电网的总运行费用; T 为调度的时间段; $C_f(t)$ 为各分布式电源在 t 时刻消耗的燃料费用, 本模型中只含有微型燃气轮机需要燃料, 故 $C_f(t) = C_{MT,F}(t)$; $C_{OM}(t)$ 为各发电单元在 t 时刻的维护费用; $C_{grid}(t)$ 为微电网和配电网的电能交易费用; $C_G(t)$ 、 $C_S(t)$ 分别为在 t 时刻微电网的购、售电价; $C_{GP}(t)$ 、 $C_{SP}(t)$ 分别为在 t 时刻微电网的购、售电能; $C_E(t)$ 为微电网在 t 时刻的环境保护成本; $C_{grid,E}(t)$ 为微电网购入电能部分的污染物处理成本; $\gamma_{grid,i}$ 为微型燃气轮机正常运行时产生的 i 类污染物排放

量; $p(k)$ 为第 k 个违规量; K 为等式和不等式约束违规量的个数; σ 为罚参数,一般取正数,表示惩罚的力度,求函数最小值时, σ 越大表示违规量 $p(k)$ 越接近于0。

1.3.2 约束条件

为了保障微电网运行的安全性和稳定性,需要对各发电单元模型进行必要的约束。

1) 功率平衡约束

$$P_L(t) = P_{PV}(t) + P_W(t) + P_{MT}(t) + P_{bat}(t) + P_{grid}(t) \quad (17)$$

$$P_{grid}(t) = C_{GP}(t) - C_{SP}(t) \quad (18)$$

2) 水轮机出力约束

$$\begin{cases} P_W^{\min}(t) \leq P_W(t) \leq P_W^{\max}(t) \\ |P_W(t) - P_W(t-1)| \leq r_W \end{cases} \quad (19)$$

3) 微型燃气轮机出力约束

$$\begin{cases} P_{MT}^{\min}(t) \leq P_{MT}(t) \leq P_{MT}^{\max}(t) \\ |P_{MT}(t) - P_{MT}(t-1)| \leq r_{MT} \end{cases} \quad (20)$$

4) 线路传输功率约束

$$P_{grid}^{\min}(t) \leq P_{grid}(t) \leq P_{grid}^{\max}(t) \quad (21)$$

5) 储能装置约束

$$\begin{cases} P_{bat}^{\min}(t) \leq P_{bat}(t) \leq P_{bat}^{\max}(t) \\ S_{OC}^{\min}(t) \leq S_{OC}(t) \leq S_{OC}^{\max}(t) \end{cases} \quad (22)$$

式中: $P_W^{\max}(t)$ 、 $P_W^{\min}(t)$ 分别为水轮机出力上下限; $P_{MT}^{\max}(t)$ 、 $P_{MT}^{\min}(t)$ 分别为微型燃气轮机出力的上、下限; r_W 和 r_{MT} 分别为水轮机组和微型燃气轮机爬坡功率上限; $P_{grid}^{\max}(t)$ 、 $P_{grid}^{\min}(t)$ 分别为线路传输功率上、下限; $P_{bat}^{\max}(t)$ 、 $P_{bat}^{\min}(t)$ 分别为储能装置出力上下限; $S_{OC}^{\max}(t)$ 、 $S_{OC}^{\min}(t)$ 分别为储能装置的容量上、下限。

2 基于改进沙猫群算法的微电网日前调度模型

2.1 沙猫群算法

根据沙猫群的觅食行为,将沙猫觅食行动分为搜索猎物 and 攻击猎物两个阶段。具体参数及公式详见文献[12]。

2.2 改进沙猫群算法

考虑到原有的沙猫群算法开发能力强但全局搜索能力较弱^[13-14],为了让沙猫个体能更好地寻到最优位置,增强算法全局搜索能力,在沙猫群算法中加入反向学习策略^[15]。

$$\vec{P}'_{os}(t) = u_b(t) + \text{rand}(0,1) \times (l_b(t) - \vec{P}_{osb}(t)) \quad (23)$$

$$\vec{P}_{os}(t+1) = \vec{P}'_{os}(t) + b \times (\vec{P}_{osb}(t) - \vec{P}'_{os}(t)) \quad (24)$$

$$b = \left(N_{\max} - \frac{N_c}{N_{\max}} \right)^{N_c} \quad (25)$$

式中: $\vec{P}'_{os}(t)$ 为当次迭代时最优位置的反向解; $u_b(t)$ 、 $l_b(t)$ 分别为上、下界; $\vec{P}_{osb}(t)$ 为目前最优位置; $\vec{P}_{os}(t+1)$ 为沙猫选择的新位置; b 为信息交换控制参数^[16]; N_c 为当前迭代次数; $N_{\max}$ 为最大迭代次数。

为了进一步提升算法的寻优性能,引入柯西变异算子,在最优位置进行扰动变异得出新解,有效降低算法出现早熟收敛的情况^[17]。

$$\vec{P}_{os}(t+1) = \vec{P}_{os}(t) + C(0,1) \times \vec{P}_{os}(t) \quad (26)$$

式中, $C(0,1)$ 为标准柯西分布。

2.3 基于改进沙猫群算法的微电网日前优化调度流程

基于改进沙猫群算法(improved sand cat swarm optimization, ISCSO)的微电网日前优化调度流程如图2所示。

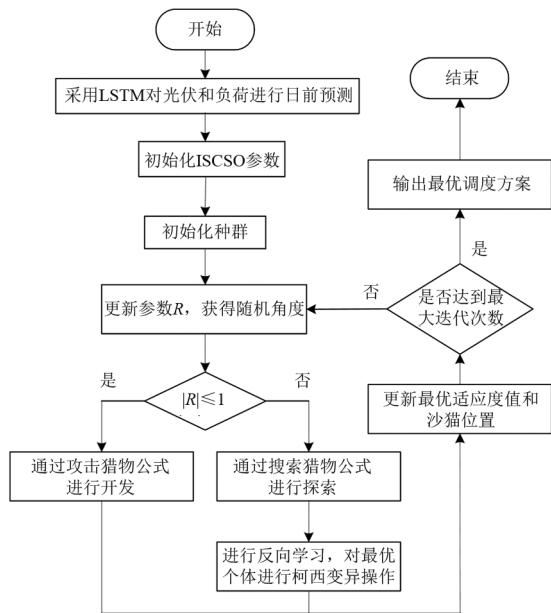


图2 基于ISCSO算法的流程

其主要步骤如下:

1) 采用长短期记忆网络(long short-term memory, LSTM)根据已知连续数据对接下来一天的光伏出力和负荷情况进行日前预测;

- 2) 设定 ISCSO 算法的参数,如初始化种群规模、最大迭代次数和优化变量的上下限等;
- 3) 初始化种群;
- 4) 更新参数 R ,获得随机角度, R 为控制沙猫搜索阶段和攻击阶段之间无缝转换的主要参数;
- 5) 通过搜索猎物公式或攻击猎物公式进行探索或开发;
- 6) 根据机组相关成本和储能参数,计算以运行成本 and 环境保护成本最低的目标函数,将其作为沙猫个体的适应度值;
- 7) 更新最优适应度值和沙猫位置;
- 8) 迭代计算所有沙猫的适应度值。

3 算例分析

根据四川某地区的实际情况,建立了一个包含水、光、微型燃气轮机和储能装置的微电网调度模型。微电网中各个发电单元参数数值见表 1;微电网其他参数数值见表 2;各分布式能源污染物排放系数及治理费用见表 3;各时段时间划分及微电网与配电网交易时购售电价见表 4;储能参数数值见表 5。

表 1 发电单元参数

参数名称	光伏	水电	燃气轮机	配电网
功率上限/kW	预测值	200	180	150
功率下限/kW	0	90	3	0
爬坡功率上限/(kW·min ⁻¹)	0	1.67	0.67	0
爬坡功率下限/(kW·min ⁻¹)	0	0.83	0.16	0
运维单价/(元·(kWh) ⁻¹)	0	0.01	0.031	0

表 2 微电网其他参数

参数	数值
水轮机启停成本/元	1.94
微型燃气轮机启停成本/元	3.68
微型燃气轮机热量损失系数	0.15
天然气低热值/(kWh·m ⁻³)	9.7
天然气单价/(元·m ⁻³)	2.5
蓄电池自放电率	0.001

表 3 污染物排放系数及治理费用

污染物类型	治理费用/(元·kg ⁻¹)	污染物排放系数/(g·kWh ⁻¹)			
		光伏	水电	燃气轮机	配电网
CO ₂	0.3	0	0	390	960
SO ₂	6.3	0	0	0.003	26.3
氮氧化物	8.5	0	0	0.2	13.1

表 4 典型日各时段时间划分及购售电价

时段	时间划分	购电价格/(元·kWh ⁻¹)	售电价格/(元·kWh ⁻¹)
峰段	10:00—12:00	1.33	0.93
	15:00—21:00		
平段	7:00—10:00	0.83	0.58
	12:00—15:00		
	21:00—23:00		
谷段	23:00—次日 7:00	0.33	0.23

表 5 储能参数(蓄电池)

参数	数值	参数	数值
最大容量/kWh	80	最小容量/kWh	20
最大输入功率/kW	50	最大输出功率/kW	50
充放率	0.9	初始储能容量/kWh	50

3.1 典型日光伏出力和负荷预测曲线

为验证模型和改进沙猫群算法的有效性,根据已知四川某地区夏季 7 月份里连续 72 h 光伏出力及负荷的实际情况,预测接下来 24 h 内光伏出力和负荷情况。

采用长短期记忆时序预测法对光伏和负荷进行预测^[18],结果如图 3、图 4 所示。由图可以看出预测负荷最高峰在用电高峰时期,相应地,光伏也是在正午时分发电量最高,符合实际情况。

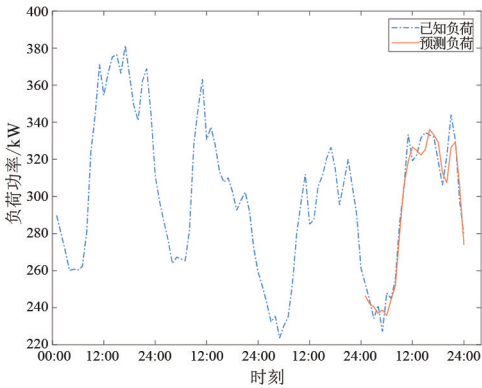


图 3 负荷预测曲线

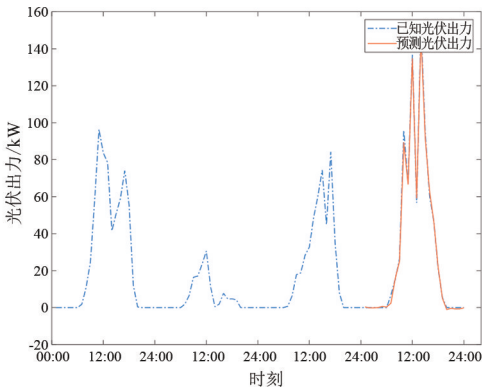


图 4 光伏出力预测曲线

为了评价该预测模型的准确性,采用了拟合优度 (R^2)、平均绝对误差 (mean absolute error, MAE)、均方根误差 (root mean square error, RMSE) 这 3 个指标进行评估。结果如表 6 所示。

从表 6 可以看出,负荷和光伏出力预测效果较好,拟合系数 R^2 均达到 0.95 以上,同时均方误差较小,预测精度能满足实际需求。本节研究仅以夏季典型时段实际数据为例,验证了所提模型的有效性。该模型在针对不同场景时预测结果的有效性还需进一步讨论,将对此进行后续研究。

表 6 负荷和光伏预测结果

类型	R^2	MAE/kW	RMSE/kW
负荷预测	0.954	6.870	8.282
光伏出力预测	0.998	1.421	2.246

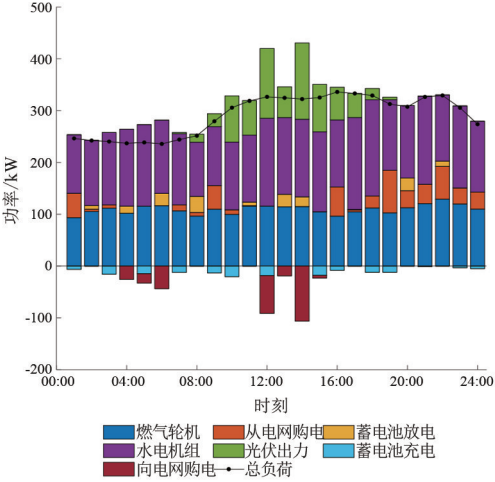
3.2 优化调度分析

以 24 h 为一个调度周期,优化调度时长为 1 h。采用了传统粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO)、灰狼算法 (grey wolf optimizer, GWO)、秃鹰搜索算法 (bald eagle search, BES)、沙猫群算法 (SCSO) 和所提 ISCSO 算法这 5 种方法,以运行成本和环境保护成本最低为目标函数对微电网模型进行求解。种群大小均设置为 100,最大迭代次数均设置为 500。图 5 展示了这 5 种方法优化得到的日前调度安排情况。表 7 给出不同方法在一天 24 h 内的调度运行结果。

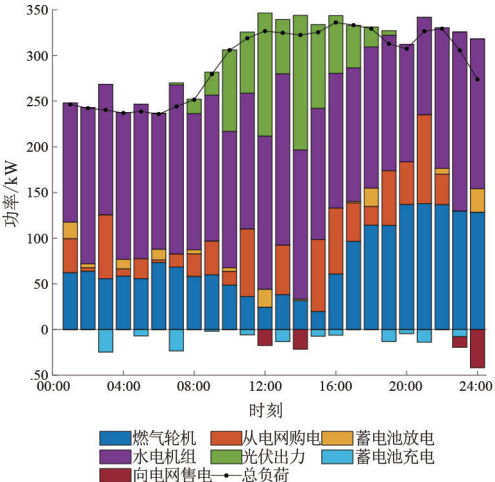
结合图表可以看出,PSO 方法和 BES 方法在整个调度周期都使微型燃气轮机保持在 100 kW 上下的出力,因此燃料成本较高,碳排放量较大。GWO 方法在优先使用光伏出力的情况下,主要采用向配电网购电配合水电机组和燃气机组出力的策略以满足负荷需求。而在峰段时购电价格高达 1.33 元/kWh,GWO 方法在这段时间的购电量达到了 408.57 kW,花费 542.58 元,占总购电成本的 67.23%,同时向配电网出售余电较少,售电收入不高。SCSO 方法主要依靠水轮机发电,较少使用微型燃气轮机,为维持电负荷平衡特向配电网大量购电,但其购电具有随机性,并未区分峰平谷时段进而择优购电,导致使用该方法进行日前调度时其碳排放量和向配电网购电成本在 5 种方法中最高,其经济效益不高且对环境危害较大。

ISCSO 方法在满足负荷需求后,在谷段充分比

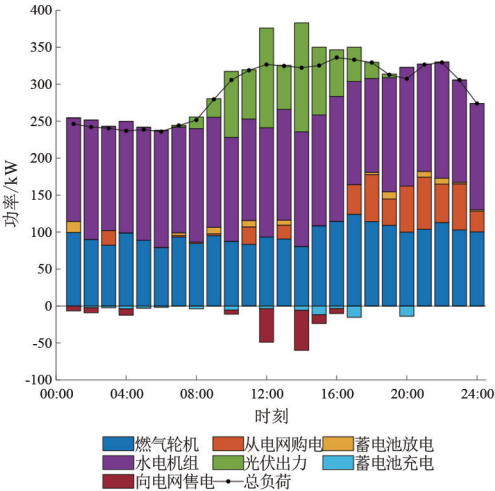
较各发电单元运行维护成本和与配电网交易的价格,使其效益最大化。考虑到蓄电池提供单位功率时费用比向配电网购电时低,在谷段时水轮机组和微型燃气轮机合理配合工作,先将蓄电池充满电,再



(a) PSO方法调度结果



(b) GWO方法调度结果



(c) BES方法调度结果

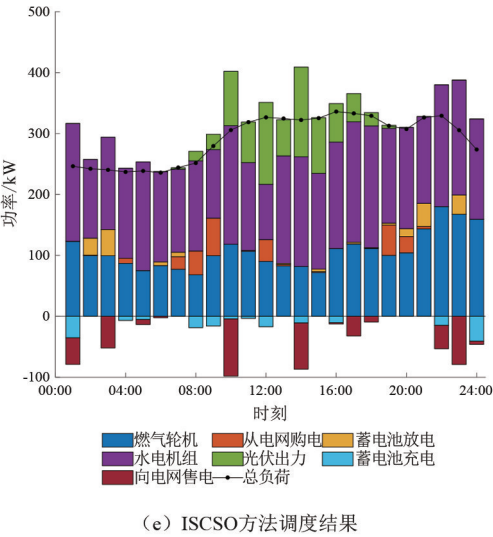
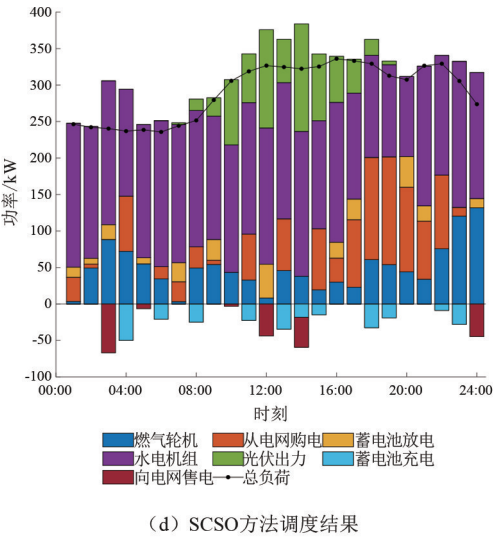


图 5 不同方法得到的日前调度结果

表 7 5 种方法的结果比较

参数	PSO	GWO	BES	SCSO	ISCSO
运行时间/s	275.15	398.80	244.18	183.84	161.89
购电成本/元	452.33	807.06	458.01	1204.80	243.29
售电金额/元	140.27	35.02	85.19	79.18	237.21
燃料成本/元	2 314.38	1 596.30	2 065.27	1 098.15	2 104.50
运维成本/元	125.44	102.96	117.78	87.65	127.79
环境成本/元	591.38	674.67	550.53	778.72	445.96
碳排放量/kg	1 500.23	1 487.14	1 375.79	1 543.91	1 240.19
综合成本/元	3 343.26	3 145.97	3 106.41	3 090.15	2 684.33

将富余电能向配电网售卖。在上午 10:00 左右,光伏出力开始增大,而此时属于用电高峰期,ISCSO 方法首先考虑了向配电网售电,其次再将蓄电池充电时间转移到用电平段和谷段,降低成本的同时通过向配电网售电获得部分收益。

ISCSO 方法充分考虑了微电网与配电网分时段购售电价和各发电单元出力情况,更加合理安排了

各机组和储能装置的工作情况,且运行时间最短,表明了 ISCSO 搜索能力更强大,求解速度更快,使得在满足负荷需求的情况下,微电网运行综合成本最低,降低了碳排放量的同时提高了微电网的经济性和稳定性。

图 6 为采用以上不同算法求解微电网优化调度结果的适应度曲线图。由图可知,所提算法相较于其他算法在寻优方面表现优异,在第 50 次迭代后,ISCSO 算法已趋于收敛,而 SCSO 算法大约在第 100 次迭代后才逐渐趋于收敛,表明 ISCSO 算法收敛速度更快。此外,SCSO 算法的成本优化结果为 3 090.15 元,ISCSO 算法的成本优化结果为 2 684.33 元,表明了改进后的 ISCSO 算法全局探索能力得到了提高,优化结果精度更高。

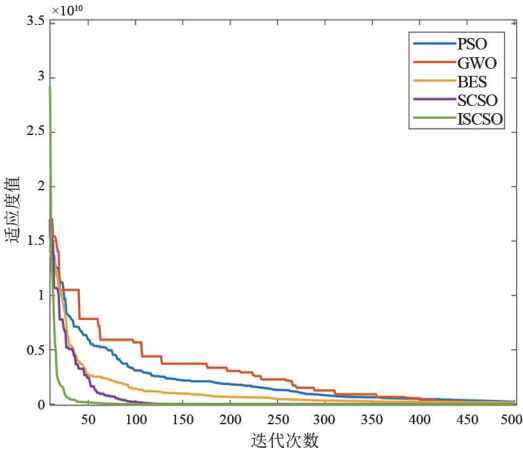


图 6 不同算法的适应度曲线

除此之外,再使用 CPLEX 求解器计算得到的综合成本为 1 350.03 元,碳排放量 1 682.89 kg,而 ISCSO 方法调度结果综合成本为 2 684.33 元,碳排放量为 1 240.19 kg。因此可以根据实际情况安排,对碳排放量和综合成本进行取舍,择优选择方法。

4 结 论

所建立的微电网模型中包含水轮机、光伏、微型燃气轮机和蓄电池。采用 LSTM 算法对负荷和光伏出力进行日前预测,以运行成本和环境保护成本最低为目标函数,利用改进沙猫群算法求解所建模型。通过 Matlab 仿真对比分析采用 PSO、GWO、BES 和 SCSO 算法的调度结果。结果表明,引入反向学习策略和柯西变异算子改进传统沙猫群算法后,ISCSO

(下转第 43 页)

一种区块链驱动调控云数据缓存的优化算法

谢江¹, 郭琳², 张晶¹, 黄思婕², 李发均³, 唐翰源⁴

(1. 国网四川省电力公司宜宾供电公司, 四川 宜宾 644000; 2. 国网四川省电力公司信息通信公司(省数据中心), 四川 成都 610041; 3. 国网四川省电力公司巴中供电公司, 四川 巴中 636000; 4. 国网四川省电力公司攀枝花供电公司, 四川 攀枝花 617000)

摘要:调控云是电网调度业务的云服务平台,可以实时反映电网运行状态,支持电网在线分析和应用业务。为了减少调控云业务采集层合法节点数据边缘缓存的延迟,防止恶意的、未经授权的用户接入边缘端对系统造成的破坏,提出了一种区块链驱动的调控云缓存系统框架,基于边缘层的许可区块链对用户进行身份验证,对合法授权用户的监控数据进行缓存,基于深度 Q 网络最小化了合法用户在边缘平面数据缓存的延迟。仿真结果证明了所提算法的有效性。

关键词:调控云; 区块链; 缓存; 深度强化学习

中图分类号: TM 73 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2024)05-0021-06

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20240504

An Optimization Algorithm for Data Caching of Blockchain-driven Dispatching Control Cloud

XIE Jiang¹, GUO Ling², ZHANG Jing¹, HUANG Sijie², LI Fajun³, TANG Hanyuan⁴

(1. State Grid Yibin Electric Power Supply Company, Yibin 644000, Sichuan, China; 2. State Grid Sichuan Information and Telecommunication Company, Chengdu 610041, Sichuan, China; 3. State Grid Bazhong Electric Power Supply Company, Bazhong 636000, Sichuan, China; 4. State Grid Panzhihua Electric Power Supply Company, Panzhihua 617000, Sichuan, China)

Abstract: The dispatching control cloud is a cloud service platform for power grid scheduling services, which can reflect the running status of power grid in real time and support online analysis and application of power grid. In order to reduce the delay of caching edge servers for legitimate nodes in dispatching control cloud acquisition layer and prevent damage to the system caused by malicious and unauthorized users accessing the edge servers, the framework of a blockchain-driven dispatching control cloud caching system is proposed, which authenticates users based on the permissioned blockchain in edge servers, and the monitoring data of legitimate users is cached. The deep Q network is proposed to minimize the time of edge plane for legitimate users. Simulation results prove the effectiveness of the proposed algorithm.

Key words: dispatching control cloud; blockchain; caching; deep reinforcement learning

0 引言

2017 年,国家电网公司开展了调度控制云平台的研究和试点工作。调度控制云平台是电网调度业务的云服务平台,采用统一、分布式的分层部署设

基金项目:国网四川省电力公司科技项目(521911230001)

计^[1]。调控云平台可以实时反映电网运行状态,支持电网在线分析和应用业务。2021 年,27 个省级监管云节点已建成投产,形成了电网系统内综合监管云体系^[2]。

电网系统运行在各个阶段都会产生大量的数据,数据量最大的是设备状态监控数据^[3]。部署在电网系统一定子区域内的物联网节点对设备状态信

息进行采集,为了减少数据上传至云端对核心网带来的压力,减少数据处理时延,可以将监控数据向边缘端汇集^[4]。

在边缘端,边缘服务器通过缓存相关数据^[5],能够处理相应的计算任务,完成任务卸载^[6]。文献[7]提出了一种基于边缘计算的智能电网分布式异常检测的体系结构,通过在边缘端缓存分布式终端协同传输的用电数据并进行异常检测,提高了智能电网的安全性。文献[8]针对智能电网的实时监控需求,提出了一种基于边缘计算框架的模拟退火算法求解了任务卸载问题。文献[9]提出了一种智能电网中联合边缘计算与 D2D 通信技术的卸载方案,降低了延迟能耗。文献[10]基于边缘计算的智能电网,提出了一种新的杂交人工蜂群算法,最小化了系统延迟。文献[11]考虑了基于边缘计算的智能电网中服务缓存问题,提出了一种在线服务缓存方法最小化处理延迟的算法。文献[12]研究了时滞控制策略问题,将服务缓存和任务卸载相结合,有效提高了系统服务质量。当接入边缘端节点增多,在无线信道环境时变情况下,传统方法迭代计算会急剧上升。随着人工智能的发展,强化学习和深度学习的结合产生了深度强化学习(deep reinforcement learning, DRL),通过在特定环境中智能体与环境的交互,可实现对环境快速变化的系统最佳长期目标的动态决策^[13]。一些研究将 DRL 引入到边缘计算中解决计算卸载问题。文献[14]在动态移动边缘系统中,提出了两种基于 DRL 的优化方法用于最小化卸载比例和计算资源分配任务完成时间。文献[15]提出了一种基于时间注意力的确定性策略梯度来求解边缘系统中计算卸载与资源优化问题,减少了任务完成时间。文献[16]提出了基于平均场博弈的 DRL 方法,减少了边缘端的处理时延。

以上算法虽然可以极大减少边缘端缓存时延,但是,由于电网中部署了大量的物联网节点用来监测设备状态信息,存在恶意节点假冒物联网节点进行恶意攻击的情况。恶意节点利用分布式拒绝服务和病毒注入攻击^[17],对系统造成灾难性的破坏。因此,需要在电网系统物联网节点与边缘服务器之间设计认证方案,减少合法用户缓存时间,防止恶意的、未经授权的用户接入边缘端。目前,大多数节点身份认证解决方案是在公钥基础设施系统中,利用可信的第三方证书颁发机构(certificate authority,

CA)为设备注册和颁发证书^[18]。这种集中式的认证容易遭受诸如单点故障的攻击,面临安全性挑战。

自 2009 年中本聪(Satoshi Nakamoto)^[19]提出基于区块链系统的比特币框架以来,区块链在各个领域的一系列应用越来越受到关注。由于区块链的分散性,它使没有可信中介的应用程序能够在密码学(或数字签名)、诚实节点及其共识机制的支持下运行,促成建立一个无信任的合作环境。区块链包括公共区块链和许可区块链。公共区块链允许任何人参与创建区块的过程;许可区块链只允许有许可证的节点参与区块构建。与公有区块链相比,许可区块链更适合于能量受限和延迟敏感的网络,以低能量和时间消耗来达成共识。文献[20]建立了边缘用户与雾服务器之间的基于区块链的交叉认证算法。文献[21]则利用许可区块链来解决智能电网中的能源消耗和基础设施映射攻击。

为了减少调控云业务采集层合法节点数据边缘缓存的延迟,防止恶意的、未经授权的用户接入边缘端对系统造成破坏,下面提出一种区块链驱动的调控云缓存系统框架,在边缘层引入许可区块链,对来自调控云业务采集层的用户进行身份验证,对合法用户的数据进行缓存,利用深度神经网络最小化合法用户数据缓存延迟。

1 区块链驱动的调控云缓存系统框架

所提许可区块链驱动的调控云缓存系统如图 1 所示。在用户平面,部署了 S 个传感器节点采集物理信息、设备运行状态信息。在边缘平面,多个基站分布在特定区域,作为具有通信、计算和人工智能功能的边缘服务器。基站利用计算能力和人工智能功能对用户进行身份验证,并将来自用户平面合法用户的数据进行缓存,利用边云协调模块启动边缘云协调策略,将监控数据的识别置于边缘平面的边缘节点,将智能分析决策置于云中心处理。

将每一个分布于用户平面完成监控数据收集的授权传感节点注册唯一账户并创建密钥,利用椭圆曲线数字签名算法和非对称密码学建立各自的身份^[22]。授权节点和基站在通过调控云的认证后注册合法身份。用户 S_i 合法身份由公钥 K_{p,S_i} 、私钥 K_{s,S_i} 和证书 C_{cert,S_i} 组成,可以描述为 $\{K_{p,S_i}, K_{s,S_i},$

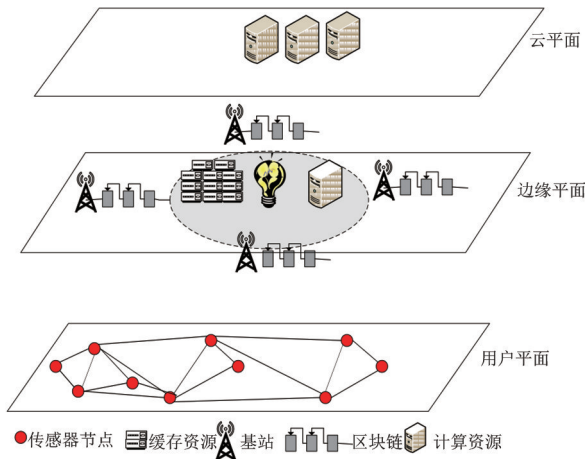


图1 系统模型

$C_{cert,S_i}\}$ 。公钥作为合法节点在边缘平面缓存信息的源地址,用于验证缓存数据的真实性。加密私钥用于签署交易,证书用于通过绑定注册信息唯一标识该合法节点,且为每一个节点分配一个钱包。钱包由合法节点公钥生成,在系统初始化阶段,每个合法节点都向调控云中心请求其他合法节点的钱包地址。

在边缘平面,每个基站收集所有合法节点的数据缓存请求,合法用户 $S_i (i \in I)$ 将其缓存请求发送到最近的基站 B_j , 记作 $R_{req,S_i \rightarrow B_j}$ 。缓存请求包括所需的缓存资源 C_{S_i} 、当前位置 L_{S_i} 、公钥 K_{p,S_i} 、签名 S_{sig,S_i} 、证书 C_{cert,S_i} 和时间戳 T_{S_i} 。 $R_{req,S_i \rightarrow B_j}$ 可表示为

$$R_{req,S_i \rightarrow B_j} = E_{K_{p,B_j}}(C_{S_i} \parallel L_{S_i} \parallel K_{p,S_i} \parallel S_{sig,S_i} \parallel C_{cert,S_i} \parallel T_{S_i}) \quad (1)$$

式中, $E_{K_{p,B_j}}()$ 为合法用户 S_i 向基站 B_j 发送的加密的数据缓存请求信息。

在接收到所有合法节点缓存请求后,各基站首先验证节点的身份,然后将合法节点的上传数据与基站地理位置进行匹配,匹配后进行该合法节点上传监控数据的缓存,每个基站向其匹配的合法缓存请求者发送信息,记为 $R_{req,B_j \rightarrow S_i}$, 可表示为

$$R_{req,B_j \rightarrow S_i} = E_{K_{p,S_i}}(L_{B_j} \parallel I_{chan,B_j} \parallel K_{p,B_j} \parallel S_{sig,B_j} \parallel T_{S_i}) \quad (2)$$

式中: $E_{K_{p,S_i}}()$ 为基站 B_j 向其匹配的合法缓存请求者 S_i 发送的加密信息; I_{chan,B_j} 为合法节点 S_i 与匹配基站 B_j 之间的无线信道状态信息。

合法节点 S_i 基于该信息执行预编程的智能合约,将监控数据缓存至匹配基站 B_j , 基站 B_j 首先验证接收到的缓存事务,记作 $T_{tran,S_i \rightarrow B_j}$ 。缓存事务包括共享缓存资源 C_{S_i} 、缓存提供者 B_j 获得的硬币

$C_{coin,S_i \rightarrow B_j}$ 、合法节点 S_i 和 B_j 的钱包地址 A_{wallet,S_i} 和 A_{wallet,B_j} 、合法节点 S_i 的签名 S_{sig,S_i} 和时间戳 T_{S_i} 。 $T_{tran,S_i \rightarrow B_j}$ 可表示为

$$T_{tran,S_i \rightarrow B_j} = E_{K_{p,B_j}}(C_{S_i} \parallel C_{coin,S_i \rightarrow B_j} \parallel A_{wallet,S_i} \parallel A_{wallet,B_j} \parallel S_{sig,S_i} \parallel T_{S_i}) \quad (3)$$

该次合法节点的交易硬币转移完成后,新生成的交易被广播到整个网络进行审计和验证,然后对其进行加密并广播到整个许可区块链网络。经过验证的该次交易事务被排序和批处理到一个加密防篡改的块中,块通过哈希指针按线性时间顺序链接,形成一个区块链。定义创建新区块的基站 B_j 作为领导者,在新区块创建后,领导者 B_j 向其他基站广播带有时间戳的块,用于区块间的审计和交叉验证,其他基站负责验证新创建区块的正确性。

在合法节点 S_i 缓存数据上传至边缘平面的第 k ($k \in K$) 个区块形成过程中,所需要的时间 $T_{S_i}(k)$ 包括区块生成时间 η 、区块验证时间 T_{k,S_i} 以及缓存内容上传延迟 T_{delay} 。

$$T_{S_i}(k) = \eta + T_{k,S_i} + T_{delay} \quad (4)$$

式中: η 为预先定义的区块生成间隔,这里取 0.5 s; T_{delay} 为缓存延迟时间。节点 S_i 的区块验证时间定义为

$$T_{k,S_i} = T_{k,broad} + T_{k,ever} + T_{k,confirm} \quad (5)$$

式中, $T_{k,broad}$ 、 $T_{k,ever}$ 以及 $T_{k,confirm}$ 分别为第 k 个区块形成过程中的块广播时间、交叉验证时间以及区块确认时间。

区块广播时间由最长区块传输时间决定,在边缘平面除去 B_j , 其余基站中最长区块的传输时间定义为

$$T_{k,broad} = \max_{j' \neq j} \frac{l_k d_{jj'}}{r} \quad (6)$$

式中: r 为基站的覆盖范围; l_k 为验证前第 k 个区块的长度; $d_{jj'}$ 为标记为 j' 的用作验证的基站 $B_{j'}$ 与领导者 B_j 之间的距离。

交叉验证在非领导者的基站 $B_{j'}$ 与 $B_{j''}$ 之间展开,交叉验证时间定义为

$$T_{k,ever} = \max_{j' \neq j'', j} \left(\frac{l_k C_{om}}{V_{j'}} + \frac{V_{local,k} d_{jj''}}{r} + \frac{V_{local,k} C_{om}}{V_{j''}} \right) \quad (7)$$

式中: C_{om} 为单位块验证所需计算资源; $V_{local,k}$ 为本地验证结果的数量; $V_{j'}$ 、 $V_{j''}$ 分别为验证者 $B_{j'}$ 、 $B_{j''}$ 所能提供的计算资源; $d_{jj''}$ 为两个交叉验证者 $B_{j'}$ 与 $B_{j''}$ 的距离。区块验证时间定义为

$$T_{k, \text{confirm}} = \max_{j' \neq j} \frac{V_{\text{check}, k} d_{jj'}}{r} \quad (8)$$

式中, $V_{\text{check}, k}$ 为交叉验证二次审计结果数量。

2 基于深度强化学习的调控云时延最小缓存算法

2.1 强化学习

强化学习是机器学习的一个分支,通过智能体(agent)与所处环境进行交互,来持续更新学习策略以实现最大化回报(return)。在某一时刻 t ,智能体观察到所处环境状态记作 s_t ,根据当前策略执行动作 a_t ,此时环境根据智能体选择的动作进行反馈并给出一个奖励信号 r_t ,而后智能体进入到下一个状态 s_{t+1} 。智能体依赖于价值函数来学习并寻求最优策略。根据函数的输入是状态 s 还是状态-动作对 $\langle s, a \rangle$,价值函数可分为状态价值函数 $V_{\pi}(s)$ 和行为价值函数 $Q_{\pi}(s, a)$ 。

解决强化学习任务的过程,即是智能体寻找最优策略的过程。智能体通过不断与环境交互并根据反馈进而调整其策略,直至得到最优策略。

2.2 深度强化学习

借助神经网络来拟合策略函数和价值函数,成为解决强化学习问题的新途径,从而诞生了深度强化学习^[23]。深度强化学习将深度学习的感知能力和强化学习的决策能力有效地结合起来,使智能体集感知能力与决策能力于一体,从而能够在具有复杂状态空间和动作空间的环境中进行感知和决策。

2.3 所提算法

在完成用户平面任一传感节点数据上传时,需要尽可能最小化区块链形成的时间 T_s ,即边缘平面所有合法用户区块形成的时间,以减少合法用户的数据缓存延迟。由于该最小化问题是非凸优化问题,该问题是 NP 困难问题。近年来,将 Q 值函数用深度神经网络进行拟合,实现对高维状态空间下复杂任务学习的深度 Q 网络(deep Q network, DQN),在解决复杂优化问题方面表现出了优异的性能^[24]。这里基于 DQN 算法,利用智能体与环境的交互,持续更新学习策略以实现最大化回报来完成 T_s 的最小化。

将用户平面任意节点定义为智能体,为智能体

定义状态空间、动作空间以及奖励。定义状态空间 S 为智能体感知到的环境以及选择动作之后变化了的环境组成的集合。时隙 t 的状态 $s(t) \in S$,表示为 $s(t) = \{T(t), F_i, C\}$,其中: $T(t)$ 为 t 时刻分配的时隙; $F_i = \{C_{S_i}, T_i\}$, T_i 为最长的数据包传输延迟; C 为某一基站可以提供缓存的能力。

定义动作空间 A 为每个智能体所选择的动作的集合,智能体所选的动作是离散动作,包括缓存基站选择以及是否生成区块。时隙 t 的动作 $a(t) \in A$,表示为 $a(t) = \{a_{\text{ca}}(t), a_{\text{block}}(t)\}$,其中: $a_{\text{ca}}(t)$ 为智能体选择与其地理位置匹配的基站完成缓存; $a_{\text{block}}(t)$ 为智能体选择是否生成区块。

奖励记为 R ,统一的系统即时奖励 $r(t)$ 定义为

$$r(t) = \alpha \frac{1}{T_{k, S_i}} + \beta \frac{1}{T_{\text{delay}}} \quad (9)$$

其中, $\alpha + \beta = 1$ 。

智能体在时隙 t 观察并获取系统状态 $s(t)$,选择动作 $a(t)$,然后环境将更新后的系统状态 $s(t+1)$ 和即时奖励 $r(t)$ 返回给下一个时隙 $t+1$ 的智能体,智能体重复上述过程找到获得最大的长期价值的最优策略 π^* 。利用 Q 函数 $Q(s, a)$ 作为值估计函数,则具有状态 s 和动作 a 的奖励值函数 $Q^*(s, a)$ 可以计算如下:

$$Q^*(s, a) = E^* \left[\sum_{s' \in S} r(s, a, s') + \gamma \max_{a'} Q^*(s', a') \right] \quad (10)$$

式中: $E^*(\cdot)$ 为期望函数; γ 为折扣因子, $0 < \gamma < 1$; s, s' 分别为智能体当前状态及智能体选择动作获得奖励后转移到的新状态; a, a' 分别为智能体当前选择的动作以及在下一状态所有可选动作; $r(s, a, s')$ 为在当前状态 s 选择动作 a 转移到新状态 s' 所获得的奖励。

最优策略 π^* 是在状态 s 下使 Q 值最大化的动作,每一步的 Q 值需要按照式(11)更新。

$$Q[s(t+1), a(t+1)] = Q[s(t), a(t)] + \theta \{r(t) + \gamma \max_{a \in A} Q[s'(t), a'(t)] - Q[s(t), a(t)]\} \quad (11)$$

式中: θ 为学习率, $0 < \theta < 1$; $s'(t)$ 为当前状态 s 下做出行为 a 后的后继状态; $a'(t)$ 为处于状态 $s'(t)$ 的相应动作。将值函数 Q 利用深度神经网络拟合,并引入另一个目标神经网络 $\hat{Q}$,以较小的学习率更新目标网络参数,将目标 $\hat{Q}$ 值与当前 Q 值的均方差定义

为损失函数 $L(\omega)$, 表示为

$$L(\omega) = E[(r + \gamma \max_{a'} \hat{Q}(s', a'; \omega^-) - Q^2(s, a; \omega)] \quad (12)$$

式中: ω 为 $Q(s, a)$ 对应神经网络的参数; ω^- 为目标深度 Q 网络的参数。

DQN 以最小化式(12)来更新参数, 利用经验回放池 D 在每一个时刻存储智能体的经验 $e(t) = \{s(t), a(t), r(t), s(t+1)\}$, 利用函数 ϕ 生成固定长度的序列放入经验回放池 D , 基于 DQN 的时延最小算法伪代码为:

- a) 初始化区块链驱动的调控云缓存系统网络参数
- b) 初始化经验回放网络 D
- c) 利用随机权重 ω 初始化目标动作值函数 Q
- d) 利用 $\omega^- = \omega$ 初始化目标神经网络参数, 经验回放网络 D
- e) for episode1, M do
- f) 初始化序列 $s_1 = \{x_1\}$, 预处理序列 $\phi_1 = \phi(s_1)$
- g) for $t = 1, T$ do
- h) 以概率 ξ 随机选择动作 $a(t)$
- i) 否则按照公式 $a(t) = \arg \max_a Q\{\phi[s(t), a; \omega]\}$ 选择动作
- j) 在仿真器执行动作 $a(t)$, 观察奖励 $r(t)$ 以及图像 x_{t+1}
- k) 设置 $s_{t+1} = s_t, a_t, x_{t+1}$, 预处理 $\phi_{t+1} = \phi(s_{t+1})$
- l) 将转换 $(\phi_t, a_t, r_t, \phi_{t+1})$ 存入经验池 D
- m) 在经验池 D 中随机采样的小批量转换 $(\phi_j, a_j, r_j, \phi_{j+1})$
- n) 设置若 episode 终止于 $j+1$ 步, 则 $y_j = r_j$, 否则 $y_j = r_j + \gamma \max_{a'} \hat{Q}(s', a'; \omega^-)$
- o) 按照式(12)执行一次梯度下降
- p) End for
- q) End for

3 仿真结果与分析

基于 Python 语言验证所提算法的性能, 以 100 个监控节点分布于正方形的观察区域, 每个内容的数据大小、所需缓存资源和最大内容分发延迟分别在 100 kiB、[0.5, 2.5] GiB 和 [5, 15] s 的范围内, 引入两种基准测试方案: 基于贪婪算法的缓存方案以及

基于随机算法的缓存方案。在基于贪婪算法的缓存方案中, 每个合法节点的数据缓存请求程序以最高的数据速率将其内容交付给缓存基站。基于随机算法的缓存方案随机选择一个基站进行数据内容的缓存。

图 2 显示了所提方案与两种基准测试方案不同缓存数据大小的系统奖励比较。从图 2 可以看出, 随着缓存数据量的增大, 所提方案的系统奖励明显增加, 面对不同的数据缓存处理方式, 智能体基于 DQN 算法可以随着周围环境来确定不同时隙位于边缘平面提供缓存的最优基站。仿真结果还表明, 系统奖励提升时, 所设计系统的区块验证时间 T_{k, S_i} 以及缓存内容上传延迟 T_{delay} 降低。

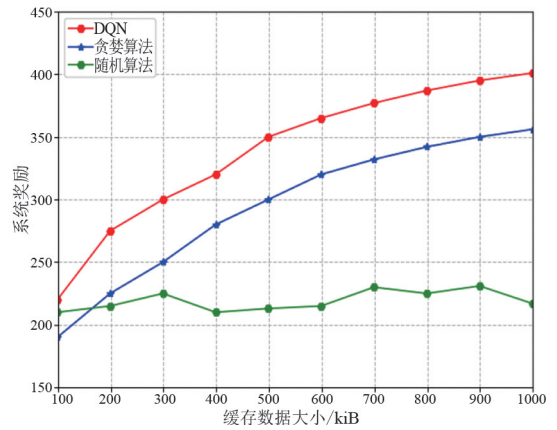


图 2 不同方案下不同缓存数据大小的系统奖励比较

图 3 显示了所提方案与两种基准测试方案不同缓存请求的累积平均奖励比较。从图 3 看到, 所提基于 DQN 的算法随着缓存请求数的增加, 累积平均奖励优于两种基准策略。因为基于 DQN 的算法是智能体通过与环境交互, 以当前网络拓扑和无线信道条件完成内容缓存, 而基于贪婪算法的缓存方案以及基于随机算法的缓存方案没有根据合法节点所处的实时环境进行缓存的配置。基于随机算法的缓

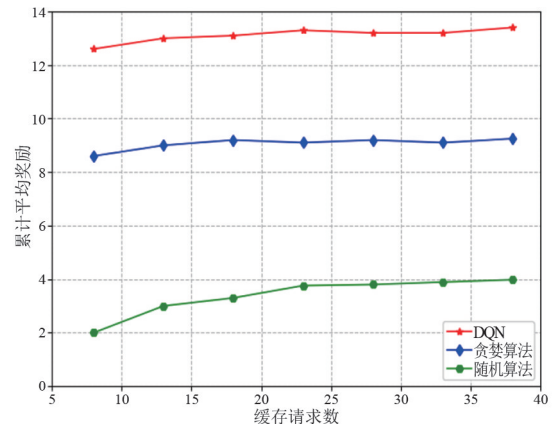


图 3 不同方案下不同缓存请求的累积平均奖励比较

存方案的累计平均奖励最低,说明缓存请求被随机选择后,有些内容缓存会失败。

图 4 显示了不同方案下不同缓存容量的平均时延。从图 4 看到,所提基于 DQN 的算法随着缓存容量的增加,平均时延低于对比算法,证明了所提算法对于降低合法用户数据缓存的延迟。

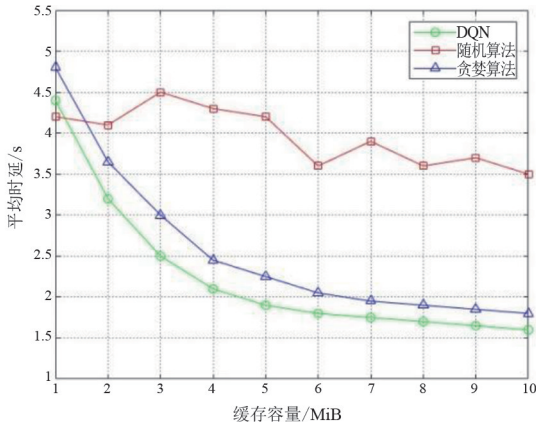


图 4 不同方案下缓存容量与平均时延变化关系

4 结 论

随着大量的可以实时反映物理世界信息的物联网节点接入电网,电网的分布式分层部署的调控云平台可以完成对各类电网应用业务的支撑。边缘缓存的业务部署,虽可减少大量物联网节点并发接入带来的调控云业务的延迟,但是,恶意的、未经授权的物联网节点接入边缘缓存业务,会带来对调控云业务的破坏。上面提出了一种区块链驱动的调控云缓存系统框架,在基站接入端部署许可区块链,每一个调控云业务采集层的节点利用许可区块链在边缘端完成身份验证并对合法用户进行数据缓存。为了减少合法用户验证过程的区块链形成时间,利用节点作为智能体与环境的交互,以最小化区块链形成时间为奖励,基于 DQN 算法最小化了合法用户数据缓存延迟。

参考文献

[1] 许洪强.面向调控云的电力调度通用数据对象结构化设计及应用[J].电网技术,2018,42(7):2248-2254.

[2] QI X L, HAN Y, WEI Z C, et al. Overall architecture and key technologies of multi-level power grid scheme system based on dispatching and control cloud[C]//2022 IEEE 10th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC), June 17-19,

2022, Chongqing, China. IEEE, 2022:366-372.

[3] 许洪强,孙世明,葛朝强,等.电网调控实时数据平台体系架构及关键技术研究与应用[J].电力系统自动化,2019,43(22):157-164.

[4] SHENG L, WANG C Y, LIU Y, et al. Data processing optimization of power grid dispatching control cloud based on edge-cloud collaborative computing[C]//2023 IEEE 3rd International Conference on Power, Electronics and Computer Applications (ICPECA), Jan. 29 - 31, 2023, Shenyang, China. IEEE, 2023:759-763.

[5] ZHOU H, JIANG K, LIU X X, et al. Deep reinforcement learning for energy efficient computation offloading in mobile edge computing[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(2):1517-1530.

[6] LI J, CHEN H, CHEN Y J, et al. Pricing and resource allocation via game theory for a small-cell video caching system[J]. IEEE Journal on selected Areas in Communications, 2016, 34(8):2115-2129.

[7] EL-AWADI R, FERNANDEZ-VILAS A, DIAZ REDONDO R P. Fog computing solution for distributed anomaly detection in smart grids[C]//IEEE International Conference on Wireless Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob), Oct. 21 - 23, 2019, Bancelona, Spain. IEEE, 2019:348-353.

[8] HUANG Y T, LU Y H, WANG F, et al. An edge computing framework for real-time monitoring in smart grid[C]//2018 IEEE International Conference on Industrial Internet, Oct. 21 - 23, 2018, Seattle, USA. IEEE, 2018:99-108.

[9] JIANG J, XU J, XIE Y, et al. A cooperative computation offloading scheme for dense wireless sensor-assisted smart grid networks[C]//2021 IEEE International Conference on Computer and Communication Systems (ICCCS), April 23 - 26, 2021, Chengdu, China. IEEE, 2021:887-892.

[10] ZAHOOR S, JAVAID N, KHAN A, et al. A cloud-fog-based smart grid model for efficient resource utilization[C]//IEEE 14th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference, June 25-29, 2018, Limassol, Cyprus. IEEE, 2018:1154-1160.

[11] LI M Y, RUI L L, QIU X S, et al. Design of a service caching and task offloading mechanism in smart grid edge network[C]//2019 15th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), June 24-28, 2019, Tangier, Morocco. IEEE, 2019:249-254.

(下转第 97 页)

SF₆/N₂混合气体 GIS 三相共箱母线接头发热时温度分布及诊断方法的仿真研究

张丕沛¹, 赵晓楠², 丛龙琦², 郭晨瑞¹

- (1. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250003;
2. 国网山东省电力公司威海供电公司, 山东 威海 264200)

摘要:以 SF₆/N₂ 混合气体作为绝缘介质的气体绝缘金属封闭开关设备 (GIS) 可有效降低环境污染, 目前已逐渐在 220 kV 及以下 GIS 母线中推广应用。由于母线接头接触不良引起发热是 GIS 较为常见的缺陷, 因此针对 SF₆/N₂ 混合气体 GIS 母线接头接触不良时的温度分布开展研究。首先, 建立了 220 kV SF₆/N₂ 混合气体三相共箱母线多物理场耦合的三维等比例仿真模型, 通过在母线接头处设置电阻膜实现接触不良状态的模拟, 从而对不同相别的母线接头接触不良时的温度分布规律开展计算分析; 然后, 研究了利用壳体表面温差诊断内部严重发热缺陷的方法。研究结果显示: 任意一相母线接头接触不良时, 壳体表面对应位置都会出现温度最高点; 当顶部两相母线接头发热且壳体表面温差达到 2.5 K, 或底部母线接头发热且壳体表面温差达到 2.0 K 时, 可诊断为严重缺陷。

关键词:混合气体; 接触不良; 温度分布; 多物理场耦合; 缺陷诊断

中图分类号: TM 216 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2024)05-0027-07

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20240505

Simulation Study on Temperature Distribution and Diagnostic Method of Three-phase Enclosed Bus Joint Heating of GIS with SF₆/N₂ Gas Mixture

ZHANG Pipei¹, ZHAO Xiaonan², CONG Longqi², GUO Chenrui¹

- (1. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250003, Shandong, China;
2. State Grid Weihai Electric Power Supply Company, Weihai 264200, Shandong, China)

Abstract: Gas insulated switchgear (GIS) taking SF₆/N₂ gas mixture as insulating medium can effectively reduce environmental pollution, and it has gradually been applied in GIS at 220 kV and below. Considering that poor contact of bus joint is a common defect, it is necessary to study the temperature distribution of bus joint of GIS with SF₆/N₂ gas mixture during poor contact. Firstly, a 3D simulation model of multi-physics coupling for 220 kV three-phase enclosed bus with SF₆/N₂ gas mixture is established. By setting a resistance film at the bus joint to simulate the poor contact state, the temperature distribution law of bus joint of different phases with poor contact is calculated and analyzed. And then, the method for diagnosing severe internal heating defects using the surface temperature differences of shell is studied. The results show that when the contact of any phase bus joint is poor, the highest temperature point will appear on the corresponding position of shell surface, and when the top two bus joints are heating and the temperature differences on shell surface reach 2.5 K, or when the bottom bus joints are heating and the temperature differences on shell surface reach 2.0 K, it could be diagnosed as a serious defect.

Key words: gas mixture; poor contact; temperature distribution; multi-physics coupling; defect diagnosis

0 引言

使用 SF_6 作为绝缘介质的气体绝缘金属封闭开关设备 (gas insulated switchgear, GIS) 凭借其绝缘性能好、免维护性强的优点, 广泛应用于电力系统中。然而 SF_6 气体是国际上公认的温室气体之一, 其分子的温室效应是 CO_2 的 23 900 倍, 若 SF_6 充气及回收过程未按标准工艺开展, 则可能导致 SF_6 气体排放至空气中, 对生态环境造成危害^[1-5]。近年来, 国内外学者一直致力于环保型替代气体的研究, 其中 SF_6/N_2 混合气体由于性能稳定且价格便宜, 开始在 220 kV 及以下变电站中逐渐应用和推广, 且相关理论试验研究及试点运行经验表明, 当混合气体中 SF_6 与 N_2 的比例为 3 : 7 并适当提升气体压力时, 可以在环保性能和绝缘性能之间获得良好的平衡^[6-10]。

SF_6/N_2 混合气体 GIS 装用量已逐渐增大, 其运行状态的评估方法也亟需研究, 尤其是将传统的纯 SF_6 气体替换为混合气体后, 气体对流能力的变化势必会对气室内部的温度分布产生不同的影响。文献[11-13]分别对纯 SF_6 气体、 SF_6/N_2 混合气体、 $\text{C}_4\text{F}_7\text{N}/\text{CO}_2$ 混合气体及 $\text{C}_5\text{F}_{10}\text{O}/\text{空气}$ 混合气体 GIS 的温度特性开展计算研究, 结果表明, 相同运行条件下各类混合气体 GIS 的母线导体温度均高于纯 SF_6 气体 GIS, 说明混合气体的对流换热能力低于纯 SF_6 气体。文献[14-16]分别对 110~500 kV SF_6/N_2 混合气体 GIS 母线的温度特性开展了试验及仿真分析, 研究了不同运行电流、不同气体压力对导体及壳体温度的影响规律, 但上述研究仅针对正常运行条件, 缺少对母线接头因接触不良而发热时温度分布的计算分析。

下面根据山东省内广泛应用的 ZF16-252 型 220 kV SF_6/N_2 混合气体 GIS 三相共箱母线气室的实际结构尺寸, 利用有限元仿真软件建立了多物理场耦合的三维温度场计算模型, 并在母线接头处设置电阻膜来模拟接触不良的状态。在此基础上对导体及壳体的温度分布特点开展了计算分析, 并研究得出利用壳体表面温差进行接触不良引起的严重发热缺陷诊断的判断方法。

1 混合气体母线温度分布计算原理

SF_6/N_2 混合气体 GIS 母线温度分布计算包含多个物理场之间的耦合过程, 主要包括电磁场-温度场耦合和流体场-温度场耦合。

1.1 电磁场-温度场耦合

混合气体母线气室内部的热源, 主要为电流流过母线导体产生的焦耳发热及在壳体内部感应产生的环流发热。

导体和外壳等金属材料在不同温度下的电导率也不相同, 因此在电磁场-温度场耦合计算时, 需要根据温度计算结果, 不断修正导体和壳体的电导率, 直至温度计算结果收敛。金属材料电导率与温度的关系可表示为

$$\sigma_m(T) = \frac{\sigma_{m20}}{1 + \alpha(T - 20)} \quad (1)$$

式中: σ_{m20} 为金属材料在 20 °C 时的电导率, 铝合金材质的导体和壳体可取 $7.14 \times 10^5 \text{ S}$; $\sigma_m(T)$ 为温度 T 时的电导率; α 为电导率温度系数, 铝合金材料约为 $3.9 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ 。

对于 GIS 母线, 其导体和壳体内部的电磁场控制方程均满足:

$$\nabla \times (\mu_m^{-1} \nabla \times \mathbf{A} - \nabla \cdot \mu_m^{-1} \nabla \cdot \mathbf{A}) = \mathbf{J}_e \quad (2)$$

式中: ∇ 为矢量微分算子; μ_m 为磁导率, 铝合金材质的导体和壳体均取 $1.4 \times 10^{-6} \text{ H/m}$; $\mathbf{A}$ 为矢量磁位; $\mathbf{J}_e$ 为导体内的运行电流密度, 由运行电流及导体截面尺寸计算得到。

在导体和壳体中还存在着感应电流, 感应电流与导体和壳体所交链的磁场有关。因此, 导体和壳体中的总电流密度分别为:

$$\mathbf{J}_d = -j\omega\sigma_m(T)\mathbf{A}|_{\text{导体交链}} + \mathbf{J}_e \quad (3)$$

$$\mathbf{J}_k = -j\omega\sigma_m(T)\mathbf{A}|_{\text{壳体交链}} \quad (4)$$

式中: $\mathbf{J}_d$ 和 $\mathbf{J}_k$ 分别为导体和壳体内部的电流密度; ω 为角频率, 这里 $\omega = 100\pi \text{ rad/s}$ 。可以看出, 由于壳体内部没有电流源, 因此式(4)右边仅有感应电流一项, 即壳体环流。

因此, 导体单位体积内的焦耳发热功率和壳体单位体积内的环流发热功率分别为:

$$P_d = \frac{\mathbf{J}_d \mathbf{J}_d^*}{\sigma_m(T)} \quad (5)$$

$$P_k = \frac{J_k J_k^*}{\sigma_m(T)} \quad (6)$$

式中, J_d^* 和 J_k^* 分别为 J_d 和 J_k 的共轭复数。

从而,导体和壳体内部的温度场计算满足的控制方程^[19]为:

$$\rho_m C_m \nabla T = \nabla(q_c + q_f) + q_m \quad (7)$$

$$q_c = \lambda_m \nabla T \quad (8)$$

$$q_f = \frac{\sigma \pi d \left(\left(\frac{T_d}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_D}{100} \right)^4 \right)}{\frac{1}{\varepsilon_d} + \frac{d_2}{D_1} \left(\frac{1}{\varepsilon_D} - 1 \right)} \quad (9)$$

$$q_m = \begin{cases} P_d, & \text{导体内部} \\ P_k, & \text{壳体内部} \end{cases} \quad (10)$$

式中: ρ_m 、 C_m 、 λ_m 分别为导体和壳体的密度、比热容、导热系数,铝合金材料分别取 2750 kg/m³、985 J/(kg·K)、1500 W/(m·K); q_c 为固体材料内部的热传导换热量; q_f 为固体及壳体间的热辐射换热量; q_m 为自身发热产生的能量; σ 为斯蒂芬玻尔兹曼常数,为 5.67×10⁻⁸ W/(m²·K⁴); T_d 和 T_D 分别为导体外表面温度和壳体内表面温度,需在迭代计算过程中读取; ε_d 和 ε_D 分别为导体外表面和壳体内表面的辐射率,铝合金材料可近似取 0.88; d_2 、 D_1 分别为导体外径、壳体内径。

式(7)的物理意义即为能量守恒定律,等号左边为导体和壳体单位体积的内能变化量,等号右边的两项分别为外界输入的能量(即 q_c 和 q_f)和自身发热产生的能量(q_m)。

1.2 流体场-温度场耦合

SF₆/N₂混合气体 GIS 母线导体与壳体间的热量传递主要以混合气体中对流传热的形式进行,气体内部的对流传热过程满足能量守恒方程、质量守恒方程和动量守恒方程,表达式^[18]分别为:

$$\rho_g C_g \mathbf{u} \nabla T = \nabla(\lambda_g \nabla T) \quad (11)$$

$$\nabla(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (12)$$

$$\rho(\mathbf{u} \nabla) \mathbf{u} =$$

$$\nabla \left\{ -p \mathbf{I} + \mu [\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T] - \frac{2}{3} \mu (\nabla \mathbf{u}) \mathbf{I} \right\} + g \Delta \rho \quad (13)$$

式中: ρ_g 、 C_g 、 λ_g 分别为气体的密度、比定压热容、导热系数; p 、 μ 、 $\Delta \rho$ 分别为气体压强、气体动力粘度、气体热膨胀引起的密度差; g 为重力加速度,取 10 m/s²; $\mathbf{u}$ 和 $\mathbf{I}$ 分别为速度矢量和单位矩阵。式(11)与

式(7)一样都反映了能量守恒定律,不同的是混合气体内部无热源,因此式(11)等号右边仅有一项。

式(7)一式(11)的求解还需要明确导体、壳体、混合气体各个边界上的边界条件。对于壳体外表面与外界空气的交界面 S1,当外界环境温度已知且恒定时,壳体与外界空气间的对流换热过程可以用对流换热边界条件来表征,即

$$\lambda_m \frac{\partial T}{\partial n_1} \bigg|_{S1} = h(T - T_a) \quad (14)$$

式中: T_a 为空气温度,取 25 ℃; h 为壳体与空气间的对流传热系数,主要与壳体尺寸及材质有关,取 5 W/(m²·K); n_1 为交界面 S1 的法向。

对于导体外表面、壳体内表面与混合气体的交界面 S2,由于混合气体的温度为待求量,因此无法用对流换热边界条件来表征,仅满足接触面边界条件,即:

$$T_m \big|_{S2} = T_g \big|_{S2} \quad (15)$$

$$\lambda_m \frac{\partial T_m}{\partial n_2} \bigg|_{S2} = \lambda_g \frac{\partial T_g}{\partial n_2} \bigg|_{S2}$$

式中: T_m 、 T_g 分别为导体、壳体与混合气体在交界面处的温度; n_2 为交界面 S2 的法向。

2 混合气体母线仿真模型

2.1 母线接头接触不良仿真模型

220 kV GIS 母线大多数为三相共箱结构,三相导体呈倒立的正三角形布置。根据典型型号的 220 kV SF₆/N₂混合气体 GIS 三相共箱母线的实际结构尺寸,利用 Comsol 多物理场有限元仿真软件建立母线接头处的 1:1 三维模型,如图 1 所示。模型包含两段母线气室,中间由盆式绝缘子隔开,由于实际中每段母线气室长度在 8 m 及以上,尺寸太大不利于计算,因此仿真模型中将每段母线气室长度设置为 2 m,并在两端施加无限远边界条件来模拟实际尺寸。母线壳体内外径分别为 460 mm、440 mm,导体内外径分别为 48 mm、60 mm。

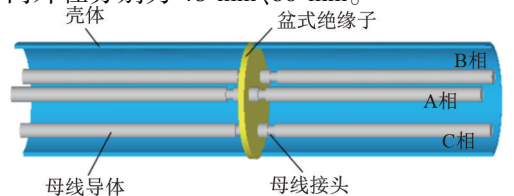


图 1 混合气体 GIS 母线仿真模型

母线接头处主要由导体触头和内嵌在盆式绝缘子上的触头座组成。当导体触头插入触头座后,触头座上的弹簧触指对导体触头形成夹紧力,从而使两者保持良好接触。若长期运行后出现触指夹紧力不足或接触面氧化等现象,则会导致导体触头与触指间接触电阻增大。为模拟母线接头接触不良,仿真模型中在导体触头与触指接触面处设置厚度为 1 mm 的电阻膜,通过改变电阻膜的电阻值来模拟触头触指间接触电阻的变化。母线接头及电阻膜示意如图 2 所示。

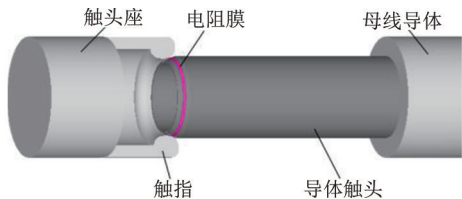


图 2 母线接头及电阻膜

2.2 混合气体参数赋值

由式(11)一式(13)可以看出,混合气体的密度、比定压热容、导热系数、动力粘度等参数都会影响导体和壳体间的对流传热过程,且这些参数都会随气体温度和气压的变化而变化。表 1 给出了 SF₆、N₂ 及 30% SF₆/70% N₂ 混合气体在 25 ℃、0.6 MPa (混合气体 GIS 额定气压) 下的热特性参数值^[20],其中混合气体的相关参数由文献[21]中提出的多组分气体参数计算公式求得。

表 1 气体热特性参数

气体	密度/ (kg·m ⁻³)	动力粘度/ (10 ⁻⁵ Pa·s)	导热系数/ [W·(m·K) ⁻¹]	比定压热容/ [J·(kg·K) ⁻¹]
SF ₆	5.967	1.501	0.013 58	649.6
N ₂	1.144	1.743	0.025 61	1 039.0
30%SF ₆ /70%N ₂	4.218	1.863	0.015 84	839.5

鉴于 Comsol 软件中已内置 SF₆、N₂ 气体热特性参数随温度的变化函数,因此计算过程中只需根据当前步长的温度计算结果对气体参数进行更新(先根据温度计算 SF₆、N₂ 气体的参数,再使用多组分气体参数计算公式计算当前温度下混合气体参数),迭代计算至结果收敛即可。混合气体隔离开关温度分布的完整迭代计算流程如图 3 所示,图中 n 为迭代计算次数。

3 混合气体母线温度计算结果

前期的理论试验研究及试点运行经验表明,

30%SF₆/70%N₂混合气体压力为 0.6 MPa 的母线气室具有较好的绝缘性能,因此在该条件下并设定外界空气温度为 25 ℃ 时开展母线导体与壳体温度分布研究。

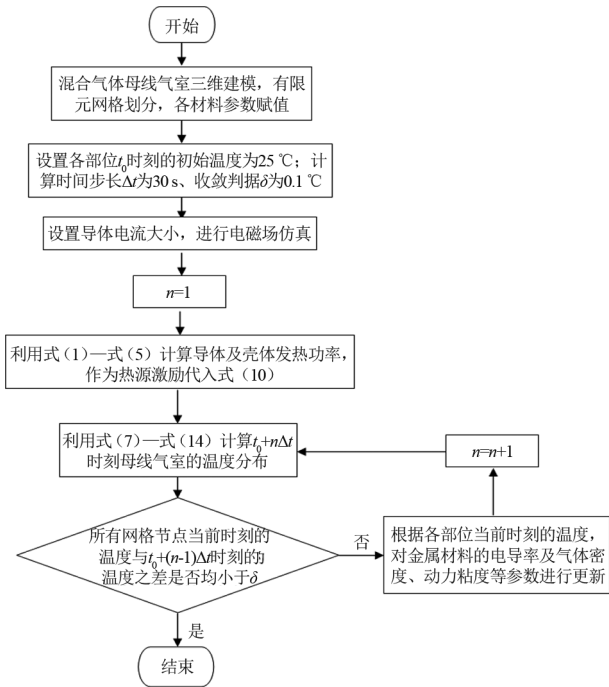


图 3 温度分布计算流程

3.1 母线接头接触不良时的温度分布

以图 1 所示仿真模型中的右侧气室为研究对象,当三相母线接头的接触电阻均设置为 50 μΩ (正常接触)时,对导体施加额定电流 4000 A,导体和壳体的温度分布如图 4 所示。可以看出,三相导体的温度分布基本一致,最高温度为 44.6 ℃,位于母线接头处,与导体其余位置相比温差约为 3.8 K,这是由于母线接头处的通流面积相对较小造成的,属于正常温升。壳体表面与三相导体对应位置的温度较高,为 33.4 ℃,但与壳体表面其余部位的温差较小(小于 1 K),此时壳体表面温度主要受外界空气对流的影响,温度分布较为均匀。

分别将 A 相、C 相母线接头的接触电阻设置为 200 μΩ,导体和壳体的温度分布分别如图 5、图 6 所示。可见当 A 相、C 相母线接头接触不良时,母线接头处的最高温度均达到 76 ℃ 左右,同时,发热相对应的壳体位置也出现了较为明显的温度最高点。因此,可以根据壳体表面温度最高点出现的位置,判断内部是否存在母线接头接触不良导致的发热缺陷。

此外,A 相母线接头接触不良时的壳体表面最高温度为 34.5 ℃,与壳体表面其余部位最大温差为

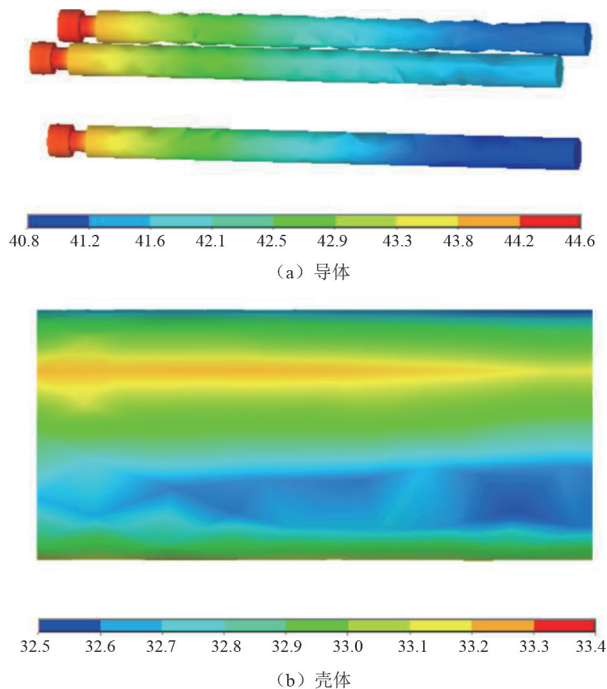


图 4 正常接触时的温度分布(单位:℃)

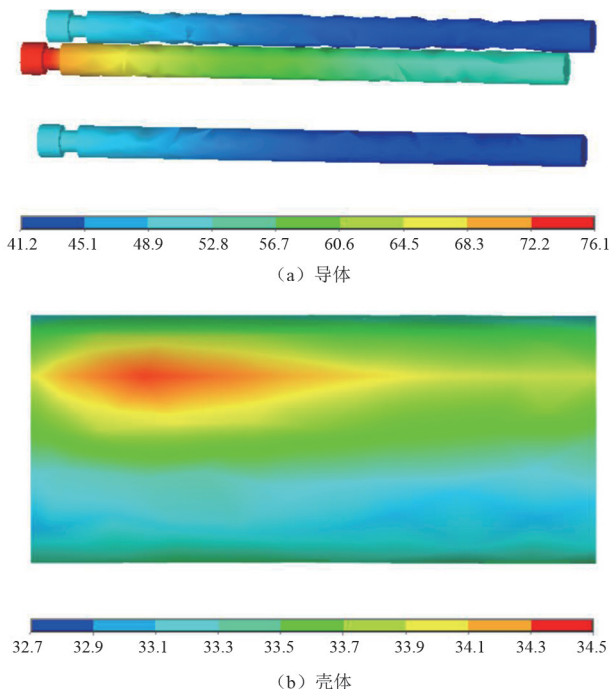


图 5 A 相母线接头接触不良时的温度分布(单位:℃)

1.8 K; C 相母线接头接触不良时的壳体表面最高温度为 34.1 °C,最大温差为 1.3 K。C 相发热时的壳体表面最高温度和温差相对较小,这是因为 C 相位于底部,受对流换热的影响,C 相母线接头产生的热量被较多地传递至气室上方,从而略微增大了壳体其余位置的温度。鉴于三相导体为倒立的正三角形布置,B 相母线接头接触不良时的温度分布规律与 A 相类似,这里不再单独进行分析。

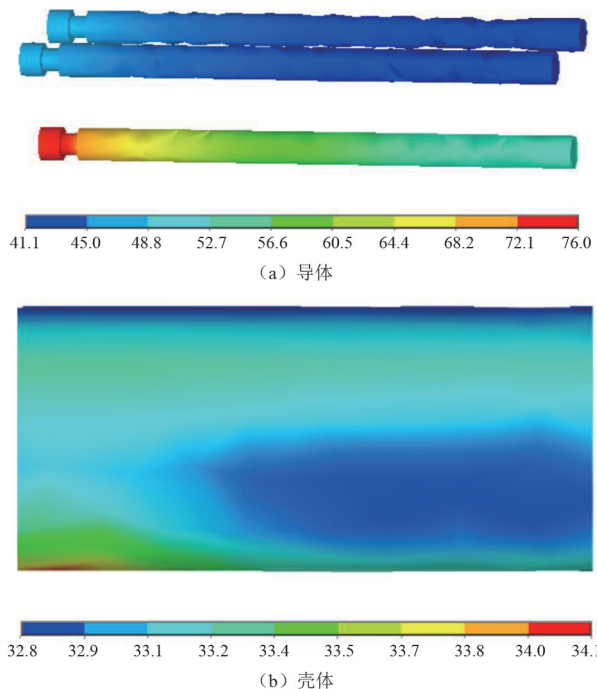


图 6 C 相母线接头接触不良时的温度分布(单位:℃)

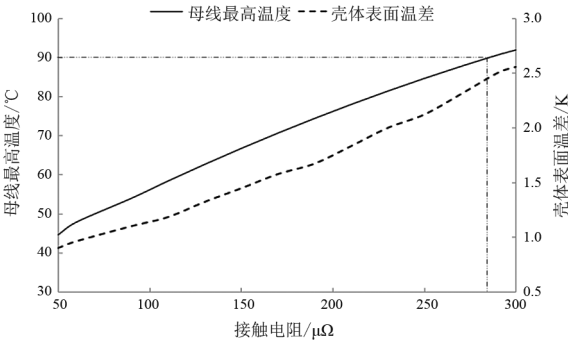
3.2 母线接头接触不良的诊断方法

由第 3.1 节的仿真结果可知,当母线接头接触电阻增大至 200 $\mu\Omega$ 时,接头处最高温度为 76 °C,尚未达到 DL/T 664—2016《带电设备红外诊断应用规范》中明确的严重发热缺陷的判定标准(90 °C)。因此,继续对 A 相、C 相不同接触电阻时的导体和壳体温度分布开展计算,得到母线接头处最高温度和壳体表面温差随接触电阻的变化曲线如图 7 所示。

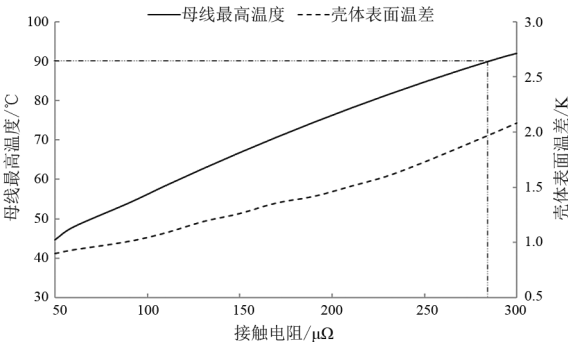
可以看出,当母线接头接触电阻增大至 280 $\mu\Omega$ 时,A 相、C 相导体最高温度均达到 90 °C。此时,A 相壳体表面温差为 2.5 K,C 相壳体表面温差为 2.0 K。

同时,考虑到不同运行电流对温度分布的影响,分别对运行电流为 3000 A、2000 A、1000 A 时,A 相、C 相母线接头接触不良的温度分布仿真计算,得到当母线接头温度达到 90 °C 时的壳体表面温差,如表 2 所示。可以看出,对于不同运行电流,母线接头温度达到 90 °C 时的壳体表面温差相同。这是由于内部导体发热严重时,壳体表面最高温度主要受内部导体温度的影响,而壳体表面最低温度主要与外界空气温度有关。

综上所述,当 220 kV SF₆/N₂混合气体 GIS 母线壳体表面侧上方存在热点且温差达到 2.5 K 时,可诊断为 A 相或 B 相(即顶部两相)导体接头存在严重发热缺陷;当母线壳体表面底部存在热点且温差



(a) A相母线接头接触不良



(b) C相母线接头接触不良

图 7 温度随接触电阻变化曲线

表 2 母线接头温度 90 °C 时不同运行电流下壳体表面温差

运行电流/ A	接触电阻/ μΩ	A 相发热时 壳体表面温差/K	C 相发热时 壳体表面温差/K
3000	570	2.5	2.0
2000	890	2.5	2.0
1000	1050	2.5	2.0

达到 2 K 时,可诊断为 C 相(即底部)导体接头存在严重发热缺陷。

4 结 论

上面通过对 ZF16-252 型 220 kV SF₆/N₂ 混合气体 GIS 三相共箱母线接头发热时温度分布的仿真研究,得出以下结论:1) 母线接头接触不良时温度上升明显,对应的壳体表面位置会出现温度最高点,但壳体表面温差较小;2) 位于底部的母线导体因接触不良发热时,受气室内混合气体对流作用影响,壳体表面温差更小。

为进一步研究利用壳体表面温差进行内部发热缺陷诊断的方法,对不同运行电流下,动静触头插接处温度达到 90℃ 时的壳体表面温差开展计算分析,结果表明:1) 顶部两相母线接头因接触不良发热时,壳体表面温差达到 2.5 K 时可诊断为严重缺陷;

2) 底部母线接头发热时,壳体表面温差达到 2.0 K 可诊断为严重缺陷。

上述结论对于结构尺寸相近的其他型号 220 kV SF₆/N₂ 混合气体 GIS 三相共箱母线可供借鉴。

参考文献

[1] 高克利,颜湘莲,王浩,等.环保型气体绝缘输电线路(GIL)技术发展[J].高电压技术,2018,44(10):3105-3113.

[2] 傅明利,王勇,卓然,等. SF₆替代气体在隔离开关中的开断性能仿真研究[J].高压电器,2021,57(3):41-47.

[3] 周文俊,郑宇,高克利,等.环保型绝缘气体电气特性研究进展[J].高电压技术,2018,44(10):3114-3124.

[4] 张晓星,田双双,肖淞,等. SF₆替代气体研究现状综述[J].电工技术学报,2018,33(12):2883-2893.

[5] 李杰,汪鹏,孙景文,等.基于 Gabor 变换的 GIS 设备典型放电缺陷识别[J].山东电力技术,2022,49(2):54-60.

[6] 郝学东,孙飞舟,罗四娇.SF₆/N₂ 混合气体在气体绝缘金属封闭开关设备母线中的应用[J].电气时代,2018(10):86-87.

[7] 季严松,张民,王承玉,等.SF₆/N₂ 混合气体在电弧作用下分解产物试验研究[J].高压电器,2021,57(3):145-151.

[8] 孙鹏程,王帮田,洪文芳,等. SF₆/N₂ 混合气体绝缘特性的实验研究[J].中国电力,2012,45(12):71-75.

[9] 汪泓,邱毓昌,张乔根.六氟化硫混合气体绝缘的发展动向[J].绝缘材料,2002(5):31-34.

[10] 周安春,高理迎,冀肖彤,等. SF₆/N₂ 混合气体用于 GIS 母线的应用与研究[J].电网技术,2018,42(10):3429-3435.

[11] 史荣斌,秦炜淇,张猛,等.特高压 C₄F₇N/CO₂ 混合气体 GIL 温度分布[J].高电压技术,2022,48(2):698-705.

[12] 靳国豪,秦川,靳婷蕾,等. c-C₄F₈ 和 C₅F₁₀O 应用于气体绝缘输电线路的温升特性分析[J].绝缘材料,2020,53(9):81-86.

[13] 张俊民,高荟凯,冯昊.三种绝缘气体下开关设备的温度场及流场对比与分析[J].电工技术学报,2015,30(6):155-161.

[14] 杨桢,任玲玲,王凯,等.基于混合绝缘气体的 GIS 母线温升多物理场耦合分析[J].高压电器,2021,57(1):48-54.

[15] 李冰,肖登明,赵谡,等.第二代气体绝缘输电线路的温升数值计算[J].电工技术学报,2017,32(13):271-276.

[16] 吴晓文,舒乃秋,李洪涛,等. 基于流体多组分传输的气体绝缘母线温度场数值计算与分析[J]. 中国电机工程学报,2012,32(33):141-147.

[17] 崔兆轩,林莘,钟建英,等.C₄F₇N/CO₂混合气体特高压母线通流温升特性研究[J]. 电工技术学报,2023,38(9):2491-2499.

[18] 梁智权,主编. 流体力学[M]. 重庆:重庆大学出版社,2002.

[19] 张丕沛,李杰,汪鹏. 隔离开关合闸不到位引起 GIS 放电故障的原因分析[J]. 山东电力技术,2021,48(11):54-58.

[20] 刘光启,马连湘,刘杰. 化学化工物性数据手册[M]. 北京:化学工业出版社,2002.

[21] 陈敬友,高兵,杨帆,等. 气体绝缘输电线路温升数值计算及绝缘气体换热能力[J]. 高电压技术,2020,46(11):4042-4051.

作者简介:

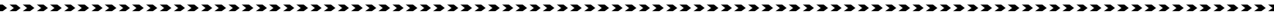
张丕沛(1996),男,硕士,工程师,主要从事高压设备带电检测及故障诊断工作;

赵晓楠(1986),男,硕士,高级工程师,主要从事高压设备带电检测及故障诊断工作;

丛龙琦(1985),男,硕士,高级工程师,主要从事高压设备带电检测及故障诊断工作;

郭晨瑞(1996),男,工程师,主要从事高压设备带电检测及故障诊断工作。

(收稿日期:2024-02-20)



(上接第 7 页)

[13] 印云刚,刘闯,何其新,等. 基于改进狼群算法的含风电配电网无功优化[J]. 内蒙古电力技术,2023,41(3):1-7.

[14] LI Yujun, XU Zhao, WONG Kit Po. Advanced control strategies of PMSG-based wind turbines for system inertia support [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017,32(4):3027-3037.

[15] 王康平,张兴科,刘财华,等. 基于自适应下垂控制的风电场无功电压控制策略[J]. 综合智慧能源,2022,44(4):12-19.

[16] 李生虎,章怡帆,于新钰,等. 采用改进下垂控制和双层无功优化的风电场无功均衡分配研究[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(13):1-7.

[17] 吴昊,于景龙,杨政厚,等. 风电场无功与电压控制技术综述[J]. 热力发电,2023,52(3):26-38.

[18] 叶林,路朋,赵永宁,等. 含风电电力系统有功功率模型预测控制方法综述[J]. 中国电机工程学报,2021,41(18):6181-6198.

[19] 路朋,叶林,裴铭,等. 风电集群有功功率模型预测协调控制策略[J]. 中国电机工程学报,2021,41(17):5887-5900.

[20] LIAO W, WU Q W, CUI H S, et al. Model predictive control based coordinated voltage control for offshore radial DC-connected wind farms [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy,2023,11(1):280-289.

[21] KOURO S, CORTES P, VARGAS R, et al. Model predictive control-a simple and powerful method to control power converters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(6):1826-1838.

[22] CHRISTAKOU K, LEBOUDEC J-Y, PAOLONE M, et al. Efficient computation of sensitivity coefficients of node voltages and Line currents in unbalanced radial electrical distribution Networks [J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2013,4(2):741-75.

[23] MARTINEZ J, KJÆR P C, TEODORESCU R. DFIG turbine representation for small signal voltage control studies [C]//2010 12th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, May 20-22,2010,Brasov,Romania.IEEE, 2010;31-40.

[24] 王子伊,王玮,马伟,等. 梯级水光蓄互补发电系统实时协调控制策略[J]. 电网技术,2021,45(3):871-881.

[25] 丁理杰,史华勃,陈刚等. 全功率变速抽水蓄能机组控制策略与调节特性[J]. 电力自动化设备,2024,44(3):166-171.

作者简介:

潘鹏宇(1993),男,博士,工程师,研究方向为全功率变速抽水蓄能机组优化控制、电力系统宽频带阻抗测量;

丁理杰(1981),男,博士,正高级工程师,研究方向为大电网安全稳定分析与控制;

王 珍(2000),女,硕士研究生,研究方向为电力电子在电力系统中的应用;

史华勃(1987),男,博士,高级工程师,研究方向为抽水蓄能发电技术、电力系统分析计算与稳定控制等;

陈 刚(1985),男,博士,正高级工程师,研究方向为电力系统分析与控制;

张远志(1995),男,博士,研究方向为电机设计及其控制、电机磁场调制原理、新型电力系统用电机研究;

查晓明(1967),男,教授,博士生导师,研究方向为电力电子功率变换及系统、新能源发电及新型供配电系统技术;

孙建军(1975),男,教授,博士生导师,研究方向为电能质量分析及治理、电力电子系统及微电网的建模和分析。

(收稿日期:2023-11-15)

“双碳”目标下火电厂碳核算主要方法综述

刘雪原^{1,2}, 陈玉敏^{1,2}, 魏 阳^{1,2}, 孟 拓⁴, 刘 悦³, 周 奇⁴, 向银太³, 李 茜⁴

(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凉山供电公司, 四川 西昌 615000; 4. 西南石油大学电气信息学院, 四川 成都 610500)

摘 要: 中国提出的“碳达峰、碳中和”目标旨在应对全球气候变化, 减少温室气体排放, 最终实现碳排放量与碳吸收量之间的平衡, 从而为全球环境保护和可持续发展做出贡献。作为中国最大的碳排放源, 火电行业承担的减排任务极为艰巨, 其减排活动具有重要意义。火电厂碳核算是针对火电厂所排放的温室气体进行测量、计算和报告的活动。火电厂主要的温室气体是二氧化碳, 其排放量与燃料类型、工艺流程、燃烧效率等因素有关。针对火电厂碳核算综述了主要标准、政策、方法和技术, 分析了各种方法的优缺点和适用范围, 展望了火电厂碳核算的发展趋势和挑战。

关键词: 火电厂; 碳核算; 核算边界; 碳核算方法

中图分类号: F 426.61 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2024)05-0034-10

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20240506

Overview of Carbon Accounting Methods for Thermal Power Plants under Dual Carbon Target

LIU Xueyuan^{1,2}, CHEN Yumin^{1,2}, WEI Yang^{1,2}, MENG Tuo⁴, LIU Yue³, ZHOU Qi⁴, XIANG Yintai³, LI Qian⁴

(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 Liangshan Electric Power Supply Company, Xichang 615000, Sichuan, China; 4. School of Electrical Engineering and Information, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, Sichuan, China)

Abstract: "carbon peaking and carbon neutrality" goals proposed by China aim to address global climate change, reduce greenhouse gas emissions and ultimately achieve a balance between carbon emissions and carbon absorption, so as to make a contribution to global environmental protection and sustainable development. As the largest source of carbon emissions in China, the thermal power industry bears a significant burden in emission reduction which makes its reduction efforts vitally important. Carbon accounting in thermal power plants involves measuring, calculating and reporting the emitted greenhouse gases. The main greenhouse gas from thermal power plants is carbon dioxide, and its emissions are related to the factors such as fuel type, process flow and combustion efficiency. Aiming at carbon accounting of thermal power plants, an overview of main standards, policies, methods and technologies is provided, the advantages and disadvantages of various methods and their applicability are analyzed, and the development trends and challenges of carbon accounting in thermal power plants are prospected.

Key words: thermal power plant; carbon accounting; accounting boundary; carbon accounting method

0 引 言

实现“双碳”目标具有重要意义^[1-4], 而“双碳”

目标的实现离不开火电厂碳核算。火电厂碳核算的目的在于控制和减少碳排放, 以实现低碳可持续发展。根据《巴黎协定》, 各国承诺在本世纪中叶实现温室气体排放达到净零, 控制全球平均气温升幅在 2℃ 以内, 努力将其限制在 1.5℃ 以内。2020 年 9 月

22日,习近平主席在联合国大会上宣布:中国二氧化碳排放2030年前达峰,2060年前实现碳中和。这是党中央、国务院做出的重大战略决策,是推动实现高质量发展的内在要求^[5]。火电厂碳核算是做好碳达峰、碳中和工作的重要基础,是制定政策、推动工作、开展考核的重要依据^[6]。火电厂是中国能源结构中比例最大的发电方式,也是中国最大的二氧化碳排放源之一。根据中国能源网数据,2019年中国火电行业二氧化碳排放量约为4.15 Gt,占全国能源消费二氧化碳排放量的51.7%。由此看来火电厂碳核算是实现双碳目标的关键一步^[7]。

实现火电厂碳核算的主要方法有物料衡算法、直接监测法与排放因子法^[8-10]。下面将介绍这3种方法的原理、优缺点和适用范围,以期火电厂的碳核算提供参考。同时,结合中国火电厂碳核算的实际情况,评价不同方法的适用性和有效性,为早日实现“双碳”目标提供理论借鉴。

1 火电厂碳核算起源与主要政策

火电厂碳核算的起源受到了国内外法律法规与政策的影响。国际法规是火电厂碳核算起源的重要驱动力,它为火电厂碳核算提供了国际性的要求和标准,促使各国积极参与温室气体排放的监测与减排。除此之外,国内法律法规为火电厂碳核算做出了重要的政策支撑,为火电厂碳核算提供了国家层面的指导与规范,进一步促进了国内火电厂碳核算体系实施和完善^[10]。以下从时间维度出发结合政策意义来论述火电厂碳核算的产生。

1.1 国际碳核算起源

国际碳核算的发展可以分为4个阶段^[11]。第一阶段是从1995年到2000年,以政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)为主导,建立了国家层面的温室气体清单编制方法和标准,为全球温室气体排放量的统计和核算提供了基础。第二阶段是从2001年到2006年,以《温室气体协议》^[12]为代表,出现了多种适用于企业和项目层面的温室气体核算方法和标准,为碳市场的发展和碳交易的实施提供了支持。第三阶段是从2007年到2012年,以ISO 14064温室气体管理标准体系和《商品和服务生命周期温室气体排放评价规范》为代表,出现了多种适用于产品

和服务层面的温室气体核算方法和标准,为碳足迹的评估提供了指导。第四阶段是从2013年至今,以IPCC 2019年国家温室气体清单指南为代表,出现了多种适用于不同领域和行业的温室气体核算方法和标准,为碳达峰、碳中和提供了参考。这些国际标准与指南的制定为全球各国制定温室气体清单和进行碳交易提供了指导和规范。

国际碳核算发展的4个阶段为火电厂碳核算提供了不同层面的方法和标准。第一阶段是在国家层面,使火电厂能够按照IPCC的指南编制温室气体清单,反映碳排放情况。第二阶段是在企业和项目层面,使火电厂能够参与碳市场的交易,实现碳排放的减少和抵消。第三阶段是在产品和服务层面,使火电厂能够评估产品和服务的碳足迹,提高碳效率和竞争力。第四阶段是在不同领域和行业的层面,使火电厂能够制定“碳达峰、碳中和”的目标和措施,为全球气候变化应对做出贡献。这些方法、标准的制定和应用,促进了火电厂碳核算的起源和发展,也推动了火电厂的低碳转型和绿色发展。

1.2 国内碳核算起源

从2007年到2010年,中国根据《中国应对气候变化国家方案》^[13]建立了全国层面的温室气体清单编制和核算体系,为全球气候谈判和减排承诺提供了数据支撑。随后,从2011年到2015年,以省级试点为基础,推出了24个行业企业温室气体核算方法与报告指南,为全国碳排放权交易市场建设与碳交易参与者提供了技术规范。自2016年以来,中国以国家标准为引领,发布了13个行业企业碳排放核算国家标准,为全国碳排放权交易线上市场运行与“碳达峰、碳中和”目标实现提供了统一标准。这些阶段的举措和标准的推出,为中国的碳排放核算和碳交易提供了重要的支持和指导。

1.3 现行国内碳排放核算法律法规

2020年6月,生态环境部发布了《生态环境监测规划纲要(2020—2035年)》^[14],其中提出了重点温室气体排放源监测的管理体系和技术体系建设。该规划强调以核算为主、辅以监测的原则,并计划首先在火电行业进行推行。2022年,生态环境部修订了《企业温室气体排放核算与报告指南 发电设施》^[15]和《企业温室气体排放核查技术指导 发电设施》^[15],规范了碳排放数据质量的控制与管理过程,减少了数据造假的空间。现行国内碳排放核算法律

气体清单指南》^[17]纳入温室气体排放量计算的气体,包括二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)、氧化亚氮(N₂O)、氢氟碳化物(HFCs)、全氟化碳(PFCs)、六氟化硫(SF₆)和三氟化氮(NF₃)。火力发电厂基本生产过程是:燃料在燃烧时加热水生成蒸汽,将燃料的化学能转变成热能;蒸汽压力推动汽轮机旋转,热能转换成机械能;汽轮机带动发电机旋转,将机械能转变成电能。其按燃料类型可分为燃煤电厂、燃气电厂、燃油电厂、余热发电厂。这些电厂在碳核算方法上有所不同,目前国际认可的火电厂排放二氧化碳量化方法主要有排放因子法、物料衡算法和直接监测法^[19]。

3.1 物料衡算法

物料衡算法的基本原理是物质守恒定律,即在确定核算边界后,输入物料量等于输出物料量与物料流失量的和。通过物料衡算法计算火电厂二氧化碳排放量,是利用输入物料和输出物料中含碳量差值,推算出燃烧过程中释放的二氧化碳量。燃烧过程中释放的主要含碳物料是煤炭、飞灰和炉渣等^[7]。物料衡算法的数据需求复杂,但可以提供更准确的排放数据,适用于需要精确核算特定化学物质排放的电厂,如燃气电厂。

国内研究多集中在如何优化物料衡算法以提高计算精度。例如,结合多维数据分析的方法来更精确地估算输入和输出物料的碳含量,从而提高排放量计算的准确性^[9]。许多国内燃气电厂和部分燃煤电厂已经采用物料衡算法进行碳核算,并通过详细分析飞灰和炉渣来提高二氧化碳排放量的核算精度^[8]。国际上,美国和欧盟等国家和地区已经制定了详细的技术标准和规范,如美国环境保护署(U.S. Environmental Protection Agency, USEPA)和欧盟排放交易体系(European Union Emissions Trading System, EU ETS)均有明确的物料衡算法应用指导。同时,一些跨国研究项目对不同国家和地区的物料衡算法应用进行了对比,发现尽管基础原理相同,但由于能源结构和技术水平的差异,各国在具体应用中存在显著差异。物料衡算法的计算公式^[9]为

$$E_{C,out} = \left[\sum (C_{in} \cdot C) - \sum (C_{out} \cdot C) \right] \cdot \frac{44}{12} \quad (1)$$

式中: $E_{C,out}$ 为火电厂碳排放, t/年; C_{in} 为输入物料量, t; C_{out} 为输出物料量, t; C 为物料含碳量, %; $\frac{44}{12}$ 为碳转

换成二氧化碳的转换系数,即二氧化碳与碳的相对原子质量之比。

目前,国内外已有一些研究与应用使用物料衡算法进行火电厂碳核算的案例。例如:文献[18]从火电厂角度分析了其内部的碳流通环节,然后提出了一个基于锅炉燃烧反应的质量平衡方程来计算机组的二氧化碳排放率,并基于物料平衡法对比了不同机组的碳排放数据;文献[20]依据物料平衡法计算了煤燃烧后产生的污染因子数据;文献[21]对美国不同类型的火电厂进行了物料衡算法和直接监测法的对比分析,发现两种方法的结果基本一致,但物料衡算法更能反映火电厂内部各个过程的碳排放特征。综上数据可知,物料衡算法可以测量不同设备不同工序的具体碳排放,但是通过物料衡算法进行火电厂碳核算测量需要大量的数据和完善的基础生产记录,就中国目前的统计基础尚不满足要求^[22]。

物料衡算法面对复杂多变的生产过程较为乏力,因为复杂过程可能存在具体数据缺失等问题。图2清晰地展示了火电厂内部的碳流通过程,这一过程与物料衡算法的应用紧密相关^[23]。该图揭示了从燃料处理到最终排放的各个步骤,涵盖了一氧化碳和二氧化碳的排放量、硫化物和其他污染物质的处理,以及飞灰和炉渣的处理设备和产物。通过图2,可以更好地理解火电厂内部的碳排放和循环过程,并且可以看到输入物料和输出物料中含碳物质的对比,这展示了物料衡算法在实际生产环境中的应用。

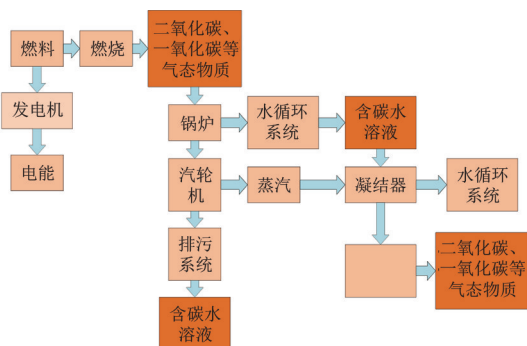


图2 火电厂内部碳流通^[19]

3.2 直接监测法

火电厂碳核算直接监测法是一种利用现场的烟气在线监测系统(continuous emission monitoring system, CEMS)^[24]直接测量火电厂烟气中二氧化碳浓度与烟气流速等参数,进而计算火电厂二氧化碳排放量的方法。直接监测法与传统的核算法相比,

具有自动化水平高、监测数据频次高、运行管理成本更经济等优势^[22],在国际上已有较成熟的应用。直接监测法和核算法是一些国家和地区双重统计碳排放量的方式。

直接监测法适用于有条件进行实时监测的电厂,如部分燃气和燃油电厂。它通过监测烟气中的二氧化碳浓度和流速来直接测量排放量。这种方法准确性高,但设备和运维成本较高。国内 CEMS 技术的开发和推广主要集中在企业和科研机构,尤其是中国环境监测总站领头开发的在线监测系统在大型燃煤电厂得到广泛应用,表现出较高的稳定性和准确性。政府法律法规中也对推广 CEMS 提出要求,推动了直接监测法的应用。国外方面,美国 and 欧盟等国家在直接监测法技术方面领先,建立了完善的技术标准和管理体系,如 USEPA 和 EU ETS 制定了详细的 CEMS 安装、校准和运行标准。此外,国外的研究重点在于如何高效管理和应用 CEMS 数据,利用大数据分析和机器学习技术优化监测系统,以提高数据的准确性和实时性。

3.2.1 原理与计算公式

直接监测法是根据生产过程中的实际数据,直接计算碳排放量的方法。它不需要依赖排放因子、燃料质量、碳氧化率等参数,而是通过 CEMS 或其他仪器,直接测量烟气流量和二氧化碳浓度,从而得到碳排放量,计算公式^[21]为

$$E_{\text{CHG}} = (Q_{\text{烟}} \cdot C_{\text{烟}} \cdot T \cdot K) \cdot \frac{1}{1000} \quad (2)$$

式中: E_{CHG} 为温室气体排放量, $\text{t}/\text{年}$; $Q_{\text{烟}}$ 为烟气流量, m^3/h ; $C_{\text{烟}}$ 为二氧化碳浓度, $\%$; T 为企业在一年中实际生产的时间, $\text{h}/\text{年}$; K 为二氧化碳的标准密度,约为 $1.977 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

3.2.2 直接检测法的关键因素

火电厂多使用燃烧后捕集二氧化碳的方法直接检测,其中烟气多通过烟囱排出。中国火电厂碳排放多为固定污染源,而通过固定污染源使用直接监测法监测碳排放有两个关键因素,分别是固定污染源温室气体排放流量的测量和温室气体浓度的测量^[25]。

1) 固定污染源温室气体排放流量的测量

面对固定污染源的排放流量常采用速度面积法来测量其流量。它是根据流体在封闭管道中的连续性方程,利用流体在不同位置的速度和截面积的关系,计算出流体的体积流量或质量流量。计算原理如图 3 所示。

系,计算出流体的体积流量或质量流量。计算原理如图 3 所示。

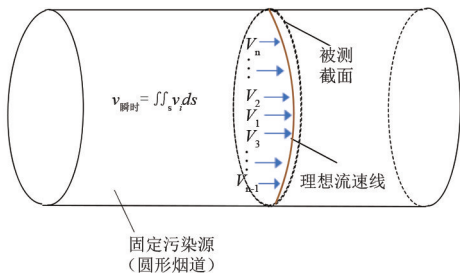


图 3 固定污染源速度流量法原理图^[25]

在封闭管道中,流体的体积流量等于流体在任意截面上的平均速度与截面积的乘积,即:

$$Q_{\text{流}} = V_{\text{流}} \cdot A \quad (3)$$

式中: $Q_{\text{流}}$ 为流体的体积流量, m^3/s ; $V_{\text{流}}$ 为流体在任意截面上的平均速度, m/s ; A 为任意截面上的截面积, m^2 。

速度截面法的步骤为:首先,选择合适的测量截面^[26],在测量截面上按照一定规则划分若干个小区域,并在每个小区域内选取一个代表性的测点;然后,使用合适的流速仪器在每个测点上测量出局部速度,并根据每个小区域所占的面积比例,计算出每个测点对平均速度的贡献,求和得到平均速度;最后,根据测量截面的形状和大小计算出截面积,并与平均速度相乘得到体积流量^[26-27]。

固定污染源温室气体排放流量的测量常用的流速仪表有皮托管、超声流量计、光学流速计等。皮托管是一种利用流体动压差来测量流速的仪表,由 1 个静压管和 1 个动压管组成,静压管对准流体流动方向,动压管垂直于流体流动方向^[28]。超声流量计是根据超声波的多普勒效应或相位差异计算出流体的平均速度。郑州燃煤电厂矩形烟道内温室气体排放采用多声道超声流量计进行监测,这是国内首次采用多声道超声流量计直接监测固定污染源温室气体排放,其研究团队总结了声路配置和几何参数测量等技术问题^[25]。光学流速计由 1 个光源和 1 个光电探测器组成,光源向流体中发射一束光线,光电探测器接收经过流体散射或干涉的光线。光学流速计的优点是测量无接触、无阻力、精度高,能测量微小流速;缺点是易受光源稳定性和环境光干扰影响,且成本高,需要校准。文献[29]就基于激光多普勒流速计测量了液力变矩器内部流场;文献[30]阐述了激光流速计的基本原理。

2) 温室气体浓度的测量

气体浓度测量的方法主要有传感器测量法、光学测量法、质谱法、热导法和气体采样分析法。下面主要介绍光学测量法中的红外线吸收法^[31]。

红外线吸收法是基于二氧化碳分子对特定波长的红外线光的吸收特性。二氧化碳分子在特定波长的红外线光的作用下会吸收部分光能,使得透过或散射的光强度减弱。通过测量透过或散射的光的强度变化,可以推断出二氧化碳浓度。红外线吸收法的传感器通常采用非色散红外(non-dispersive infrared, NDIR)^[32]技术或可调谐半导体激光吸收光谱(tunable diode laser absorption spectroscopy, TDLAS)技术^[33]。这两种技术都可以实现高灵敏度和准确度的二氧化碳浓度测量。NDIR 传感器使用 1 个滤波器来选择特定波长的红外线光,例如文献[34]基于 NDIR 技术设计了一款单光路双波长的反射式气室结构二氧化碳传感器。TDLAS 传感器则使用激光来发射特定波长的红外线光。例如文献[35]就采用了 TDLAS 技术对吸气式组合发动机燃烧室内二氧化碳浓度测量。

综上,这些方法在不同的应用领域和场景中有不同的优势和限制。在选择二氧化碳浓度的测量方法时,需要考虑测量的精度要求、测量范围、实时性以及实际操作的可行性。

3.2.3 直接监测法现状

2021 年 12 月 22 日,国家能源局发布实施了 DL/T 2376—2021《火电厂烟气二氧化碳排放连续监测技术规范》^[36],这是国内首个二氧化碳排放连续监测行业技术标准。DL/T 2376—2021 主要规定了火电厂烟气二氧化碳排放连续监测系统的组成、安装、运行、校验、数据处理和质量保证等内容,为火电厂烟气二氧化碳排放连续监测提供了技术要求和指导。目前,许多火电厂已经展开碳数据监测与分析工作,为发电行业的节能减排起到了良好的示范作用。总之,CEMS 法是一种先进有效的碳排放量监测方法,适合火电企业的实际情况。DL/T 2376—2021 的发布实施有利于全面推进 CEMS 法的推广应用,完善发电行业碳排放监测核算技术体系,高质量完成国家碳监测评估试点工作。

3.3 排放因子法

排放因子法由于计算简单、权威性高且应用广泛,而被中国相关的温室气体清单编制指南、温室气

体排放核算方法与报告指南采用。排放因子法适用于大多数火电厂,特别是燃煤电厂。它根据化石燃料的消耗量和排放因子来计算温室气体排放量。这种方法操作简单,但可能因地区能源品质差异和机组燃烧效率不同而导致误差。国内方面,中国环境保护部与国家发展和改革委员会合作建立了全国统一的排放因子数据库,为排放因子法在全国范围内的应用提供了关键的数据支持。同时,国内多个研究机构 and 高校积极开展排放因子法的推广和培训活动,提升了各地环保部门和企业对该法的认识和应用能力。在国外方面,特别是美国和欧洲等地每年根据最新研究成果和实际数据对排放因子进行更新。例如,IPCC 定期发布的《国家温室气体清单指南》为各国提供了最新的排放因子数据。排放因子法在国际碳市场和各国温室气体清单编制中得到广泛应用,并已成为国际通行的碳核算方法之一。各国通过制定详细的应用指南和技术规范,确保排放因子法应用的准确性和一致性。

3.3.1 排放因子法的定义与原理

排放因子法是一种基于活动数据和排放因子相乘来计算温室气体排放量的方法^[37]。活动数据是指导致温室气体排放或吸收的活动或过程所涉及的数量或强度参数^[38],例如燃煤发电过程中的活动数据就是燃煤量。排放因子是指单位活动数据所对应的温室气体排放量^[37],例如燃煤发电过程中的排放因子就是单位燃煤量所产生的二氧化碳排放量。

根据 IPCC 发布的《国家温室气体清单指南》^[17],火电厂燃煤发电过程中二氧化碳排放量的计算公式为:

$$E_{\text{总}} = E_{\text{燃烧}} + E_{\text{电}} + E_{\text{过程}} \quad (4)$$

式中: $E_{\text{总}}$ 为总的二氧化碳排放量, t; $E_{\text{燃烧}}$ 为化石燃料的二氧化碳排放量, t; $E_{\text{电}}$ 为购买电力排放的二氧化碳排放量, t; $E_{\text{过程}}$ 为其他来源的二氧化碳排放量, t。

$$E_{\text{燃烧}} = A_{\text{D}} \cdot F_{\text{E}} \cdot O_{\text{X}} \quad (5)$$

$$F_{\text{E}} = C_{\text{C}} \cdot O_{\text{F}} \cdot \frac{44}{12} \quad (6)$$

式中: A_{D} 为燃煤量, t; F_{E} 为单位燃煤量二氧化碳排放因子; O_{X} 为碳氧化率, %; C_{C} 为化石燃料的单位热值含碳量, tC/GJ; O_{F} 为化石燃料的碳氧化率, %。

$$E_{\text{电}} = A_{\text{D电}} \cdot F_{\text{E电}} \quad (7)$$

式中: $A_{\text{D电}}$ 为火电厂消耗了的电力, kWh; $F_{\text{E电}}$ 为电力

碳排放因子,kgCO₂/kWh。

$$E_{\text{过程}} = A_{\text{D过程}} \cdot M_{\text{过程}} \cdot C_{\text{含}} \tag{8}$$

式中: $A_{\text{D过程}}$ 为火电厂生产过程中产生的其他温室气体(如甲烷、氧化亚氮、硫化氢等)的排放量; $M_{\text{过程}}$ 为相应的分子量,g/mol; $C_{\text{含}}$ 为气体分子中碳原子的比例。

根据中国火电厂碳核算排放因子法研究现状可知,排放因子法主要聚焦在两个方面:化石燃料燃烧排放和购买电力排放^[39]。化石燃料燃烧排放是指火电厂使用燃煤、燃油、燃气等化石燃料及掺烧化石燃料的纯凝发电机组和热电联产机组等发电设施在氧化燃烧过程中产生的二氧化碳排放。该类排放是火电厂二氧化碳排放的主要来源,比例超过 90%。购买电力排放是指火电厂购买并使用电网输送的电力所对应的电力生产环节产生的二氧化碳排放。该类排放是火电厂二氧化碳排放的次要来源,比例较小^[40]。在实际计算中,需要根据不同情况选择合适的数据来源。活动数据一般可以从企业自身或相关部门获取,也可以从统计年鉴等公开资料中查询。

排放因子可以根据不同的层次和精度选择缺省值或实测值。根据《企业温室气体排放核算与报告指南 发电设施》,缺省值是指由权威机构或专家根据大量数据统计分析得到的具有一定代表性的平均值,一般分为国家级、省级和行业级 3 个层次。实测值是指根据实际生产过程中所用燃料的化学成分或烟气成分进行实验室分析或现场监测得到的值,一般具有更高的准确性和可靠性。碳氧化率是指燃料中的碳被氧化成二氧化碳的比例,一般可以采用缺省值或根据锅炉效率进行估算。根据 DL/T 2376—2021,可以得到常见化石燃料的相关参数缺省值。

3.3.2 排放因子法的现状

中国已经出台了 GB/T 32151.1—2015《温室气体排放核算与报告要求 第 1 部分:发电企业》^[41],规定了发电企业二氧化碳排放的核算方法、数据来源、不确定性分析、报告格式等内容;还建立了全国碳排放权交易市场,涵盖了发电、钢铁、有色、化工、建材、造纸等 7 个重点行业,其中发电行业所占比例最大,约占总交易量的 80%。目前,中国已经开展了火电厂二氧化碳排放连续监测技术的试点工作,通过安装在线监测设备,成功实现了对火电厂固定排放源烟气二氧化碳排放量的实时、准确监测。火电厂碳核算排放因子法的应用有利于提高火电厂二氧化碳排放数据的准确性和一致性,促进火电厂实施低碳发展战略,参与全国碳排放权交易。

为规范碳核算方法,需建立国家温室气体排放因子数据库,实施规范更新,制定适用于不同领域的碳核算统计方法与标准。为确保数据库全面覆盖各温室气体来源,需建立统一规范的碳核算体系。为维持时效性和准确性,需设立定期更新机制。这一系列措施将有助于建立更透明、可持续的碳核算体系,为实现低碳经济和碳中和目标提供支持。

3.4 3 种碳核算方法对比

针对火电厂碳核算的 3 种碳核算方法,下面从适用场景、精度、成本、实时性、优缺点、适用性 6 个维度进行了简要总结,具体分析如表 2 所示。

4 展望与总结

未来主流碳核算方法将更加市场化和国际化,与全球碳市场的发展和衔接相适应,碳核算方法将更加精细化和动态化^[42]。未来火电厂碳核算的发

表 2 火电厂 3 种核算方法不同维度比较

维度	排放因子法	物料衡算法	直接监测法
使用场景	常用于数据不完整或无法直接测量排放的场合	适用于有详细物料流量和质量数据的场合	适用于大型企业,有在线监测设备(CEMS)的场合
优点	简单易行,数据获取方便,适用范围广	精度较高,能够反映实际生产过程中的碳排放	精度最高,可实时监测,反映最真实的排放情况
缺点	精度较低,依赖于排放因子的准确性	数据获取复杂,要求详细的物料和能量流量数据	设备成本高,维护要求高,适用范围有限
精度	低至中等	中等至高	高
成本	低	中等	高
实时性	无法实时监测	无法实时监测	可实时监测
适用性	适用于初步评估或数据不全的情况	适用于有详细物料与能量流量数据的企业	适用于有条件安装在线监测系统的大型企业

展方向将会是针对不同行业和产品的特点与公司规模结合现代信息技术,研究制定适用不同排放情况的核算方法^[43]。火电厂可以基于排放因子法、物料衡算法、直接监测法等碳核算,结合在线监测数据实现碳排放量的实时动态评估,通过不确定度量化评估在线监测数据的质量确保数据可靠性^[44]。未来,激光测量技术将不断提高流量计精度,智能传感器结合物联网技术可实现实时数据采集和远程监控,数据融合与人工智能可帮助全面评估碳排放情况^[45]。烟道流量计作为火电厂碳核算的关键技术,其发展和应用将推动火电行业向低碳、环保方向发展,而新兴技术的不断进步也将在未来火电厂碳核算中发挥重要作用。

综上所述,在“碳达峰、碳中和”的目标下,火电厂碳核算方法的研究进展主要集中在以下几个方面:

1) 优化碳排放因子的确定方法:准确的排放因子对于计算碳排放量至关重要。通过不断改进和精细化排放因子的确定方法,可以提高数据的可比性和准确性。

2) 基于在线监测数据的碳核算模型:利用实时在线监测数据可以更准确地评估火电厂的碳排放量,这有助于制定更具针对性的碳减排计划。

3) 分析不同地区、不同类型、不同技术水平的火电厂的碳强度和碳减排潜力:了解不同火电厂的特点和潜力,有助于制定差异化的碳达峰目标和路径。这可以促进更有针对性的政策和措施。

4) 火电厂的低碳转型策略:提高燃煤机组效率、发展可再生能源替代、实施碳捕集利用和封存等策略,将有助于降低火电厂的碳排放量。

5 结 论

中国“双碳”目标的提出意味着中国要在未来30年内实现二氧化碳排放的快速下降,而火电行业作为中国最大的二氧化碳排放源,其碳减排任务十分艰巨^[46]。因此,火电厂的碳核算工作具有重要的意义。首先,它为火电厂确立碳减排目标提供科学依据,帮助制定合理的碳减排计划和措施。其次,碳核算数据可作为碳排放权交易的基础,帮助企业更好地参与碳市场,实现碳排放的经济化管理。此外,对政府来说,通过对火电厂的碳排放情况进行核算

和监管,可以更有效地征收碳税,推动企业减排。最后,碳核算工作还为企业的碳审计提供数据支撑,帮助监管部门更好地了解企业的碳排放情况,实现碳减排目标的有效监管。因此,碳核算工作对企业和社会都具有重要意义,为实现碳减排目标提供了数据支撑和技术保障。

参考文献

- [1] 刘学之,孙鑫,朱乾坤,等.中国二氧化碳排放量相关计量方法研究综述[J].生态经济,2017,33(11):21-27.
- [2] 陈文会,鲁玺.碳中和目标下中国燃煤电厂CCUS集群部署优化研究[J].气候变化研究进展,2022,18(3):261-271.
- [3] 武强,涂坤,曾一凡.“双碳”目标愿景下我国能源战略形势若干问题思考[J].科学通报,2023,68(15):1884-1898.
- [4] 朱法华,王玉山,徐振,等.中国电力行业碳达峰、碳中和的发展路径研究[J].电力科技与环保,2021,37(3):9-16.
- [5] 叶晨,李红军,唐志东,等.热电联产机组的控制优化策略研究[J].四川电力技术,2020,43(2):7-11.
- [6] 唐虎,崔浩,陈爱伦,等.燃煤锅炉用户电能替代方案对比研究[J].四川电力技术,2020,43(1):88-94.
- [7] 刘健.燃煤电厂碳排放核算与在线监测对比研究[J].计算机应用文摘,2023,39(5):117-119.
- [8] 谭超.燃煤电厂碳排放监测方法研究[D].广州:华南理工大学,2018.
- [9] 张安安,周奇,李茜,等.“双碳”目标下火电厂二氧化碳计量技术研究现状与展望[J].发电技术,2024,45(1):51-61.
- [10] 刘源,温作民.中国绿色低碳技术创新效率测度及空间溢出效应——基于“双碳”目标视角[J].生态经济,2023,39(12):49-55.
- [11] 陈红敏.国际碳核算体系发展及其评价[J].中国人口·资源与环境,2011,21(9):6.
- [12] 联合国.关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书[EB/OL].(1987-09-16)[2023-07-12].<https://ozone.unep.org/system/files/documents/MOP-35-12C.pdf>.
- [13] 中国气象局贯彻落实《中国应对气候变化国家方案》行动计划[N].中国气象报,2007-08-16(003).
- [14] 生态环境部.生态环境监测规划纲要(2020—2035年)[EB/OL].[2023-07-12].http://www.ep-serve.com/forepart/zxnr_index.do?oid=51478575&tid=26378242.

- [15] 生态环境部办公厅.关于印发《企业温室气体排放核算与报告指南 发电设施》《企业温室气体排放核查技术指南 发电设施》的通知:环办气候函[2022]485号[A/OL].(2022-12-21)[2023-07-14].
https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk/xxgk06/202212/t20221221_1008430.html
- [16] 中华人民共和国生态环境部.碳排放权交易管理办法(试行):部令第19号[A/OL].(2021-01-05)[2023-07-12].
https://www.gov.cn/gongbao/content/2021/content_5591410.htm
- [17] 胡艳麟,朱齐艳.《IPCC 2006 年国家温室气体清单指南》(2019 年修订版)废弃物卷修订浅析[J].低碳世界,2021,11(9):49-50.
- [18] 蔡宇,李保卫,胡泽春,等.燃煤机组碳排放指标计算及影响因素分析[J].电网技术,2013,37(5):1185-1189.
- [19] 宋铜铜.燃煤电厂碳排放强度核算及影响因素研究[D].北京:华北电力大学,2021.
- [20] 段升飞.固体燃料燃烧产生多环芳烃及含氧多环芳烃排放因子与排放特征的研究[D].济南:山东大学,2021
- [21] 王萍萍,赵永椿,张军营,等.双碳目标下燃煤电厂碳计量方法研究进展[J].洁净煤技术,2022,28(10):170-183.
- [22] 于琳娜.完善发电行业碳排放数据核算体系[N].中国电力报,2022-04-15(002).
- [23] 赵国涛,钱国明,王盛,等.“双碳”目标下火电企业绿色低碳转型的对策分析[J].华电技术,2021,43(10):11-21.
- [24] 邱梦春,温作乐,屈颖,等.一种烟气流量监测装置及方法:CN202310014166.8[P].2023-04-04.
- [25] 李海洋,葛志松,宋进.固定污染源温室气体排放量直接监测方法综述[J].中国测试,2022,48(10):181-188.
- [26] 李海洋,张亮,刘幸,等.固定排放源烟气流量在线监测技术的研究[J].上海计量测试,2018,45(5):6-11.
- [27] 国家环境保护局.固定污染源排气中颗粒物测定与气态污染物 采样方法:GB/T 16157—1996[S].北京:中国环境科学出版社,1996.
- [28] 李海洋,王灿,姚新红,等.一种液体用标准 L 型皮托管的系数标定装置及方法:116718802A[P].2023-09-08.
- [29] 过学迅.应用激光多普勒流速计测定液力变矩器内部流场的探讨[J].工程机械,1988(2):41-45.
- [30] 苗华义.激光流速计[J].工业仪表与自动化装置,1985(3):32-35.
- [31] 韦建环,杨峥,张勇,等.一种红外线吸收法测量试样中碳元素的助熔剂用量确定方法:113008825B[P].2023-07-21.
- [32] 孙世岭.基于非色散红外技术的二氧化碳传感器研究[J].仪表技术与传感器,2021(4):1-3.
- [33] 杨舒涵,乔顺达,林殿阳,等.基于可调谐半导体激光吸收光谱的氧气浓度高灵敏度检测研究[J].中国光学(中英文),2023,16(1):151-157.
- [34] 张雅楠,刘灿,张磊,等.基于 NDIR 技术的红外二氧化碳气体传感器研究[J].仪表技术与传感器,2023(9):23-28.
- [35] 焦晓锋.基于 TDLAS 的吸气式组合发动机燃烧流场的 CO₂ 浓度测量技术研究[D].太原:中北大学,2023.
- [36] 电力行业环境保护标准化技术委员会.火电厂烟气二氧化碳排放连续监测技术规范:DL/T 2376—2021[S].北京:中国电力出版社,2022.
- [37] 马学礼,王笑飞,孙希进,等.燃煤发电机组碳排放强度影响因素研究[J].热力发电,2022,51(1):190-195.
- [38] 李峥辉,卢伟业,庞晓坤,等.火电企业 CO₂ 排放在线监测系统的研发应用[J].洁净煤技术,2020,26(4):182-189.
- [39] 郑玉蓉,孙文彬,杜守航,等.煤炭企业碳排放核算方法研究综述[J/OL].煤炭学报:1-13[2023-10-31].
<https://doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.2023.1077>.
- [40] 徐沁颖.基于排放因子法的蒸汽锅炉碳排放核算[J].工业锅炉,2023(4):12-15.
- [41] 全国碳排放管理标准化技术委员会.温室气体排放核算与报告要求 第 1 部分:发电企业:GB/T 32151.1—2015[S].北京:中国标准出版社,2015.
- [42] 芦海燕,张雪雁.国标碳核查体系建设经验及对我国的启示[J].生态经济,2023,39(2):41-46.
- [43] 叶强,胥威汀,汪伟,等.“碳中和”愿景下的四川电力减碳路径构想[J].四川电力技术,2021,44(2):28-32.
- [44] 邓程慧,闻倩娱,朱娜,等.欧盟碳排放量核算方法及不确定度的研究与借鉴[C]//第十八届中国标准化论坛论文集.杭州:中国计量大学标准化学院,华电电力科学研究院有限公司,2021:10.
- [45] 李玉超,蔡迪韦,黄秀,等.基于 5G 和工业互联网的智能碳排放计量装置:202311705823.x[P].2024-01-12.
- [46] 李健华,陈雪,付浩,等.碳电市场环境下火电厂市场竞价策略及交易技术[J].四川电力技术,2023,46(3):46-52.

作者简介:

刘雪原(1994),男,硕士,工程师,主要研究方向为电力系统及其自动化;

陈玉敏(1997),女,硕士,工程师,主要研究方向为电力系统及其自动化;

魏 阳(1987),女,博士研究生,高级经济师,主要研究方向为碳中和技术创新;

孟 拓(1999),男,硕士研究生,工程师,主要研究方向为碳反演与碳计量;

(上接第 20 页)

算法的全局优化能力得到了改善,具有快速收敛和强大搜索能力等特点;同时,该方法能考虑日前需求,合理安排各机组出力,具有一定的有效性和可靠性,为微电网的安全可靠、经济环保运行提供了参考。

参考文献

[1] ALOTAIBI I, ABIDO M A, KHALID M, et al. A comprehensive review of recent advances in smart grids: A sustainable future with renewable energy resources [J]. Energies, 2020, 13(23):6269.

[2] 刘畅,卓建坤,赵东明,等. 利用储能系统实现可再生能源微电网灵活安全运行的研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1):1-18.

[3] 桑博,张涛,刘亚杰,等. 多微电网能量管理系统研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(10):3077-3093.

[4] HIRSCH A, PARAG Y, GUERRERO J. Microgrids: A review of technologies, key drivers, and outstanding issues[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 90:402-411.

[5] 全年,李燕青,申宏威,等. 基于改进黑洞算法的微电网优化调度[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(5):113-119.

[6] 何力,吕红芳,李俊甫,等. 基于模拟退火算法改进的人工鱼群算法(SA_AFSA)的微电网能量优化调度研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(9):36-43.

[7] 李国庆,翟晓娟,李扬,等. 基于改进蚁群算法的微电网多目标模糊优化运行[J]. 太阳能学报, 2018, 39(8):2310-2317.

[8] 李兴莘,张靖,何宇,等. 基于改进粒子群算法的微电网多目标优化调度[J]. 电力科学与工程, 2021, 37(3):1-7.

[9] 续一臣,王海云. 基于改进灰狼算法的微电网优化调度[J]. 计算机仿真, 2023, 40(3):96-102.

刘 悦(1974),男,高级政工师,主要研究方向为电气工程及其自动化;

周 奇(1999),男,硕士研究生,工程师,主要研究方向为碳监测与碳计量;

向银太(1981),男,高级工程师,主要研究方向为电气工程及其自动化;

李 茜(1988),女,博士,副教授,主要研究方向为碳监测与碳计量、综合能源系统运行与控制、能源系统智能感知等。 (收稿日期:2024-03-26)

[10] 薛开阳,楚瀛,凌梓,等. 考虑柔性负荷的综合能源系统低碳经济优化调度[J]. 可再生能源, 2019, 37(8):1206-1213.

[11] 宋扬,石勇,刘宝泉,等. 基于改进麻雀搜索算法的机场微电网优化调度策略[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(3):33-40.

[12] SEYYEDABBASI A, KIANI F. Sand cat swarm optimization: a nature-inspired algorithm to solve global optimization problems [J]. Engineering with Computers, 2022, 39(4):2627-2651.

[13] 贾鹤鸣,王琢,文昌盛,等. 改进沙猫群优化算法的无人机三维路径规划[J]. 宁德师范学院学报(自然科学版), 2023, 35(2):171-179.

[14] LI Y M, WANG G C. Sand cat swarm optimization based on stochastic variation with elite collaboration [J]. IEEE Access, 2022, 10:89989-90003.

[15] 毛清华,张强. 融合柯西变异和反向学习的改进麻雀算法[J]. 计算机科学与探索, 2021, 15(6):1155-1164.

[16] 何庆,林杰,徐航. 混合柯西变异和均匀分布的蝗虫优化算法[J]. 控制与决策, 2021, 36(7):1558-1568.

[17] 赵超,王斌,孙志新,等. 基于改进灰狼算法的独立微电网容量优化配置[J]. 太阳能学报, 2022, 43(1):256-262.

[18] HALPERN-WIGHT N, KONSTANTINOU M, CHARALAMBIDES A G, et al. Training and testing of a single-layer LSTM network for near-future solar forecasting [J]. Applied Sciences, 2020, 10(17):5873.

作者简介:

朱赵晴(2000),女,硕士研究生,研究方向为电力系统及电能质量分析研究;

方苓璐(1984),女,硕士,高级工程师,主要从事电力规划技术工作;

夏焰坤(1984),男,博士,教授,研究方向为电力系统及电能质量分析研究。

(收稿日期:2023-12-06)

基于存量煤电的抽水蓄能电站容量配置与成本收益分析模型

何璞玉, 张玉鸿, 焦 杰, 任文诗, 张冀嫻

(国网四川省电力公司经济技术研究院, 四川 成都 610095)

摘要:随着新能源渗透率的不断提高,灵活性调节资源需求逐年加大,抽水蓄能可以有效缓解新能源并网所导致的“峰谷矛盾”问题,亟需研究抽水蓄能参与电力市场机制以及不同运行模式下的成本收益模型。首先,梳理了5种抽水蓄能电站的运营机制;然后,构建了基于存量煤电的抽水蓄能容量配置优化模型,算例结果表明在存量煤电的背景下应对煤电机组进行灵活性改造,使煤电机组全部为开机状态且在全天均保持最小技术出力运行,并基于最小等效负荷配置对应容量的抽水蓄能;最后,建立了抽水蓄能电站不同运行模式下成本收益模型,算例结果表明在完全市场化模式下,抽水蓄能电站收益中电能量收益占67%、调频辅助服务收益占16%、备用辅助服务收益占2%、无功和黑启动等辅助服务收益占15%。

关键词:抽水蓄能; 容量配置; 新能源; 等效负荷; 成本收益

中图分类号:F 426 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2024)05-0044-09

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20240507

Capacity Allocation and Cost-benefit Analysis Model of Pumped Storage Power Station Based on Stocked Coal Power

HE Puyu, ZHANG Yuhong, JIAO Jie, REN Wenshi, ZHANG Jiyuan

(State Grid Sichuan Economic and Technological Research Institute, Chengdu 610095, Sichuan, China)

Abstract: With the increasing penetration of new energy, the demand for flexible regulation resources is increasing year by year. Pumped storage can effectively alleviate the problem of "peak-valley contradiction" caused by new energy grid connection, and it is urgent to study the mechanism of pumped storage participating in electricity market and the cost-benefit model under different operation modes. Firstly, the operation mechanisms of five pumped storage power stations are sorted out, and then an optimization model of pumped storage capacity allocation based on the stocked coal power is constructed. The results show that under the background of stocked coal power, the coal-fired power units should be flexibly reformed, so that all the coal-fired power units are in start-up state, the minimum technical output is maintained throughout the day, and the corresponding capacity of pumped storage is configured based on the minimum equivalent load. Finally, the cost-benefit model of pumped storage power station under different operation modes is established. The research results show that in the fully market-oriented mode, the electric energy income of pumped storage power station accounts for 67%, the auxiliary service income of frequency modulation accounts for 16%, the auxiliary service income of standby accounts for 2%, and the auxiliary service income of reactive power and black start accounts for 15%.

Key words: pumped storage; capacity allocation; new energy; equivalent load; cost benefit

0 引言

在“双碳”目标指引下,风电和光伏等新能源快速发展,将成为中国未来电力系统的主体电源^[1]。

基金项目:国网四川省电力公司科技项目(521996230008)

在此背景下,抽水蓄能电站的价值开始显现,作为一种可以在时间尺度上将电能进行转移的电力灵活性资源,抽水蓄能可以有效缓解新能源并网所导致的“峰谷矛盾”问题^[2]。抽水蓄能电站具有技术水平成熟、开发潜力庞大、经济成本优秀等优势,这将极大促进电力系统的绿色化、低碳化转型^[3]。到

2025 年中国抽水蓄能电站建成投产规模将达 62 GW 以上,到 2030 年其规模将达到 120 GW^[4]。

目前,针对抽水蓄能电站的容量配置规划,国内外专家团队已经进行了多类型方法的探索性研究。文献[5]针对风-光-蓄能源系统,构建了以投资成本最小化为目标函数的抽水蓄能电站容量配置规划模型。文献[6]构建了以弃风、弃光电量之和最小与经济、环境效益最大为目标的双层规划模型,确定了联合系统中抽水蓄能电站的容量配置。文献[7]确定了等效火电替代系数、SO₂排放量和调峰容量比等多类型指标,采用贝叶斯评价模型对抽水蓄能电站进行了容量配置分析。文献[8]以在规划期内系统的可靠性与经济性最优为目标函数,建立了求取抽水蓄能电站最佳需求容量的综合规划模型。文献[9]以系统运行成本和投资成本综合最优为目标,提出了一种基于多时间尺度迭代优化的抽水蓄能电站容量配置模型。文献[10]在考虑火电机组运行成本的基础上,以风光联合出力的日内波动率最低为目标,提出了一种平抑风光波动的抽水蓄能电站容量配置规划模型。这些研究大部分都考虑了经济性目标对抽水蓄能电站容量配置优化的影响,但没有考虑存量煤电灵活性改造对抽水蓄能电站容量配置的影响。

同时,针对抽水蓄能电站参与各类型电力市场的成本收益模式机制也亟待研究。文献[11]详细介绍了中国《关于进一步完善抽水蓄能价格形成机制的意见》,并提出了以两部制电价政策为主体,以竞争性方式形成电量电价,将容量电价纳入输配电价回收。文献[12]开发了一个评估抽水蓄能电站在电力市场中参与电量竞价和在辅助服务市场进行灵活调节服务竞价的收益模型。文献[13]构建了不同市场阶段下抽水蓄能电站的全生命周期效益分析模型,计算了市场环境下抽水蓄能电站的利润空间。文献[14]通过构建斯塔克尔伯格博弈模型,解决了以抽水蓄能电站在日前市场中的收益最大化为目标函数的双层优化问题。文献[15]考虑容量电价与效益分配机制,求解了抽水蓄能电站基于现货市场背景下的资本金内部效益。以上文献大多在单一运行模式下建立成本收益模型,没有考虑到在电力市场发展的不同阶段抽水蓄能电站运行策略的差异性。

综上,考虑存量煤电灵活性改造对抽水蓄能电

站容量配置的影响以及电力市场不同发展阶段,下面构建了煤电不同出力情景下的抽水蓄能电站容量配置优化模型,建立了抽水蓄能电站不同运行模式下成本收益模型,对抽水蓄能电站的度电成本进行敏感性分析,并对完全市场化模式下抽水蓄能电站的电能量收益、容量收益和辅助服务收益进行测算。

1 抽水蓄能电站运营模式分析

从国外实践经验来看,在竞争性电力市场国家或地区,由于电力市场模式的差异,抽水蓄能电站的运营模式体现出明显的差异化特征^[16]:在以英国为代表的分散式市场,抽水蓄能电站主要通过签订场外中长期合约的方式实现成本回收^[17];而在集中式特征较为明显的电力市场中,抽水蓄能电站根据其提供的功能,参与电能量市场及辅助服务市场竞争获得相应收入。

1) 内部核算制

日本电力公司为发、输、配、售一体化运营,把抽水蓄能电站资产纳入总资产一起核定电力公司总收入,电站作为电力公司内部下属单位,与电力公司进行内部核算^[18]。法国抽水蓄能电站由法国电力公司统一建设、管理、考核和使用^[19]。美国一些州采用“厂网一体化”,抽水蓄能电站仍由原发、输、配一体化公司统一运营^[20]。中国早期抽水蓄能电站投资运行成本以及回报一并计入电网销售电价中,通过销售电价回收抽水蓄能电站成本。

2) 容量租赁制

抽水蓄能电站由所有权独立的主体建造,电网公司租赁抽水蓄能电站拥有其使用权。抽水蓄能电站租赁给电网后,电网“按需调度”,按照现货市场电价进行结算,由于电站运行效率为 75%~80%,只要现货市场峰谷价差大于 25%即可实现正向价差套利。

3) 两部制计划电价

成本通过容量计划电价和电量计划电价方式回收,电价由国家政府价格主管部门核定。目前,浙江天荒坪、湖北天堂、江苏沙河抽水蓄能电站均采用两部制电价。

4) 固定补偿+变动竞价

《国家发展改革委关于进一步完善抽水蓄能价格形成机制的意见》(发改价格〔2021〕633 号)明确抽水蓄能电站执行“容量电价补贴”+“电量市场与

辅助服务市场竞争电价”,保证 40 年经营期内部收益率达 6.5%,还贷期按照 25 年核定。在电力现货市场尚未运行的地区,抽水蓄能电站抽水电量可由电网企业提供,抽水电价按燃煤发电基准价的 75% 执行。抽水蓄能电站上网电量由电网企业收购,上网电价按燃煤发电基准价执行。政府核定的抽水蓄能容量电价对应的容量电费由电网企业支付,纳入省级电网输配电价回收。

5) 两部制市场竞价

抽水蓄能电站作为独立主体可自由参与电能市场,采用独立经营的方式,全部容量电量自由参与现货市场和调频、备用、爬坡、无功、黑启动辅助服务市场。这种模式也称为“自调度”模式,即抽水蓄能电站在日前自行决定发电/抽水运行曲线,在低谷低价时段抽水、高峰高价时段发电,自主实现现货市场价差套利;自主进行调频与旋转备用报价,从辅助服务市场中获利。

基于上述对于国内外抽水蓄能电站运营模式的分析,针对中国抽水蓄能电站发展现状提出了 3 种运营模式,分别是计划制模式、半计划半市场模式以及完全市场化模式,第 3 章将针对每种运营模式提出抽水蓄能电站的收益分析模型。

2 基于存量煤电的抽水蓄能电站容量配置优化模型

中国燃煤火电基本为大容量、高参数火电机组,具有较强的调节能力。但火电机组出力越低,单位发电煤耗反而越高。建设抽水蓄能电站,可使火电机组的运行条件得到改善,以较平稳的出力工况运行,提高运行效率,减少煤炭消耗。由于风光的随机性、波动性和间歇性,抽水蓄能电站可调节发电与用电负荷在时间上不匹配。下面综合考量新能源波动下各类电源出力,建立等效负荷下抽水蓄能电站容量配置模型。

2.1 风光发电出力特征分析模型

1) 风力发电出力特征数学模型

$$0 \leq P_t^w \leq P_{\max}^w \quad (1)$$

$$P_{t\min}^w \leq P_t^w \leq P_{t\max}^w \quad (2)$$

式中: P_t^w 为 t 时刻风电场的出力; $P_{t\max}^w$ 、 $P_{t\min}^w$ 分别为 t 时刻风电场的可用功率上、下限,与 $P_{\max}^w$ (最大装机容量) 相关。

式(1)表示风电有出力上下限;式(2)表示风电有出力波动带。

2) 光伏发电出力数学模型

光伏发电出力模型同风力发电出力模型。

2.2 基于存量煤电的抽水蓄能电站容量配置分析模型

若风光出力最丰富时,出现等效负荷 $D_t^{\text{net},i} < 0$ 的状态,需要考虑配备抽水蓄能电站。抽水蓄能电站配置的容量为

$$P^{\text{pump},i} = -\min\{0, D_t^{\text{net},i} \mid t = 1, 2, \dots, T\} \quad (3)$$

式中: i 为不同情景, $i=1$ 表示煤电机组不存在或者均停机情景, $i=2$ 表示灵活性改造前煤电机组最小出力情景, $i=3$ 表示灵活性改造后煤电机组最小出力情景, $i=4$ 表示灵活性改造后煤电机组依次累计关停情景; $P^{\text{pump},i}$ 为第 i 种情景下的抽水蓄能电站配置容量; $D_t^{\text{net},i}$ 为第 i 种情景下 t 时刻的等效负荷。

不同情景下的等效负荷表达式如下:

1) 煤电机组不存在或者均停机情景($i=1$)

t 时刻的系统总负荷减去风光、水电及核电随机出力,形成等效负荷。

$$D_t^{\text{net}1} = D_t - P_t^v - P_t^w - P_t^{\text{HP}} - P_t^{\text{NP}} \quad (4)$$

式中: $D_t^{\text{net}1}$ 为煤电机组均停机情景下的等效负荷; D_t 为 t 时刻的系统总负荷; P_t^v 为 t 时刻的光伏出力; P_t^w 为 t 时刻的风电出力; P_t^{HP} 为 t 时刻的水电出力; P_t^{NP} 为 t 时刻的核电出力。

2) 灵活性改造前煤电机组最小出力情景($i=2$)

t 时刻的系统总负荷减去风光随机出力,再减去煤电最低出力,形成新的等效负荷。

$$D_t^{\text{net}2} = D_t - P_t^v - P_t^w - P_t^{\text{HP}} - P_t^{\text{NP}} - \sum_{n=1}^N P_{n\min}^{\text{ther}} \quad (5)$$

式中: $D_t^{\text{net}2}$ 为灵活性改造前煤电机组最小出力情景下的等效负荷; $\sum_{n=1}^N P_{n\min}^{\text{ther}}$ 为灵活性改造前所有煤电机组最小技术出力。

3) 灵活性改造后煤电机组最小出力情景($i=3$)

煤电机组进行灵活性改造,最低出力由 $P_{n\min}^{\text{ther}}$ 变为 $P_{n\min}^{\text{ther,flex}}$ (若没有改造,则 $P_{n\min}^{\text{ther,flex}} = P_{n\min}^{\text{ther}}$)。 t 时刻系统总负荷减去风光随机出力,再减去灵活性改造后的所有煤电最低出力,形成新的等效负荷。

$$D_t^{\text{net}3} = D_t - P_t^v - P_t^w - P_t^{\text{HP}} - P_t^{\text{NP}} - \sum_{n=1}^N P_{n\min}^{\text{ther,flex}} \quad (6)$$

式中: $D_t^{\text{net}3}$ 为灵活性改造后煤电机组最小出力情景下的等效负荷; $\sum_{n=1}^N P_{n\min}^{\text{ther,flex}}$ 为灵活性改造后所有煤电机组最小技术出力。

4) 灵活性改造后煤电机组依次累计关停情景 ($i=4$)

t 时刻的系统总负荷减去风光随机出力,再依次减去关停 1 号至 j 号机组后剩余灵活性改造后煤电机组之和最低出力,形成新的等效负荷 $D_{ij}^{\text{net}4}$ 。

$$D_{ij}^{\text{net}4} = D_t - P_t^v - P_t^w - P_t^{\text{HP}} - P_t^{\text{NP}} - \sum_{n=1}^j P_{n\min}^{\text{ther,flex}} \quad (j = 1, 2, \dots, N) \quad (7)$$

式中, $D_{ij}^{\text{net}4}$ 为灵活性改造后煤电机组依次累计关停情景下的等效负荷,这里假设机组启停费用从低到高依次排序。

2.3 算例分析

以某区域电网数据为例开展算例分析。最大负荷为 60 533 MW,风电装机容量为 10 000 MW,光伏装机容量为 20 000 MW,煤电机组容量为 18 000 MW,水电装机容量为 35 081 MW,核电装机容量为 1766 MW;煤电机组包括 9 台,装机容量均为 2000 MW,灵活性改造前后煤电最小技术出力系数分别为 0.60 和 0.35。在第 2.2 节所述 4 种情景下分别对抽水蓄能电站的容量进行优化配置,前 3 种情景下负荷与各机组出力对比情况如图 1 至图 3 所示。

由图 1 可以看到,煤电机组均停机情景下负荷曲线低于风电、光伏、水电、核电功率之和的时刻为 14:00—15:00,因此该情景下等效负荷小于 0 的时刻仅为 14:00—15:00 时,调峰需求极小,因此配置较少容量的抽水蓄能容量即可满足系统调峰需求。

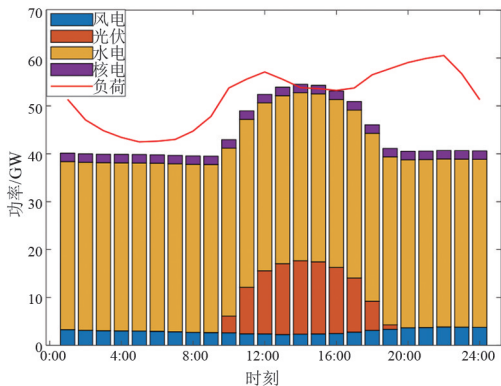


图 1 煤电机组均停机情景下负荷与机组出力对比

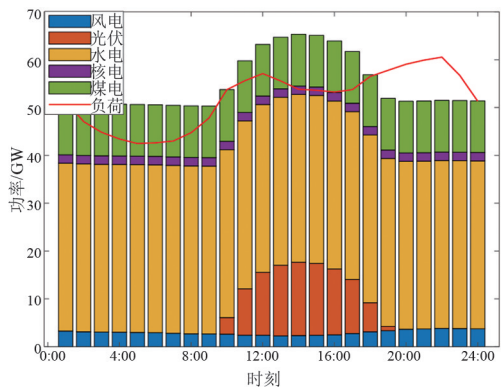


图 2 改造前煤电机组最小出力情景下负荷与机组出力对比

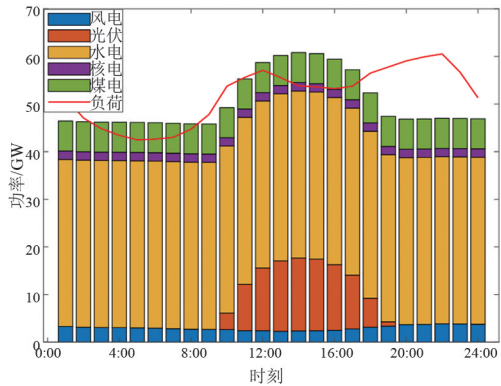


图 3 改造后煤电机组最小出力情景下负荷与机组出力对比

由图 2 和图 3 可以看到,煤电机组改造后降低了最低技术出力,提升了系统调峰能力,最小等效负荷的绝对值减小,因此需要配置的抽水蓄能容量也将随之降低。

改造后煤电机组依次累计关停情景下等效负荷情况如图 4 所示,调度日 24 h 内风电和光伏出力最丰富的时刻为 13:00,此时等效负荷为负值且最小,则抽水蓄能电站配置容量即为该时刻等效负荷的绝对值,配置结果如图 5 所示。灵活性改造前煤电机组最小出力情景下抽水蓄能电站的最优配置容量分别为 11 493 MW,灵活性改造后依次关停 0~9 台煤电机组情景下抽水蓄能电站的最优容量配置分别为 6993 MW、6293 MW、5593 MW、4893 MW、4193 MW、3493 MW、2793 MW、2093 MW、1393 MW 和 693 MW。结果表明,煤电机组关停数量越少,煤电发电量越多,整体等效负荷越小,风光出力最丰富时出现等效负荷小于 0 的时刻越多,最小等效负荷的绝对值越大。而根据第 2.2 节提出的基于存量煤电下抽水蓄能电站容量配置分析模型,需要配置的抽水蓄能容量为出现等效负荷小于 0 时最小等效

负荷的绝对值。因此,煤电机组关停数量越少,则需要配置更多的抽水蓄能容量提升系统的调峰能力,只有这样才能实现对风光的充分消纳,有助于降低弃风弃光率。另外,煤电机组灵活性改造后最小技术出力降低,需要配置的抽水蓄能容量也随之降低。

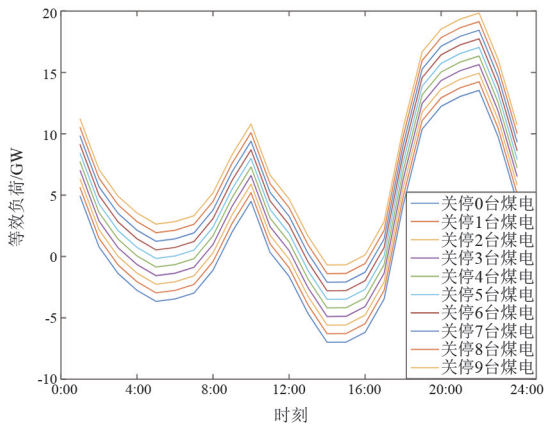


图4 改造后煤电机组依次累计关停情景下
等效负荷情况

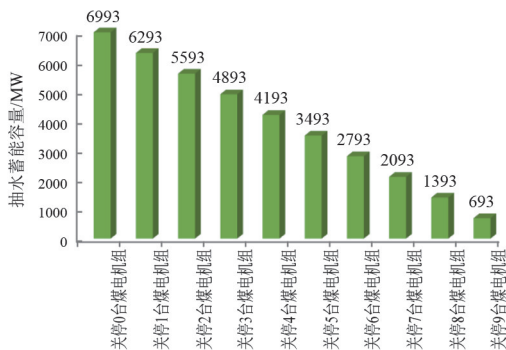


图5 改造后煤电机组依次累计关停情景下
抽水蓄能容量配置结果

3 抽水蓄能电站不同运营模式下成本收益分析模型

3.1 基于全寿命周期的抽水蓄能电站度电成本分析模型

根据抽水蓄能电站的全寿命周期成本,结合抽水蓄能电站的年发电量,可计算抽水蓄能电站的度电成本,计算方法为:

$$C_{HPS} = \frac{C_{HPS}}{Q_{HPS}} = \frac{C_{IN} + C_{OM}}{\eta P_{HPS} H_{HPS}} \quad (8)$$

$$C_{IN} = C(r, n) (C_P P_{HPS} + C_E E_{HPS}) \quad (9)$$

$$C(r, n) = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (10)$$

$$C_{OM} = \mu C_{IN} \quad (11)$$

式中: C_{HPS} 为抽水蓄能电站的度电成本; C_{HPS} 为抽水

蓄能电站的年成本费用; Q_{HPS} 为抽水蓄能电站的年发电量; C_{IN} 为抽水蓄能电站的年初始投资成本; C_{OM} 为抽水蓄能电站的年运行维护成本; η 为抽水蓄能电站的转换效率; H_{HPS} 为抽水蓄能电站的储电年利用小时数; P_{HPS} 、 E_{HPS} 分别为抽水蓄能的功率和容量; C_P 、 C_E 分别为抽水蓄能的功率和容量的单位投资; $C(r, n)$ 为等年值系数; r 为基准折现率; n 为抽水蓄能电站的运行寿命; μ 为抽水蓄能电站的运行维护费用系数。

3.2 计划制模式下抽水蓄能电站收益分析模型

1) 抽水蓄能电站容量收益

$$R_{cap}^{pump} = C_c^{pump} \times P_{r,c}^1 \quad (12)$$

式中: R_{cap}^{pump} 为抽水蓄能电站的容量收益; C_c^{pump} 为额定容量; $P_{r,c}^1$ 为抽水蓄能电站的容量电价。

2) 抽水蓄能电站总收入

在计划制模式下,抽水蓄能电站属于容量租赁型,完全听从电网的调度,按照协议的容量租赁价格获得补偿。抽水蓄能电站的容量收益即总收入。

$$R_{all}^{pump} = R_{cap}^{pump} \quad (13)$$

式中, R_{all}^{pump} 为抽水蓄能电站的总收入。

3.3 半计划半市场模式下抽水蓄能电站收益分析模型

半计划半市场模式下,抽水蓄能电站参与现货市场深度调峰和顶峰,参与辅助服务市场调频与旋转备用,听从电网调度,不参与市场的出力报价,该部分收益与市场出清价格相关。该模式下抽水蓄能电站的收益包括电量收益、辅助服务补偿收益和容量补贴收益。

1) 电量收益

$$R_{energy}^{pump} = \text{Max} \left\{ 20\% \sum_{d=1}^{365} \sum_{t=1}^{24} (\eta^{pump} - 75\%) P_{r,base}^{ther} P_{dt}^{pumpse}, \right. \\ \left. 20\% \sum_{d=1}^{365} \sum_{t=1}^{24} (P_{r,dt}^{pumpse} P_{dt}^{pumpse} - P_{r,dt}^{pumpse} P_{dt}^{pumpse}) \Delta T \right\} \quad (14)$$

式中: R_{energy}^{pump} 为抽水蓄能电站的电量收益; η^{pump} 为抽水蓄能电站的发电效率; $P_{r,base}^{ther}$ 为抽水蓄能电站所在地区的燃煤发电基准价; P_{dt}^{pumpse} 为第 d 天 t 时刻的发电功率; P_{dt}^{pumpse} 为第 d 天 t 时刻的抽水功率; $P_{r,dt}^{pumpse}$ 为第 d 天 t 时刻的发电上网电价; $P_{r,dt}^{pumpse}$ 为第 d 天 t 时刻的抽水用电电价。

2) 辅助服务补偿收益

$$R_{\text{ancillary}}^{\text{pump}} = 20\% \left(\sum_{m=1}^{12} \left(V_m^{\text{pumpreserve}} \times \frac{T_m^{\text{pump}}}{T_m^{\text{pumptotal}}} \times P_{r,m}^{\text{pumpreserve}} + \sum_{d=1}^{365} \sum_{t=1}^T L_{f,d,t}^{\text{pump}} P_{r,f,d,t}^{\text{pump}} K_f^{\text{pump}} \right) \right) \quad (15)$$

式中: $R_{\text{Ancillary}}^{\text{pump}}$ 为抽水蓄能电站的辅助服务市场收益; $V_m^{\text{pumpreserve}}$ 为第 m 月被留用的备用容量; $T_m^{\text{pumptotal}}$ 为第 m 月总时长; T_m^{pump} 为第 m 月被调度时长; $P_{r,m}^{\text{pumpreserve}}$ 为第 m 月备用价格; $L_{f,d,t}^{\text{pump}}$ 为第 d 天 t 时刻的调频里程; $P_{r,f,d,t}^{\text{pump}}$ 为第 d 天 t 时刻的调频里程价格; K_f^{pump} 为调频性能系数。

3) 容量收益(补贴)

$$R_{\text{capacity}}^{\text{pump}} = C_c^{\text{pump}} \times P_{r,c}^{\text{pump}2} \quad (16)$$

式中, $P_{r,c}^{\text{pump}2}$ 为抽水蓄能电站的部分补贴容量电价。 $P_{r,c}^{\text{pump}2} < P_{r,c}^{\text{pump}1}$, 容量补贴电价相比计划模式下的容量电价下降了。

3.4 完全市场化模式下抽水蓄能电站收益分析模型

完全市场化模式下,抽水蓄能电站参与现货市场深度调峰和顶峰,参与辅助服务市场调频与旋转备用,同时参与市场的出力报价。容量成本不再获得部分补贴。以抽水蓄能电站总收益最大化为目标函数,建立市场化模式下抽水蓄能电站的运行优化模型。

1) 目标函数

$$\text{Max}(R_{\text{energy}}^{\text{pump}} + R_{\text{frequency}}^{\text{pump}} + R_{\text{reserve}}^{\text{pump}}) \quad (17)$$

$$R_{\text{energy}}^{\text{pump}} = \sum_{d=1}^{365} \sum_{t=1}^{24} (P_{r,d,t}^{\text{pumpge}} P_{dt}^{\text{pumpge}} - P_{r,d,t}^{\text{pumpsf}} P_{dt}^{\text{pumpsf}}) \Delta T \quad (18)$$

$$R_{\text{frequency}}^{\text{pump}} = \sum_{d=1}^{365} \sum_{t=1}^{24} K^{\text{pump}} (P_{r,d,t}^{\text{pumpgf}} P_{dt}^{\text{pumpgf}} + P_{r,d,t}^{\text{pumpsf}} P_{dt}^{\text{pumpsf}}) \quad (19)$$

$$R_{\text{reserve}}^{\text{pump}} = \sum_{d=1}^{365} \sum_{t=1}^{24} (P_{r,d,t}^{\text{pumpgr}} P_{dt}^{\text{pumpgr}} + P_{r,d,t}^{\text{pumpsr}} P_{dt}^{\text{pumpsr}}) \quad (20)$$

式中: $R_{\text{frequency}}^{\text{pump}}$ 为抽水蓄能电站的调频服务收益, $P_{r,d,t}^{\text{pumpgf}}$ 为第 d 天 t 时刻的发电调频里程价格(可以申报或者选择价格接受型); $P_{r,d,t}^{\text{pumpsf}}$ 为第 d 天 t 时刻的抽水调频里程价格(可以申报或者选择价格接受型); K^{pump} 为调频性能系数; P_{dt}^{pumpgf} 为第 d 天 t 时刻抽水蓄能电站在发电工况下的调频申报容量; P_{dt}^{pumpsf} 为第 d 天 t 时刻抽水蓄能电站在抽水工况下的调频申报容量; $R_{\text{reserve}}^{\text{pump}}$ 为抽水蓄能电站的备用服务收益;

$P_{r,d,t}^{\text{pumpgr}}$ 为第 d 天 t 时刻的发电过程备用市场报价; P_{dt}^{pumpgr} 为第 d 天 t 时刻的发电过程申报备用容量; $P_{r,d,t}^{\text{pumpsr}}$ 为第 d 天 t 时刻的抽水过程备用市场报价; P_{dt}^{pumpsr} 为第 d 天 t 时刻的抽水过程申报备用容量。

2) 约束条件

$$P_{dt}^{\text{pumpge}} P_{dt}^{\text{pumpsf}} = 0 \quad (21)$$

$$P_{dt}^{\text{pumpgf}} P_{dt}^{\text{pumpsf}} = 0 \quad (22)$$

$$P_{dt}^{\text{pumpgr}} P_{dt}^{\text{pumpsr}} = 0 \quad (23)$$

$$P_{\text{min}}^{\text{pump}} = P_{dt}^{\text{pumpge}} + P_{dt}^{\text{pumpgf}} + P_{dt}^{\text{pumpgr}} = P_{\text{max}}^{\text{pump}} \quad (24)$$

$$P_{\text{min}}^{\text{pumps}} = P_{dt}^{\text{pumpsf}} + P_{dt}^{\text{pumpsr}} = P_{\text{max}}^{\text{pumps}} \quad (25)$$

$$T_{\text{min}}^{\text{pumpge}} = T_{\text{max}}^{\text{pumpge}} \quad (26)$$

$$T_{\text{min}}^{\text{pumpsf}} = T_{\text{max}}^{\text{pumpsf}} \quad (27)$$

$$V_0^{\text{pump}} = V_T^{\text{pump}} \quad (28)$$

$$V_{\text{min}}^{\text{pump}} = V_t^{\text{pump}} = V_{\text{max}}^{\text{pump}} \quad (29)$$

$$V_{t+1}^{\text{pump}} = V_t^{\text{pump}} + P_{dt}^{\text{pumpge}} \phi_1 (1 - \eta_1) - P_{dt}^{\text{pumpsf}} \phi_2 (1 - \eta_2) \quad (30)$$

式中: $P_{\text{max}}^{\text{pumpge}}$ 为最大发电功率; $P_{\text{min}}^{\text{pumpge}}$ 为最小发电功率; $P_{\text{max}}^{\text{pumps}}$ 为最大抽水用电功率; $P_{\text{min}}^{\text{pumps}}$ 为最小抽水用电功率; $T_{\text{max}}^{\text{pumpge}}$ 、 $T_{\text{max}}^{\text{pumpsf}}$ 为一天内连续发电、抽水蓄电时长; $T_{\text{min}}^{\text{pumpge}}$ 、 $T_{\text{min}}^{\text{pumpsf}}$ 分别为最大发电、蓄电时长; V_0^{pump} 为同一充放电周期初始时刻库容; V_t^{pump} 为 t 时刻水库库容; $V_{\text{min}}^{\text{pump}}$ 为最小库容; $V_{\text{max}}^{\text{pump}}$ 为最大库容; ϕ_1 为发电转化为库容的系数; ϕ_2 为抽水转化为库容的系数; η_1 为抽水蓄能抽水损耗率; η_2 为抽水蓄能发电损耗率。

3.5 算例分析

3.5.1 抽水蓄能电站度电成本敏感性分析

基于全寿命周期抽水蓄能电站度电成本分析模型,以装机容量为 1200 MW 的抽水蓄能电站为例开展度电成本敏感性分析。为更好地分析抽水蓄能发电的经济性,以下列 6 种假设进行计算。

假设 1:初始投资成本为 5.5 元/W;基准折现率为 9.5%;使用寿命为 30 年;运维费率为 2.5%;年利用小时数为 2000 h。

假设 2:在假设 1 的基础上,仅将使用寿命增加至 40 年,其他参数不变。

假设 3:在假设 1 的基础上,仅将初始投资成本增长 10%。

假设 4:在假设 1 的基础上,仅将基准折现率降低至 7%。

假设 5:在假设 1 的基础上,仅将年利用小时数

增加 10%。

假设 6:在假设 1 的基础上,仅将运维费率降低至 1.5%。

以假设 1 为基准,所做度电成本敏感性分析如图 6 所示。结果表明,抽水蓄能电站度电成本与使用寿命和年利用小时数均呈负相关关系,与初始投资、基准折现率和运维费率均呈正相关关系,其中基准折现率对抽水蓄能度电成本的影响程度最大。

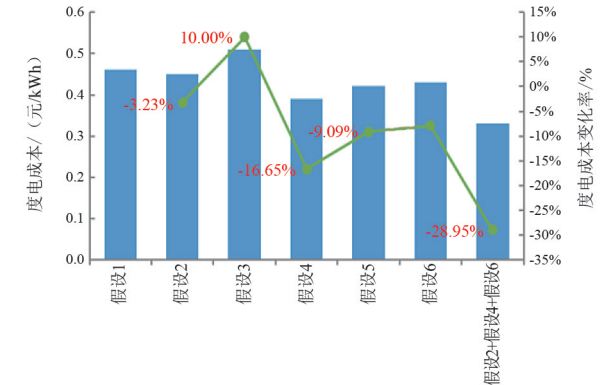


图 6 抽水蓄能电站度电成本敏感性分析

若将使用年限提升至 40 年,基准折现率降至 7%,运维费率降至 1.5%,则度电成本将降至 0.33 元/kWh。目前全国绝大部分省份或直辖市的一般工商业峰谷价差已超过 0.3 元/kWh,其中不少区域价差超过 0.5 元/kWh,抽水蓄能应用的经济性可以较好地体现。

3.5.2 完全市场化模式下抽水蓄能电站收益分析

以装机容量为 1200 MW 的抽水蓄能电站为例开展算例分析。额定抽发功率均为 1200 MW;连续满抽满发小时数为 5 h;年抽水利用不超过 2000 h;综合效率为 80%。提供的备用容量占额定功率的最大比例为 100%。对于无功平衡服务、事故应急及恢复服务等是不可计量的辅助服务,签订年度合同费用为 100 元/(kW·a),年收入共 12 000 万元。

价格曲线采用文献[21]提供的美国 PJM 某一日的节点电价曲线和调频里程价格曲线,如图 7 所示,其中:峰时最大电价为 620 元/MWh,出现在晚上 19:00;谷时最低电价为 170 元/MWh,出现在凌晨 1:00;最大峰谷电价比值达到 3.65。调频容量按固定价格补偿,为 18 元/MW,调频里程价格是市场竞争价,在 24 h 内波动。一天内调频里程价格高峰是 41 元/MW,出现在 9:00、19:00 和 20:00;低谷价格是 20 元/MW,出现在 14:00。备用市场价格为 16 元/MW。

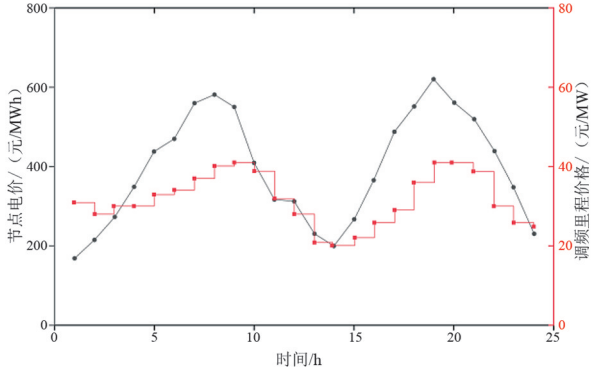


图 7 价格曲线

抽水蓄能电站的电能量、调频、备用优化结果如图 8 所示。

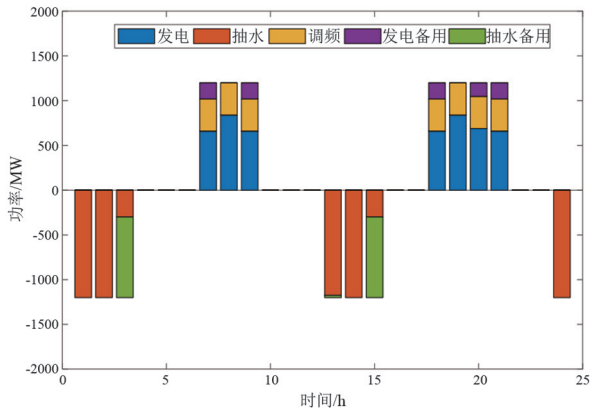


图 8 抽水蓄能电站电能量、调频、备用优化结果

由图 8 可见,抽水蓄能电站总发电时长为 7 h,分别为 6:00~9:00 和 18:00~22:00,发电电量为 5 008.27 MWh。总抽水时长为 7 h,分别为 1:00~4:00、13:00~16:00 和 24:00,抽水电量为 6 575.34 MWh。抽水蓄能电站储能容量如图 9 所示,可见抽水蓄能一天内实现“两抽两发”。整体来看:抽水蓄能电站在电价较高时发电,对应上午和晚上的负荷高峰时刻;在电价较低时抽水,对应中午和夜间的负荷低谷时刻。

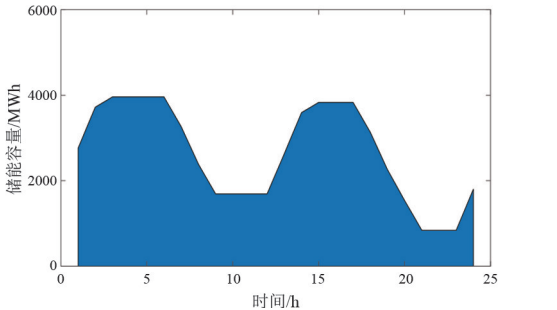


图 9 某抽水蓄能电站储能容量

根据是第 3.4 节的完全市场化模式下抽水蓄能电站收益分析模型计算得到:发电收入为 283.22 万元,抽水费用为 141.18 万元,现货市场收益为 142.04 万元。

抽水蓄能电站在发电工况下提供 AGC 调频服务,容量总和共 2520 MW。基本调频容量收入为 4.54 万元,调用调频里程收入为 29.10 万元,调频收入共 33.64 万元。

抽水蓄能电站发电和抽水的剩余容量提供备用服务,在发电工况下提供的备用容量为 871.73 MW,抽水工况下提供的备用容量为 1 824.66 MW。发电备用容量收入为 1.39 万元,抽水备用容量收入为 2.92 万元,备用收入共 4.31 万元。

综上,抽水蓄能电站电能量、调频、备用的日收入共 180 万元,年收入为 65 698.788 万元。加上不可计量辅助服年度合同收入 12 000 万元,共 77 698.788 万元。收入明细如表 1,收入结构如图 10 所示。

表 1 某抽水蓄能电站年度收入 单位:万元

收入	电能量	调频	备用	无功、黑启动等	总计
日收入	142.04	33.64	4.31	32.88	212.87
年收入	51 844.77	12 279.33	1 574.69	12 000.00	77 698.79

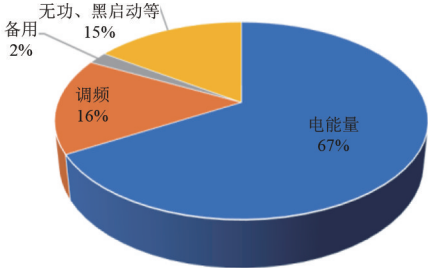


图 10 抽水蓄能电站收入结构

4 结 论

上面构建了基于存量煤电的抽水蓄能容量配置优化模型与抽水蓄能电站不同运行模式下成本收益模型。通过算例分析,得出以下结论:

- 1)煤电机组关停数量越少,煤电发电量越多,风光出力最丰富时最小等效负荷的绝对值越大,即需要配置更多容量的抽水蓄能;煤电机组改造降低了最低技术出力,提高了系统调峰能力,使最小等效负荷的绝对值减小,需要配置的抽水蓄能容量也将随之降低。
- 2)考虑到中国大容量煤电机组较多,具有较强的调节能力,且煤电启停时间长、启停成本高,因此存量煤电的背景下应对煤电机组进行灵活性改造,使煤电机组全部为开机状态,且全天均保持最小技

术出力运行;同时,基于最小等效负荷配置对应容量的抽水蓄能,可使煤电机组以较平稳的出力工况运行,减少煤炭损耗,降低煤电启停成本。这将有助于在保证系统经济性的前提下最大限度提高系统的调峰能力,实现风光 100%消纳。

3)抽水蓄能电站度电成本与使用寿命和年利用小时数均呈负相关关系,与初始投资、基准折现率和运维费率均呈正相关关系。若将抽水蓄能电站的使用年限提升至 40 年,基准折现率降至 7%,运维费率降至 1.5%,则度电成本将降至 0.33 元/kWh。

4)在完全市场化模式下,抽水蓄能电站完全独立参与市场,其收入来源包括电能量收益、调频辅助服务收益、备用辅助服务收益、无功和黑启动等辅助服务收益,其中电能量收益最高,占总收入的 67%,备用辅助服务收益最低,占总收入的 2%。

参考文献

[1] 刘梦晨,郑华,秦立军,等.基于源网荷储综合调峰资源协同方案研究[J].电测与仪表,2022,59(8):127-132.

[2] 普智勇,张冬蕊,尹学卫,等.不同储能对多时间尺度风电消纳特性对比研究[J].节能技术,2020,38(4):371-374.

[3] Cong N T.Progress in electrical energy storage system: A critical review[J].Progress in Natural Science,2009,19(3):291-312.

[4] 《抽水蓄能中长期发展规划(2021~2035 年)》印发实施[J].中国电力企业管理,2021(27):7.

[5] 桑林卫,卫璇,许银亮,等.抽水蓄能助力风光稳定外送的最佳配置策略[J].中国电力,2022,55(12):86-90.

[6] 程孟增,唐一金,商文颖,等.风-光-火-抽蓄联合系统中抽水蓄能电站最佳容量配置[J].电力建设,2021,42(11):72-81.

[7] 蔺梦雪,顾圣平.基于贝叶斯评价模型的抽水蓄能电站容量规划[J].水电能源科学,2019,37(1):156-159.

[8] 娄素华,崔继纯.考虑动态功能的抽水蓄能电站综合规划模型[J].电力系统自动化,2009,33(1):27-31.

[9] 林俐,李北辰,孙勇,等.基于高比例新能源消纳的抽水蓄能容量多时间尺度迭代优化配置模型[J].电网与清洁能源,2021,37(1):104-111.

[10] 杨昌海,张赛,王雪妍,等.基于平抑风光波动的抽水蓄能容量优化配置[J].电网与清洁能源,2023,39(7):140-146.

[11] 我国进一步完善抽水蓄能价格形成机制[J].河南科技,2021,40(14):2.

[12] 杨宏基,周明,张茗洋,等.电力市场下抽水蓄能电站运营策略及效益分析[J].华北电力大学学报(自然

科学版),2021,48(6):71-80.

[13] 柳洋,何永秀,李漠兴,等.市场环境下抽水蓄能电站的价格市场衔接机制设计与效益评估[J].现代电力,2023,40(1):42-49.

[14] 谢正义,王义民,畅建霞,等.新能源并网下混合式抽水蓄能电站竞价策略[J].水力发电学报,2023,42(12):14-26.

[15] 马良,翟海燕,杨文婷,等.现货市场下抽水蓄能电站电量收益及综合效益分析[J].水利水电技术(中英文),2023,54(S1):283-289.

[16] 罗莎莎,刘云,刘国中,等.国外抽水蓄能电站发展概况及相关启示[J].中外能源,2013,18(11):26-29.

[17] 孟鑫成.电力市场条件下抽水蓄能电站辅助服务补偿机制研究[D].保定:华北电力大学,2009.

[18] 张滇生,陈涛,李永兴.日本抽水蓄能电站考察述评[J].南方电网技术,2009,3(5):1-5.

[19] 罗开颜,王睿,刘庆,等.国外抽水蓄能电站盈利模式

(上接第 13 页)

2)引入数值缓启动器,在微电网并网/孤岛模式切换过程中,使得输入电流内环控制结构中的参考给定值缓慢变化,进一步减小因控制结构切换造成的瞬时冲击电流,实现了微电网并网/孤岛运行模式的平滑切换。

参考文献

[1] 乐健,廖小兵,章琰天,等.电力系统分布式模型预测控制方法综述与展望[J].电力系统自动化,2020,44(23):179-191.

[2] 吴宇奇,叶雨晴,马啸,等.抑制电压波动与规避频率越限的孤岛微电网并网预同步方案[J].电力系统自动化,2021,45(14):56-64.

[3] XIAO J F, WANG P, SETYAWAN L. Implementation of multiple-slack-terminal DC microgrids for smooth transitions between grid-tied and islanded states[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(1):273-281.

[4] 张纯江,徐菁远,庆宏阳,等.主从结构微电网逆变器离网全过程平滑切换控制策略[J].电力系统自动化,2022,46(23):125-133.

[5] ANSARI S, CHANDEL A, TARIQ M. A comprehensive review on power converters control and control strategies of AC/DC microgrid [J]. IEEE Access, 2020, 9: 17998-18015.

[6] GAO D W Z. Basic concepts and control architecture of microgrids[J]. Energy Storage for Sustainable Microgrid, 2015:1-34.

[7] TANG X S, DENG W, QI Z P. Investigation of the dynamic stability of microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(2):698-706.

探析[J].中国能源,2022,44(7):16-23.

[20] 王昊婧.新形势下我国抽水蓄能电站运营效益评价方法研究[D].北京:华北电力大学,2016.

[21] 周丽.抽水蓄能电站主辅市场容量分配模型及竞价策略研究[D].北京:华北电力大学,2021.

作者简介:

何璞玉(1991),男,硕士,经济师,研究方向为电价机制与电力技术经济;

张玉鸿(1970),男,硕士,高级工程师,研究方向为电价机制与电力技术经济;

焦 杰(1992),男,硕士,经济师,研究方向为电价机制与电力技术经济;

任文诗(1994),女,硕士,经济师,研究方向为电价机制与电力技术经济;

张冀嫻(1987),女,硕士,高级经济师,研究方向为电价机制与电力技术经济。

(收稿日期:2024-05-23)

[8] AHMED I, SUN L T, CHEN X. A novel control scheme for microgrid inverters seamless transferring between grid-connected and islanding mode [C]//2017 China International Electrical and Energy Conference (CIEEC), October 25-27, 2017, Beijing, China. IEEE, 2017:167-172.

[9] LI H J, WANG J, HU A P, et al. Smooth switching control strategy for microgrid based on state following controller[C]//2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2), October 20-22, 2018, Beijing, China. IEEE, 2018:1-4.

[10] LIANG B M, KANG L, HE J Z, et al. Coordination control of hybrid AC/DC microgrid[J]. The Journal of Engineering, 2019, 16:3264-3269.

[11] VASQUEZ J C, GUERRERO J M, LUNA A, et al. Adaptive droop control applied to voltage-source inverters operating in grid-connected and islanded modes [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(10):4088-4096.

[12] 许胜,曹武,赵剑锋.微网稳定运行与模式平滑切换综合控制策略[J].电工技术学报,2018,33(16):3855-3867.

[13] 陈杰,陈新,冯志阳,等.微网系统并网/孤岛运行模式无缝切换控制策略[J].中国电机工程学报,2014,34(19):3089-3097.

作者简介:

陈仁钊(1970),男,硕士,高级工程师,从事智能微电网分布式能源、储能电池及电池管理系统研究;

陈 杨(2000),男,硕士研究生,研究方向为新能源发电与智能电网控制;

夏 岩(1983),男,副教授,博士,研究方向为电力电子技术 with 新能源发电。

(收稿日期:2024-02-23)

基于时频域瞬时特征的配电网弧光接地故障检测

张 华¹, 苏学能¹, 任 杰², 张真源²

(1. 国网四川省公司电力科学研究院, 四川 成都 610041; 2. 电子科技大学, 四川 成都 611731)

摘要:配电网弧光接地故障对电力系统安全和人身安全带来很大的威胁,快速准确的弧光检测是实现故障隔离与处置、预防电气安全风险的重要手段之一。为实现在不同电压等级和系统配置下均具有高水平检测速度和准确度的弧光检测,提出了一种基于时频域特征的弧光接地故障检测方法。首先,通过奇异值分解与变分模态分解将零序电流分解为不同频带的单分量子信号,得到的子信号有不同的频带与中心频率,且避免了模态混叠带来的误差,有利于对不同谐波分量进行细化分析;然后,利用希尔伯特变换获得子信号的瞬时幅值、相位与频率,并将瞬时特征作为检测的主要依据,为保证在线计算时对应时序信号分类的准确性,设计了基于长短期记忆(LSTM)网络的故障分类器以区分弧光接地与其他情况;最后,通过不同系统配置的实际配电网弧光接地的故障数据验证了该方法的性能。

关键词:弧光接地; 瞬时特征; 希尔伯特变换; 长短期记忆(LSTM)

中图分类号:TM 734 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2024)05-0053-08

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20240508

Arc Grounding Fault Detection in Distribution Network Based on Transient Features in Time-frequency Domain

ZHANG Hua¹, SU Xueneng¹, REN Jie², ZHANG Zhenyuan²

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, Sichuan, China)

Abstract: Arc grounding faults in distribution network are a great threat to system safety and personal safety, and fast and accurate detection means are one of the important technologies to prevent the risk. In order to achieve a high level of detection speed and accuracy for different voltage levels and system configurations, an arc grounding fault detection method based on time-frequency domain characteristics is proposed. The zero-sequence current is decomposed into single component sub-signals of different frequency bands by singular value decomposition and variational mode decomposition, and the obtained sub-signals have different band and center frequency, and it avoids the errors caused by mode mixing, which ensures the refine analysis of different harmonic components. And then, the instantaneous amplitude, phase and frequency of sub-signals are obtained by using Hilbert transform, and the instantaneous characteristics are taken as the main basis for detection. In order to ensure the classification accuracy of sequence signals during online calculation, a fault classifier based on long short-term memory (LSTM) network is designed to distinguish arc grounding from other cases. Finally, the performance of the proposed method is verified by the fault data of arc grounding in an actual distribution network.

Key words: arc grounding; transient features; Hilbert transform; long short-term memory (LSTM)

0 引言

配电网作为电力系统的重要组成部分,其规模与智能化水平近年来得到了长足的发展。确保配电

基金项目:国网四川省电力公司科技项目(52199722000B)

网的安全稳定运行变得越发重要^[1-2]。由于中国配电网系统多数采用中性点不直接接地的运行方式,在单相接地故障发生时,故障电流较主网更小,故障特征微弱。尤其在高阻接地时,过渡电阻进一步抑制了零序电流中的特征量,使得配电网单相接地故障检测面临着巨大的挑战。并且,弧光接地发生时,

电弧的随机性和非线性导致零序电流中存在大量的谐波分量^[3],使得故障信号暂态分量中的谐波成分与线性电阻接地时的理论谐波成分不一致,进一步降低了一些以暂态分量特征作为主要判据的故障检测方法的准确性。因此,快速准确的配电网弧光接地故障检测仍是亟待解决的工程难题。

通过建立配电网系统的零模等效方程,弧光接地故障检测可被简化为串联电弧故障,零模等效将具有复杂电路结构的耦合系统转化为具有明确参数且结构简单的电路。因此,一般对配电网弧光接地故障的研究重点在于对电弧故障发生时测量点的电气量特性。目前,许多学者在诸多方面对电弧进行了研究,包括基于信号处理的特征提取、基于电弧机理建模的电路状态辨识等。实际在大多数配电网中,能够直接得到的信号只有出线端的相电压和相电流采样值,而通过单端信号对系统状态进行精确的建模与估计是十分困难的。因此,利用信号处理方法来获取故障特征量成为了大多数研究中重要的步骤之一。文献[4]利用傅里叶变化(Fourier transform, FT)分析了电弧故障发生时的频率特性,并将一些低次谐波作为电弧故障检测的特征量。文献[5]利用 FT 对电弧电流与电压中的畸变程度进行了分析和计算,比较了电弧故障和其他故障时奇次谐波所占比例的差异,并作为电弧检测的依据。文献[6]对不同负载下不同类型的特征量进行了分析,包括时域中的均值、总变分、极值,以及频域中的直流量、三次谐波、五次谐波含量等,并在上述参数构成的特征空间中完成了故障分类。在文献[7]中,电弧故障的场景被分为了阻性、容-感性和开关性 3 种,在不同的类别下选择了更显著的谐波成分作为故障检测的指标。

上述的研究均在时域和频域中提取故障特征来实现电弧检测,需要至少采样一个周波的数据。不同场景下,时域特征的表现形式可能会存在很大差异。因此,需要针对故障场景特点设计合适的函数或数值计算方法,这无疑限制了检测方法的通用性。同时,基于 FT 的频域分析方法缺乏时间信息,单纯依赖频域特征的故障检测方法无法完全实现故障态表征,且容易被背景谐波干扰。

为解决上述问题,一些时频域分析方法被应用到电弧故障检测中。与频域分析不同的是,时频域分析兼顾了时间信息和频率信息,能够获得信号频

率、相位、幅值等参数随时间的变化趋势^[8],扩大了特征选择的范围。文献[9-12]通过小波变换算法获得了故障信号频率随时间的变化,并将小波系数作为故障检测指标。但基于小波变换的故障检测算法性能优劣取决于选择的基函数是否合适。文献[13-14]选择了维格纳维拉分布(Wigner-Viller distribution, WVD)来提取故障信号的时频域特征。虽然 WVD 具有很高的时频聚集性,且不需要选择基函数,但在分析电弧故障信号这类多分量非平稳信号时,会出现交叉项干扰。文献[7, 15-16]利用希尔伯特变换(Hilbert transform, HT)分析故障信号的时频特性。与小波变化、WVD 等积分变化方法相比,HT 提供了一种计算信号瞬时参数的新途径,不受测不准原理的制约;但应用于多分量信号的时频分析时,容易出现没有物理意义的负频率。因此,在应用 HT 之前,一般需要通过合适的信号分解技术将多分量信号分解为单分量信号。

许多文献也研究了弧光故障的检测策略。文献[17]提出了一种基于主成分分析和支持向量机的综合电弧检测方法,以解决电弧故障在多类型负载下的分类问题。文献[18]设计了一种基于随机森林与深度神经网络结合的串联电弧故障检测方法。文献[19]建立了用于快速电弧辨识的卷积神经网络模型,并在 IEC 62606 的支持下验证了方法的可行性。上述研究通过机器学习和人工智能来完成电弧故障检测,但采用的模型缺乏时序特征量变化趋势的捕捉能力,在处理强动态特性信号分类任务时,难以利用其演变规律。

为此,下面提出了一种基于时频域特征的电弧检测方法。为避免直接使用 HT 提取时频特征时可能出现的负频率,通过变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)将多分量故障信号分解为具有不同频率中心的单量子信号,并利用奇异值分解(singular value decomposition, SVD)确定合适的分解层数,以获得故障场景适应能力和更好的分解性能。同时,分析了各个频带子信号的瞬时幅值、相位和频率,将瞬时参数作为电弧故障检测的指标。为兼顾特征量的幅值和相位变化特性,设计了基于长短期记忆单元(long short-term memory, LSTM)网络的故障分类器,以便更好地区分弧光接地故障和其他故障。通过实际配电网弧光接地故障数据,验证了所提方法的可行性。

1 电弧故障信号的时频特性

1.1 电弧故障信号时域-频域特性分析

电弧弧柱的等效电阻是时变的非线性电阻,在正弦电压激励下,故障信号为非平稳多分量信号。图1显示了实际配电网系统单相弧光接地的零序电压和零序电流,可见波形中存在周期性的畸变和随机跳变,且在电流过零点处尤为明显,被称为“零休”现象。

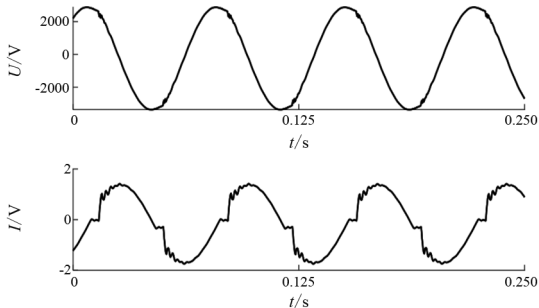


图1 弧光接地故障电压与电流波形

在现代信号处理技术中,周期信号 $x(t)$ 可表示为调幅-调频函数。

$$x(t) = a(t) \cdot \cos \varphi(t) \quad (1)$$

式中: $a(t)$ 为信号包络线; $\varphi(t)$ 为瞬时相位函数。当 $a(t)$ 为定值、 $\varphi(t)$ 为时间相关的一次函数时,信号 $x(t)$ 为平稳单分量余弦信号,其幅值、频率和相位均可通过 FT 得到。FT 的常见表达式为

$$F(\omega) = \int x(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (2)$$

由式(2)可见,FT 是将信号投射到以三角函数为基的线性空间中,并获得不同频率下的系数。一个周期的时间信号可由不同频率的三角函数叠加形成,且投影系数为常数而不是函数。因此,当 $a(t)$ 不为定值,或 $\varphi(t)$ 不为一次函数时,通过傅里叶变换无法得到信号幅值与相位的变化情况。

电弧故障电流和电压的频谱如图2所示,3~7次奇次谐波是故障信号中的主要成分,但谐波的时间信息,包括开始时间、结束时间和趋势,无法由 FT 获得。

1.2 希尔伯特变换

时频域分析同时具备时间与频率信息的获取能力,是分析非平稳信号的常用手段。其中,希尔伯特变换由于不受测不准原理的制约,相比于其他积分

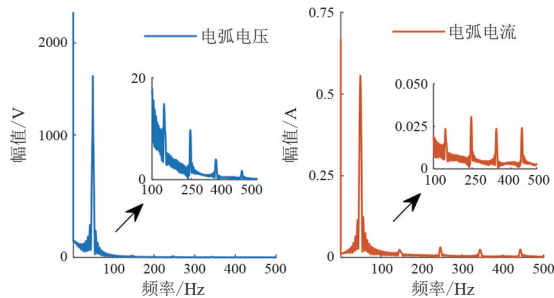


图2 电弧故障电流与电压的频谱

变换型的时频分析方法,在某些场景下具备更优越的性能。

Gabor(伽柏)定义的解析信号由实部 $x(t)$ 与虚部 $\tilde{x}(t)$ 构成^[20],表示为

$$x_A(t) = x(t) + j\tilde{x}(t) \quad (3)$$

虚部 $\tilde{x}(t)$ 可通过原信号的 HT 来获得,其表达式为

$$\tilde{x}(t) = \frac{1}{\pi} \text{p.v.} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau \quad (4)$$

式中:p.v.为柯西主值; τ 为时间变量。因此信号的瞬时幅值 $A(t)$ 、瞬时相位 $\varphi(t)$ 及瞬时频率 $f(t)$ 可表示为

$$\begin{cases} A(t) = \sqrt{x^2(t) + \tilde{x}^2(t)} \\ \varphi(t) = \arctan \frac{\tilde{x}(t)}{x(t)} \\ f(t) = \frac{\varphi'(t)}{2\pi} \end{cases} \quad (5)$$

式中, $\varphi'(t)$ 为瞬时相位导数。

显然,在分析故障电弧信号时,一些重要谐波成分的幅值、频率和相位等的变化趋势,可通过基于 HT 的时频域方法直接计算得出。

但是,HT 的应用存在一些限制,即待分析信号必须为幅度缓变的单分量信号,否则求出的瞬时频率会存在没有物理意义的负值。因此,在应用 HT 之前,一般会将信号分解为本征模函数(intrinsic mode function, IMF),即包络线频率低于载波频率的单分量信号。

1.3 VMD

VMD 是一种具备完备数学框架的信号分解方法。通过将信号分解任务转化为固定分解层数下的带宽和最小问题,构建了频域维纳滤波器。VMD 构建的最优化问题表示为

$$\min \left\{ \sum_k \left\| \partial_t \left[\left(\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right) \cdot x_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\}$$

$$\text{s.t. } \sum_k x_k(t) = x(t) \quad (6)$$

式中: ∂_t 为时间的编导数; $x_k(t)$ 为分解信号; $\delta(t)$ 为狄拉克函数; k 为设置的分解层数; ω_k 为子信号中心频率。式(6)表示带约束条件的最小带宽和问题, 可通过拉格朗日方程转化为无约束最优化问题, 表示^[21]为

$$L = a \sum_k \left\| \partial_t \left\{ \left[\delta(t) + \frac{j}{\pi t} \right] \cdot x_k(t) \right\} e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 +$$

$$\left\| x(t) - \sum_k x_k(t) \right\|_2^2 + \left[\lambda(t), x(t) - \sum_k x_k(t) \right] \quad (7)$$

式中: a 为引入的松弛因子, 避免问题无法求解; $\lambda(t)$ 为拉格朗日乘子。该问题通过交替方向乘子法求解, 并得到在分解层数 k 下最优的子信号集。

显然, VMD 的优势在于在合适的参数下能够得到最优的分解结果, 相比于 EMD 及其衍生算法, 具有明确的物理意义和更低的模态混叠。但参数 k 的选择会严重地影响算法性能。

利用 SVD 确定合适的分解层数 k 。SVD 可获得非方阵的特征值, 从而得到在弗罗贝尼乌斯 (Frobenius) 规范下最接近目标矩阵的低维矩阵。其表达式为

$$\mathbf{A} = \mathbf{U} \mathbf{S} \mathbf{V}^T \quad (8)$$

式中, $\mathbf{A}$ 为 $m \times n$ 维矩阵, 对于一维带噪声的信号 $a(q) (q=0, 1, \dots, m+n-1)$, 可将其构建为汉克尔矩阵, 如式(9)所示; $\mathbf{U}$ 和 $\mathbf{V}$ 为 $m \times m$ 和 $n \times n$ 维单位矩阵, 分别由 $\mathbf{A} \mathbf{A}^T$ 和 $\mathbf{A}^T \mathbf{A}$ 的特征向量构成; $\mathbf{S}$ 为由矩阵 $\mathbf{A}$ 的特征值构成的对角矩阵, 其对角元素为非增的。

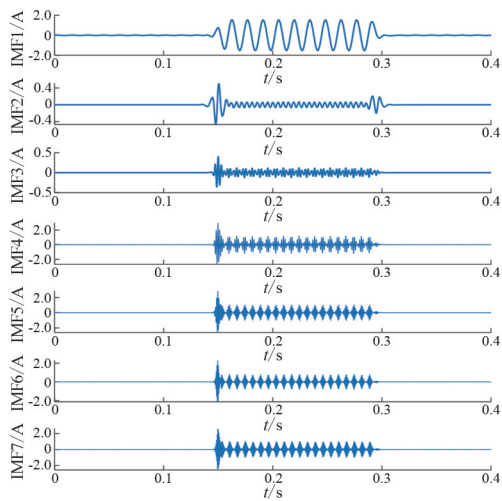
$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a(0) & a(1) & \cdots & a(n-1) \\ a(1) & a(2) & \cdots & a(n) \\ \cdots & \cdots & 0 & \cdots \\ a(m-1) & a(m) & \cdots & a(m+n-1) \end{bmatrix} \quad (9)$$

特征值大小表示在原信号的重要程度, 因此可通过设置阈值选择前 k 个主要特征值, 实现信号去噪, 同时获得了适当的 k 值作为分解层数。

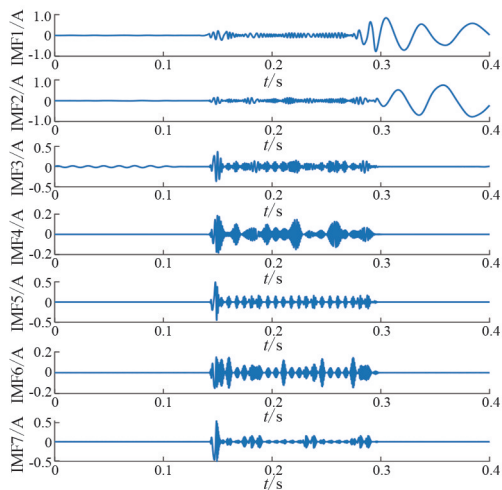
1.4 电弧故障信号的时频分析

为表明 SVD+VMD 分解的性能, 经 VMD 分解后以及相同数据的 EMD 分解结果如图 3 所示。可见, VMD 得到的 IMF 具有更小的带宽和模态混叠现象。

IMF1 至 IMF4 频谱如图 4 所示, 前 4 个 IMF 分



(a) VMD 得到的 IMF 的



(b) EMD 得到的 IMF 的

图 3 电弧故障电流的分解模态

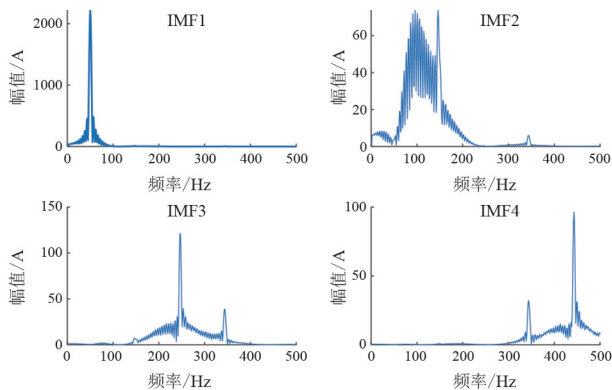


图 4 IMF1 至 IMF4 频谱

别为以 50 Hz、150 Hz、350 Hz 和 450 Hz 为中心频率的调幅-调频信号。

通过希尔伯特变化, 获得前 4 个 IMF 的时频谱如图 5 所示。时频谱清晰地反映了电弧故障发生后, 幅值降低的整个过程。并且, 在故障发生和故障切除时, 其相位函数模式在故障时出现了明显切换。

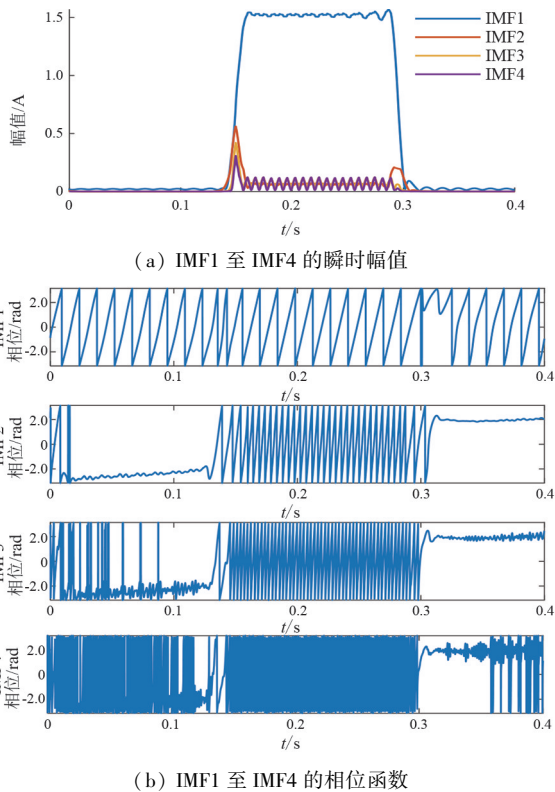


图5 IMF1至IMF4的相位函数

可见,在燃弧时零序电流中的主要谐波分量为3~7次谐波,且具有稳定的、不明显衰减的幅值,与故障暂态的谐波分量不同。另外,由于系统状态的切换,所有IMF的相位函数模式也同时发生了变化。这些时频域动态特性为电弧检测提供了依据。

1.5 方法的灵敏性分析

采用SVD+VMD对故障信号进行分解的目的在于获得故障信号中主要固有模态分量。电弧故障伴随着大量的且含量随频率增加而降低的奇次谐波,IMF1至IMF4实际上主要表征的是故障信号中的工频以及3、5、7次谐波,但与傅里叶变换描述的平稳信号不同,IMF1至IMF4表征的子信号是具有动态特性的非平稳信号。因此相较于傅里叶变换,对电弧故障信号而言,该方法具有更强的特征表征能力。

但在某些情况下,如燃弧间隙过小、空气电离程度高时,电弧阻值的非线性非常弱以至于故障信号畸变程度很低,故障信号中特征谐波含量随之变低,从而影响故障检测算法的精度。实际上,一些其他因素,如故障距离、接地电阻大小等对检测方法造成的影响最终也归结于对特征谐波造成的影响。对所提的方法而言,会影响SVD的特征值矩阵中表征主要谐波分量的特征值的大小,从而影响VMD对信号的分解准确性。通过SVD主要特征值和信号总

谐波失真(total harmonic distortion, THD)的关系来阐述该现象,仿真分析如图6所示。

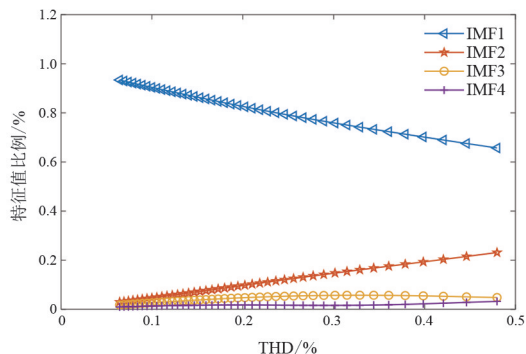


图6 IMF特征值随THD的变化

图6中,IMF1的特征值比例随THD的增加而减小,意味着在动态特性更强的电弧故障中,工频分量相对更小。相反,IMF2至IMF4的特征值比例随THD的增加而增加,且IMF2的特征值上升得十分明显,其原因在于IMF2至IMF4对应的3、5、7次谐波是造成THD增加的主要因素。但在THD小于0.1时,IMF2至IMF4的特征值同样小于0.1,此时的电弧故障信号的特征是非常微弱的,仅依靠点值特征难以完成准确的故障检测。这种情况下,需要对信号中的时序特征进行挖掘。

2 电弧检测方法

2.1 LSTM

故障检测的准确率和速度不仅取决于特征集是否具有显著的特征表征能力,还取决于故障分类器的性能。经过上述分析,选择了第1至第4模态的瞬时参数作为特征,在实际应用中,作为与采样数据长度相同的时序数据。因此,选择了LSTM作为时序特征分类器,其基本原理表示为

$$\begin{cases} i_t = g(\mathbf{W}_i x_t + \mathbf{V}_i h_{t-1} + \mathbf{b}_i) \\ o_t = g(\mathbf{W}_o x_t + \mathbf{V}_o h_{t-1} + \mathbf{b}_o) \\ m_t = f_t m_{t-1} + i_t c_t \\ f_t = g(\mathbf{W}_f x_t + \mathbf{V}_f h_{t-1} + \mathbf{b}_f) \\ h_t = o_t \tanh m_t \\ c_t = \tanh(\mathbf{W}_c x_t + \mathbf{V}_c h_{t-1} + \mathbf{b}_c) \end{cases} \quad (10)$$

式中: i_t 为输入门; o_t 为输出门; m_t 为记忆单元; f_t 为遗忘门; h_t 为隐层的输出,且 h_t 会作为遗忘因子参与下一次LSTM单元的计算; x_t 为输入序列; $\mathbf{W}$ 为权重向量; $\mathbf{V}$ 为递归权重向量; $\mathbf{b}$ 为偏移权重向量; C_t

为当前输入的单元状态。LSTM 的主要结构和 LSTM 网络如图 7 和图 8 所示。

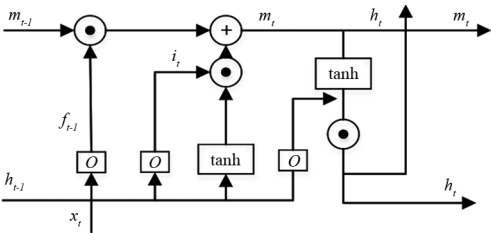


图 7 LSTM 单元的主要结构

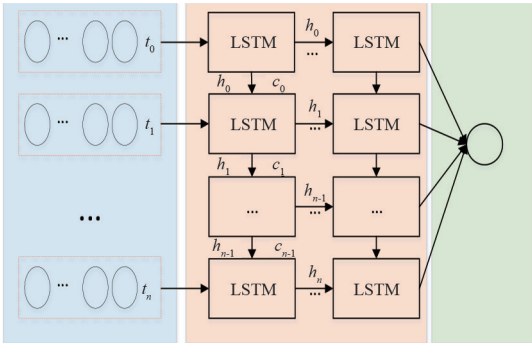


图 8 LSTM 网络

依靠独特的结构和遗忘因子,LSTM 能够捕获时序数据的前后关系,相比于同样可以实现时序分类的循环神经网络,降低了梯度消失的可能性。

2.2 算法设计

三相系统中不对称故障发生时,零序分量为最能体现故障发生的模量,因此将零序电流和零序电压作为原始数据。由于在弧光接地故障发生时,零序分量为非平稳周期信号,因此检测算法输入至少为一个工频周期的采样值。弧光接地检测流程如图 9 所示。

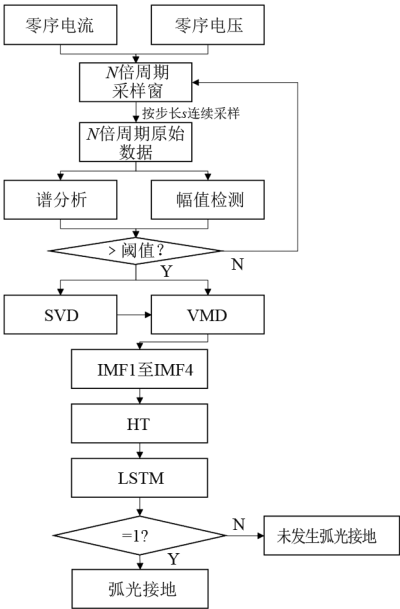


图 9 算法流程

首先,缓存整数倍周期的采样数据并按固定步长递推,以获得连续且长度相同的时间序列;在进行 VMD 分解前通过频谱分析和幅值检测确定是否需要弧光接地检测,从而避免传感器零漂、三相不平衡或漏电流带来的噪声;当检测到非对称故障时,则触发弧光检测算法开始对零序分量信号进行分析和分类;通过 SVD 计算出故障信号的主要成分数量,并作为 VMD 最佳分解层数;随之通过 VMD 和 HT 得到的 IMF1 至 IMF4 的瞬时振幅、瞬时相位和瞬时频率,并作为输入的时间序列信号输入 LSTM 网络。

3 算 例

用实际 35 kV 配电网弧光接地故障的零序分量来验证所提方法的有效性,具体配置如表 1 所示。

表 1 系统配置

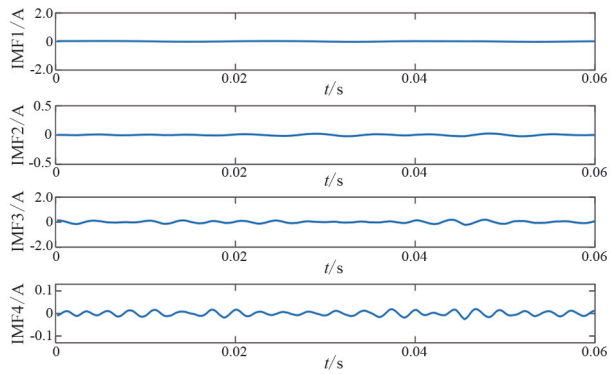
电压等级/kV	数据源	中性点接地方式	故障类型
35	零序电流和零序电压	中性点不接地和中性点经消弧线圈接地	持续燃弧和间歇性燃弧

训练数据集被分为 3 个部分:故障前数据、故障时数据以及故障后数据。其目的是通过对故障前后数据分别标签化,使模型能够辨别三相不平衡、零漂或漏电流导致的零序信号噪声等情况与实际弧光故障的区别。同时,分段标签化有助于识别故障起始的谐波跃升和相位突变,提高检测速度。上述 3 种情况的分解子信号如图 10 所示。燃弧前零序电流的 IMF 与燃弧时的 IMF 存在明显的区别,如故障前零序电流 IMF1 的幅值较低,IMF2 至 IMF4 的频率较高。同时,燃弧期间电流的 IMF,特别是 IMF1 和 IMF2(工频分量和 3 次谐波分量)有明显的上升。而随着接地故障的发展和稳定燃弧通道的形成,3 次谐波的幅度在连续上升后逐渐稳定。

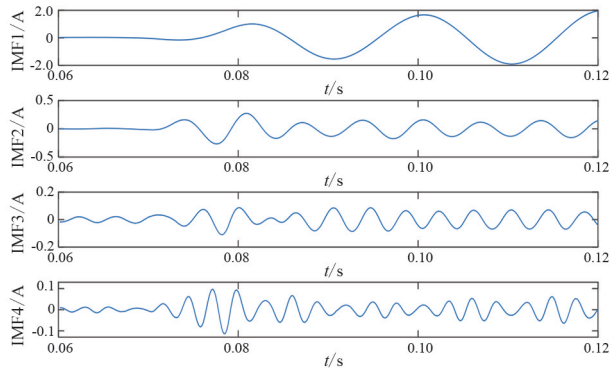
此外,LSTM 模型的配置为 100 个隐藏单元,并采用自适应矩估计算法进行训练。基于 LSTM 的电弧检测方法的训练过程如图 11 所示。

模型训练完成后,将 22 个中性点不接地系统和 32 个谐振接地系统的零序电流和电压数据作为测试数据集输入模型,以检验模型的有效性。结果表明,中性点不接地系统的故障电弧检测准确率为 95%,谐振接地系统为 91%。中性点不接地系统的识别精度略高于谐振接地系统,这是由于谐振接地系统故障发生后投入了随调试消弧线圈,补偿了系

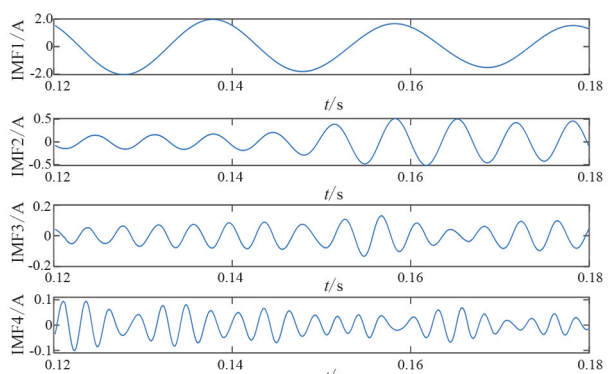
统中的电容电流,使得电弧特性变小导致模型无法识别。



(a) 故障前信号 IMFs



(b) 故障时信号的 IMFs



(c) 故障后信号 IMFs

图 10 故障零序电流的分解模式

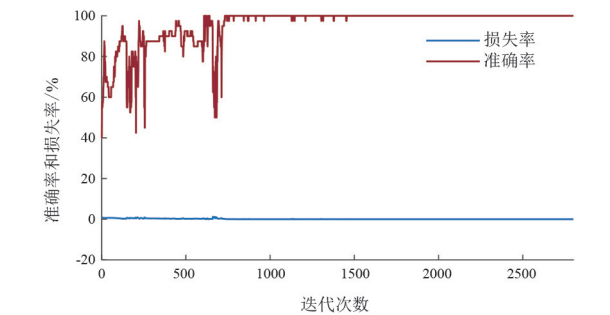


图 11 模型训练时的正确率和损失

在相同的测试数据集下,将所提方法与常见的弧光检测算法,包括基于频域特征与支持向量机

(support vector machine, SVM) 的故障分类方法、基于卷积神经网络 (convolutional neural networks, CNN) 的故障信号特征提取与故障辨识方法等进行对比,其正确率如图 12 所示。

由于实际故障数据的强动态特性,频域特征无法完全描述其故障特性,特别是故障时的暂态分量和电弧的强随机性会影响频域特征提取和卷积层特征提取的准确性,因此基于频域特征的 SVM 方法与 CNN 在动态特性太强的情况下难以完成高精度检测任务。而所提方法融合 SVD 和 VMD 的优势,完成了信号去噪和对主要固有模态分量的提取,具有更强的抗噪能力和强动态情况下的准确性。

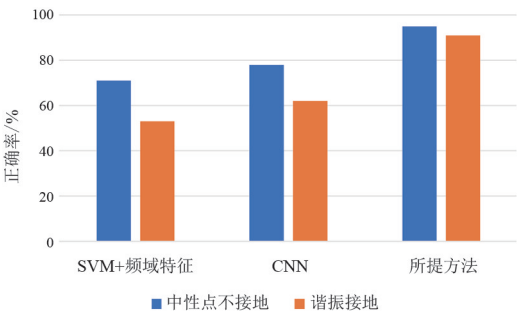


图 12 算法的正确率对比

4 结 论

上面提出了一种基于时频域瞬时特征的弧光接地故障检测新方法。针对电弧故障信号的非平稳性和多分量特性,结合 SVD 和 VMD 实现了故障信号的分解并获得了故障信号中的主要模态。同时,通过希尔伯特变换计算出瞬时振幅、频率和相位,并对其特性进行分析,得到电弧故障信号的瞬时特征。经过对瞬时参数的分析,选择反映工频以及 3、5、7 次谐波成分的调幅信号 IMF1 至 IMF4 作为主要特征。此外,还设计了基于 LSTM 的电弧检测算法,该算法可以捕获输入时间序列的趋势。最后,用实际配电系统的电弧故障数据验证了所提方法的有效性。

参考文献

[1] 邓丰,李鹏,曾祥君,等.基于 D-PMU 的配电网故障选线和定位方法[J].电力系统自动化,2020,44(19): 160-167.
[2] 李雅洁,孟晓丽,宋晓辉,等.基于最优 FIR 滤波器与层次聚类的配电网单相接地故障选线方法[J].电网技

- 术,2015,39(1):143-149.
- [3] 顾荣斌,蔡旭,陈海昆,等.非有效接地电网单相电弧接地故障的建模及仿真[J].电力系统自动化,2009,33(13):63-67.
 - [4] ARTALE G, CATALIOTTI A, NUCCIO V C S, et al. A set of indicators for arc faults detection based on low frequency harmonic analysis[C]//2016 IEEE International Instrumentation and Measurement Technoloty Conference Proceedings, May 23 - 26, 2016, Taipet, China. IEEE, 2016:1183-1188.
 - [5] ZENG K, XING L D, ZHANG Y J, et al. Characteristics analysis of AC arc fault in time and frequency domain[C]//2017 Prognostics and System Health Management Conference, July 9 - 12, 2017, Harbin, China. IEEE, 2017:1-5.
 - [6] LI S N, YAN Y. Fault arc detection based on time and frequency domain analysis and radom forest[C]//2021 International Conference on Computer Network, Electronic and Automation (ICCNEA), September 24-26, 2021, Xi'an, China. IEEE, 2021:248-252.
 - [7] ZHANG Z Y, REN J, TANG X T, et al. Novel approach for arc fault identification with transient and steady state based time-frequency analysis[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(4):4359-4369.
 - [8] WANG Y K, ZHANG F, ZHANG X H, et al. Series AC arc fault detection method based on hybrid time and frequency analysis and fully connected neural network[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(12):6210-6219.
 - [9] LAI T M, SNIDER L A, LO E, et al. High-impedance fault detection using discrete wavelet transform and frequency range and RMS conversion[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1):397-407.
 - [10] YU Q F, HU Y Q, YANG Y. Identification method for series arc faults based on wavelet transform and deep neural network[J]. Energies, 2019, 13(1):142.
 - [11] KIM Chul-Hwan, KIM Hyun, KO Young-Hun, et al. A novel fault-detection technique of high-impedance arcing faults in transmission lines using the wavelet transform[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(4):921-929.
 - [12] ZHANG S, QU N, ZHENG T F, et al. Series arc fault detection based on wavelet compression reconstruction data enhancement and eeep residual network[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2022, 71:3508409.
 - [13] GUO F Y, GAO H X, WANG Z Y, et al. Detection and line selection of series arc fault in multi-load circuit[J]. IEEE Transactions on Plasma Scinece, 2019, 47(11):5089-5098.
 - [14] LIU J T, ZHOU K F, HU Y. EMD-WVD method based high-frequency current analysis of low voltage arc[C]//2018 Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), September 23 - 26, 2018, Perth, WA, Australia. IEEE, 2018:1-5.
 - [15] CHEN C K, GUO F Y, LIU Y L, et al. Recognition of series arc fault based on the Hilbert Huang transform[C]//2015 IEEE 61st Holm Conference on Electrical Contacts (Holm), October 11 - 14, 2015, San Diego, CA, USA. IEEE, 2015:324-330.
 - [16] LIU W J, ZHANG X B, DONG Y J, et al. Arc fault detection for AC SSPC based on Hilbert-Huang transform[C]//IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, October 29 - November 1, 2017, Beijing, China. IEEE, 2017:4104-4109.
 - [17] JIANG J, WEN Z, ZHAO M X, et al. Series arc detection and complex load recognition based on principal component analysis and support vector machine[J]. IEEE Access, 2019, 7:47221-47229.
 - [18] JIANG J, LI W, WEN Z, et al. Series arc fault detection based on random forest and deep neural network[J]. IEEE Sensors Journal, 2021, 21(15):17171-17179.
 - [19] WANG Y, HOU L M, PAUL K C, et al. ArcNet: Series AC arc fault detection based on raw current and convolutional neural network[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(1):77-86.
 - [20] WANG X Z, YAN Z. Multiple scale identification of power system oscillations using an improved Hilbert-Huang transform[C]//2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition, March 15-18, 2009, Seattle, WA, USA. IEEE, 2009:1-6.
 - [21] DRAGOMIRETSKIY K, ZOSSO D. Variational mode decomposition[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2014, 62(3):531-544.
- 作者简介:**
- 张 华(1985),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统安全稳定分析与控制;
- 苏学能(1991),男,博士,工程师,研究方向为电力系统安全稳定分析与并行计算;
- 任 杰(1993),男,博士研究生,研究方向为配电网故障检测;
- 张真源(1986),男,博士,研究方向为电力系统分析。

(收稿日期:2024-05-18)

基于改进层次分析法和数据挖掘的架空输电线路 极端灾害风险评估模型

周 林¹, 彭宇辉¹, 刘 阳², 任成君¹, 孙文成¹, 张亚迪¹, 张 杰¹, 陈 钊¹, 李卓雯¹

(1. 国家电网有限公司西南分部, 四川 成都 610041; 2. 国网思极数字科技(北京)有限公司, 北京 100052)

摘要:针对现有架空输电线路极端灾害风险评估模型仅计算了风险指标的主观权重值导致评估效果不佳的问题, 提出了一种基于改进层次分析法和数据挖掘的评估模型。首先, 从输电线路的故障隐患、运行状况和自然条件 3 个方面出发, 建立风险评估体系层次结构; 然后, 利用层次分析法将相同层次的不同风险指标进行两两比较, 得到各风险指标的主观权重值, 再利用最小相对熵原理对主观权重值进行改进计算得到风险指标的客观权重值; 最后, 利用数据挖掘技术从历史极端灾害数据中提取出各风险指标的风险特征及风险等级, 生成风险评估模型。通过实验对比测试, 所提出的基于改进层次分析法和数据挖掘的架空输电线路极端灾害风险评估模型评估准确率为 96.7%, 评估效果较好。

关键词:改进层次分析法; 数据挖掘; 架空输电线路; 极端灾害; 风险评估模型; 模型设计

中图分类号: TM 75 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2024)05-0061-05

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20240509

An Extreme Disaster Risk Assessment Model for Overhead Transmission Lines Based on Improved Analytic Hierarchy Process and Data Mining

ZHOU Lin¹, PENG Yuhui¹, LIU Yang², REN Chengjun¹, SUN Wencheng¹, ZHANG Yadi¹,
ZHANG Jie¹, CHEN Zhao¹, LI Zhuowen¹

(1. Southwest Branch of State Grid Corporation of China, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. State Grid SGITG Digital Technology (Beijing) Co., Ltd., Beijing 100052, China)

Abstract: Previous models for extreme disaster risk assessment of overhead transmission lines only calculated the subjective weight values of risk indicators, resulting in poor evaluation performance. Therefore, an extreme disaster risk assessment model for overhead transmission lines based on improved analytic hierarchy process (AHP) and data mining is designed. Firstly, based on the actual situation of overhead transmission lines, a hierarchical structure of risk assessment system is established from three aspects: fault hidden dangers, operating conditions and natural conditions of transmission lines. And then, by comparing different risk indicators at the same level in pairs, subjective weight value of risk indicators is obtained. The subjective weight value of risk indicators is calculated and improved with the principle of minimum relative entropy to obtain the objective weight value of risk indicators. Finally, data mining technology is used to extract the corresponding risk features and risk levels from historical extreme disaster data, and the corresponding risk assessment model is generated. Through experimental comparison testing, the proposed model based on improved AHP and data mining of extreme disaster risk assessment for overhead transmission lines has an accuracy of 96.7%, and the evaluation effect is good.

Key words: improved analytic hierarchy process; data mining; overhead transmission line; extreme disaster; risk assessment model; model design

0 引 言

为了保证人们的用电需求能够被满足,架空输电线路的建设力度越来越大。架空输电线路分布范围极其广泛,所处自然环境极为复杂且自然灾害频发,其中雷暴、洪水、山火、暴雨等极端自然灾害的出现,将会破坏架空输电线路而严重影响到电网的稳定运行。因此,需建立架空输电线路极端灾害风险评估模型,对输电线路在运行过程中产生的风险进行评估,从而制定相应的措施降低灾害的影响。

不少研究学者针对输电线路风险评估模型展开了研究。文献[1]通过融合输电线路中多种参数数据,计算输电线路在实际运行中的安全风险,在图像数据耦合识别的作用下生成相应的多维输电线路图像数据,并对其进行模型训练得到风险指标数据;但该方法的适用性不强。文献[2]在火焰燃烧模型的作用下,分析输电线路山火跳闸的风险特征,实现输电线路的风险分布评估;实验结果表明,该方法评估时间较长。文献[3]将极端灾害在输电线路中产生的特征因子通过运算生成相应的云模型,对输电线路的动态风险进行修正,通过 Eclat (equivalence class transformation) 算法对输电线路风险指标进行关联,从而完成对输电线路极端灾害的风险评估;但实验结果表明,该方法评估效果不佳。上述风险评估模型虽然能够起到一定的评估作用,但由于多种因素的影响以及技术手段不完善,导致评估效果不佳。

在以上研究的基础上,下面设计了基于改进层次分析法和数据挖掘的架空输电线路极端灾害风险评估模型。根据架空输电线路的实际情况构建评估体系层次结构,利用最小相对熵改进层次分析法计算出各层次因素的权重,在数据挖掘的作用下提取相关数据特征,生成输电线路极端灾害风险评估模型。所设计的方法能够针对极端灾害条件下的输电线路进行科学合理的风险评估,并制定应对措施,减小极端灾害给输电线路带来的破坏,保障电网的稳定运行。

1 评估模型设计

1.1 建立风险评估体系层次结构

考虑到架空输电线路可能面临的不同风险来

源,需要选择与极端灾害风险相关的因素作为评估指标。同时,考虑数据的可获取性和实时性,确保所选指标的数据能够准确反映当前风险状况。另外,指标之间可能存在相关性和依赖关系,在选择指标时应综合考虑指标之间的内在联系,以获取更全面和准确的风险评估结果。因此,从输电线路的故障隐患、运行状况和自然条件 3 个方面出发,对风险评估指标进行分析,明确不同风险发生的概率和风险评估指标之间的内在联系,构建相应的风险评估体系层次结构^[4-5],如表 1 所示。

表 1 风险评估体系层次结构

目标层	准则层	指标层	指标说明
输电线路故障隐患 			

表 1 将极端灾害风险评估问题转化成层次监测的判断问题,为后续生成相应的风险评估模型奠定基础。

1.2 基于改进层次分析法计算指标权重

以所构建的风险评估体系层次结构作为基础,构建判断矩阵如式(1)所示。

$$T_x = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & a_{ij} & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中: T_x 为构建的判断矩阵; a_{ij} 为风险指标 i 与风险

指标 j 的相对重要性; n 为风险指标的数量。 a_{ij} 的取值根据不同指标的相对重要性进行判定: 当两个风险指标重要性相同时取值为 0.5; 若其中一个风险指标的重要性远小于另一个则取值为 0.1, 若远大于另一个则取值为 0.9。

利用层次分析法对各层次不同风险指标的主观权重值进行计算^[6-8]。其具体计算过程为

$$\begin{cases} w_{ij} = (w_{ix} - w_{jx})M + 0.5 \\ w_{ix} = w_y w_{iy} M \end{cases} \quad (2)$$

式中: w_{ij} 为第 i 个风险指标 X_i 相对于第 j 个风险指标 X_j 的主观权重值; w_{ix} 、 w_{jx} 分别为风险指标 X_i 、 X_j 所在 x 层次的整体权重值; w_y 为在 y 层次的主观权重值; w_{iy} 为 X_i 在 y 层次的主观权重值; M 为层次分析函数。

利用最小熵相对原理对上述层次分析法进行改进^[9-12], 如式(3)所示。

$$\begin{cases} H(R) = -\sum_{i=1}^n P(X_i) \log_2 P(X_i) \\ \min H(R) = -\sum_{i=1}^n P(X_i) \sum_{j=1}^n P(X_j | X_i) \log_2 P(X_j | X_i) \\ M' = \min H(R) \cdot M \end{cases} \quad (3)$$

式中: $H(R)$ 为条件熵 R 的熵; $P(X_i)$ 为第 i 个风险指标 X_i 出现的概率; $\min H(R)$ 为最小相对熵值; $P(X_j | X_i)$ 为在风险指标 X_i 存在的情况下, 风险指标 X_j 出现的概率; M' 为改进后的层次分析函数。

对层次分析法进行改进处理后, 利用改进层次分析法计算风险指标的客观权重^[13-15], 如式(4)所示。

$$\begin{cases} K = \frac{1}{I(R|F_1)} \times M' \\ a_j = \frac{(1 - e_j) \times K}{n - \sum_j e_j} \end{cases} \quad (4)$$

式中: K 为改进层次分析法的互信息量; $I(R|F_1)$ 为互信息计算函数, I 为给定 R 时 F_1 的条件熵; e_j 为风险指标 X_j 的客观权重值; a_j 为改进后的风险指标 X_j 的客观权重值。

1.3 基于数据挖掘提取风险特征及生成风险评估模型

考虑到历史极端灾害对架空输电线路的影响, 需要对历史数据进行分析 and 处理, 并根据处理结果, 利用数据挖掘提取相应的风险特征。提取过程如图 1 所示。

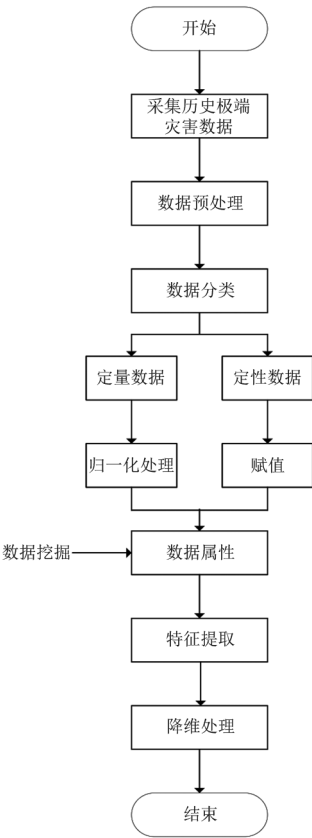


图 1 基于数据挖掘提取风险特征过程

首先, 对采集的历史极端灾害数据进行预处理, 将数据划分为定量数据和定性数据, 对定量数据进行归一化处理, 对定性数据根据严重程度进行赋值; 然后, 进行数据挖掘, 根据数据的属性提取出数据特征并进行降维处理; 最后, 根据所提取的数据特征 f , 按照表 2 所示的风险划分等级确定对应的风险等级, 为后续的风险评估奠定基础。

表 2 风险划分等级

风险等级	定性特征	定量特征
I	<0.20	1
II	0.20≤ f <0.40	2
III	0.40≤ f <0.70	3
IV	>0.70	4、5

结合构建的风险指标评估体系层次结构和计算的风险指标权重值, 生成相应的风险评估模型, 如图 2 所示。

风险评估模型主要分为三大部分, 分别为信息层、融合层和目标层。信息层为架空输电线路的本体特征和输电线路周边的环境特征, 其中: 本体特征为输电线路的长度、高度等多项指标; 环境特征为输电线路所处的海拔、温度、湿度、地表类型等多项指标。这些指标互相影响, 利用第 1.2 节的改进层次

分析法计算出对应的权重值,用于后续的风险评估。在进行数据融合时,先利用数据挖掘提取出相应的风险特征,将该风险特征作为基础对输电线路进行风险评估,并确定相应的风险等级完成风险评估。

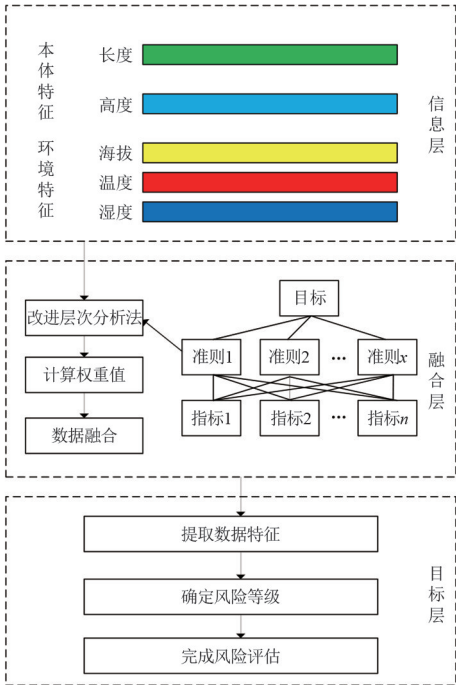


图 2 架空输电线路极端灾害风险评估模型

2 实验测试

2.1 实验准备

为验证所设计的基于改进层次分析法和数据挖掘的架空输电线路极端灾害风险评估模型在实际应用中的效果,进行了相关实验测试。

以某架空输电线路为实验对象,使用 NI LabVIEW 软件创建数据采集 VI 与硬件设备通信,进行历史数据的采集。采集到的数据直接保存到计算机的数据库中。使用 LabVIEW 的数据处理工具箱和函数库对采集到的原始数据进行去除噪声、滤波、数据对齐和校准等操作,再通过分析和算法模块实现特征提取。得到的历史数据特征提取结果如图 3 所示。

同时,对某架空输电线路的风险指标权值进行计算,结果如表 3 所示。

为提高实验的可信度,设置了相应的对照实验将所建模型与其他评估模型进行对比。其中:所设计的基于改进层次分析法和数据挖掘的架空输电线路极端灾害风险评估模型为模型 1;文献 [3] 的基于

改进云模型和多因素权重分析的架空输电线路极端灾害风险评估模型为模型 2;文献 [16] 的基于物元可拓的架空输电线路极端灾害风险评估模型为模型 3。

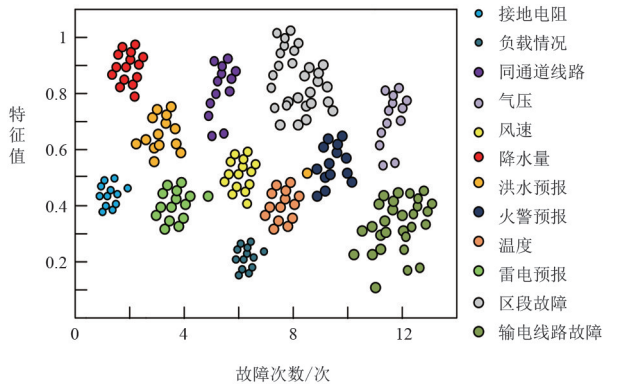


图 3 历史数据的特征提取结果

表 3 某架空输电线路风险指标权重值

序号	风险指标	指标权重值
1	输电线路故障	0.600 0
2	区段故障	0.400 0
3	所在海拔	0.076 1
4	地形	0.076 1
5	地貌	0.076 1
6	防洪装置情况	0.080 7
7	防雷装置情况	0.080 7
8	防火装置情况	0.080 7
9	改造后故障	0.085 2
10	跨越水坡	0.089 8
11	保护角	0.088 2
12	输电线路材质损耗	0.089 8
13	接地电阻	0.087 4
14	同通道线路	0.089 4
15	土地利用率先	0.088 4
16	负载情况	0.087 9
17	雷电预报	0.195 2
18	洪水预报	0.195 2
19	火警报警	0.195 2
20	降雨量	0.177 5
21	风速	0.177 5
22	气压	0.177 5
23	温度	0.215 0
24	输电线路故障隐患	0.250 0
25	输电线路运行状况	0.425 0
26	周边自然条件	0.325 0

2.2 实验结果与讨论

为验证 3 种风险评估模型在实际应用中的效果,以 3 种模型的风险评估准确率作为评价指标,对比 3 种模型的性能。实验中,随机抽取某输电通道架空输电线路的 30 次不同风险等级的数据样本,分别利用 3 种模型进行风险等级评估,并将各模型的风险评估结果与实际结果相对比,通过式(5)计算出模型评估的准确率。

$$Q = \frac{P_1}{P} \tag{5}$$

式中: Q 为模型风险评估的准确率; P_1 为评估正确的实验次数; P 为实验次数。统计结果如图 4 所示。

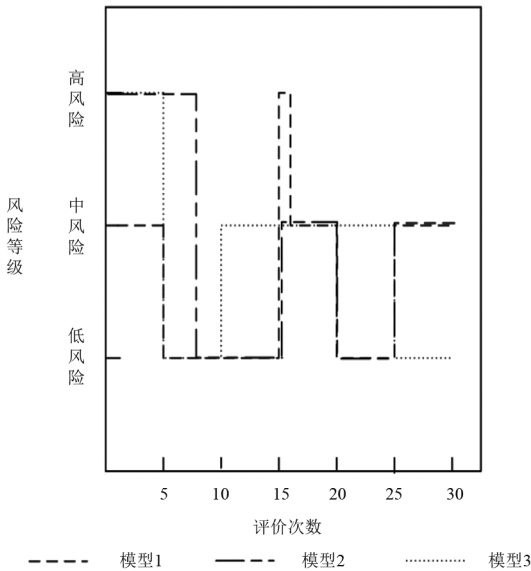


图 4 3 种模型的风险评估结果

如图 4 所示,在对某输电通道架空输电线路进行 30 次风险评估的过程中,3 种模型的评估结果与实际结果均存在一定差异,其中:模型 1 的评估结果与实际结果差异不大,评估准确率为 96.7%;模型 2 的评估效果较差,评估准确率为 80%;模型 3 的评估准确率为 50%。可见,模型 1 的评估准确率最高。这是因为所设计模型结合了改进的层次分析法和数据挖掘技术,综合考虑了主观和客观因素,使评估结果更全面和准确,避免了仅依赖主观权重值带来的评估效果不佳的问题。同时通过两两比较不同风险指标,得到了风险指标的判断矩阵,从而捕捉到多个影响因素之间的相对重要性关系,可更全面地考虑不同因素对极端灾害风险的影响,降低了主观性的偏差。因此,所设计的基于改进层次分析法和数据挖掘的架空输电线路极端灾害风险评估模型在实际

应用中效果最好,能够准确评估架空输电线路的风险情况,保障架空输电线路的正常运行。

3 结 论

综上所述,架空输电线路中出现的极端灾害受到多种因素的影响,因此上面从多个角度出发,建立了相应的风险评估体系层次结构,利用层次分析法构建了风险评估指标的判断矩阵并计算出各层次风险指标的主观权重和客观权重,再利用数据挖掘提取出的输电线路历史数据中的特征确定输电线路的风险等级。在实际应用中,所设计的风评估模型评估效果较好,能够根据输电线路的实际情况针对极端灾害进行分析处理,并制定相应的防护措施,提高输电线路面对极端灾害时的反应能力。所设计的方法还存在些许不足,如在实验测试中仅对单一的输电线路进行评估,导致实验结果具有偶然性,在之后的研究中将采集多个样本进行评估处理。

参考文献

[1] 徐昌前,王东,苏峰,等.基于图像数据耦合识别的输电线路安全风险评估方法[J].计算机科学,2023,50(S1):803-808.

[2] 周恩泽,樊灵孟,黄勇,等.基于火焰燃烧模型的输电线路山火跳闸风险分布评估[J].电网技术,2022,46(7):2778-2785.

[3] 杜平,张小军,许永新,等.基于改进云模型和 Eclat 算法的输电线路极端灾害风险评估[J].现代电力,2021,38(5):483-491.

[4] 宋耐超,王瑞琦,李明明,等.多自然灾害下的架空输电线路运行风险评估[J].电力系统保护与控制,2021,49(19):65-71.

[5] 冯学斌,侯继勇,武健,等.基于环境参量和主成分分析的 OPGW 光缆状态风险评估方法[J].光通信技术,2021,45(10):44-47.

[6] 张兰,王光霞,安利,等.基于改进层次分析法的遥感影像压缩质量评价[J].测绘与空间地理信息,2023,46(4):8-12.

[7] 寇星湖,刘登攀,钱峰,等.基于改进层次分析法的无人机作战效能评估方法研究[J].舰船电子工程,2023,43(2):110-114.

[8] 陈冲,刘星桥,段文勇,等.基于改进层次分析法和模糊综合评价的哺乳母猪环境舒适性评估[J].农业工程技术,2022,42(27):108.

(下转第 75 页)

基于混合神经网络的交直流混联电网 交流线路故障定位

陈伟哲^{1,2}, 宋 弘³, 吴 浩^{1,2}, 宋匡玮^{1,2}, 田海鹏^{1,2}, 漆梓渊^{1,2}

(1. 四川轻化工大学自动化与信息工程学院, 四川 自贡 643000; 2. 人工智能四川省重点实验室, 四川 自贡 643000; 3. 阿坝师范学院, 四川 汶川 624000)

摘要:随着电网交直流混联程度的不断加深,复杂的电网结构导致故障的精确定位愈加困难。针对目前定位方法所存在问题,提出一种基于同步挤压小波变换结合混合神经网络的交直流混联电网交流线路故障定位方法。首先,对交流线路单端电压数据通过同步挤压小波变换处理后,提取其时频矩阵中部分低频区域的能量,构建特征向量;然后,将特征向量构建数据集,并输入至混合神经网络中进行训练与测试,实现故障定位。实验结果表明,所提方法有较高的定位精度与一定的抗噪性能,受不同故障类型与过渡电阻的影响较小。

关键词:交直流混联电网; 交流线路; 同步挤压小波变换; 神经网络; 故障定位

中图分类号: TM 773 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2024)05-0066-10

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20240510

AC Line Fault Location for AC/DC Hybrid Power Grids Based on Hybrid Neural Networks

CHEN Weizhe^{1,2}, SONG Hong³, WU Hao^{1,2}, SONG Kuangwei^{1,2}, TIAN Haipeng^{1,2}, QI Ziyuan^{1,2}

(1. School of Automation and Information Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, Sichuan, China; 2. Artificial Intelligence Key Laboratory of Sichuan Province, Zigong 643000, Sichuan, China; 3. Aba Teachers College, Wenchuan 624000, Sichuan, China)

Abstract: With the increasing degree of mixing of AC/DC power grids, the complex grid structure makes it increasingly difficult to accurately locate the faults. Aiming at the problems of the current location methods, a fault location method for AC line of AC/DC hybrid power grid based on synchrosqueezing wavelet transform (SWT) combined with hybrid neural network is proposed. Firstly, the single-ended voltage data of AC line is processed by SWT, and then the energy of some low-frequency regions in the time-frequency matrix is extracted to construct feature vectors. Finally, the feature vectors are constructed as a data set, which is input to the hybrid neural network for training and testing to realize fault location. The experimental results show that the proposed method has high positioning accuracy and certain anti-noise performance, and is less affected by different fault types and transition resistances.

Key words: AC/DC hybrid power grid; AC line; synchrosqueezing wavelet transform; neural network; fault location

0 引 言

随着大规模分布式能源接入电力网络,针对交

直流混联的复杂电网的故障定位技术面临新的挑战,研究一种快速准确可靠的电网故障定位方法能够加快故障修复速度,快速实现电网自愈,对智能电网的安全稳定运行有非常重要的意义^[1]。

目前,故障定位领域的研究中主要使用行波法及其变种实现对各类线路的故障定位^[2-3],行波法主要分为单端法与双端法。通过计算波头到达终端的时间与波速结合来计算故障距离,但由于该方法

基金项目:四川省科技厅项目(2022YF50518, 2022ZHCG0035);人工智能四川省重点实验室项目(2023RYY06);企业信息化与物联网测控技术四川省高校重点实验室项目(2022WYY04);四川轻化工大学研究生创新基金项目(Y2022122)

需计算行波波速,而行波波速易受到输电线路参数的影响,因此文献[2]提出了一种无须计算波速且不受输电线路垂弧影响的高压交流线路故障定位方法,通过计算连续两次行波波头到达两端的时间差实现故障定位;但该方法未能脱离利用小波分解提取故障波头的思路,且未就方法的抗噪性能进行研究。文献[3]针对T型输电线路提出一种能同时得到故障区域与故障位置的方法,通过建立故障支路判断矩阵确定故障支路后通过小波分解提取行波到达3个测量点的时间差实现故障定位,该方法不受行波波速与过渡电阻的影响,但仍需要通过小波分解提取故障波头。文献[4]针对超高压输电线路单相接地故障定位提出了通过故障点电压电流变化量推导回路方程,将其通过R-L模型转换至时域中;通过连续积分得到故障距离,该方法无须提取故障波头,且能解决相位不一致带来的误差,但仅能实现单相接地故障的故障定位,具有一定的局限性。虽然研究人员们对行波法或传统定位方法进行了多方面的改进,但目前的故障定位方法仍然存在行波波头难以确定,在实际工程中其定位精度易受到噪声干扰的影响等问题。另外,由于交直流混联电网故障线路波形特征是通过多个行波源波形叠加而成,故障特征混叠严重,导致特征提取出现困难,因此需要研究新的故障定位方法。

随着电网自动化程度的提高,各类自动化终端设备与先进的测量装置在交直流混联电网中得到了应用,为深度学习技术应用于复杂电网故障定位中提供了数据基础。而神经网络的回归机制又为利用神经网络实现输电线路的故障定位提供了思路。例如文献[5]通过长短时记忆神经网络(long short-term memory, LSTM)实现大型多机电力系统中的输电线路故障检测、诊断和定位;该方法利用LSTM实现故障诊断后,利用LSTM回归机制实现故障线路的各类故障的定位,但在面对三相接地故障时,其定位误差较大。文献[6]利用小波包能量熵提取故障特征,先通过深度置信网络(deep belief network, DBN)分类模型对各类特征波形划分为4类,再对每一类特征波形单独训练一个DBN回归模型,实现故障定位。文献[7]将卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)与LSTM结合,首先通过最大平均差异(maximum mean discrepancy, MMD)对不同输电线路进行划分,然后利用双端CNN-LSTM结合

Q学习实现不同类型输电线路的故障定位。上述文献都是先通过神经网络对特征进行划分后利用神经网络回归机制实现故障定位,而文献[8]利用S变换提取特征后,直接利用改进1D-CNN-GRU实现故障定位;该方法能够实现高压直流输电线路的各类故障的定位,无须提前进行划分故障类型。文献[9]直接将故障时间序列信号作为输入,利用双向门控递归单元(bi-directional gated recurrent unit, Bi-GRU)结合注意力机制实现故障定位,且受噪声影响较小。但目前还未有研究人员针对交直流混联电网交流线路故障定位进行研究,仅有文献[10]针对交直流混联电网直流系统故障提出了基于麻雀优化CNN-LSTM的故障定位方法,但该方法定位误差较大。

由于目前直流系统并没有充分参与进电力系统潮流和稳定控制中,而电力电子器件过载能力低,导致当单个交流线路发生简单故障时,直流线路容易出现换向失败、直流闭锁或重启等现象^[11],进一步影响交流线路故障波形特征,使得故障特征提取更加困难。因此,下面提出一种基于同步挤压小波变换结合改进CNN-LSTM的交直流混联电网交流线路故障定位方法。首先,利用克拉克变换对故障线路单端电压量解耦后,利用同步挤压小波变换对解耦后的3个分量进行处理后,提取部分能量作为特征,构成特征向量;然后,通过改进CNN-LSTM实现故障定位,并针对网络的改进设计了一种多尺度时间卷积模块替换原始网络单一的输入层,加入一种多重密集连接模块提取更深层次的特征;最后,通过引入Ghost1D模块实现网络轻量化。

1 交直流混联电网故障仿真模型

参考实际工程,在PSCAD/EMTDC中搭建了如图1所示的交直流混联电网故障仿真模型。其中各线路参数如表1所示。为了模拟实际运行中存在多种新能源并网运行的情况,将G1设置为双馈风电机组,以便对风力发电与传统火电并网运行情况进行模拟,直流线路换流器为12脉动晶闸管换流器。

为了验证所提故障定位模型的性能,选择在线路长度为100 km的线路6中设置包括单相接地故障、两相接地故障、两相相间短路故障、三相短路故障在内共10种故障情况,进行故障定位实验。

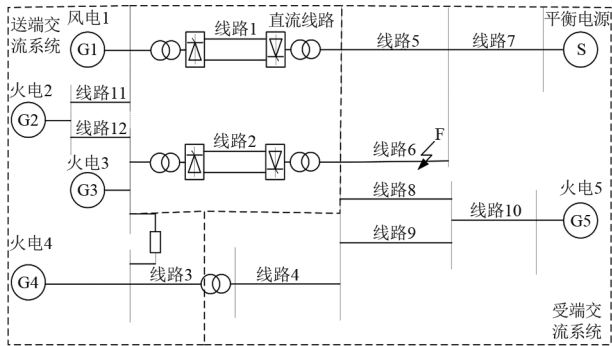


图 1 交直流混联电网拓扑

表 1 交直流混联电网参数

参数名称	参数值
送端交流系统额定电压/kV	345
受端交流系统额定电压/kV	230
交流线路正序负序阻抗/ $(\Omega \cdot \text{m}^{-1})$	7.05×10^{-5}
交流线路正序负序电抗/ $(\Omega \cdot \text{m}^{-1})$	$4.002 \ 3 \times 10^{-4}$
交流线路正序负序容抗/ $(\text{M}\Omega \cdot \text{m})$	$3.701 \ 2 \times 10^2$
交流线路零序电阻/ $(\Omega \cdot \text{m}^{-1})$	32.3×10^{-5}
交流线路零序电抗/ $(\Omega \cdot \text{m}^{-1})$	$1.200 \ 7 \times 10^{-3}$
交流线路零序容抗/ $(\text{M}\Omega \cdot \text{m})$	$5.261 \ 3 \times 10^2$
G2、G3 发电机容量/MVA	2000
G4、G5 发电机容量/MVA	500
额定直流电压/kV	500
额定直流电流/kA	2

2 基于 SWT 的特征提取方法

2.1 同步挤压小波变换原理

同步挤压小波变换 (synchrosqueezing wavelet transform, SWT) 能够实现信号的无损可逆变换, 具有计算速度快、抗噪抗频谱混叠能量较强的优点^[12]。通过 SWT 从复合信号 $f(t)$ 中提取特定频率分量 $f_k(t)$ 的基本流程如下:

1) 选择 Morlet 小波作为母小波函数对 $f(t)$ 进行连续小波变换。

$$W_f(a, b) = \int f(t) a^{-1/2} \tilde{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

式中: $W_f(a, b)$ 为连续小波系数; a 为尺度因子, 对应频率信息; b 为平移因子, 对应时间信息; $\tilde{\psi}(t)$ 为母小波函数。

2) 将 $f(t)$ 划分为不同频率区间。

$$W_l = \left(\frac{\omega_{l-1} + \omega_l}{2}, \frac{\omega_l + \omega_{l+1}}{2} \right) \quad (2)$$

式中: W_l 为连续小波变换计算得到的连续小波系数; ω_l 为第 l 个频率分量的中心频率。

对小波系数进行挤压, 得到同步挤压小波系数 $T_f(a, b)$ 为

$$T_f(a, b) = \sum_{a_i \in [\omega_f - \omega_l, \omega_f + \omega_l]} R_{\psi}^{-1} a_i^{-1.5} W_f(a, b) \Delta a_i \quad (3)$$

式中: $R_{\psi}^{-1} = \int_0^{+\infty} \varphi^*(\xi) \cdot d\xi / \xi$, 即小波函数共轭傅里叶变换的积分形式, φ^* 为小波函数共轭的傅氏变换; $a_i^{-1.5}$ 为尺度归一化因子; $W_f(a, b)$ 为连续小波变换计算得到的连续小波系数; Δa_i 为离散化处理后的尺度步长。

3) 通过对第 k 个频率分量所对应的同步挤压小波变换 $T_f(a, b)$ 进行反变换, 提取特定频率分量 $f_k(t)$ 。

$$f_k(t) = \frac{2}{R_{\psi}} \text{Re} \left[\sum_{l \in \chi_k(t)} T_f(\omega_l, t) \Delta \omega \right] \quad (4)$$

式中: $f_k(t)$ 为第 k 个频率分量在时间 t 上的重构结果; $\text{Re}(\cdot)$ 为取实部; $T_f(\omega_l, t)$ 为同步挤压后的小波系数; $\Delta \omega$ 为频率步长。

SWT 将时间信号转换到时间频率面上, 通过挤压的方式将小波系数限制在中心频率附近, 使得时频能量更加集中, 各频率曲线不存在交叉项, 这使得其能有效避免频率混叠的现象。

2.2 故障信号特征提取方法

故障信号经过同步挤压小波变换后得到时间-频率相关矩阵。该矩阵中每行数据代表同一频率下的信号特征, 每列代表同一时间下的信号特征。但由于同步挤压小波变换后得到的时频矩阵中每个量都为复数, 需先对每个量求其绝对值后进行后续特征提取; 而其时频矩阵中信号的能量在一定程度上能够反映故障距离的特征^[18], 因此定义 SWT 时频矩阵中每个值的绝对值的平方来表征该值包含的能量, 选择提取 SWT 时频矩阵中各点数据的能量, 再对某特定频率分量 $f_k(t)$ 求能量和, 如式(5)所示。

$$E_k = \sum_{at} \left| f_k(k, at) \right|^2 \quad (5)$$

式中: E_k 为时频矩阵中第 k 行的能量和; $\left| f_k(k, at) \right|^2$ 为时频矩阵中第 k 行、时间为 at 处对应的能量。

因此, 信号经同步挤压小波变换后得到的能量序列为 $E = [E_1, E_2, \dots, E_n]$ 。

以图1所示交直流混联电网线路6出现故障为例,线路6总长100 km,设置故障距离为40 km,发生过渡电阻为 $50\ \Omega$ 的A相接地故障,仿真时长为1 s,故障发生时刻为0.8 s,以100 kHz为采样频率,对故障前1 ms和故障后3 ms(400个采样点)的三相电压信号进行特征提取。考虑三相电压信号在发生故障时,各相电压信号会相互耦合,因此首先使用克拉克变换实现三相信号的解耦,通过式(6)求得三相信号的 α 、 β 、0模分量。

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 2 & -1 & -1 \\ 0 & \sqrt{3} & \sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: V_0 、 V_α 、 V_β 分别为解耦后的 α 、 β 、0模分量; V_a 、 V_b 、 V_c 分别为a、b、c三相电压信号。

对解耦后三相信号的 α 、 β 、0模分量分别进行同步挤压小波变换,其中 α 模分量经同步挤压小波变换得到的时频图如图2所示。

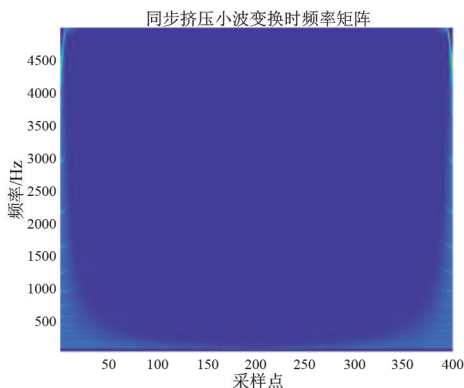
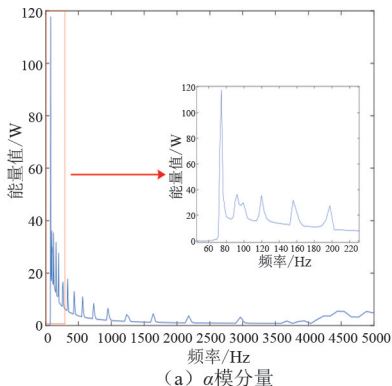


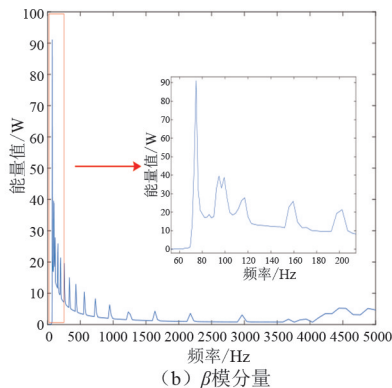
图2 α 模分量同步挤压小波变换时频矩阵

图2所示时频矩阵中包含大量与故障位置相关的信息,通过式(5)对 α 、 β 、0模分量对应的时频矩阵的各个频率下每行分量求取能量和作为能量特征,特征能量和随频率的分布情况如图3所示。

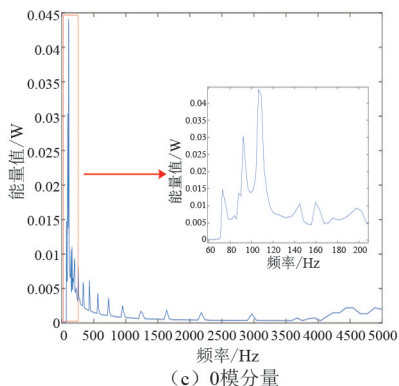
由图3可知,各模态分量经同步挤压小波变换后时频图的能量集中于低频区域,对应时频矩阵的



(a) α 模分量



(b) β 模分量



(c) 0模分量

图3 各模态分量特征能量和频率曲线

41~90行,矩阵行对应频率曲线如图4所示,所选的低频区域的频率区间为64.67~207.20 Hz。

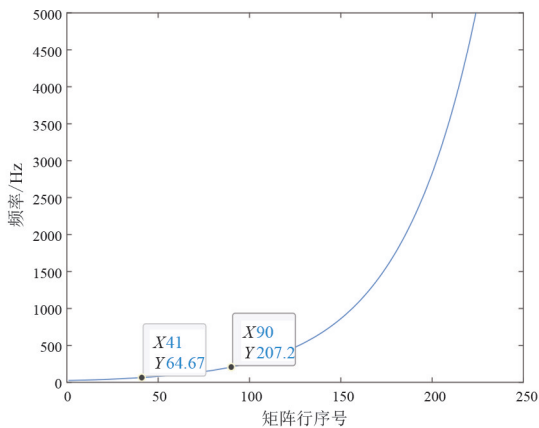


图4 SWT 时频矩阵行对应频率曲线

因此选择该部分能量和来构建特征向量。特征向量构建方式如下:

1)对采集到的单端电压信号通过克拉克变换解耦,得到 α 、 β 、0模分量。

2)取3个分量故障前1 ms和故障后3 ms时间窗的数据,通过同步挤压小波变换后,由式(5)求取其时频矩阵41~90行对应的能量和 E_α 、 E_β 、 E_0 ,其中 $E_\alpha = [E_{\alpha 41}, E_{\alpha 42}, E_{\alpha 43} \cdots E_{\alpha 90}]$, E_β 、 E_0 同理。

3)将 α 、 β 、0模分量对应 E_α 、 E_β 、 E_0 组合,并经过0~1归一化后得到特征向量 $T = [E_0, E_\alpha, E_\beta]$,该特

征向量维度为 150×1 。

以故障位置距离送端 40 km、发生过渡电阻为 50Ω 的 A 相接地故障为例,将单端故障电压信号通过上述步骤求得故障特征向量,其故障特征向量如图 5 所示。

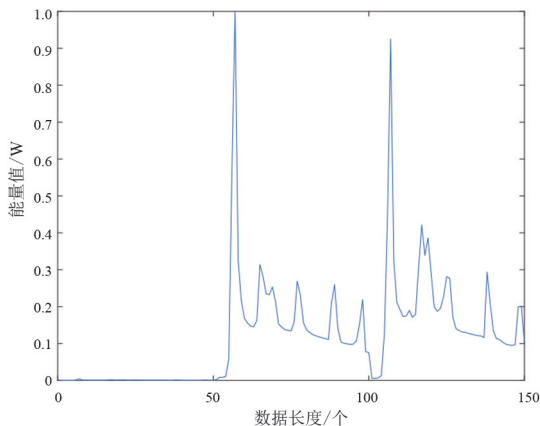


图 5 故障特征向量波形

从图 5 所示故障特征向量波形能够看出故障信号的能量分布特征较为明显。为了验证所提特征向量构建方法能够反映故障距离的变化,以故障距离为 20 km、40 km、60 km、80 km 4 种故障距离发生过渡电阻为 1Ω 的 A 相接地故障为例,展示不同故障距离下的特征向量波形,如图 6 所示。

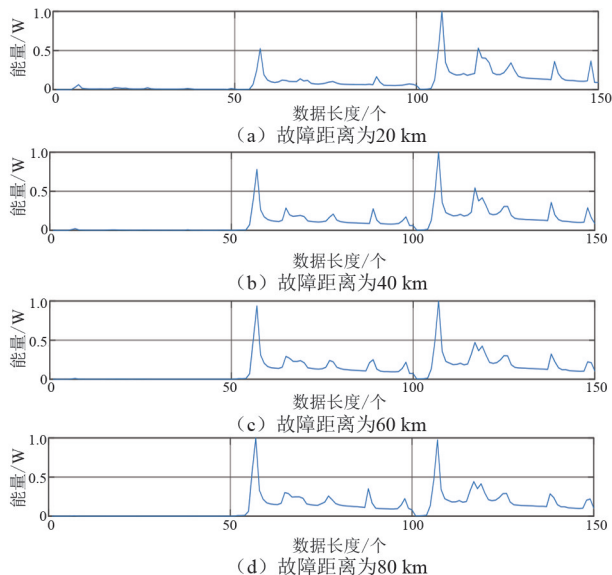


图 6 不同故障距离下特征向量波形

以故障距离为 40 km,发生过渡电阻为 1Ω 、 10Ω 、 50Ω 、 100Ω 、 200Ω 的 A 相接地故障为例,展示不同过渡电阻情况下的特征向量波形,如图 7 所示。

由图 6 可知,随之故障距离的变化,所构建的故障特征向量也随之变化,因此所提特征提取方式能够提取有关故障位置的信息。而由图 7 可知,当过

渡电阻小于等于 200Ω 时,过渡电阻的变化对特征向量的影响很小,因此不同过渡电阻对故障定位精度的影响较小。

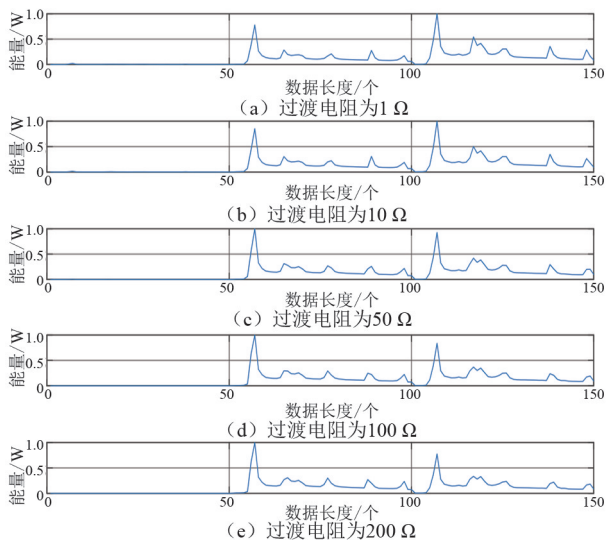


图 7 不同过渡电阻下特征向量波形

3 改进 CNN-LSTM 神经网络故障定位模型

为了提高 CNN-LSTM 定位模型准确度,对 CNN-LSTM 神经网络进行了改进。首先,提出了一种多尺度时间卷积模块作为对网络输入样本的初步特征提取,充分利用了不同时间尺度上的时间信息;然后,提出一种多重密集连接结构,能提取信号更深层次的特征;最后,利用 Ghost 模块实现网络轻量化后,利用 LSTM 回归机制实现对混联电网交流线路的故障定位。

3.1 多尺度时间卷积模块

普通的卷积结构难以充分地提取信号特征信息^[13]。为了充分利用不同时间尺度上的时间信息,使网络输入层提取的初始特征更加丰富,提出了一种多尺度时间卷积模块,如图 8 所示。

首先,使用两个 1×1 卷积将输入特征降维为原来的一半;然后,使用 1×1 、 3×3 、 5×5 的卷积提取左侧支路的时间特征信息,再将多尺度信息利用 concat 操作进行拼接后,由 3×3 的卷积核进一步挖掘深层特征;最后,将两条支路特征进行拼接后作为输出。

3.2 多重密集连接模块

DenseNet 是文献[14]提出的一种密集连接网

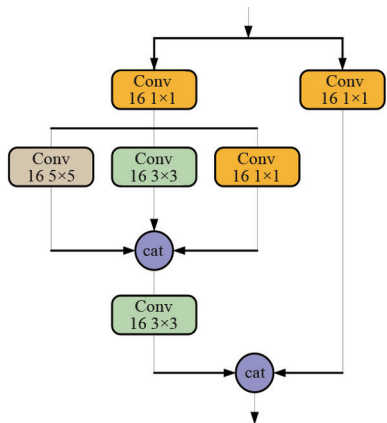


图 8 多尺度时间卷积层

络,通过多个 Dense 模块构成其网络基本结构。而 Dense 模块由多个卷积层利用密集连接构成,每个层都与前面所有层直接相连,密集连接的结构使得信息能够更好地传递和共享,增强了网络的特征表达能力。为了进一步提高 Dense 模块对深层故障距离信息的提取能力,设计了一种多重密集连接模块,通过将 4 个 Dense 模块再次利用密集连接的原理组合起来,以提取更深层次的信息,其结构如图 9 所示。

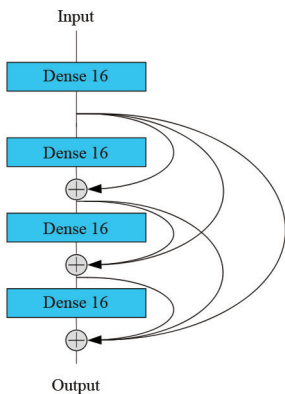


图 9 多重密集连接模块

3.3 Ghost 模块

Ghost 卷积模块是文献[15]于 2019 年提出的一种稀疏卷积层结构模块,通过利用部分传统卷积生成特征图以进一步生成 Ghost 特征图。由于卷积层的输出特征图会包含相似的冗余信息,而 Ghost 模块在去除这些冗余信息的同时,其特征提取能力也不会降低,Ghost 模块结构如图 10 所示。

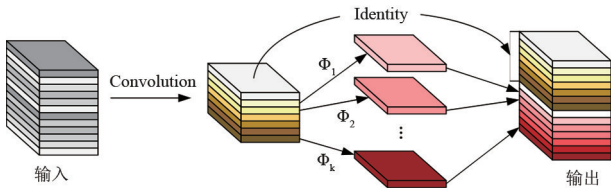


图 10 Ghost 模块结构

首先,通过普通卷积生成 m 个特征图,再通过分组线性运算得到 n 个 Ghost 特征图;最后,将各个特征图拼接起来输出 $m \times n$ 个特征图。传统卷积参数量为 A_1 ,而 Ghost 卷积参数量为 A_2 ,通过式(7)计算可知,Ghost 卷积参数量约为传统卷积计算量的 $1/n$ 。

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{m \cdot n \cdot c \cdot k \cdot k}{m \cdot c \cdot k \cdot k + (n - 1) \cdot m \cdot d \cdot d} \approx \frac{n \cdot c}{n + c - 1} \approx n \quad (7)$$

式中: k 为普通卷积核大小; d 为输入数据的空间维度; c 为输入数据的通道数。

由于原始 Ghost 模块通常运用于提取二维图像特征,使得改进模块中的卷积都是二维普通卷积,而这里所用特征为一维特征,因此需要将 Ghost 模块中的二维卷积替换为一维卷积,保持其他流程不变,以构成能够适用于一维信号的 Ghost 卷积,实现网络轻量化。

3.4 LSTM

LSTM 是循环神经网络(recurrent neural network, RNN)的一种变体,是针对 RNN 训练过程中易出现梯度消失与爆炸的现象所提出的神经网络^[16]。LSTM 网络结构如图 11 所示。

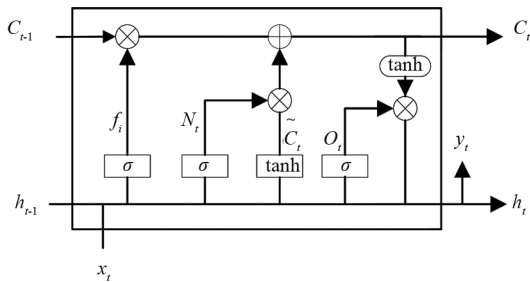


图 11 LSTM 结构

LSTM 主要由 3 个门组成,分别是遗忘门、输入门、输出门。图中: σ 为 sigmoid 激活函数; x_t 为 t 时刻的输入; C_t 为 t 时刻的细胞状态; h_t 为 t 时刻的输出。

3.5 改进 CNN-LSTM 神经网络模型

利用改进卷积神经网络进一步挖掘特征向量的隐性特征后,利用 LSTM 回归模型实现交直流混联电网交流线路的故障定位,并引入 Adam 优化器实现对梯度下降的优化,并利用梯度均值与梯度平方来决定权重的更新迭代。所提的改进 CNN-LSTM

神经网络结构如图 12 所示。

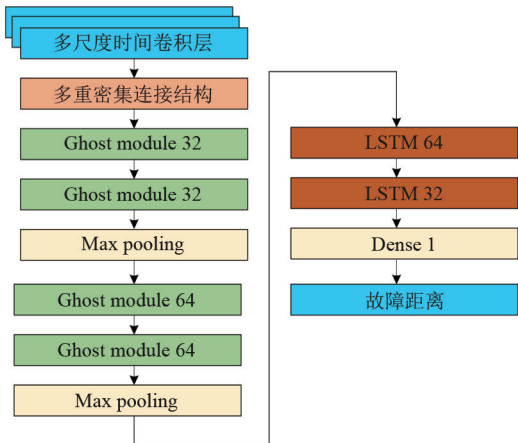


图 12 改进 CNN-LSTM 神经网络结构

4 基于同步挤压小波变换与 CNN-LSTM 的故障定位模型

4.1 故障定位流程

基于同步挤压小波变换与 CNN-LSTM 的故障定位流程如图 13 所示,具体流程如下:

- 1)采集故障线路单端故障三相电压信号。
- 2)利用克拉克变换对故障三相电压解耦,得到故障电压 α 、 β 、0 模分量。
- 3)对故障电压 α 、 β 、0 模分量分别通过同步挤压小波变换并求其时频矩阵某频率区间内的能量和后,组合并归一化至 0~1 区间内得到特征向量。
- 4)对不同故障距离的多种故障情况下的故障电压原始数据通过步骤 1~3 处理后,构建数据集;并以 1 : 9 的比例划分验证集与训练集,将验证集与训练集中未包含的故障情况作为测试集。

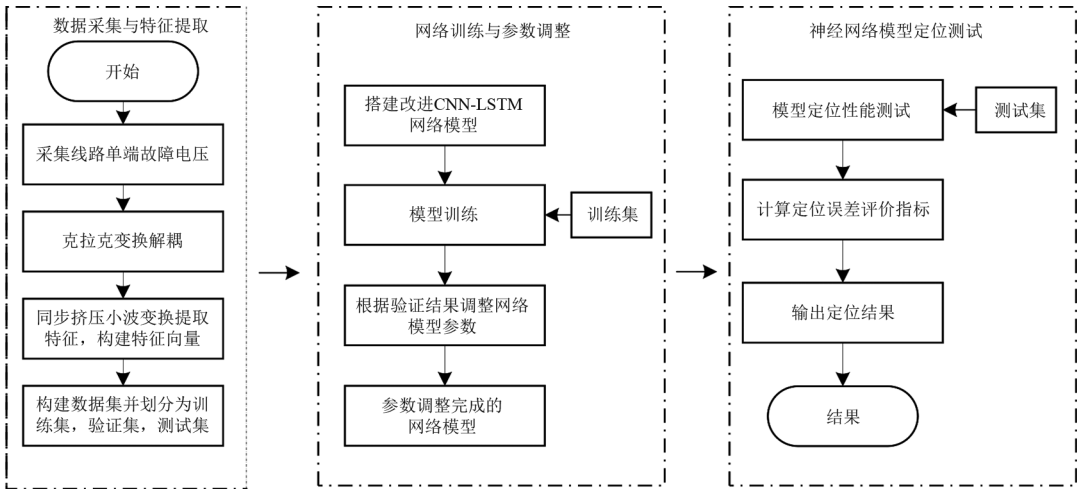


图 13 基于同步挤压小波变换与改进 CNN-LSTM 的故障定位流程

5)改进 CNN-LSTM 神经网络模型训练与验证,利用 LSTM 回归模型实现故障定位,并微调模型参数。

6)利用测试集对训练好的网络进行测试,计算多个评价指标,输出定位结果。

4.2 评价指标

通过神经网络的回归机制实现故障定位,因此需要多个评价指标来评价网络回归效果的优良与否,因此选择决定系数 R^2 来评估模型对数据的拟合程度,其表达式如式(8)所示;选择均方误差 M_{SE} 作为损失函数,其表达式如式(9)所示;选择平均绝对误差 M_{AE} 来评估定位结果的误差值,其表达式如式(10)所示。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2} \tag{8}$$

$$M_{SE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \tag{9}$$

$$M_{AE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}_i| \tag{10}$$

式中: y_i 为实际故障距离; $\hat{y}_i$ 为预测故障距离; $\bar{y}$ 为故障距离的平均值。

5 网络测试与定位实验结果

5.1 网络收敛性验证

依据图 1 所示交直流混联电网进行实验,以线路 6 为故障线路,以 100 kHz 为采样频率,线路 6 长度为 100 km,为了使样本中包含的不同故障距离信息更加丰富,从故障线路首端 3 km 处为起点,以

1 km 为步长,直到 97 km 处截止,设置发生故障类型包括单相接地 (AG, BG, CG)、两相接地故障 (ABG, ACG, BCG)、两相相间短路故障 (AB, AB, BC)、三相短路故障 (ABC),过渡电阻为 1 Ω、10 Ω、50 Ω、100 Ω、200 Ω,共有 4750 组故障样本。

将样本集以 9 : 1 的比例划分为训练集与验证集,通过改进 CNN-LSTM 神经网络进行训练与验证,设置网络训练 epoch 为 200, batchsize 为 32,学习率为 0.000 1。经过 200 次训练后得到如图 14 所示的网络损失曲线图。

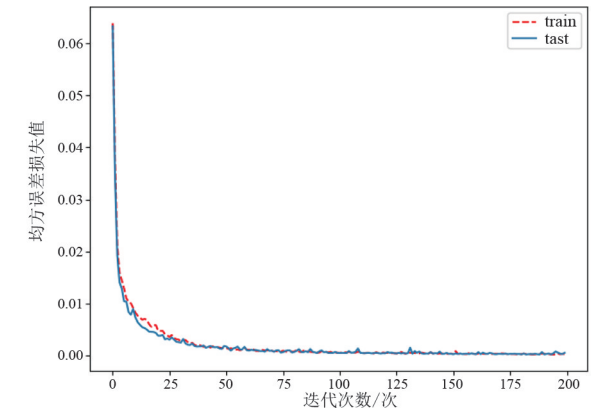


图 14 网络损失曲线

分析图 14 可知,网络训练过程中,训练 40 轮左右网络基本收敛,训练至最终 200 轮时均方误差损失值接近 2×10^{-4} ,因此所提网络具有较好的收敛速度与收敛性。

5.2 故障定位结果与性能分析

5.2.1 故障定位结果

所提网络模型经过 200 次训练后,验证集的决定系数 R^2 为 0.999 1,平均绝对误差为 0.068%,从验证集结果来看网络训练效果较好。

由于验证集中样本是在 4750 组故障样本中随机挑选 10%组成的,剩余 90%为训练集,因此验证集定位结果不能完全表征所提算法定位结果,需要利用不同故障位置发生其他过渡电阻的故障信息对训练好的网络进行定位测试。

测试集中样本组成如下:以故障位置在 10 km、40 km、70 km 处为不同故障距离,对应线路全长的 10%、40%、70%处,每个故障位置发生共 10 种故障,以 20 Ω 与 150 Ω 为过渡电阻,一共 60 组故障样本。将测试集输入至训练好的网络中进行测试,得到的测试集的定位结果如图 15 所示,测试集定位结果与实际故障位置的平均绝对误差为 0.235%,即平

均定位误差为 235 m,具有较高的定位精度。

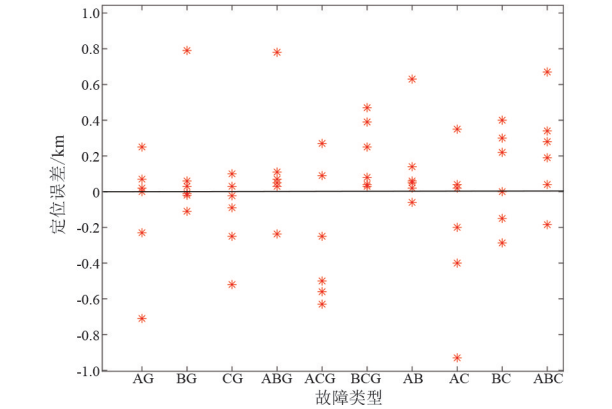


图 15 测试集定位结果

图 15 中展示了不同故障类型下的测试集定位结果,其中最大误差出现于 AC 相间短路故障中的一个样本,定位误差达到 0.903 km,小于 1 km,因此所提算法能够有效定位交流线路的多种故障情况,无须提前对故障类型进行划分,且受过渡电阻干扰较小。

5.2.2 定位模型抗噪性能分析

考虑到实际电网运行中存在噪声干扰的影响,因此验证算法的抗噪能力尤为重要^[17]。电网故障信息在通过同步相量测量装置传输到调度室的过程中,很容易受到周边电子设备的噪声干扰,这类噪声通常呈正态分布,与高斯白噪声相似,因此选择在测试样本原始数据中添加信噪比为 35 ~ 50 dB 的高斯白噪声,以模拟实际情况下的噪声干扰现象。所提算法在不同噪声干扰下的定位结果如表 2 所示。

表 2 网络在不同噪声干扰的定位结果		
附加噪声信噪比/dB	模型定位平均绝对误差/%	模型最大定位误差/%
50	0.156	0.747
45	0.135	0.780
40	0.305	0.807
35	2.492	7.362

分析表 2 定位结果可知,所提定位算法在附加噪声信噪比高于 40 dB 时具有较高的定位准确率,定位平均误差均小于 0.305%,对应故障定位平均误差小于 305 m,且最大定位误差小于 1 km,但在面对噪声干扰较大时(低于 40 dB),定位误差较大,因此该算法具有一定的抗噪性,达到 40 dB。

5.2.3 不同模型定位结果分析

将所提的改进 CNN-LSTM 故障定位与其他定

位模型进行对比,对比网络模型包括支持向量机 (support vector machine, SVM)、径向基神经网络 (radial basis function neural network, RBF)、RNN、CNN、Tansformer 与 CNN-GRU 神经网络模型。采用相同的训练集与验证集对网络进行训练与验证,并通过无噪声情况下的相同测试集进行测试,以验证集定位结果的平均绝对误差与测试集定位结果的平均绝对误差为评价指标,得到不同网络验证集定位结果与测试集定位结果如表 3 与图 14 所示。

表 3 不同神经网络模型定位结果对比表

网络模型	验证集平均绝对误差/%	测试集平均绝对误差/%
SVM	0.944	1.347
RBF	0.586	0.987
RNN	1.707	2.349
CNN	0.276	0.861
Tansformer	0.092	0.459
CNN-GRU	0.087	0.654
所提网络模型	0.068	0.235

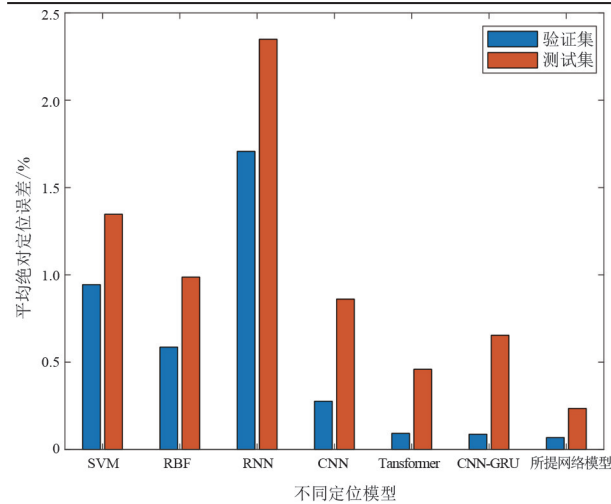


图 16 不同神经网络模型定位结果对比

分析表 3 和图 16 可知,所提的交直流混联电网交流线路故障定位模型在 7 种故障定位模型中有最高的定位精度。其中 Transformer 与 CNN-GRU 尽管在验证集的平均绝对误差较小,但在利用测试集进行测试的过程中会出现较大的误差,而所提网络模型无论是在验证集与测试集均有最好的定位精度。

6 结 论

针对交直流混联电网交流线路故障易受直流线路复合故障的影响,导致定位困难的问题,

上面提出一种基于同步挤压小波变换结合改进 CNN-LSTM 的混联电网交流线路故障定位方法,该模型具有较好的收敛速度,对故障距离的拟合程度达到 99.91%,测试集定位结果平均绝对误差为 0.235%,得出了以下结论:

1)所提算法具有一定的抗噪性,达到 40 dB,可考虑在数据预处理中添加去噪算法进行处理,提高抗噪性能。

2)所提算法在面对混联电网交流线路发生不同过渡电阻、不同类型的故障,能够实现较为精确的故障定位,其定位精度受过渡电阻与故障类型的影响较小。

3)相较于传统智能定位方法中的浅层神经网络与目前常用于回归预测的部分深度神经网络,所提改进 CNN-LSTM 具有更好的定位精度。但由于所提方法需要进行神经网络训练,因此对故障信号的要求较高,且由于实际电网故障数据难以获得,需要搭建符合实际电网参数的电网仿真模型以获取大量故障样本数据。当定位对象发生变化时,同样需要通过建模来获取故障数据,并通过网络训练与测试实现故障定位。因此所提方法的精确性与适用性在一定程度上受到不同电网结构的影响。

4)所提算法无须提取故障波头即可实现故障定位,避免了由于线路参数与其他干扰造成的故障波头难以提取的问题。

参考文献

[1] 李泽文,曾祥君,夏翊翔,等.高压交流输电线路故障行波定位技术综述[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2022,19(3):104-121.

[2] 余泽轩,帕孜来·马合木提.基于改进双端法的高压交流输电线路故障定位[J].光电子·激光,2021,32(10):1099-1104.

[3] 崔超奇,王占山,杨东升,等.一种不受波速影响的 T 型输电线路故障定位方法[J].电测与仪表,2017,54(18):15-21.

[4] 李跃,郑涛,文安.基于单端量的超高压交流输电线路单相接地故障测距方法研究[J].电力系统保护与控制,2020,48(6):27-33.

[5] BELAGOUNE S,BALI N,BAKDI A,et al.Deep learning through LSTM classification and regression for transmission

line fault detection, diagnosis and location in large-scale multi-machine power systems [J]. Measurement, 2021, 177:109330.

[6] 叶鑫杰,兰生,肖思捷,等.基于小波包能量熵和 DBN 的 MMC-HVDC 输电线路单极接地故障定位方法[J].南方电网技术,2021,15(2):82-91.

[7] WANG X H, ZHOU P, PENG X G, et al. Fault location of transmission line based on CNN-LSTM double-ended combined model[J].Energy Reports,2022,8(S5):781-791.

[8] 杨玉萍,吴浩,田海鹏等.高压直流输电线路单端智能故障定位方法[J].电力系统及其自动化学报,2023,35(9):120-129.

[9] ZHANG F, LIU Q Y, LIU Y L, et al.Novel fault location method for power systems based on attention mechanism and double structure GRU neural network [J]. IEEE Access,2020,8:75237-75248.

[10] 张晓炜. 基于深度学习的混合直流系统故障诊断方法研究[D].北京:北京交通大学,2022.

[11] 董新洲,汤涌,卜广全,等.大型交直流混联电网安全运行面临的问题与挑战[J].中国电机工程学报,2019,39(11):3107-3119.

[12] 段建东,李浩,雷阳,等.利用同步挤压小波变换的高压交直流混联系统交流线路暂态方向保护[J].中国电机工程学报,2019,39(13):3833-3842.

[13] 卞景艺,刘秀丽,徐小力,等.基于多尺度深度卷积

(上接第 65 页)

[9] 陈祉如,郭亮,杜艳,等.基于改进层次分析法的电能计量系统综合评价[J].山东大学学报(工学版),2022,52(6):167-175.

[10] 云玉新,赵富强,张磊,等.结合相关系数及改进层次分析法的油浸式变压器质量评估[J].重庆理工大学学报(自然科学),2022,36(5):203-210.

[11] 沙金,郑斯斯.基于改进层次分析法的工程教育认证课程毕业要求达成度评价[J].大众科技,2022,24(2):129-132.

[12] 熊文祥,陈永刚.基于集对可拓和改进层次分析法的铁路通信系统安全评估[J].计算机系统应用,2022,31(2):285-290.

[13] 孟建佛,王双银,张静怡,等.基于改进层次分析法的小水电生态环境影响评价[J].水利与建筑工程学报,2022,20(1):103-107.

[14] 李银久,李秋华,焦树林.基于改进层次分析法、CRITIC 法与复合模糊物元 VIKOR 模型的河流健康评价[J].

神经网络的故障诊断方法[J].振动与冲击,2021,40(18):204-211.

[14] LANDOLA F, MOSKEWICZ M, KARAYEV S, et al. Densenet: Implementing efficient convnet descriptor pyramids[R/OL].[2023-05-09].DOI:10.48550/arXiv.1404.1869.

[15] HAN Kai,WANG Yunhe,TIAN Qi, et al. GhostNet: more features from cheap operations [C]//IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR),June 13-19,2020,Seattle,USA. IEEE,2020:1577-1586.

[16] GREFF K, SRIVASTAVA R K, KOUTNIK J, et al. LSTM: a search space odyssey[J]. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 2017, 28(10):2222-2232.

[17] 邵庆祝,谢民,王同文,等.基于深度随机配置网络的电网故障诊断方法[J].控制工程,2022,29(12):2213-2220.

作者简介:

陈伟哲(1999),男,硕士研究生,研究方向为交直流混联电网故障诊断;

宋 弘(1973),男,硕士,教授,研究方向为电力系统故障诊断;

吴 浩(1980),男,博士,教授,研究方向为电力系统保护与控制。

(收稿日期:2023-11-07)

生态学杂志,2022,41(4):822-832.

[15] 王晓天,张英华,秦挺鑫,等.基于熵值法改进层次分析法马拉松急救能力评价模型的构建[J].中国安全生产科学技术,2021,17(9):169-174.

[16] 周恩泽,黄勇,向淳,等.基于物元可拓的输电线路山火风险评估模型[J].南方电网技术,2022,16(1):145-154.

作者简介:

周 林(1971),男,高级工程师,从事输变电工程技术管理工作;

彭宇辉(1972),男,高级工程师,从事输变电工程建设和运行管理工作;

刘 晔(1989),女,高级工程师,从事输变电信息化项目建设管理和运行维护工作;

任成君(1987),男,高级工程师,从事输变电设备技术管理工作;

孙文成(1985),男,高级工程师,从事输变电工程建设和运行管理工作。

(收稿日期:2023-11-03)

电缆终端搪铅涡流检测信号小波去噪参数选择方法

唐 军¹, 邵千秋², 任 亮¹, 陈 莉¹, 张 睿¹, 王然然¹, 邓 瑞¹, 冯 伟¹

(1. 国网四川省电力公司南充供电公司, 四川 南充 637000;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

摘要: 电缆终端搪铅质量直接影响高压电缆的安全稳定运行, 有必要对其进行脉冲涡流无损检测, 以排查是否存在缺陷。在实际检测时, 涡流检测信号容易受到白噪声干扰, 小波去噪是一种有效的白噪声滤除手段。然而, 以往的研究通常根据经验选取小波参数, 忽略了参数变化对涡流检测信号实际去噪效果的影响。因此, 提出了基于粒子群优化算法的电缆终端搪铅涡流检测信号小波去噪参数选择方法, 以归一化相关系数作为适应度函数, 通过量化去噪涡流检测信号在峰值附近的失真程度, 获得了最优小波去噪参数为 Sym25 小波基、10 层分解层数和中位数阈值函数, 保证了降噪涡流检测信号峰值大小与峰值时间的相对误差小于 3%。研究成果可为确定不同噪声干扰下的涡流检测信号小波去噪参数自动选择提供方法参考。

关键词: 电缆终端; 搪铅; 涡流检测; 小波去噪; 粒子群优化算法

中图分类号: TM 726.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2024)05-0076-04

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20240511

Wavelet Denoising Parameter Selection Method for Eddy Current Detection Signals of Lead Sealings of Cable Terminal

TANG Jun¹, SHAO Qianqiu², REN Liang¹, CHEN Li¹, ZHANG Rui¹, WANG Ranran¹,
DENG Rui¹, FENG Wei¹

(1. State Grid Nanchong Electric Power Supply Company, Nanchong 637000, Sichuan, China;

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

Abstract: The quality of lead sealings of cable terminal has a direct impact on safe and stable operation of high-voltage cables, so it is necessary to carry out the pulse eddy current non-destructive testing to avoid the defects. But the eddy current detection signals can be impacted by noise in actual engineering, and wavelet denoising is an effective measure to filter out the white noise. However, the previous researches on wavelet denoising have typically selected wavelet parameters based on experiences, ignoring the impact of parameter variations on actual denoising effect. Hence, a wavelet denoising parameter selection method for eddy current detection signals is proposed based on particle swarm optimization algorithm, which adopts an evaluation index called normalized correlation coefficient (NCC) as fitness function. Through quantifying distortion degree of denoising eddy current detection signals near the peak, the optimal wavelet denoising parameters are obtained, that is, Sym25 wavelet, ten-layer decomposition layer and median threshold function, which makes the relative error between peak value of eddy current detection signals after denoising and peak time be less than 3%. The research results can provide a method reference for automatically determining the optimal wavelet denoising parameters for eddy current detection signals under different noise interference.

Key words: cable termination; lead sealing; eddy current detection; wavelet denoising; particle swarm optimization algorithm

0 引言

高压电缆终端搪铅具有密封防水作用,并保证电缆金属外护层良好接地^[1],一旦在外力作用下形成缺陷,容易导致电缆终端进气、进水等,严重时会造成绝缘击穿、爆炸等恶性停电事故。2017年和2019年,浙江电网110 kV及220 kV高压电缆曾多次发生因搪铅开裂导致的故障跳闸事故,严重影响了电力负荷的安全稳定传输^[2]。因此,为提高电缆搪铅质量状态管理水平并降低搪铅缺陷造成断电的事故率,有必要对电缆搪铅开展无损检测与评估。

目前,具有高灵敏度和非接触式优势的脉冲涡流检测技术已被证明能有效检测搪铅开裂缺陷^[3-4]。但是,在现场检测过程中,脉冲涡流检测电压信号会混入检测装置固有噪声和检测环境噪声,这些噪声将会叠加到真实脉冲涡流检测电压信号中,难以准确提取出涡流检测信号最大峰值特征,导致缺陷检测的可靠性较低。

小波去噪算法的出现为抑制固有噪声、环境噪声等白噪声提供了一种有效方法^[5],它需根据以下两个基本原则对小波去噪参数进行选择:1)去噪后信号的信噪比高;2)去噪后信号的畸变小^[6]。小波去噪参数包括小波基、分解层数和阈值函数。然而,除去一些支撑长度过长不利于实际使用的小波基外,仍有112个小波基能够用于涡流检测信号去噪;单个周期信号采样点数为2000的前提下,最大的分解层数为10层;此外,还有4种不同类型的阈值函数:平均阈值、中位数阈值、硬阈值和软阈值。这些小波去噪参数的不同组合情况可多达4000多种,采样传统枚举法对每种组合情况进行讨论不符合工程实际要求^[7-8]。

因此,下面提出了基于粒子群优化算法的涡流检测信号小波去噪参数选择方法。该方法分别利用信噪比、均方根误差、相对平滑度和归一化相关系数作为适应度函数,通过量化去噪涡流检测信号与原始涡流检测信号在峰值附近的相似程度,获得了最优小波去噪参数,以期为确定不同情况下涡流检测信号小波去噪参数的自动选择提供方法参考。

1 基于粒子群优化算法的涡流检测信号小波去噪参数选择方法

1.1 粒子群优化算法

粒子群优化算法是一种基于群体合作的随机搜索算法,算法的实现原理如图1所示。当前迭代中粒子的速度和位置可表示^[9]为

$$V_{i+1} = \omega V_i + c_1 \cdot \text{rand} \cdot (p_{\text{best}_i} - S_i) + c_2 \cdot \text{rand} \cdot (g_{\text{best}_i} - S_i) \quad (1)$$

$$S_{i+1} = S_i + V_{i+1} \quad (2)$$

式中: ω 为权重系数,取值0.8; p_{best_i} 与 g_{best_i} 分别为第*i*次迭代中粒子个体最优适应度函数值与种群最优适应度函数值; c_1 与 c_2 为学习因子,均值均为2; rand 为0~1的随机函数; V_i 为第*i*次迭代中目标粒子的速度; V_{i+1} 为第*i+1*次迭代中目标粒子的速度; S_i 为第*i*次迭代中目标粒子的位置; S_{i+1} 为经过向上整取后的第*i+1*次迭代中目标粒子的位置。

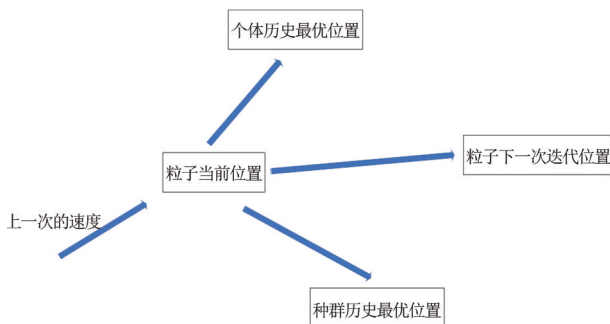


图1 粒子寻优

由于粒子群优化算法目的是得到针对含白噪声涡流检测信号的最优小波去噪参数,从而得到理想的去噪涡流检测信号。因此,选择使用评估信号质量的指标,即分别将信噪比(signal noise ratio, SNR)、均方根误差(root mean squared error, RMSE)、相对平滑度*r*和归一化相关系数(normalized cross correlation, NCC)作为粒子群优化算法的适应度函数,这4个指标分别表示^[10]为

$$S_{\text{NR}} = 10 \lg \frac{P_s}{P_n} \quad (3)$$

$$R_{\text{MSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^n (Y_k - X_k)^2}{n}} \quad (4)$$

$$r = \frac{\sum_{k=1}^{n-1} (X_{k+1} - X_k)^2}{\sum_{k=1}^{n-1} (Y_{k+1} - Y_k)^2} \quad (5)$$

$$N_{cc} = \frac{\sum_{k=1}^n Y_k \cdot X_k}{\sqrt{(\sum_{k=1}^n Y_k^2)(\sum_{k=1}^n X_k^2)}} \quad (6)$$

式中: P_s 和 P_n 分别为信号和噪声的功率; Y_k 为第 k 个信号采样点去噪后的信号; X_k 为第 k 个信号采样点原始带噪信号。

1.2 小波去噪参数选择方法

小波去噪参数选择的具体过程如图 2 所示, 步骤如下:

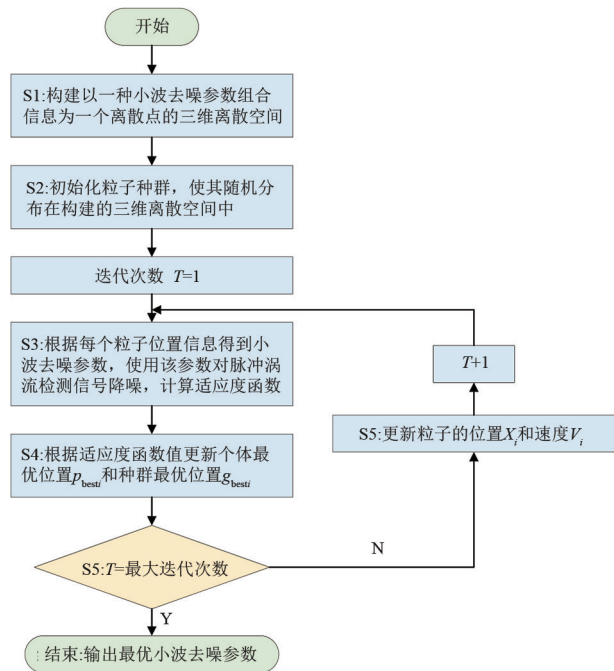


图 2 去噪参数寻优流程

1) 小波去噪参数包括小波基类型、层数和阈值函数, 需对上述 3 个参数进行数字编码使其能够被用于粒子群优化算法, 112 个小波基类型、10 种分解层数和 4 类阈值函数分别编码为 $[1, 2, 3 \cdots 112]$ 、 $[1, 2, 3 \cdots 10]$ 和 $[1, 2, 3, 4]$; 创建包含 4480 个离散点的三维离散空间。

2) 将种群数目初始化为 100, 并使其随机分布在步骤 1 创建的三维离散空间中。

3) 根据每个粒子的位置信息得到对应的小波去噪参数, 再使用该参数对含噪涡流检测信号降噪, 并计算具体的适应度函数。

4) 根据适应度函数值更新个体和种群的最优位置, 即若当前的适应度函数值优于粒子个体适应度函数值的历史最优值, 则更新粒子个体最优适应度函数值 p_{best_i} ; 若当前的适应度函数值优于种群适应度函数值的历史最优值, 则更新种群最优适应度函数值 g_{best_i} 。

5) 判断迭代是否完成: 如果当前迭代次数未达到最大迭代次数 (设置为 30 次), 则根据式 (1) — 式 (2) 更新粒子个体的速度和位置, 再重复步骤 3 和步骤 4, 值得注意的是, 由于在进行数字编码后, 每个粒子的输入参数是离散的, 因此, 在确定当前粒子的位置后, 应该再对粒子对应的位置进行向上取整处理; 如果当前迭代次数达到最大迭代次数, 则停止迭代, 输出最优小波去噪参数和利用所述最优小波去噪参数去噪后的涡流检测信号。

2 粒子群优化算法寻优和去噪结果分析

2.1 粒子群优化算法寻优结果

通过实验得到的原始脉冲涡流检测信号如图 3(a) 所示, 但由于现场检测工况中外界干扰较实验室环境更强, 因此在其基础上通过人为加白噪声的方式得到信噪比为 10 dB 的带噪脉冲涡流检测信号, 将其作为研究对象, 如图 3(b) 所示。加噪的模型可表示为

$$x(t) = x^*(t) + e(t)$$

式中: $x^*(t)$ 为实验信号; $e(t)$ 为噪声。值得注意的是, 虽然在一定的工作环境, 噪声的能量是额定的, 但是在细节上却有所区别。因此为了增加优化结果的适用性, 每次均在图 3(a) 中原始涡流检测信号的基础上加入不同的功率噪声进行寻优。

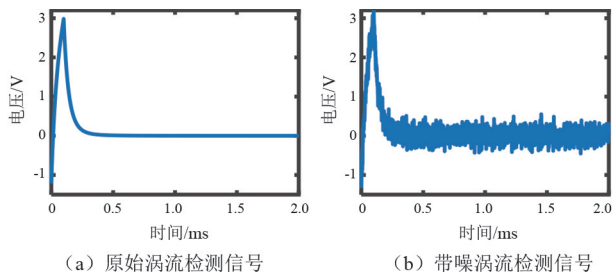


图 3 涡流检测信号

粒子群优化算法收敛的结果如图 4 所示, 以不同的信号评估指标作为适应度函数进行寻优, 在 30 次迭代后均能较好地收敛。同时, 将寻优的最佳适应度与对应的小波去噪参数列于表 1。

2.2 去噪效果分析

为了进一步分析表 1 每组参数的去噪效果, 使用去噪参数对带噪的脉冲涡流检测信号进行小波去噪, 去噪后的涡流检测信号如图 5 所示。可以看出,

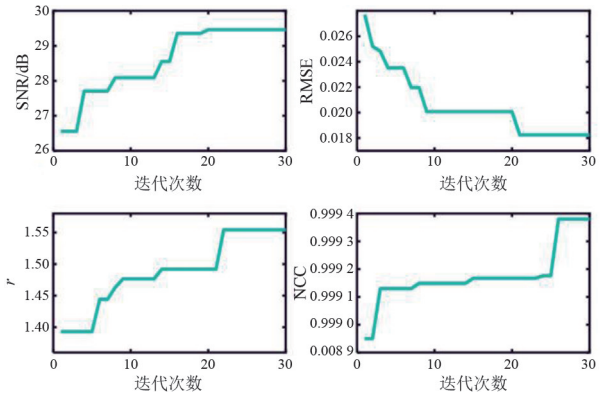


图 4 粒子群优化算法寻优收敛

表 1 粒子群优化算法寻优结果

参数	SNR	RMSE	r	NCC
最优值	29.463 dB	0.018	1.554	0.999
小波基	Bior4.4	Sym11	Bior1.5	Sym25
分解层数	9	8	7	10
阈值函数	中位数	中位数	软阈值	中位数

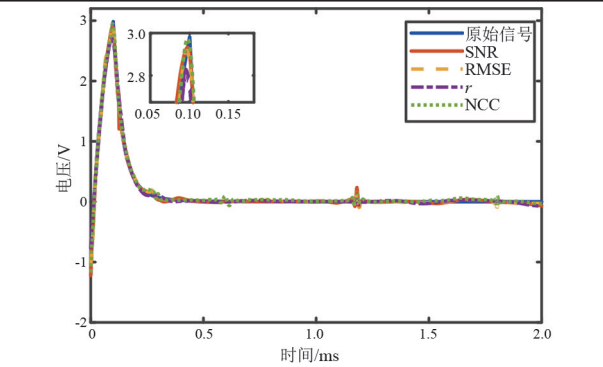


图 5 采用不同适应度函数时的去噪涡流检测信号

采用不同适应度函数时均能滤除大部分噪声,相对于原始脉冲涡流检测信号仅在局部有细微的失真和抖动。分别采用 SNR、RMSE、 r 和 NCC 作为适应度函数时,去噪涡流检测信号的信噪比分别为 21.2 dB、22.8 dB、20.6 dB 和 23.3 dB,与带噪脉冲涡流检测信号的 10 dB 信噪比相比,去噪脉冲涡流检测信号的信噪比显著提高。

由于不同的适应度函数所体现的数学意义不同,因此得到的去噪涡流检测信号在细节上也有所区别。因此,根据一定的标准来判断去噪涡流检测信号的优劣是有必要的。涡流检测信号在峰值附近所包含的信息较多,故根据降噪涡流检测信号在峰值附近的失真程度评估去噪质量。将去噪涡流检测信号与原始涡流检测信号作差,得到残差信号以更直观地反映信号降噪后的失真程度,并将峰值点对应的位置用红线标记,如图 6 所示。

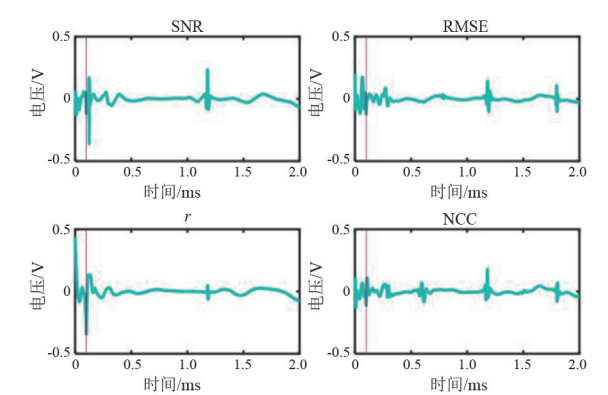


图 6 采用不同适应度函数时的涡流检测信号残差

从图 6 可以看出,使用 SNR、RMSE 和 r 作为适应度函数时,去噪涡流检测信号与原始涡流检测信号总体上匹配较好,但在峰值处存在明显的失真;SNR 和 r 作为适应度函数时的峰值大小最大失真度分别为 5.87% 和 10.19%,RMSE 作为适应度函数时的峰值时间最大失真度为 5.94%。而使用 NCC 作为适应度函数时,去噪涡流检测信号仅在后半部分有波动,其余高信息密度部分的失真程度均在可接受范围内;较使用其他指标作为适应度函数时,去噪涡流检测信号的平滑程度相对更优,峰值失真程度相对更小。

同时,为了增加研究结果的普适性,通过人为加噪的方式得到另外三组不同的带噪涡流检测信号并重复上述去噪过程,去噪涡流检测信号的峰值大小相对误差和峰值时间相对误差见表 2。可以看出,以 NCC 作为适应度函数时,去噪涡流检测信号峰值大小和峰值时间的相对误差最小,最大相对误差小于 3%。因此,在以峰值失真程度为判断标准的情况下,由 NCC 作为适应度函数可得到最优去噪涡流检测信号,对应的最佳小波去噪参数分别为 Sym25 小波基、10 层分解层数、中位数阈值函数。

表 2 采用不同适应度函数时的去噪信号

		峰值失真程度				单位: %
组别	相对误差	SNR	RMSE	r	NCC	
1	峰值大小	-4.75	-4.06	-9.22	-2.95	
	峰值时间	-2.97	-5.94	-7.92	-2.97	
2	峰值大小	-5.87	-2.14	-10.19	-2.49	
	峰值时间	-2.97	-3.96	-9.90	-2.96	
3	峰值大小	-4.26	-2.97	-9.09	-2.39	
	峰值时间	-2.98	-3.96	-6.94	-2.97	

送端换流母线电压上升影响受端换相的机理及抑制措施

马 星^{1,2}, 尹纯亚³, 王利超^{1,2}, 马 健^{1,2}, 槽伟红^{1,2}, 段 玉^{1,2}

(1. 国网新疆电力有限公司电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011;

2. 新疆电力系统全过程仿真重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830011;

3. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830017)

摘要:为避免由送端换流母线电压上升引起逆变器关断角减小导致换相失败,分别从电气量变化特性和无功交换特性研究了其发生机理。基于推导建立的关断角表达式,分析发现送端换流母线电压上升会引起直流电流增大从而导致关断角减小;同时直流电流的增大会引起逆变器无功消耗增加,导致受端换流母线电压跌落,进一步导致关断角减小,诱发换相失败。因此,提出了一种通过改进送端控制器以抑制换相失败的措施。该措施在送端换流母线电压上升时增大整流器触发角以抑制直流电流的上升,同时增大整流器无功消耗从而减缓送端换流母线电压的上升。基于PSCAD/EMTDC电磁暂态仿真平台,利用CIGRE HVDC标准测试模型仿真验证了理论分析的正确性和抑制措施的有效性。

关键词:换相失败; 换流母线电压; 直流电流; 无功功率; 高压直流输电

中图分类号: TM 721 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2024)05-0080-06

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20240512

Mechanism and Suppression Measures for Receiving-end Commutation Affected by Voltage Rise of Sending-end Converter Bus

MA Xing^{1,2}, YIN Chunya³, WANG Lichao^{1,2}, MA Jian^{1,2}, ZAO Weihong^{1,2}, DUAN Yu^{1,2}

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830011,

Xinjiang, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Whole Process Simulation for Power System,

Urumqi 830011, Xinjiang, China; 3. School of Electrical Engineering,

Xinjiang University, Urumqi 830017, Xinjiang, China)

Abstract: In order to avoid the commutation failure due to the decrease of extinction angle of inverter caused by voltage rise of converter bus at sending end, the occurrence mechanism is studied from the variation characteristics of electrical quantity and the exchange characteristics of reactive power respectively. Based on the derived expression of extinction angle, it is found that the voltage rise of converter bus at sending end will increase DC current, which will lead to the decrease of extinction angle. At the same time, the increase of DC current will lead to the increase of reactive power consumption of inverter, resulting in voltage drop of converter bus at receiving end, further leading to the decrease of extinction angle and inducing commutation failure. Therefore, a measure to suppress commutation failure by improving controller at sending end is proposed. This measure increases the trigger angle of rectifier when the voltage of converter bus rises at sending end to suppress the rise of DC current and increases the reactive power consumption of rectifier, so as to slow down the voltage rise of converter bus at sending end. Based on PSCAD/EMTDC electromagnetic transient simulation platform, CIGRE HVDC benchmark model is used to verify the correctness of theoretical analysis and the effectiveness of suppression measures.

Key words: commutation failure; conerter bus voltage; DC current; reactive power; high voltage direct current transmission

0 引言

中国地域辽阔,资源丰富,但能源与负荷在地理分布上呈现不均衡特点^[1]。高压直流输电系统因其远距离输电经济性好、易调节的特点得到重点关注和广泛应用^[2-5]。但直流输电系统的逆变器采用半控型器件晶闸管换流,逆变侧易发生换相失败^[6-8]。

受端换流母线电压跌落、直流电流上升是导致换相失败的主要原因^[9-11]。文献[12]分析了受端交流非对称故障对换相的影响,指出非对称故障不仅会导致换流母线电压跌落还会引起电压过零点前移,使得换相条件更为恶劣。文献[13]针对受端交流非对称故障推导建立了考虑直流电流变化的仅含电压变化率的关断角表达式,分析发现考虑直流电流变化后的临界电压降更为严峻。文献[14]研究了直流线路中平波电抗器及对地电容等储能元件在受端交流系统发生对称故障时的充放电效应,继而分析了其对直流电流的影响,指出故障后直流电流的变化速率与线路中平波电抗器的大小负相关。上述研究都是基于受端交流故障展开,未考虑送端换流母线电压的变化。文献[15]研究了送端换流母线电压恢复对逆变器换相的影响,推导建立了直流控制系统随送端换流母线电压跌落采用不同控制方式时的关断角表达式,分析发现送端换流母线电压恢复会导致关断角减小,严重时会发生换相失败。但其未考虑送端换流母线电压上升对逆变器换相的影响。随着高压直流输电技术的发展和运用,直流送端落点日趋密集,故障导致多条直流间交互特性也更为复杂。文献[16]指出多馈出直流系统中,若某回直流线路闭锁,会导致送端暂态压升从而与之存在耦合关系的其他直流线路。但其未深入研究送端换流母线电压上升对逆变器换相的影响,也未提出有效的改善措施。

因此,下面分别从电气量变化特性和无功交换特性着手研究送端换流母线电压上升对逆变器关断角的影响,以及整流器触发角与逆变器关断角、送端换流母线电压的关系,并基于此提出有效的改善措施;最后基于PSCAD/EMTDC电磁暂态仿真平台利用CIGRE HVDC标准测试模型进行仿真验证。

1 电压上升导致换相失败的机理

1.1 换相失败的影响因素

换相过程中,在反向电压作用期间本应退出导通的阀未能完全恢复阻断能力或换相过程始终未能结束,使本该关断的阀在正向电压作用下重新导通,就会发生换相失败^[17]。晶闸管在反向电压的作用下恢复其阻断能力的过程可用临界关断角 $\gamma_{\min}$ 表示,若关断角 $\gamma < \gamma_{\min}$,则逆变器发生换相失败^[18]。 γ 表达式^[19]为

$$\gamma = \arccos\left(\frac{\sqrt{2}T_1 I_d X_{Cl}}{NU_{Ll}} + \cos\beta\right) \quad (1)$$

式中: T_1 为受端换流变压器的变比; I_d 为直流电流; X_{Cl} 为受端换相电抗; N 为单极6脉波桥的数量; U_{Ll} 为受端换流母线电压; β 为触发超前角。

由式(1)可知, γ 与多种影响因素有关,这些因素除去系统参数外可以划分为电气量(U_{Ll} 及 I_d)和控制量(β)两类。当故障发生时,电气量比控制量变化更快^[20]。因此,在故障初期, U_{Ll} 的跌落和 I_d 的增大会共同导致 γ 减小。

送端换流母线电压上升导致逆变器换相失败与交、直流系统电气量变化特性、无功交换特性有关,其间关系如图1所示,应分别进行分析。

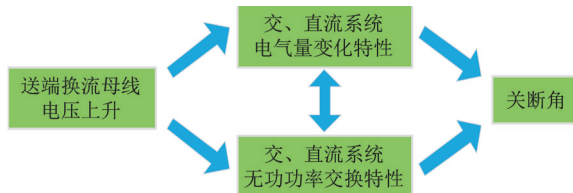


图1 送端换流母线电压上升与关断角关系

1.2 电气量变化特性

直流准稳态模型^[15]为

$$I_d = \frac{U_{dR} - U_{dI}}{R_d} \quad (2)$$

$$U_{dR} = 1.35NT_R U_{LR} \cos\alpha - \frac{3}{\pi}NX_{CR}I_d \quad (3)$$

$$U_{dI} = 1.35NT_1 U_{Ll} \cos\gamma - \frac{3}{\pi}NX_{Cl}I_d \quad (4)$$

式中: U_{dR} 、 U_{dI} 分别为送端和受端直流电压; R_d 为直流线路的等效电阻; T_R 为送端换流变压器的变比; U_{LR} 为送端换流母线电压; α 为整流器触发角; X_{CR} 为送端换相电抗。

将式(3)和式(4)代入式(2)得到 I_d 与两端换流母线电压的关系为

$$I_d = \frac{1.35N(T_R U_{LR}^* U_{LRN} \cos \alpha - T_I U_{LI}^* U_{LIN} \cos \gamma)}{R_d + \frac{3N}{\pi}(X_{CR} - X_{CI})} \quad (5)$$

式中: U_{LR}^* 、 U_{LRN} 分别为送端换流母线电压标幺值和额定值; U_{LI}^* 、 U_{LIN} 分别为受端换流母线电压标幺值和额定值。

由式(5)可知, I_d 与 U_{LR} 正相关, 即 I_d 在 U_{LR} 上升时具有增大趋势。将式(5)代入式(1)可得 γ 与两端换流母线电压的关系式为

$$\gamma = \arccos(K_1 \frac{U_{LR}^*}{U_{LI}^*} + K_2) \quad (6)$$

其中:

$$\begin{cases} K_1 = \frac{1.35\sqrt{2}NT_I T_R U_{LRN} X_{CI} \cos \alpha}{U_{LIN} [1.35\sqrt{2}NT_I^2 X_{CI} + R_d + \frac{3N}{\pi}(X_{CR} - X_{CI})]} \\ K_2 = \frac{[R_d + \frac{3N}{\pi}(X_{CR} - X_{CI})] \cos \beta}{R_d + \frac{3N}{\pi}(X_{CR} - X_{CI}) + 1.35\sqrt{2}NT_I^2 X_{CI}} \end{cases} \quad (7)$$

考虑到控制系统中 PI 控制器的延时特性, 可认为在 U_{LR} 迅速上升时, 直流控制系统的控制效果不明显, α 与 β 保持不变^[21]。 K_1 、 K_2 与直流系统运行参数有关, 可看做定值。由式(6)可知, 若 U_{LI} 不变 ($U_{LI}^* = 1$ pu), U_{LR} 的上升会导致 γ 减小。结合式(5)可知, U_{LR} 上升会引起 I_d 增大从而导致 γ 减小。若 $\gamma < \gamma_{\min}$, 则逆变器会发生换相失败。将 $\gamma_{\min}$ 代入式(6)可得 U_{LR} 上升导致逆变器换相失败的临界电压为

$$U_{LRM}^* = \frac{\cos \gamma_{\min} - K_2}{K_1} \quad (8)$$

由式(8)可知, 若 $U_{LR}^* > U_{LRM}^*$, 逆变器会发生换相失败。

1.3 无功功率交换特性

高压直流输电系统运行时, 直流系统与受端交流系统功率交换关系如图 2 所示。

图 2 中: P_{dl} 为直流系统受端输送的有功功率; Q_{CI} 为受端交流系统提供的无功功率; Q_{LI} 为受端滤波器提供的无功功率; Q_{dl} 为逆变器消耗的无功功率。结合图 2 和逆变器运行特性可得直流系统受端

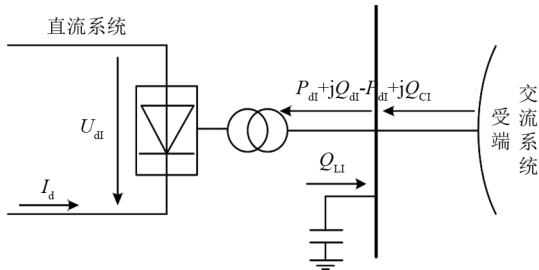


图 2 直流系统与受端交流系统功率交换关系

功率计算公式^[19]为

$$\begin{cases} P_{dl} = U_{dl} I_d \\ Q_{dl} = P_{dl} \tan \varphi_1 \\ \cos \varphi_1 = \frac{\cos \gamma + \cos(\gamma + \mu_1)}{2} \end{cases} \quad (9)$$

式中: φ_1 为受端功率因数角; μ_1 为受端换相角, 其与 I_d 正相关^[22]。 U_{LR} 上升会引起 I_d 增大进而导致 μ_1 增大, 结合式(9)可知, μ_1 增大会引起 φ_1 增大, 进而导致 Q_{dl} 增大。 Q_{CI} 会随 Q_{dl} 增大, 引起 U_{LI} 降低, 导致 γ 减小。

1.4 电压上升影响关断角的机理

U_{LR} 上升影响 γ 过程如图 3 所示。

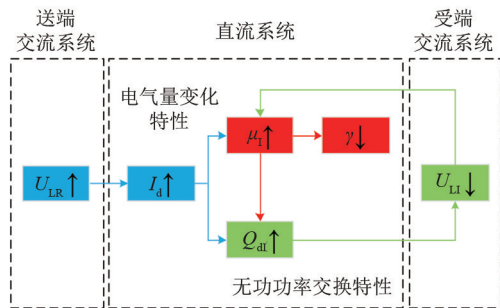


图 3 送端换流母线电压上升影响关断角过程

图 3 中: “↑”“↓” 分别表示各参数的增大或减小; 蓝色框图表示 U_{LR} 上升引起电气量变化影响 γ 过程; 绿色框图表示 U_{LR} 上升引起无功功率交换变化影响 γ 过程; 红色框图表示换相参数。由图 3 可知, U_{LR} 上升会引起 I_d 增大, μ_1 随 I_d 增大, 导致 γ 减小; 同时 I_d 和 μ_1 的增大会导致 Q_{dl} 增大, Q_{CI} 随 Q_{dl} 增大, 引起 U_{LI} 降低, 进一步导致 γ 减小。

2 控制器改进措施

2.1 基于电气量变化特性的分析

U_{LR} 上升时, 若考虑 α 的变化, 则由式(6)可得

$$\gamma = \arccos(K_3 \frac{U_{LR}^*}{U_{LI}} \cos \alpha + K_2)$$

(10)

其中:

$$\begin{cases} K_2 = \frac{\left[R_d + \frac{3N}{\pi}(X_{CR} - X_{CI})\right] \cos \beta}{R_d + \frac{3N}{\pi}(X_{CR} - X_{CI}) + 1.35\sqrt{2}NT_1^2X_{CI}} \\ K_3 = \frac{1.35\sqrt{2}NT_1T_RU_{LRN}X_{CI}}{U_{LIN}\left[1.35\sqrt{2}NT_1^2X_{CI} + R_d + \frac{3N}{\pi}(X_{CR} - X_{CI})\right]} \end{cases}$$

(11)

由式(10)可知, γ 与 U_{LR} 负相关, 而与 α 正相关, 即 γ 在 α 增大时具有增大趋势。若 U_{LI} 不变 ($U_{LI}^* = 1$ pu), 将 γ_{min} 代入式(10)可得 α 与 U_{LR} 的关系表达式为

$$\alpha = \arccos\left(\frac{\cos \gamma_{min} - K_2}{K_3 U_{LR}^*}\right)$$

(12)

结合式(10)和式(12)可知, 为抑制 U_{LR} 上升导致逆变器换相失败, 应在 U_{LR} 上升时, 增大 α 。

2.2 基于无功功率交换特性的分析

高压直流输电系统运行时, 直流系统与送端交流系统功率交换关系如图 4 所示。

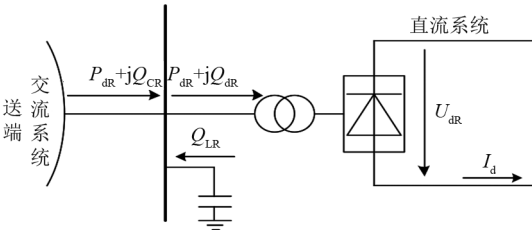


图 4 直流系统与送端交流系统功率交换关系

图 4 中: P_{dr} 为直流系统送端输送的有功功率; Q_{CR} 为送端交流系统提供的无功功率; Q_{LR} 为送端滤波器提供的无功功率; Q_{DR} 为整流器消耗的无功功率。结合图 4 和整流器运行特性可得直流系统送端功率计算公式^[18]为

$$\begin{cases} P_{dr} = U_{dr} I_d \\ Q_{dr} = P_{dr} \tan \varphi_R \\ \cos \varphi_R = \frac{\cos \alpha + \cos(\alpha + \mu_R)}{2} \end{cases}$$

(13)

式中: φ_R 为送端功率因数角; μ_R 为送端换相角。

由式(13)可知, 若增大 α , 则会引起 φ_R 增大, 导致 Q_{dr} 增大, 进而减缓 U_{LR} 的上升, 抑制逆变器换相失败的发生。

2.3 送端控制器的改进

U_{LR} 上升时增大 α 影响 γ 过程如图 5 所示。

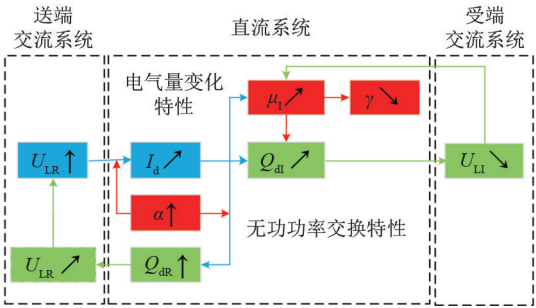


图 5 送端换流母线电压上升时增大触发角影响关断角过程

图 5 中, “↗” “↘” 分别表示 U_{LR} 上升时增大 α 可减缓各参数的增大或减小。由图 5 可知, U_{LR} 上升时增大 α 可改善电气量变化特性和无功功率交换特性, 从而改善 γ 的变化特性。将表 1 所示的 CIGRE HVDC 标准测试模型参数代入式(10), 可得 α 与 U_{LR} 的关系曲线如图 6 所示。

表 1 CIGRE HVDC 标准测试模型参数

参数	系统额定运行值
U_{LRN}/kV	345
U_{LIN}/kV	230
R_d/Ω	5
$X_{CR} = X_{CI}/\Omega$	13.444 5
$\alpha/(\circ)$	20
$\beta/(\circ)$	40
$\gamma/(\circ)$	15
$\gamma_{min}/(\circ)$	7
N	2
T_R	0.612 8
T_1	0.919 2

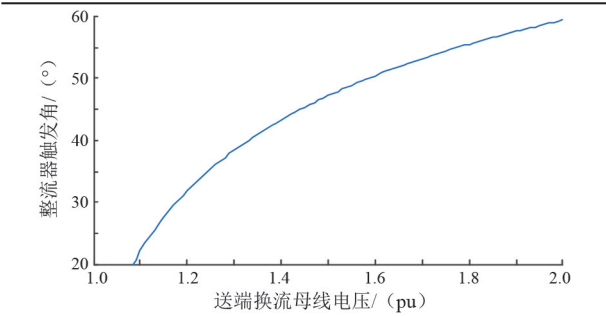


图 6 整流器触发角与送端换流母线电压的关系曲线

U_{LR} 上升时 α 大于图 6 中蓝色曲线数值便可抑制逆变器换相失败的发生。基于式(10)对 CIGRE HVDC 标准测试模型送端控制器^[15]改进后, 其结构如图 7 所示。

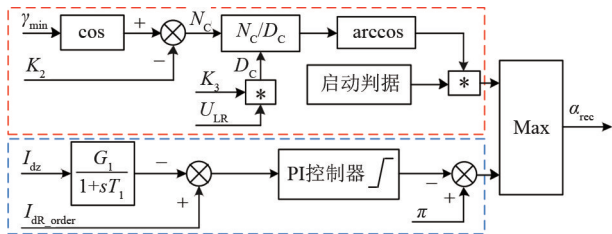


图 7 改进后的送端控制器结构

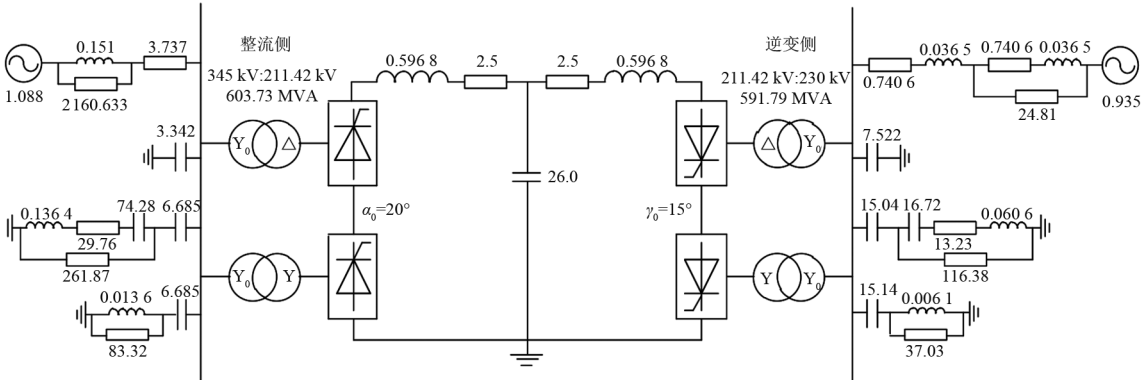
图 7 中： I_{dz} 、 I_{dR_order} 分别为送端直流电流及其指令值； α_{rec} 为整流器触发角指令值；蓝色虚线框内为原系统定电流控制器；红色虚线框内为新增的改进装置，以 $U_{LR}^* > U_{LRM}^*$ 为启动判据，以 $U_{LR}^* < U_{LRM}^*$ 为切出判据。当 U_{LR} 上升时，取输出较大者作为 α_{rec} 。

3 仿真实验

基于 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真平台利用 CIGRE HVDC 标准测试模型仿真验证，具体模型和参数信息^[23]如图 8 所示。系统额定运行时各参数信息见表 1。

3.1 电压上升导致换相失败的机理验证

基于 CIGRE HVDC 标准测试模型参数计算得到 $K_1=0.842\ 5$ ， $K_2=0.079\ 2$ ， $U_{LRM}^*=1.084\ 1$ pu。设置 U_{LR} 于 $t=2\ s$ 时开始上升，当 $U_{LR}^*=1.1$ pu 大于 U_{LRM}^* 时，电气量及受端无功功率变化波形如图 9 所示。



注：电阻、电感、电容的单位分别为 Ω 、H、 μF

图 8 CIGRE HVDC 标准测试模型

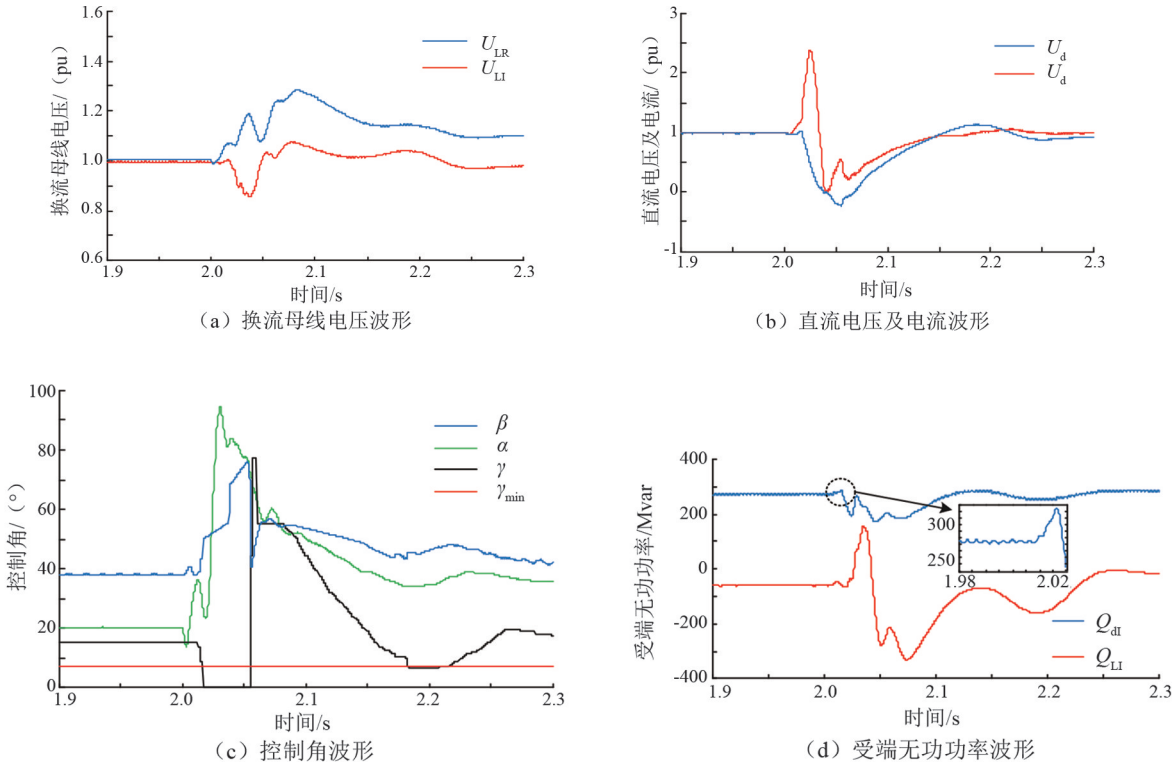


图 9 电气量及受端无功功率变化波形

由图 9 可知, U_{LR} 上升时, I_d 迅速增大, α 先减小后增大, Q_{di} 有增大趋势, Q_{Li} 增大, U_{Li} 减小, γ 减小并小于 γ_{min} ,逆变器发生换相失败。

仿真结果与理论分析一致: U_{LR} 上升会引起 I_d 增大从而导致 γ 减小;同时 I_d 的增大会引起 Q_{Li} 增加,导致 U_{Li} 跌落,进一步导致 γ 减小,诱发换相失败。

3.2 改进措施有效性验证

送端控制器改进后 α 波形如图 10 所示。

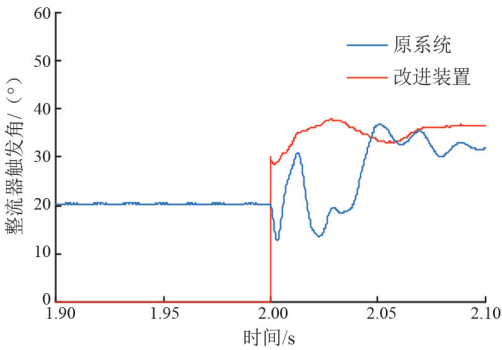
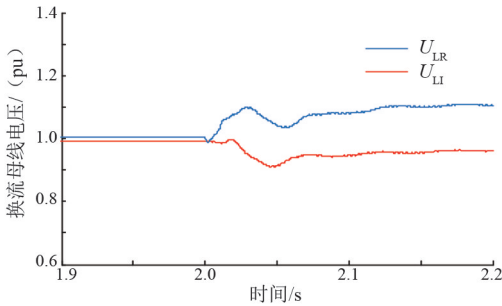


图 10 整流器触发角波形

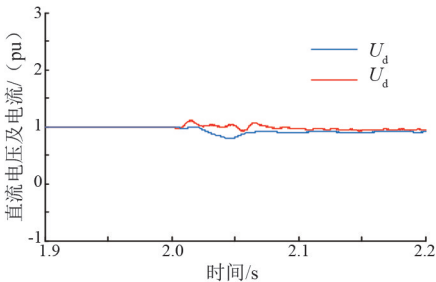
由图 10 可知, U_{LR} 上升时,改进装置输出的 α 较原系统更大且增速更快。送端控制器改进后电气量及送端无功功率变化波形如图 11 所示。

由图 11 可知,送端控制器改进后,在 U_{LR} 上升时 I_d 小幅增大, α 迅速增大, Q_{LR} 增大, U_{Li} 略有减小, γ 减小但并未小于 γ_{min} ,逆变器未发生换相失败。

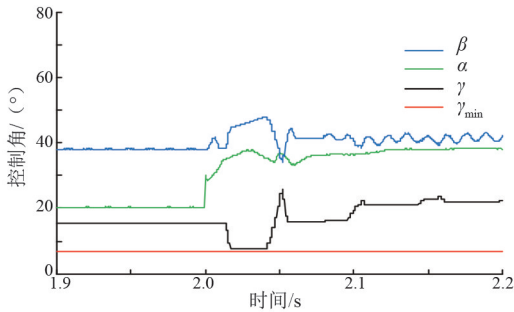
仿真结果与理论分析一致:改进装置在 U_{LR} 上升时增大 α 以抑制 I_d 的上升,同时增大 Q_{LR} 从而减缓 U_{LR} 的上升,有效抑制了逆变器换相失败的发生。



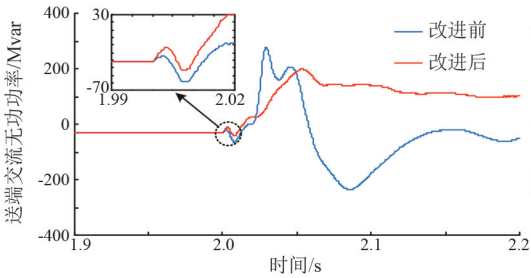
(a) 送端控制器改进后的换流母线电压波形



(b) 送端控制器改进后的直流电压及电流波形



(c) 送端控制器改进后的控制角波形



(d) 送端交流系统提供的无功功率波形

图 11 送端控制器改进后电气量及送端无功功率变化波形

4 结 论

上面分别从电气量变化特性和无功功率交换特性研究了送端换流母线电压上升导致逆变器换相失败的机理及抑制措施,得到以下结论:

1) 送端换流母线电压上升会引起直流电流增大;同时逆变器无功功率消耗增加,引起受端换流母线电压跌落,二者共同导致逆变器关断角减小,诱发换相失败。

2) 送端换流母线电压上升时增大整流器触发角可抑制直流电流的增大;同时整流器无功功率消耗增加,减缓送端换流母线电压的上升,从而避免逆变器发生换相失败。

基于上述结论所提出的一种通过改进送端控制器以抑制送端换流母线电压上升导致逆变器换相失败的措施,经仿真验证有效。

参考文献

[1] 陈国平,董昱,梁志峰.能源转型中的中国特色新能源高质量发展分析与思考[J].中国电机工程学报,2020,40(17):5493-5506.
[2] 李小鹏,戴文睿,林圣,等.基于高频分量的高压直流输电线路单端保护方法[J].四川电力技术,2020,43(2):33-35.
(下转第 105 页)

基于油压监测的电力少油设备状态检修技术探讨及应用

吴晓晖¹,汪晓华²,陈凌³,舒萍⁴,滕予非³,龙震泽³,田倩倩³

(1. 国网四川省电力公司,四川 成都 610041;2. 成都佳信电气工程技术有限公司,四川 成都 610041;
3. 国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610041;4. 国网四川省电力公司
攀枝花供电公司,四川 攀枝花 617000)

摘要:少油设备的检修以周期性停电检修为主,该方式很难及早发现设备异常,易错过发现设备故障的最佳时机,酿成爆炸事故。现有的泄漏电流、介质损耗、局部放电等在线监测方法,也难于实时监测设备故障信息。为此建立了油浸式套管和电流互感器的油压分析模型,提出油压实时监测、异常预警、带电取油、色谱验证以及缺陷处置的少油设备状态检修技术路线,研制出油压在线监测、带电校验、带电取补油等成套设备,并进行现场应用。通过典型案例分析,进一步验证技术方案的可行性。

关键词:少油设备;油压监测;油浸式电流互感器;油浸式套管;状态检修

中图分类号:TM 45 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2024)05-0086-07

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20240513

Discuss on Condition-based Maintenance Technology of Oil Less Equipment Based on Oil Pressure Monitoring and Its Application

WU Xiaohui¹, WANG Xiaohua², CHEN Ling³, SHU Ping⁴, TENG Yufei³, LONG Zhenze³, TIAN Qianqian³

(1. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. Chengdu Jiaxin Electrical Engineering Technology Co., Ltd., Chengdu 610041, Sichuan, China; 3. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China; 4. State Grid Panzhihua Electric Power Supply Company, Panzhihua 617000, Sichuan, China)

Abstract: Traditional overhaul of oil less equipment is mainly based on periodic power outage inspection, but it is difficult to find out the abnormalities at the first time, which easily misses the best time to overhaul and ultimately leads to an explosion accident. The current on-line monitoring methods such as leakage current, dielectric loss and partial discharge are also difficult to monitor the fault information of equipment in real time. To solve these problems, firstly the oil pressure analysis model for oil-immersed bushing and current transformer is established. And then, a technical route of condition-based maintenance is proposed for oil less equipment based on oil pressure online monitoring, fault early warning, oil sampling with load, chromatography analysis and defect handling. Further, a complete set of oil pressure online monitoring equipment, live calibration equipment and live oil sampling and refueling equipment are developed. Finally, with typical on-site cases, the feasibility of condition-based maintenance technology based on oil pressure monitoring is verified.

Key words: oil less equipment; oil pressure monitoring; oil-immersed current transformer; oil-immersed bushing; condition-based maintenance

0 引言

电力少油设备通常指油浸式电流互感器和套管。

少油设备规模庞大,有效的监测手段欠缺,爆燃事故时有发生。近三年,四川范围内发生了多起油浸式电流互感器和套管的爆燃事故,严重影响电网安全稳定运行。

长期以来,以周期性停电检修为主的少油设备

检修方式往往无法第一时间发现设备异常。而以泄漏电流、介质损耗和局部放电为代表的电参量在线监测技术^[3-5],从技术原理上来看可用于少油设备的状态监测,但其在工程应用时易受现场电磁环境干扰,数据质量难以保证,且误告警后运维人员无法对异常设备进行进一步的诊断,盲目停电检修的风险极大。目前只有油色谱分析技术^[6]能相对准确地对充油类设备进行故障定性和定量分析,但当前在线监测技术无法在带电情况下将其结合进来,故而降低了应用效果。

为解决少油设备的状态监测问题,四川电网自2017年起率先应用了油压监测技术。2018年至今,陆续有学者从油压监测机理、过热及放电缺陷下的油压特征等方面开展研究^[7-10],证明了油压监测技术的可行性。2021年6月,DL/T 846.16—2021《电力少油设备压力检测装置》标准正式实施,进一步规范了油压监测装置^[11]。

然而,目前基于油压监测技术的状态检修技术体系并不完善,在一定程度上降低了少油设备油压监测技术的应用价值。为解决状态检修目标下的少油设备数据监测与分析、故障定性与定量以及缺陷诊断与处置等问题,下面从油压监测的基本原理出发,进一步探讨油压分析模型、状态检修技术路线、关键技术要素、成套装置和成功应用案例等。

1 油压分析模型

1.1 基本原理

油浸式电流互感器和油浸式套管等电力少油设备均为密闭结构。设备发生故障时,其绝缘油在热、电作用下发生裂解,产生大量的气体,包括 H_2 、 CH_4 、 C_2H_6 、 C_2H_4 、 C_2H_2 、 CO 、 CO_2 等组份不同的气体,这些气体一部分溶于绝缘油中,另一部分从绝缘油中析出,使密闭结构内气体量增多引起内部压强的变化。因此,可以通过分析内部压强的变化判断少油设备在电气和结构上的缺陷。

1.2 油浸式套管油压分析模型

为避免混淆,定义 P 为少油设备取油口处的压强(以下简称油压); $P_{油柱}$ 为少油设备油柱的压强(以下简称液压); $P_{气}$ 为少油设备内气体空间的压强(以下简称气压)。套管取油口压强简化分析模型如图1所示。

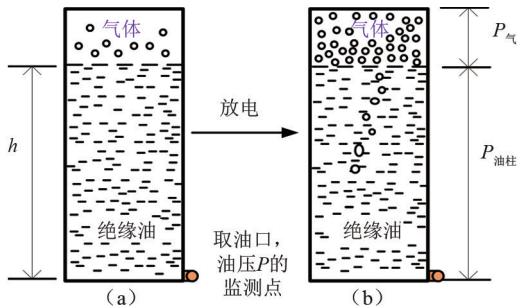


图1 套管取油口压强简化分析模型

油浸式套管为刚性密闭结构,其内部包含气体空间和绝缘油空间,如图1(a)所示。根据液体压强公式和气体状态方程,套管的油压 P 、液压 $P_{油柱}$ 和气压 $P_{气}$ 分别为

$$P_{油柱} = \rho gh, P_{气} = \frac{\sum n_i RT}{V_{气}}, P = P_{油柱} + P_{气} \quad (1)$$

式中: ρ 为油的密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, m/s^2 ; h 为油位高度, m ; n_i 为第 i 种气体的物质的量, mol ; R 为摩尔气体常数, $8.31 J/(mol \cdot K)$; T 为套管内气体温度, K ; $V_{气}$ 为气体的体积, m^3 。

正常运行时,由于套管油的质量不变,液压 $P_{油柱}$ 不变。因而,套管油压 P 主要受气压 $P_{气}$ 影响,与 n_i 、 T 正相关,与 $V_{气}$ 负相关。又由于 $V_{气}$ 同样受 T 影响,因而套管油压整体呈现出与温度非常高的相关性。

当套管存在缺陷并在热、电作用下发生油裂解时,产生大量的气体,气体含量增大,气压 $P_{气}$ 增大,引起油压 P 变化,如图1(b)所示。

当套管漏油(内漏或泄漏)时会引起油位变化,导致液压 $P_{油柱}$ 变化,进一步导致气体体积变化,气压 $P_{气}$ 变化。

当套管外部密封失效时,套管密闭的结构被破坏,致使套管气压 $P_{气}$ 与环境大气压相等,密封失效后套管油压 P 与温度的相关性降低。

1.3 油浸式电流互感器油压分析模型

油浸式电流互感器顶部设有金属膨胀器,根据 JB/T 7068—2015《互感器用金属膨胀器》,金属膨胀器容积与压强存在一定的关系^[12],即容积-压强曲线。互感器取油口压强简化分析模型如图2所示。

正常运行时互感器内部充满了油,如图2(a)所示,互感器的油压 P 为液压 $P_{油柱}$ 和膨胀器所处工作点的压强的和。

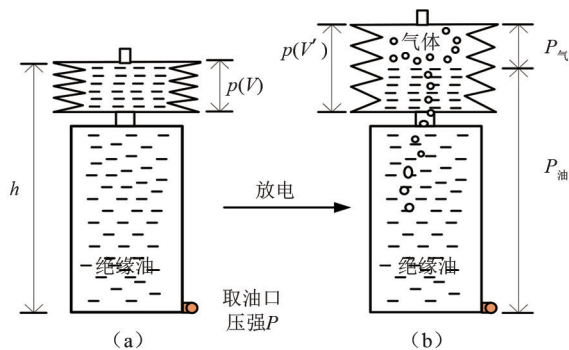


图2 互感器取油口压强简化分析模型

$$P = P_{\text{油柱}} + p(V) = \rho gh + p(V) \quad (2)$$

式中: $p(V)$ 为正常运行时金属膨胀器的压强; V 为正常运行时金属膨胀器所处工作点的容积。

放电产气时,如图 2(b) 所示,金属膨胀器顶部会聚集气体。根据分子动理论,密闭气体空间内上下各处压强相等,因此,气体压强与膨胀器顶部压强相等,即

$$P = P_{\text{油柱}} + P_{\text{气}} = \rho gh + p(V') \quad (3)$$

式中: $p(V')$ 为放电产气时金属膨胀器顶部压强; V' 为放电产气时金属膨胀器工作点的容积。

可见,放电产气时取油口压强的分析模型并未改变,只是膨胀器的工作点发生变化,进而引起油压的变化。

2 技术路线及关键要素分析

2.1 技术路线

所探讨的状态检修技术路线包括油压在线监测、数据异常预警、设备带电取油、油样色谱分析及带电缺陷处置 5 个环节,如图 3 所示。

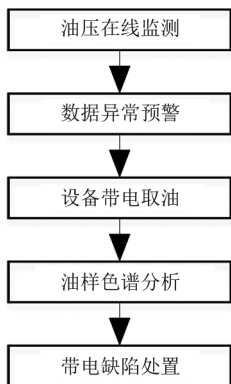


图3 状态检修技术路线

与其他在线监测技术相比,该技术路线的优势体现在:

1)油压监测技术是非电量监测,相比于电量监

测,其原理更加简单,且监测数据不易受现场强电磁环境干扰,便于数据分析;

2) 油压监测技术可以将传统的色谱分析技术结合起来,通过带电取油和色谱验证实现故障预警后的再次检验,可以解决部分设备缺陷的定性和定量分析问题,避免误告警引起的不必要的担心和停电;

3)考虑了少油设备部分缺陷的不停电处置问题以及油压监测装置的不停电校验和更换问题。

2.2 油压在线监测的关键要素分析

1) 高数据稳定性

应充分考虑油压传感元件的测量准确度和长期稳定性,提升油压监测装置的长期稳定性。根据 DL/T 846.16—2021,测量准确度至少应达到 0.5 级,并满足 1 年免维护的要求。

2) 高频数据采样

高频采样更有助于提高故障预警的及时性,尤其针对故障快速发展、短期内绝缘被击穿并引起设备爆燃的故障情况。根据 DL/T 846.16—2021,采样周期应不大于 1 min。

3) 油压就地数显及声光警示

油压就地数显便于运维人员对比初始油压和当前油压。针对油压数据严重异常的设备,现场油压监测装置可配备声光报警功能,警示现场工作人员。

2.3 数据异常预警的关键要素分析

运用数据横向分析、纵向对比等方法提取特征信息,实现少油设备的故障预警。故障预警的方法和阈值可以参照 DL/T 846.16—2021。由于所提出的技术路线具备故障预警的带电再检验能力,因此,可以将预警算法的灵敏度进一步提高。

2.4 设备带电取油的关键要素分析

应下引油路系统并保障油路密封性。适配原取油口,通过不锈钢管或紫铜管将微量绝缘油下引至电气安全区域,为设备带电取油以及缺陷带电处置奠定基础。下引引流管应严格保证密封性,避免发生漏油事故。

2.5 油样色谱分析的关键要素分析

油路系统中的存油量,下引后油路系统中的油几乎不会参与设备本体油的循环,为保证油样的准确性,取油时应预先将油路管路中的油排出。

2.6 带电缺陷处置的关键要素分析

1) 低油位缺陷和高油位缺陷的带电处置

低油位和高油位是少油设备运行过程中的常见

问题,尤其是当套管存在内漏故障时,套管可能存在严重过压现象,若不及时排出,高压将破坏套管的结构强度,引发更严重的问题。以上这两类缺陷,以往只能停电处理,所提检修技术路线将其考虑在内,可解决低油位缺陷带电补油以及高油位缺陷带电排油的问题。

2) 油压监测装置的带电校验和带电更换

受限于设备成本以及压力传感元件的技术发展水平,油压传感器的准确度随时间仍存在一定的漂移,不能完全避免现场校验,因此,数据异常时应能现场带电校验或更换传感器,提升数据可靠性。

3 成套装置研制

3.1 系统组成

根据所提出的检修技术路线进行成套装置研制,该装置系统架构如图 4 所示,主要包括油路系统、油压检测单元、数据采集与分析装置、多功能带电补(排)油装置以及多点油压校验装置。

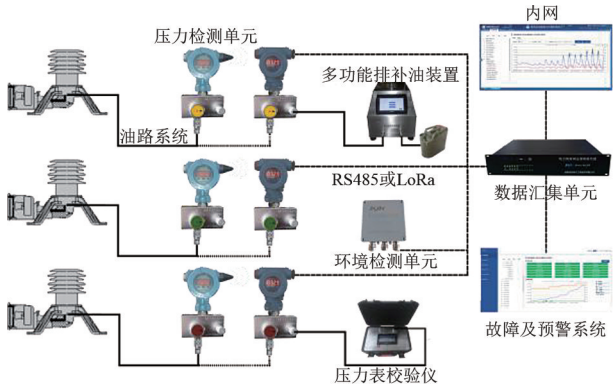


图 4 系统架构

3.2 油路系统

油路系统通过适配少油设备原取油口并通过不锈钢管或紫铜管将微量绝缘油下引至油压检测单元。下引引流管至油压检测单元间配有隔离球阀,便于检修。

3.3 油压检测单元

油压检测单元由油压传感器和组合阀组成。组合阀具有三通功能,可通过组合阀上的手柄切换连接状态。三路接口分别是油路管道接口、油压传感器接口、多功能接口。其中,油路管道接口连接引流管,油压传感器接口连接油压传感器,多功能接口可用于取油、传感器校验和带电补(排)油。

油压传感器技术指标包括:1) 准确度 CT 为 0.1 级,主变压器套管为 0.5 级;2) 示值分辨率不小于 0.1 kPa;3) 热零点漂移不超过 $\pm 0.03\% \text{ FS}/^\circ\text{C}$ (FS 表示满量程,下同);4) 热满量程输出漂移不超过 $\pm 0.03\% \text{ FS}/^\circ\text{C}$;5) 长期稳定性为 $\pm 0.1\% \text{ FS}/\text{年}$ 。(FS/ $^\circ\text{C}$ 指满量程温度漂移)

3.4 数据采集与分析装置

实现油压监测数据的采集和存储,通过数据横向分析和纵向对比研判设备状态,推送预警信息。

3.5 多功能带电补(排)油装置

基于活塞缸和电机研制了补(排)油装置,装置具备油气分离、单向逆止、过压保护以及缺油报警等功能,保证操作过程的安全性。

装置设置了定量/定速取补油功能以及负压排油功能,当需要带电处置低油位缺陷或高油位缺陷时,多功能接口连接带电补(排)油装置,切换组合阀手柄状态,可一键完成操作。补排油速度为 150 mL/min。

3.6 油压校验装置

基于电气比例阀和气泵实现了油压校验装置的快速调压。当油压传感器数据异常时,可关闭油路系统隔离球阀,连接油压校验装置,切换组合阀手柄状态,实现油压传感器量程下正、反行程的多点校验。

4 状态检修案例

4.1 一起电流互感器局部放电检修案例

2021 年 6 月,某 220 kV 变电站母联断路器 212 间隔 A、B、C 三相 CT 油压不一致,如图 5 所示。

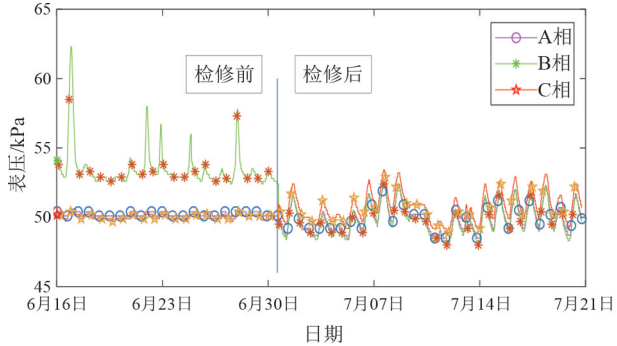


图 5 某母联断路器 212 A、B、C 相 CT 油压曲线

其中:A、B 相油压差最小值为-2.3 kPa,最大值为-11.7 kPa,变化量达 9.4 kPa;B、C 相油压差最小

值为 2.5 kPa,最大值为 11.9 kPa,变化量达 9.4 kPa;而 A、C 相油压差最小值为-0.1 kPa,最大值为 0.6 kPa,变化量仅为 0.7 kPa。

可见,A、B 相油压差以及 B、C 相油压差均超出 DL/T 846.16—2021 规定的压差告警阈值(2.5 kPa),故推测 B 相 CT 存在异常。

带电取油化验结果显示 B 相油中 H₂ 超 14 500 μL/L,CH₄ 达 791 μL/L,总烃超 960 μL/L,严重超标,判定为电弧放电,如表 1 所示。

表 1 某母联 212 B 相 CT 色谱数据对比

组分	含量/(μL·L ⁻¹)	
	2020-11	2021-06
CH ₄	4.45	791.94
C ₂ H ₄	1.46	0.85
C ₂ H ₆	2.12	173.20
C ₂ H ₂	0.32	0.65
H ₂	54.77	14 508.73
CO	92.25	118.50
CO ₂	191.81	233.46
总烃	8.35	966.64

4.2 一起电流互感器取油口接头泄漏检测案例

2021 年 7 月,某 220 kV 变电站 110 kV 线路 A、B、C 三相 CT 油压不一致,如图 6 所示。

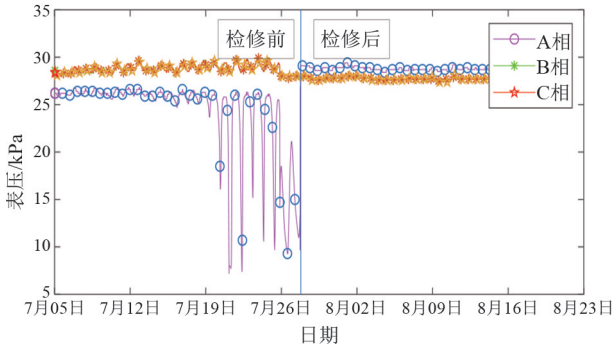


图 6 某 110 kV 线路 CT A、B、C 相套管油压曲线

其中:A、B 相油压差最大值为-2.1 kPa,最小值为-21.5 kPa,变化量达 19.4 kPa;A、C 相油压差最大值为-1.9 kPa,最小值为-21.3 kPa,变化量达 19.4 kPa;而 B、C 相油压差最大值为 0.3 kPa,最小值为-0.3 kPa,变化量仅为 0.6 kPa。

可见,A、B 相压差以及 A、C 相压差变化量均超出 DL/T 846.16—2021 规定的告警阈值(2.5 kPa),故推测 A 相 CT 存在异常。

带电取油化验数据符合运行条件,但 A 相 CT

底部有明显油渍,CT 取油口根部有明显渗漏点,判定为渗油故障,如图 7 所示。



图 7 某 110 线路 CT 渗油缺陷

经分析,A 相油压缓慢下降到一定程度时油压出现剧烈波动,其原因为:连续渗油时 CT 油位会逐渐降低至膨胀器的容积下限,此时 CT 接近于一个刚性结构;当温度降低,油位进一步下降时,膨胀器顶部出现负压空间,油压急剧减小;当温度增大,油位再次上升时,膨胀器顶部的负压空间减小,油压急剧上升,形成剧烈波动。

4.3 一起套管外部密封失效检修案例

2020 年 4 月,某 220 kV 变电站 1 号主变压器中压侧 A、B、C 三相套管油压不一致,如图 8 所示。

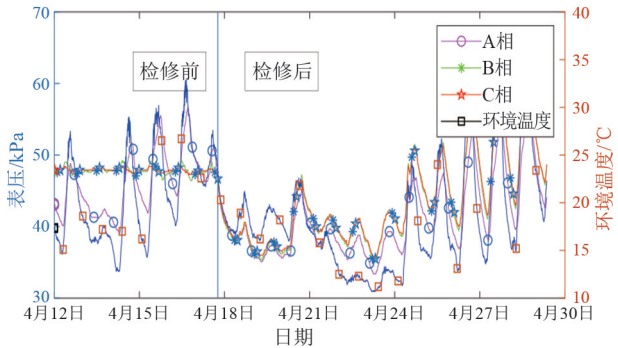


图 8 某 1 号主变压器中压侧 A、B、C 相套管油压曲线

其中:A 相油压最小值为 37.0 kPa,最大值为 56.7 kPa,变化量为 19.7 kPa; B 相油压最小值为 46.4 kPa,最大值为 49.7 kPa,变化量仅为 3.3 kPa; C 相油压最小值为 47.2 kPa,最大值为 48.7 kPa,变化量仅为 1.5 kPa。同期,环境温度最小值为 12.8 ℃,最大值为 33.3 ℃,变化量达 20.5 ℃。

可见,B、C 相套管的油压波动小,与温度的相关性低,明显不符合正常套管的油压特征。故推测 B、C 相套管存在异常。

带电取油化验数据符合运行条件,但 B、C 相 H₂、CO 含量约为 A 相的 10%,如表 2 所示。结合油压特征,判断为气体逸散,存在密封不良情况。

表 2 某主变压器中压侧套管色谱分析

组份	含量/($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)		
	A 相	B 相	C 相
CH ₄	14.26	2.27	2.02
C ₂ H ₄	2.85	5.61	2.87
C ₂ H ₆	6.86	1.61	0.89
C ₂ H ₂	0	0	0
H ₂	11.65	1.68	1.10
CO	448.59	31.78	20.95
CO ₂	1 671.66	2 136.92	1 631.71
总烃	23.97	9.49	5.78

停电检查时确认 B、C 相将军帽密封胶垫锈蚀,密封不良,如图 9 所示。



图 9 停电检查确认密封缺陷

经分析,B、C 相油压变化较小的原因:将军帽密封不良时,套管内部与大气相通,套管气侧油压接近于环境大气压,受套管气侧体积变化的影响小,内部油压与温度相关性大大降低。

4.4 一起套管内部密封失效检修案例

2020 年 6 月,某 220 kV 变电站 2 号主变压器高压侧 A、B、C 三相套管油压不一致,如图 10 所示。

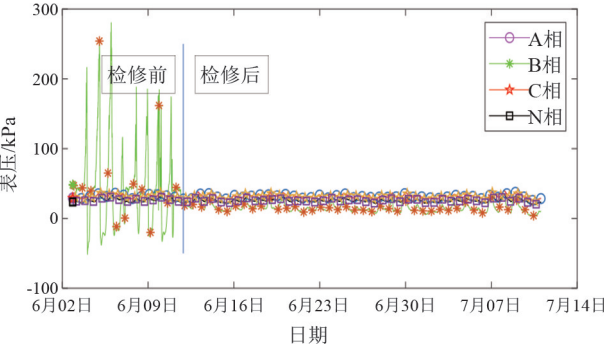


图 10 某 2 号主变压器高压侧 A、B、C、中性点套管油压曲线

其中:A 相油压最小值为 28.0 kPa,最大值为 38.9 kPa,变化量为 10.9 kPa; B 相油压最小值为 -51.4 kPa,最大值为 280.5 kPa,变化量达到 331.9 kPa;C 相油压最小值为 27.5 kPa,最大值为 39.1 kPa,变化量仅为 11.6 kPa。

可见,B 相套管油压变化量约为 A 相的 30.4 倍、C 相的 29.6 倍,且 B 相油压出现高压和负压,可推测 B 相套管存在异常。

带电取油时发现套管处于满油位状态,且出现放不出油的情况。结合油压特征,判定为内漏,如图 11(a)所示。停电后通过加压试验检验出原套管与主变压器本体的密封不良,如图 11(b)所示。

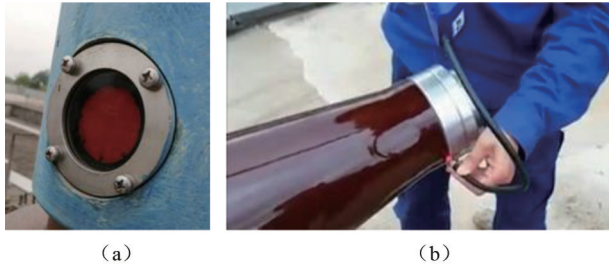


图 11 检修前油位及停电检查泄漏点

经分析,B 相套管出现高压和负压的原因:套管与主变压器本体密封不严时,主变压器的油可能进入套管,导致套管油位上升,气侧空间被压缩;由于密闭空间的气体油压与气体体积成反比,气侧油压成倍增长,形成高压,进一步提升了气体的溶解度,导致气体分子数降低;当温度下降,油位降低时,套管气侧空间体积变大,形成负压。

5 结 论

上面从油压监测的基本原理、分析模型、技术路线、关键要素以及成套装置等方面展开探讨,结合 4 起典型案例验证了技术的可行性。未来,还可以从以下两个方面继续推进相关工作。

1)受限于压力传感元件的成本和技术发展水平,油压传感器的准确度在长期运行过程中受温度、湿度等的影响会存在一定的下降。因此,数据异常时应加强传感器现场校验,避免出现不必要的停电和担心。

2)油压数据不仅受温度的影响,同时受气体溶解度、油体积、膨胀器容积、膨胀器结构以及产气速度等多重因素的影响。因此,需进一步通过试验加强不同运行工况下设备故障或缺陷与压强特征图谱的研究,提高预警准确性。

参考文献

[1] 徐鹏,曹雅榕,陈弘扬,等.油纸电容型套管常见缺陷及

对策[J].电瓷避雷器,2021(4):209-214.

[2] 冀辉,刘连升,焦洪涛,等.220 kV 油浸式电流互感器缺陷案例分析[J].国网技术学院学报,2020,23(3):14-16.

[3] 王晓辉,朱永利,王艳,等.基于深度学习的电容器介损角在线辨识[J].电工技术学报,2017,32(15):145-152.

[4] 赵廷志,冯新岩,李承振,等.基于套管高频和特高频电流监测的换流变局放监测[J].变压器,2020,57(9):33-37.

[5] 于大洋,张聪聪,王磊,等.变电站工频磁场干扰对泄漏电流传感器准确度影响研究[J].高压电器,2021,57(6):107-114.

[6] 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与判断导则:DL/T 722—2014[S].北京:中国电力出版社,2015.

[7] 徐勇.互感器的内部压力测量[J].高电压技术,1993(2):38-41.

[8] 陈凌,苏长华,吴晓晖,等.基于内部压强响应的变压器套管在线监测装置研制[J].高电压技术,

(上接第 79 页)

3 结 论

上面针对脉冲涡流检测信号白噪声干扰的小波去噪参数选择,提出了基于粒子群优化算法的脉冲涡流检测信号小波去噪参数选择方法,分别利用信噪比、均方根误差、相对平滑度和归一化相关系数作为适应度函数,通过量化去噪脉冲涡流检测信号与原始脉冲涡流检测信号在峰值附近的相似程度,发现采用归一化相关系数作为适应度函数时,可得到最优去噪脉冲涡流检测信号,其峰值大小和峰值时间的相对误差均小于 3%,对应的最佳小波去噪参数分别为 Sym25 小波基、10 层分解层数和中位数阈值函数。

参考文献

[1] 周路遥,曹俊平,王少华,等.基于多状态量特征及变化规律的高压电缆状态综合评估[J].高电压技术,2019,45(12):3954-3963.

[2] 曹俊平,王少华,任广振,等.高压电缆附件铅封涡流探伤方法试验验证及应用[J].高电压技术,2018,44(11):3720-3726.

[3] 曹俊平,孙兴涛,王少华,等.基于涡流技术的高压电缆

2020,46(2):569-575.

[9] 贺兴容,尹佳,张国治,等.过热缺陷下少油设备的压力变化特性研究[J].高压电器,2021,57(8):99-104.

[10] 唐炬,尹佳,张晓星,等.基于压力和特高频的少油设备绝缘联合在线监测[J].高电压技术,2020,46(2):546-553.

[11] 全国高电压试验技术和绝缘配合标准化技术委员会.高电压试验技术分技术委员会.高电压测试设备通用技术条件 第 16 部分:电力少油设备压力检测装置:DL/T 846.16—2021[S].北京:中国电力出版社,2022.

[12] 全国互感器标准化技术委员会.互感器用金属膨胀器:JB/T 7068—2015[S].北京:机械工业出版社,2016.

作者简介:

吴晓晖(1974),男,高级工程师,主要从事变压器类设备技术管理以及电力设备在线监测技术研究;
汪晓华(1988),男,硕士,工程师,主要从事电力设备在线监测技术、非电量监测在电网中的应用研究工作。

(收稿日期:2023-12-03)

铅封裂纹缺陷检测研究[J].高压电器,2020,56(8):168-175.

[4] 马诚佳,张浩,陆晓依.铅封涡流探伤在高压电缆线路现场检测中的应用[J].高电压技术,2019,45(增刊2):118-121.

[5] 米翰宁,王昕,任广振,等.自适应小波阈值去噪算法用于局部放电白噪声去噪[J].高压电器,2021,57(6):94-101.

[6] 陆小鹏,吴炬卓,牛海清,等.基于改进小波变换阈值估计法去除电缆绝缘局部放电信号白噪声[J].电器与能效管理技术,2021(3):24-28.

[7] 何平,何若冰,陈佳,等.基于小波阈值的局部放电白噪声去噪方法综述[J].广东电力,2020,33(11):83-90.

[8] 范佳兴,范杰清.基于多重自相关的局部放电信号小波去噪分解层数确定方法[J].河北师范大学学报(自然科学版),2022,46(6):582-586.

[9] 聂文梅,宋晓霞.基于自适应粒子群优化算法的无线传感器网络覆盖控制[J].沈阳工业大学学报,2023,45(4):459-464.

[10] 朱新山,丁杰.一种采用随机归一化相关系数调制的量化水印[J].计算机学报,2012,35(9):1959-1970.

作者简介:

唐 军(1991),男,硕士,研究方向为电力系统及其自动化、分布式电源并网技术;
邵千秋(1991),男,博士,研究方向为电缆缺陷检测。

(收稿日期:2023-11-10)

沟通三跳接点引起的断路器控制回路隐性故障及其改进措施

王 可¹, 王利平¹, 蒋星燃², 王 丹²

(1. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041; 2. 国网四川省电力公司超高压公司, 四川 成都 610041)

摘要:断路器控制回路断线是严重危及电网安全运行的危急缺陷,其隐性化发展使得断路器拒动概率增加。断路器保护的沟通三跳接点作为断路器保护重合功能的一部分,在特殊情况下会使得断路器出现控制回路断线无法告警的隐性故障。通过实际案例分析研究断路器保护沟通三跳接点的二次回路设计、原理及其作用,提出了该隐性故障产生的机理和发展过程;最后,对该隐性故障产生的充分条件针对性地提出了改进措施。

关键词:继电保护; 隐性故障; 沟通三跳; 断路器保护; 控制回路断线

中图分类号:TM 73 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2024)05-0093-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20240514

Hidden Failure of Circuit Breaker Control Circuit Caused by GST Connection and Its Improvement Measures

WANG Ke¹, WANG Liping¹, JIANG Xingran², WANG Dan²

(1. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. State Grid Sichuan Extra High Voltage Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: The disconnection of breaker control circuit is a critical defect that seriously endangers the safe operation of power grid, and its hidden development increases the probability of circuit breaker refusing to operate. As a part of the reclosing function of breaker protection, GST connection will cause the circuit breaker to have a hidden failure in which the control circuit is disconnected and cannot be alarmed under special circumstances. The design, principle and function of secondary circuit of GST connection in breaker protection are analyzed and studied through practical cases. Finally, the improvement measures are put forward according to the sufficient conditions for hidden failure.

Key words: relay protection; hidden failure; GST connection; breaker protection; control circuit disconnection

0 引言

电力系统的正常运行需要“三道防线”作为支撑,以应对各种异常扰动和故障的影响。继电保护装置作为“第一道防线”,其不正确动作可能引起电力系统的连锁事故,甚至引发电网解列和大规模停电事故。继电保护装置的隐性故障常常是一种家族性缺陷,在电力系统正常运行时对系统并无影响,但当电力系统中某些部分发生变化时,这种隐形故障就会被触发从而导致连锁反应^[1-2]。继电保护隐性故障对整个电力系统可靠性的潜在影响已经成为广

泛共识^[3-6]。

断路器控制回路断线是一种常见的危急缺陷,可能导致电力系统故障时断路器拒动,引起事故范围扩大和越级跳闸^[7]。而断路器保护的沟通三跳接点作为断路器保护重合功能的一部分,在断路器保护重合功能未就绪时起沟通三跳的作用^[8]。

下面通过一次实际发生的控制回路断线消缺案例,揭示在特殊情况下由沟通三跳接点引起的控制回路断线故障隐性化过程,并分析该隐性故障产生的机理和作用,最后针对性地提出改进措施。

1 故障经过

某日 3 时 21 分调度下令甲站 500 kV 甲乙一线进入 24 h 试运行,500 kV 甲乙一线 5073 断路器和 500 kV 甲丙二线/甲乙一线 5072 断路器为合位,5072 和 5073 断路器保护重合闸把手在“停用”位置,运行正常。500 kV 甲乙一线接线如图 1 所示。

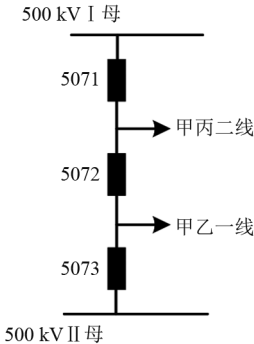


图 1 500 kV 甲站甲乙一线接线

次日 4 时 23 分,甲站接调度令 500 kV 甲乙一线 24 h 试运行结束投入重合闸功能,将 5073 断路器保护重合闸把手置于“单重”位置后,5073 断路器操作箱第 2 组 C 相合位继电器(2HWJC)灯熄灭,监控后台报 5073 断路器第 2 组控制回路断线告警。继电保护检修人员检查发现跳闸回路中串接的断路器位置辅助接点接线松动,导致 5073 断路器第 2 组 C 相跳闸回路断开,经紧固端子后缺陷消除,各项告警信号复归。

2 故障分析

2.1 故障直接原因

500 kV 甲乙一线 5073 断路器操作箱第 2 组 2HWJC 灯熄灭和监控后台报 5073 断路器第 2 组控制回路断线告警的直接原因,为第 2 组 C 相跳闸回路中串接的断路器位置辅助接点接线松动,如图 2 所示。

图中:2HWJA、2HWJB 以及 2HWJC 为 5073 断路器操作箱第 2 组跳闸回路的合位监视继电器;S1A、S1B 以及 S1C 分别为 5073 断路器的三相位置辅助接点(合位时处于闭合状态);2TQA、2TQB 以及 2TQC 为 5073 断路器的第 2 组分相跳闸线圈;K10 为 SF₆密度继电器闭锁接点,正常时闭合。

由图 2 可知,当第 2 组 C 相跳闸回路中串接的

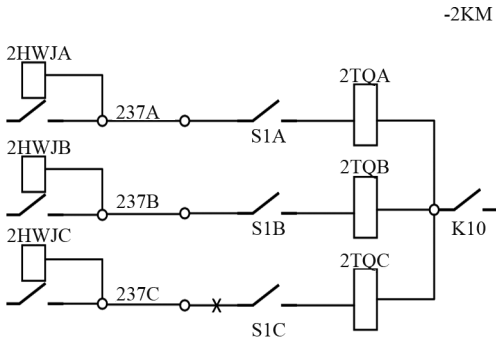


图 2 控制回路断线

断路器位置辅助接点接线松动时,237C 回路处于断开状态使得 2HWJC 失电,引起 5073 断路器操作箱第 2 组 C 相 2HWJC 灯熄灭。

而远方遥信报警回路中,控制回路断线信号的逻辑回路如图 3 所示。

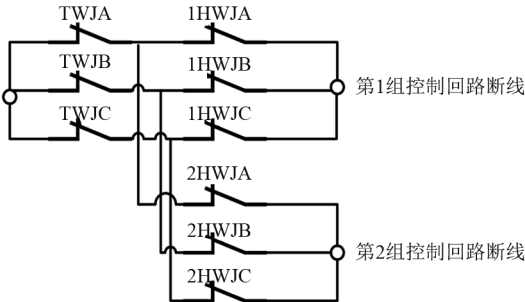


图 3 控制回路断线告警信号回路

由图 3 可知,当断路器处于正常合位时,三相跳闸线圈(TWJ)都不会动作,其常闭接点处于闭合位置;两组跳闸回路中的三相 1HWJ 和 2HWJ 动作,其常闭接点断开,使得控制回路断线信号不会发出。但当第 2 组 C 相跳闸回路故障时,其 2HWJC 继电器返回,导致 2HWJC 常闭接点闭合,产生第 2 组控制回路断线信号。

2.2 故障隐性化原因

由第 2.1 节分析可知,因端子松动接触不良产生的控制回路断线告警,在现场运维检修中属于常见典型缺陷。

问题的关键在于 5073 断路器送电之后的 24 h 试运行期间,C 相操作箱灯一切正常,并未报出控制回路断线信号。而试运行结束后,断路器保护重合闸把手由“停用”切至“单重”,异常信号马上报出。从故障排除过程和结果来看,5073 断路器的第 2 组 C 相操作回路确实出现了断线的情况,而断路器保护的重合闸把手属于断路器保护开入回路,其和操作回路没有任何电气联系。因此可以得出,5073 断

路器保护自身的重合闸功能影响了 5073 断路器第 2 组操作回路的监视功能。

2.2.1 沟通三跳接点回路

进一步分析发现,5073 断路器所用断路器保护为非“六统一”保护,设计有两对沟通三跳接点(GST)分别并联于断路器操作箱的两组分相跳闸回路上,图 4 是并联于第 2 组操作回路的沟通三跳接点示意图。

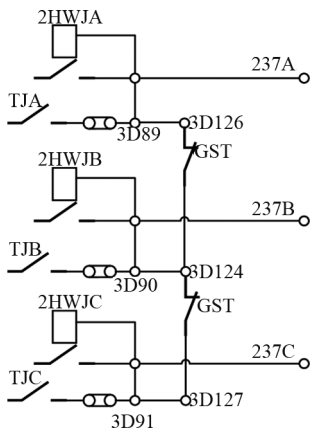


图 4 沟通三跳接点

由图 4 可知,当 GST 接点闭合时,ABC 三相的分相跳闸回路将被 GST 接点并联在一起。此时只要任一相的跳闸回路处于导通状态,则 ABC 三相的合位监视继电器就能动作,因此在这种状态下操作箱的分相合位监视继电器实际已无法正常监视分相跳闸回路,给断路器的正常运行带来巨大隐患。

2.2.2 沟通三跳接点原理及作用

分析该断路器保护的说明书得知沟通三跳接点的闭合条件为:

- 1) 当重合闸在未充好电状态且“未充电沟通三跳”控制字投入,将沟通三跳接点闭合;
- 2) 重合闸为三重方式时,将沟通三跳接点闭合;
- 3) 重合闸装置故障或直流电源消失时,将沟通三跳接点闭合。

上述 3 个条件构成“或”门逻辑,任一条件满足即闭合沟通三跳接点。

由于 500 kV 电压等级普遍采用 3/2 主接线形式,由边、中两个断路器供电,因此线路的重合功能一般由对应的断路器保护实现,而不由线路保护实现。但是区内故障的判别却又在线路保护中,这就造成了故障的判别和重合的执行分列在两个不同的保护中。以 500 kV 线路“单重”为例,线路保护在运行时无法确定断路器保护的运行状态,因此线路

保护不管断路器保护的重合功能是否就绪,对于区内单相故障会直接选择“单跳”,此时若断路器保护的重合功能异常,就会造成该断路器长期三相不一致运行。因此断路器保护配置沟通三跳接点,以在重合功能异常时直接并联三相跳闸回路,即使线路保护发出“单跳”令,也将直接作用于断路器的三相跳闸回路跳开三相。

2.2.3 5073 断路器隐性故障发展过程

根据消缺过程分析,5073 断路器第 2 组 C 相操作回路断线在 5073 断路器合闸送电之后既已存在。另一方面,经查阅 500 kV 甲站 5073 断路器保护定值单,其“未充电沟通三跳”控制字为“1”,因此在试运行期间重合闸把手置于“停用”时,重合闸不充电引起沟通三跳接点闭合,将 5073 断路器的第 1 组和第 2 组跳闸回路三相分别并列。

在这种情况下,虽然此时第 2 组 C 相跳闸回路已经断线,但是由于第 2 组的 A 相和 B 相跳闸回路完整,负电由 237A 和 237B 两根线缆提供给 C 相的合位监视回路,导致 C 相在控制回路已经断线的情况下不报控制回路断线信号,在操作箱上也能看到完整的 C 相 HWJ 灯。试运行结束后,将重合闸把手置“单重”,重合闸充电完成之后断路器保护打开沟通三跳接点,第 1 组和第 2 组跳闸回路三相分开,237C 回路断线立即引起 2HWJC 失电,C 相 HWJ 灯熄灭,第 2 组控制回路断线信号发出。

3 故障后果及改进措施

3.1 故障隐性化的条件及后果

3.1.1 故障条件

由缺陷处置过程可知,在 500 kV 甲乙一线线路试运行期间,5073 断路器第 2 组 C 相跳闸控制回路已经断线,按规程^[9]规定应定义为“危急缺陷”。但是根据前两章分析,该故障由于断路器保护沟通三跳接点的影响隐性化之后完全无法监视,此时如果线路出现区内故障,则第 2 组 C 相跳闸回路将无法正常跳闸,可能引起失灵保护动作和越级跳闸,严重威胁电网和设备安全。

综合来看,该隐性故障出现的充分条件为:

- 1) 两组跳闸回路中出现任一相断线;
- 2) 断路器保护含有沟通三跳接点;
- 3) 断路器保护处于应闭合沟通三跳接点的状态。

根据充分条件分析得现场可能含有该隐性故障的运行设备为:

1) 主变压器间隔 500 kV 侧边断路器长期处于停用重合闸状态(若主变压器间隔为半串配置,则两个断路器均处于停用重合闸状态);

2) 500 kV 线路由于运行检修方式调整,边、中断路器临时处于重合闸停用状态,如试运行、带电作业时。

3.1.2 故障后果

500 kV 断路器出现所述隐性故障时,正常的分相跳闸回路监视功能将失去。如果断路器出现了控制回路断线故障而又不能得到及时消缺,将在电网故障时拒动,进而引起后备保护动作和越级跳闸,严重时使得电网剧烈振荡,甚至完全解列。沟通三跳接点引起的断路器控制回路隐性故障对继电保护设备的正常跳闸功能造成严重影响,威胁电网“第一道防线”的安全。

3.2 改进措施

由沟通三跳接点引起的断路器保护隐性故障有 3 个充分条件,因此只要消除这 3 个条件即可避免出现该隐性故障,其中第 1 个充分条件跳闸回路断线和该故障的隐性化并无关系,下面仅针对后两个充分条件分别提出改进措施。

3.2.1 取消沟通三跳接点

在非“六统一”断路器保护中,主流继电保护厂家都设计了沟通三跳接点回路,以应对断路器保护故障或者失电时,线路保护“单跳”形成断路器长期三相不一致的缺陷。而根据最新的“六统一”^[10]设计规范要求,由于 500 kV 采用 3/2 接线形式,当其中一个断路器处于三相不一致状态时不影响整个间隔的全相状态,因此规定当断路器保护失电时,由断路器本体三相不一致保护三相跳闸。按“六统一”设计规范要求设计的新断路器保护都已取消了沟通三跳接点。因此加快技改项目立项,尽快改造原有含沟通三跳接点的非“六统一”断路器保护是最有力的措施。

对于在运的非“六统一”断路器保护,在改造完成之前应先采取临时性措施取消沟通三跳接点回路,例如图 4 中的断路器第 2 组跳闸回路中,可取消 3D89—3D126、3D90—3D124、3D91—3D127 线缆。

3.2.2 退出“未充电沟通三跳”功能

对于主变压器间隔而言,主变压器保护跳闸为

直接动作于操作箱 TJR 继电器,由 TJR 继电器直接驱动 3 个分相跳闸回路跳闸,同时 TJR 接点给断路器保护“三相保护跳闸”开入直接闭重跟跳三相,因此涉及主变压器间隔的停用重合闸断路器保护完全不需要沟通三跳功能。对于上述断路器保护可将“未充电沟通三跳”整定为 0,以使得断路器保护在停用重合闸时不再闭合沟通三跳接点,开放跳闸回路的分相监视功能。

需要注意的是,所提整定方法只能用于长期停用重合闸的主变压器间隔断路器,对于临时停用重合闸的线路间隔不应使用该方法。因常规变电站断路器保护单套配置,如需修改断路器保护定值则需要将一次设备转为冷备用状态,而线路的重合闸投停较为频繁,客观上不允许线路间隔应用该法。

4 结 论

继电保护隐性故障可能在电网某些故障时引起继电保护设备不正确动作,导致系统出现连锁故障威胁电网安全。断路器控制回路断线故障本身是一种使得断路器失去跳闸能力的危急故障,其隐性化之后使得断路器拒动概率大增。上面以一次实际的隐性故障消缺过程为例,分析了断路器保护沟通三跳接点的回路设计、原理及其引起控制回路断线故障隐性化发展的原因和过程。在此基础上,针对该隐性故障出现的充分条件分别提出了更换改造、整定调整等有效的改进措施。

参考文献

- [1] TAMRONGLAK S, HOROWITZ S H, PHADKE A G, et al. Anatomy of power system blackouts: preventive relaying strategies [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(2):708-715.
- [2] PHADKE A G, THORP J S. Expose hidden failures to prevent cascading outages [J]. IEEE Computer Applications in Power, 1996, 9(3):20-23.
- [3] 周虎兵,张焕青,杨增力,等.二次系统隐性故障的多指标综合风险评估[J].电力系统保护与控制, 2019, 47(9):120-127.
- [4] 张驰,谢民,刘宏君,等.基于语义网的智能站继电保护隐性故障辨识诊断技术研究[J].电力系统保护与控制, 2019, 47(14):95-101.
- [5] 李辉,贾晓风,李利娟,等.基于元胞自动机的电网隐性

故障传播模型关键线路识别方法[J].电力系统保护与控制, 2018, 46(6):16-23.

[6] 李斌,靳方超,李仲青,等.电压回路中性线断线的隐性故障识别及其影响[J].中国电机工程学报, 2013, 33(13):179-186.

[7] 陈超.1000 kV GIS 断路器控制回路的原理及典型异常浅析[J].科学技术创新, 2020(33):179-180.

[8] 马越,朱茂森.500 kV 断路器保护未正确沟通三跳分析[J].电气技术, 2021, 22(8):45-47.

[9] 国家电力调度控制中心.国网(调/4)527-2014 国家电网公司继电保护和自动装置缺陷管理办法[Z].北京:国家电网公司, 2014.

(上接第 26 页)

[12] LI L M, ZHANG H. Delay optimization strategy for service cache and task offloading in three-tier architecture mobile edge computing system[J].IEEE Access, 2020, 8:170211-170224.

[13] LIU X, SUN C, ZHOU M, et al. Reinforcement learning-based multislot double-threshold spectrum sensing with Bayesian fusion for industrial big spectrum data[J].IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(5):3391-3400.

[14] LIANG Y T, HE Y J, ZHONG X X. Decentralized computation offloading and resource allocation in MEC by deep reinforcement learning[C]//2020 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC), Aug. 9-11, 2020, Chongqing, China. IEEE, 2020:244-249.

[15] CHEN J, XING H L, XIAO Z W, et al. A DRL agent for jointly optimizing computation offloading and resource allocation in MEC[J].IEEE Internet of Things Journal, 2021,8(24):17508-17524.

[16] SHI D, GAO H, WANG L, et al. Mean field game guided deep reinforcement learning for task placement in cooperative multiaccess edge computing[J].IEEE Internet of Things Journal, 2020,7(10):9330-9340.

[17] CHENG G J, CHEN Y, DENG S G, et al. A Blockchain-based mutual authentication scheme for collaborative edge computing[J].IEEE Transactions on Computational Social Systems, 2022,9(1):146-158.

[18] SHEN M, LIU H S, ZHU L H, et al. Blockchain-assisted secure device authentication for cross-domain industrial IoT[J].IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020,38(5):942-954.

[19] NAKAMOTO Satoshi. Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system[EB/OL].[2023-04-10].https://bitcoin.org/bitcoin.pdf.

[20] ARUN M, BALAMURALI S, RAWAL B S, et al. Mutual

[10] 国家电网公司科技部.线路保护及辅助装置标准化设计规范:Q/GDW 1161—2014[S].北京:中国电力出版社, 2014.

作者简介:

王可(1994),男,硕士,工程师,研究方向为电力系统继电保护;

王利平(1972),男,博士,教授级高级工程师,研究方向为电力系统继电保护;

蒋星燃(1989),男,工程师,研究方向为电力系统继电保护;

王丹(1993),女,硕士,工程师,从事电力系统二次检修工作。(收稿日期:2023-11-24)

authentication and authorized data accessbetween fog and user based on blockchain technology [C]//IEEE INFOCOM Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS), July 6-9, 2020, Toronto, Canada. IEEE, 2020:37-42.

[21] GAI K K, WU Y L, ZHU L H, et al. Permissioned blockchain and edge computing empowered privacy-preserving smart grid networks[J].IEEE Internet of Things Journal, 2019, 6(5):7992-8004.

[22] KANG J W, YU R, HUANG X M, et al. Enabling localized peer-to-peer electricity trading among plug-in hybrid electric vehicles using consortium blockchains[J].IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(6):3154-3164.

[23] DAI Y Y, XU D, MAHARJAN S, et al. Artificial intelligence empowered edge computing and caching for Internet of Vehicle[J].IEEE Wireless Communications, 2019,26(3):12-18.

[24] GUO F X, YU F R, ZHANG H L, et al. Adaptive resource allocation in future wireless networks with blockchain and mobile edge computing[J].IEEE Transactions on Wireless Communications, 2020, 19(3):1689-1703.

作者简介:

谢江(1973),男,高级工程师,研究方向为电力信息化与自动化;

郭琳(1984),女,硕士,高级工程师,研究方向为电力通信建模、通信大数据分析 with 通信智能应用;

张晶(1989),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力通信技术;

黄思婕(1992),女,硕士,工程师,研究方向为光纤通信技术和无线通信技术;

李发均(1989),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力通信技术;

唐翰源(1994),女,助理工程师,研究方向为电力通信运检。

(收稿日期:2023-11-22)

基于虚实结合型仿真平台的水电机组试验研究

卢旭东¹, 何璇¹, 汤雨¹, 陈金保², 肖志怀²

(1. 国网四川省电力公司映秀湾水力发电总厂, 四川 成都 611830;

2. 武汉大学动力与机械学院, 湖北 武汉 430072)

摘要:随着以化石燃料为基础的传统能源技术, 逐渐被如风能、光伏发电、绿色氢电解和潮汐能等清洁能源技术所取代, 且电力系统互联规模不断增大, 调度运行方式与控制日趋复杂。在此背景下, 开展担任调峰调频任务的水电机组的试验研究对提高电力系统稳定性、抗扰动能力等具有重要意义; 然而, 由于成本和风险巨大, 试验类型受到极大限制。为此, 构建包括真实部件和虚拟部件的虚实结合型水轮机调节系统仿真平台, 并通过自动开机、空载扰动、连续增负荷、甩负荷和故障模拟等试验验证了基于虚实结合型仿真平台的水电机组试验研究的合理性。研究表明, 构建的虚实结合型仿真平台可有效模拟水电机组过渡过程, 以低成本、低风险实现了水电机组调节系统的常规试验与故障模拟试验。

关键词:电力系统; 水电机组; 虚实结合型仿真平台; 试验研究

中图分类号: TM 6 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2024)05-0098-08

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20240515

Experimental Study on Hydropower Units Based on Virtual and Real Integrated Simulation Platform

LU Xudong¹, HE Xuan¹, TANG Yu¹, CHEN Jinbao², XIAO Zhihui²

(1. State Grid Yinxiuwan Hydroelectric Power Plant, Chengdu 611830, Sichuan, China; 2. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei, China)

Abstract: With traditional energy technologies based on fossil fuels gradually being replaced by clean energy technologies such as wind energy, photovoltaic power generation, green hydrogen electrolysis and tidal energy, and the scale of power system interconnection continues to increase, the scheduling and operation methods and controls are becoming increasingly complex. In this context, conducting the experimental research on hydropower units which undertake the peak shaving and frequency regulation tasks is of great significance for improving the stability and disturbance resistance of power system. However, due to the huge cost and risk, the types of experiments are greatly limited. To this end, a virtual and real integrated simulation platform for hydro-turbine regulation system is constructed, which includes both real and virtual components. The rationality of experimental research on hydro-turbine units based on the virtual and real integrated simulation platform is verified through experiments such as automatic start-up, no-load disturbance, continuous load increase, load rejection and fault simulation. The research results show that the constructed virtual and real integrated simulation platform can effectively simulate the transition process of hydropower units, and achieve routine testing and fault simulation testing of regulation system of hydropower units at low cost and risk.

Key words: power system; hydropower units; virtual and real integrated simulation platform; experimental study

0 引言

水电作为一种可再生、清洁的能源形式在电力

基金项目: 国网四川省电力公司科技项目(521901230001)

系统中扮演着重要角色^[1-2]。然而, 随着电力系统规模的不断扩大和运行方式的日益复杂化, 对水电机组的稳定性和可靠性提出了更高的要求^[3-5]。构建水轮机调节系统仿真平台对研究和改进水电机组的调节系统显得尤为重要^[6-7]。

目前的水轮机调节系统试验研究包括虚实结合型、全实物型和全仿真型。1)在虚实结合型水轮机调节系统试验研究方面:文献[8]结合真实部件(调速器电气柜和液压执行机构)、物理模型(油压装置、模拟接力器)和数学模型(以传递系数表示的线性水轮机模型、一阶发电机模型、单机无穷大电力系统、孤立电网),开展了机组开机、空载扰动、一次调频、甩负荷、孤网调节等模拟试验,实现了对水轮机调速系统性能和功能的测试;文献[9]搭建半实物仿真平台,验证了水轮机调速器侧配置附加阻尼控制装置的实际控制效果,其中实物部分包括水轮机调速器电气柜、机械液压装置、油压装置和导叶接力器,虚拟部分包括水轮机及引水系统模型(理想水轮机与刚性水击联合模型)、发电机-电网-负荷模型(一阶模型);文献[10]搭建包含真实调速器、随动系统仿真仪和机组仿真仪的轴流式水轮机调节系统半实物仿真平台,并通过真机对比试验,验证了所搭建仿真平台的精准性和优越性。由于在无真实机组或不具备开机条件时可模拟机组动态特性,即可对水轮机调速器进行多种试验,甚至实现故障反演,该类型仿真平台具有较大的实际应用和推广价值。2)在全实物型水轮机调节系统试验研究方面:文献[11]开展了大藤峡水力发电厂 8 号机组调速器参数整定试验;文献[12]开展了华安水电厂 2 号机组调速器微机调节器参数整定试验;文献[13]开展了潘家口电厂 2 号机组静特性试验、空载试验和甩负荷试验。由于需考虑设备承受能力,该类型试验可开展的种类较少,且试验过程中参数设置较为保守。3)在全仿真型水轮机调节系统试验研究方面:

文献[14]开展了调节系统死区对一次调频动态性能的影响分析;文献[15]基于 Simulink 仿真提出了水轮机调节系统稳定性量化分析方法;文献[16]基于 Simulink 仿真提出了水轮机调节系统广义预测控制应用方法。由于试验成本较低,且可开展的试验类型较多,该类型试验受到广泛采用。总之,传统的全实物型试验研究面临成本高昂、风险大的挑战,限制了其广泛应用和深入研究^[17-19],而全仿真型试验对水电机组物理特性考虑不足。因此,基于虚实结合型仿真平台的水电机组试验研究成为一种确保水电机组安全、高效运行的重要保障。

下面通过结合真实部件和虚拟部件,以低成本、低风险构建了包含真实调速器、虚拟随动系统、虚拟电网和虚拟水轮机等部件的虚实结合型水电机组仿真平台,并开展了自动开机、空载扰动、连续增负荷、甩负荷和故障模拟等水电机组调节系统的试验研究。

1 虚实结合型水轮机调节系统仿真平台

所构建的虚实结合型水轮机调节系统仿真平台包含真实控制器(调速器电气部分)、随动系统仿真仪和水轮发电机组仿真仪,如图 1 所示。其中:真实控制器来自中国西南部的 XLD 水电站右岸机组;水轮发电机组和随动系统仿真仪自主开发,仿真计算模型均采用非线性模型;水轮发电机组中水轮机模型基于 BP 神经网络^[11]构建。为便于开展仿真试验,电网频率由机组仿真仪给定。

1.1 控制器

XLD 水电站的调速器采用“基于可编程序控制

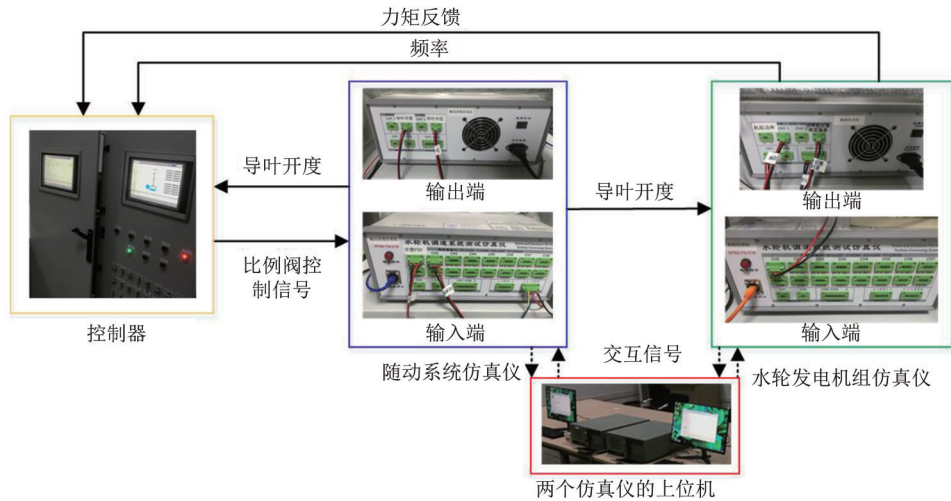


图 1 虚实结合的水轮机调节系统仿真平台

器软件实现的控制器+电液随动系统”的结构,即:由微机产生所需的控制规律,而液压放大部分自行闭环,形成一个相对独立的电液随动系统^[20]。控制器采用并联结构,可运行在转速、开度或功率模式。为避免发生超低频振荡,左岸机组一般采用开度控制模式。但考虑负荷外送通道网架结构,右岸机组一般采用转速控制模式(frequency control mode, FCM)或功率控制模式(power control mode, PCM),且每种模式下带负荷运行时均采用固定比例积分微分(proportional-integral-derivative, PID)控制方式(仅一组参数)。FCM 或 PCM 下 PID 控制器如图 2 所示,其线性部分传递函数如式(1)所示^[21],其中: y_c 、 y 分别为导叶开度变化量的参考值和导叶开度的偏差相对值; f_c 、 f 分别为频率变化量的参考值和频率的偏差相对值; p_c 、 p_t 分别为功率变化量的参考值和功率的偏差相对值; b_p 、 e_p 分别为永态转差系数和调差率; u 为控制器输出; e 为转速跟踪误差; K_p 、 K_I 和 K_D 分别为比例、积分和微分增益; T_{lv} 为微分环节时间常数。

$$G_c(s) = \frac{u}{e} = \frac{(K_D + T_{lv}K_p)s^2 + (K_p + T_{lv}K_I)s + K_I}{T_{lv}s^2 + s} \quad (1)$$

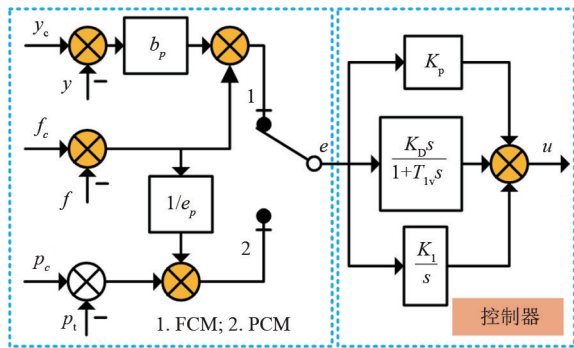


图 2 XLD 水电站 PID 控制器

1.2 随动系统仿真仪

电液随动系统包含延时、饱和、限速、死区等非线性环节,结构如图 3 所示;其线性部分传递函数如式(2)所示^[22-23],其中: K_y 为综合放大器系数; T_{y1} 和 T_y 分别为中间接力器和主接力器反应时间常数; t_0 为导叶全开时间; t_{c1} 、 t_{c2} 、 t_{c3} 为导叶三段关闭时间; Y_0 为初始导叶开度; Y_{c1} 和 Y_{c2} 为导叶开度分段关闭拐点。

$$G_s(s) = \frac{y}{u} = \frac{K_y}{T_{y1}T_y s^2 + T_y s + 1} \quad (2)$$

由于研究数据来自混流式水电站,因此这里不

考虑随动系统仿真仪的轮叶随动系统部分。

1.3 水轮发电机组仿真仪

在组成成分上,水轮发电机组仿真仪包含基于神经网络的非线性水轮机模型、引水系统模型和发电机模型^[16]。其中,非线性水轮机模型包含水轮机力矩特性神经网络(torque characteristic neural network, TCNN)和流量特性神经网络(discharge characteristic neural network, DCNN),如图 4 所示。在上位机仿真软件内,水轮机模型包含 TCNN 和 DCNN 的权值与阈值信息、工作水头、额定出力、机组惯性时间常数 T_a 、额定转速、发电机负载自调节系数 e_g 、额定流量、转轮直径、水流惯性时间常数 T_w 、最小导叶全程时间、引水管道长度、水击波速、采样频率等数据。为便于计算,引水系统和发电机采用刚性水击模型^[24]和经典的一阶模型^[15]描述,分别如式(3)和式(4)所示。

$$G_h(s) = -T_w s \quad (3)$$

$$G_g(s) = \frac{1}{T_a s + e_g} \quad (4)$$

2 仿真试验验证

配置仿真仪上位机与下位机通信协议后,通过在仿真仪上位机软件界面实时修改机组各类参数,可在搭建的虚实结合型水轮机调节系统仿真平台上开展多种试验,甚至实现故障反演。在试验过程中,由调速器控制柜发出机组开机、停机以及负荷调整指令,并将相应控制信号传递至 PLC 模块。PLC 模块根据接收到的指令,产生对应的开关和比例阀控制信号,并输出至随动系统仿真仪。随动系统仿真仪计算各随动环节输出,包括比例阀和导叶开度,并将信号输出至调速器和水轮发电机组仿真仪。水轮发电机组仿真仪计算机组频率和功率,并将信号输出至调速器。

结合 XLD 电站实际运行数据,在 PCM 下验证仿真平台精度。以 TCNN 输出与运行数据对比为例,验证结果如图 5 所示,可以看出:TCNN 误差较小,能以较高精度在大波动或小波动过程中表示水轮机力矩特性,即所搭建的虚实结合型水轮机调节系统仿真平台可靠性较高。

为充分验证所搭建的虚实结合型水轮机调节系统仿真平台可靠性,开展自动开机、空载扰动、增负荷、甩负荷、故障反演等试验。

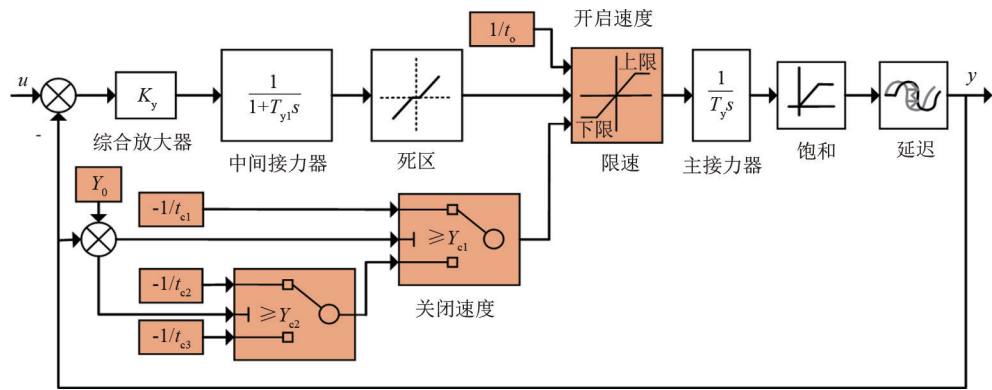


图 3 XLD 水电站随动系统

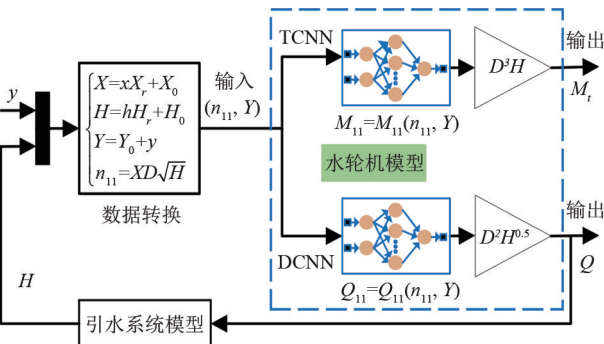
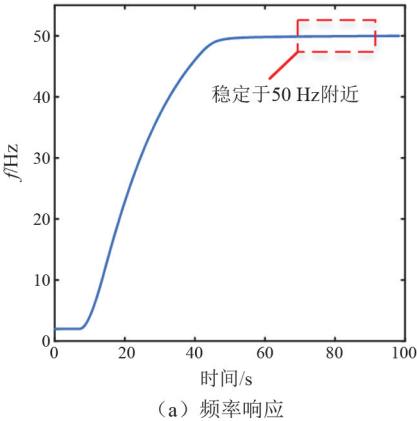
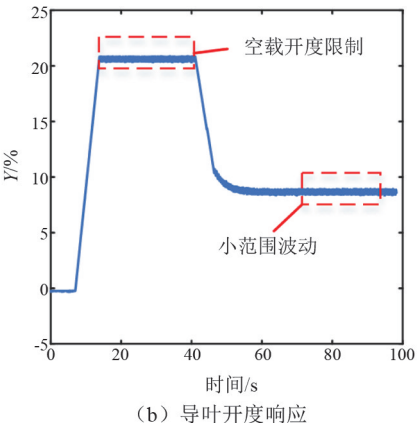


图 4 基于神经网络的非线性水轮机模型

示。需要注意:一旦按下“启动仿真”按钮,则调速系统处于闭环状态,这时可通过各波形的实测值数据框判断系统是否正常工作;出于仿真算法收敛性考虑,在所有情况下,仿真的机组频率输出下限为 2 Hz,因此在开机过程中的仿真频率仅包含 2 Hz 以上部分。



(a) 频率响应



(b) 导叶开度响应

图 6 开机过程仿真结果

根据图 6 可以看出:开机指令发出后,调速系统仿真频率增加,最终稳定在 50 Hz 附近;仿真导叶开度 Y 先增加到空载开度限制值,然后降至空载开度;导叶开度在稳态时具有小幅度波动,这与随动系统参数选取有关。构建非线性水轮机调节系统模型

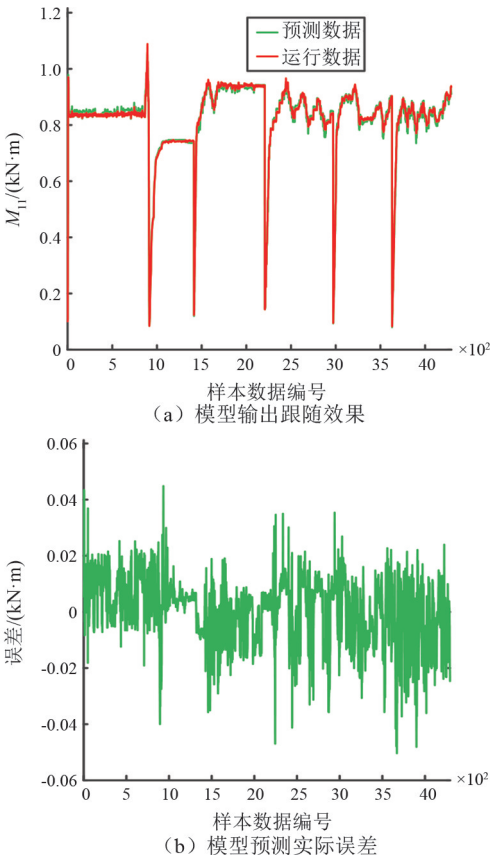


图 5 TCNN 建模效果

2.1 自动开机试验

自动开机试验的开机过程仿真波形如图 6 所

后,可采用智能优化算法辨识出更合适的随动系统结构参数。

2.2 空载扰动试验

实时仿真情况下的空载扰动波形如图 7 所示。根据图 7 可见在空载扰动过程中,频率和导叶开度变化符合机组运行规律。

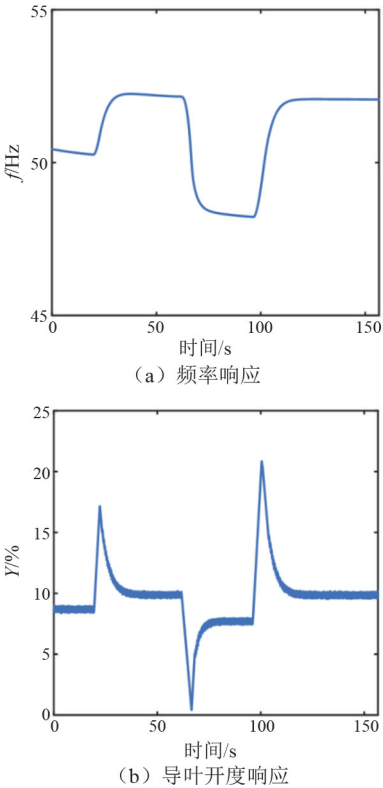


图 7 空载扰动过程仿真结果

2.3 机组连续增负荷试验

机组连续增负荷试验仿真波形如图 8 所示,可见在连续增负荷过程中,机组频率不变,机组功率随着导叶开度增大而增大,符合水轮机运行规律。

2.4 甩负荷试验

甩负荷波形如图 9 所示,可见在甩负荷时,仿真机组频率大幅度增加,然后趋向空载开度;仿真机组功率瞬间变为 0,这是由于并网断路器断开所致;导叶开度按分段关闭规律关闭,然后增加并稳定于空载开度。

2.5 故障反演试验

基于所建仿真平台,开展机组测频断线故障、主配跟随故障这两种典型故障模拟。

1) 机组测频断线故障

获取方式为:在调速系统正常带负荷运行情况下,人工拔除机组仿真仪频率输出端子。在发生故障时,调速器触摸屏界面会出现相应的报错信息:

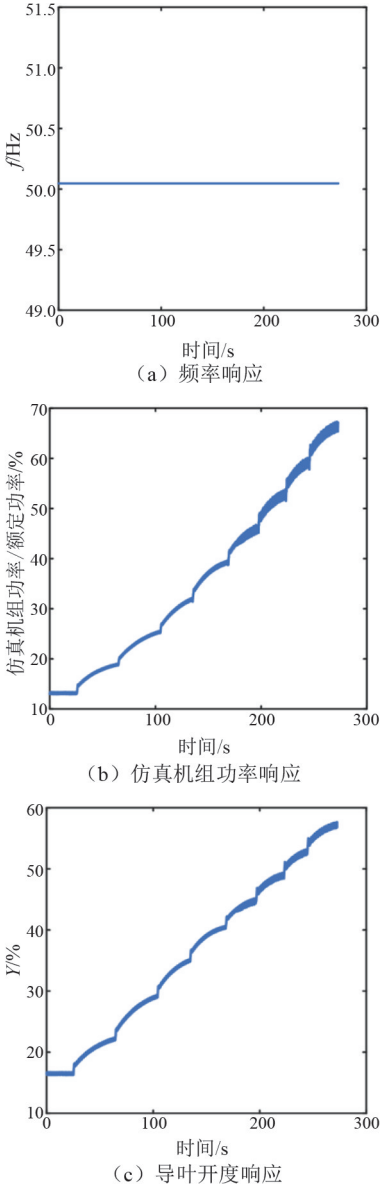


图 8 功率模式连续增负荷过程仿真结果

调速器事故、机组频率故障、残压机频断线、齿盘探头 1 断线、齿盘探头 2 断线、网频断线、残压机频跳变、水头信号断线。将测频断线故障模拟结果导入 Matlab 软件,生成仿真波形如图 10 所示。由图 10 可知:发生机组测频断线故障时,机组报错但不停机;频率不变,导叶开度和仿真机组功率维持小幅度波动状态,与实际运行情况相符。

2) 主配跟随故障

获取方式为:在调速系统正常运行情况下人工拔除随动系统仿真仪导叶中位反馈端子(随动系统至控制器的导叶开度信号)。在发生故障时,调速器触摸屏界面会出现相应的报错信息:调速器事故、主配传感器断线、网频断线、水头信号断线。发生主配跟随故障时,机组由功率模式切换至空载运行模

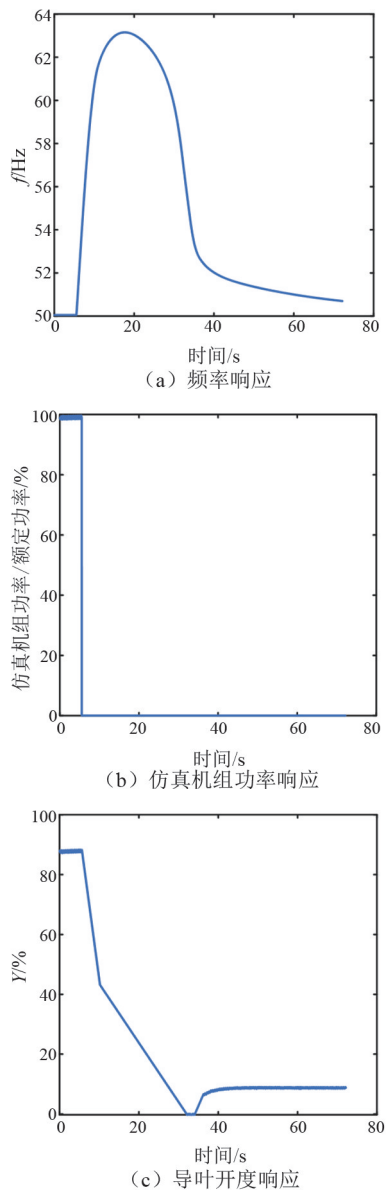


图 9 功率模式甩负荷过程仿真结果

式。将仿真结果导入 Matlab 软件,生成波形如图 11 所示。由图 11 可知:发生主配跟随故障时,调速系统缺失一个反馈,导叶开度迅速上升至限制值;机组转为空载运行状态,仿真机组功率变为 0,仿真机组频率迅速上升。

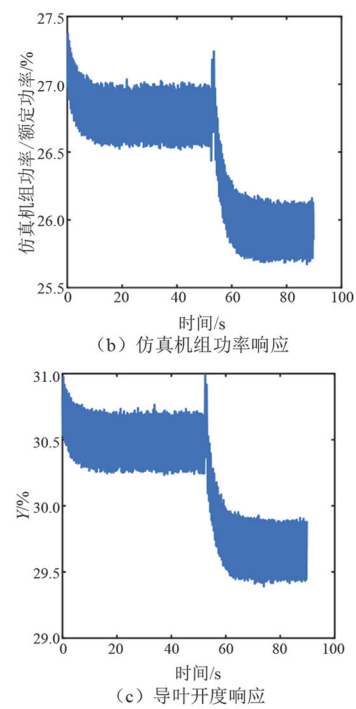
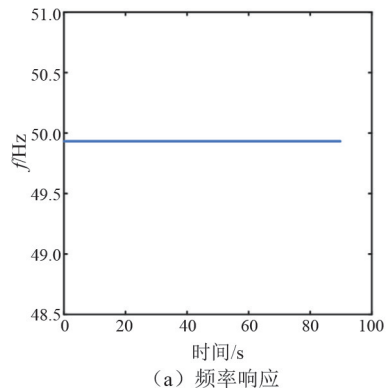


图 10 测频断线故障模拟结果

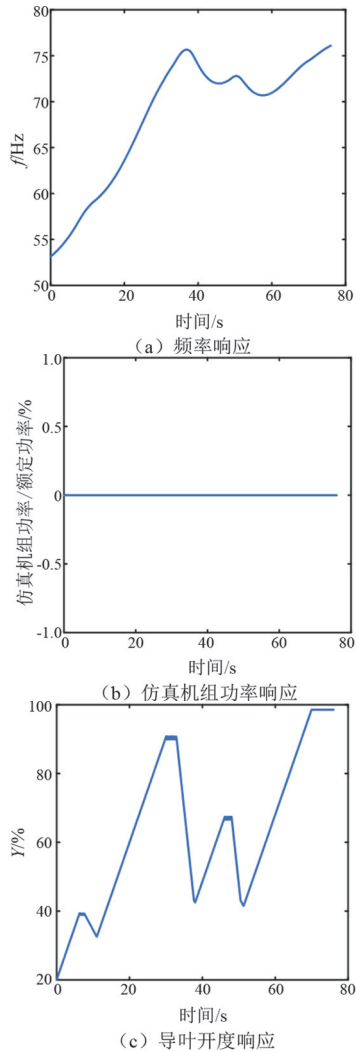


图 11 主配跟随故障模拟结果

3 结 论

基于所构建的包括真实调节器、虚拟水电机组和虚拟随动系统的水轮机调节系统仿真平台,开展了自动开机、空载扰动、连续增负荷、甩负荷、故障反演等试验,一方面验证了仿真平台的准确性和可靠性,为水电机组调节系统的运行和管理提供更可靠的支持;另一方面为水电站控制器参数调整、结构改良提供有力技术支持。由于所搭建的仿真平台采用一阶发电机模型,考虑高阶发电机特性的水轮机调节系统仿真平台有待进一步研究开发。

参考文献

- [1] 范成围. 水火机组调速器死区对超低频振荡的影响分析[J]. 四川电力技术, 2020, 43(4): 5-8.
- [2] JI G G, ZHANG L D, SHAN M Y, et al. Enhanced variable universe fuzzy PID control of the active suspension based on expansion factor parameters adaption and genetic algorithm[J]. Engineering Research Express, 2023, 5(3): 035007.
- [3] 凌楠, 曾昊, 格桑晋美, 等. 藏中联网后西藏电网安全稳定特性及控制策略分析[J]. 四川电力技术, 2021, 44(3): 23-28.
- [4] LI P F, LI Y. Research on the electro-hydraulic servo system of picking manipulator[J]. AIP Advances, 2023, 13: 015312.
- [5] LIU M J, CHENG L W, XU J Z, et al. An improved particle swarm fuzzy PID for adaptive control of temperature in CFRP induction heating[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part B-Journal of Engineering Manufacture, 2023, 238(4): 500-513.
- [6] AGHASEYEDABDOLLAH M, ABEDI M, POURGHOLI M. Supervisory adaptive fuzzy sliding mode control with optimal Jaya based fuzzy PID sliding surface for a planer cable robot[J]. Soft Computing: A Fusion of Foundations, Methodologies and Applications, 2022, 26(17): 8441-8458.
- [7] ALI N, AYZAZ Y, IQBAL J. Collaborative position control of pantograph robot using particle swarm optimization[J]. International Journal of Control Automation and Systems, 2022, 20: 198-207.
- [8] 蔡卫江, 陈逸鸣, 初云鹏. 大型国外水电站水轮机调速器仿真试验研究[J]. 水电与抽水蓄能, 2018, 4(5): 51-56.
- [9] 张建新, 施鑫磊, 陈刚, 等. 水电机组调速器附加阻尼控制仿真试验[J]. 南方电网技术, 2019, 13(11): 24-28.
- [10] 王安林, 丘涛基, 陈齐灯, 等. 基于虚实结合的水轮机调节系统仿真平台[J]. 中国农村水利水电, 2021(12): 198-202.
- [11] 程俊才, 朱涛, 郝慧贤, 等. 大藤峡水力发电厂 8 号机组调速器特性试验[J]. 水电站机电技术, 2021, 44(7): 9-11.
- [12] 陈继勇, 陈世群. 华安水电厂 2 号微机调速器安装与调整试验[J]. 福建水力发电, 2019(2): 39-42.
- [13] 马玉杰. 潘家口电厂 2 号机组调速器试验浅析[J]. 水电站机电技术, 2018, 41(10): 6-9.
- [14] 魏加达, 赵训新, 莫凡, 等. 调节系统死区对一次调频动态性能的影响分析[J]. 水电能源科学, 2023, 41(10): 190-194.
- [15] 陈金保, 任刚, 丁其琦, 等. 孤网模式下基于 HBBC 的水轮机调节系统稳定性量化分析方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(13): 60-69.
- [16] 陈金保, 刘少华, 陈上, 等. 孤网模式下水轮机调速系统广义预测控制应用方法[J]. 水利学报, 2024, 55(5): 619-630.
- [17] MORTEZA G S, FATEMEH K, HASAN M. Lyapunov-based adaptive PID controller design for buck converter[J]. Soft Computing: A Fusion of Foundations, Methodologies, and Applications, 2023, 27(9): 5741-5750.
- [18] HUANG M Q, TIAN M, LIU Y, et al. Parameter optimization of PID controller for water and fertilizer control system based on partial attraction adaptive firefly algorithm[J]. Scientific Reports, 2022, 12: 12182.
- [19] ITABORAHY FILHO M A, PUCHTA E, MARTINS M S R, et al. Bio-inspired optimization algorithms applied to the GAPID control of a buck converter[J]. Energies, 2022, 15(18): 6788.
- [20] 陈金保, 张智, 郑阳, 等. 孤网模式下水电机组智能鲁棒控制[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(14): 111-120.
- [21] CHEN J B, LIU S H, WANG Y H, et al. Generalized predictive control application scheme for nonlinear hydro-turbine regulation system: Based on a precise novel control structure[J]. Energy, 2024, 296: 130916.
- [22] LI H H, CHEN D Y, ZHANG H, et al. Nonlinear modeling and dynamic analysis of a hydro-turbine governing system in the process of sudden load increase transient[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2016, 80: 414-428.

[23] GUO W C, YANG J D, WANG M J, et al. Nonlinear modeling and stability analysis of hydro-turbine governing system with sloping ceiling tailrace tunnel under load disturbance [J]. Energy Conversion and Management, 2015, 106:127–138.

[24] CHEN J B, ZHENG Y, LIU D, et al. Quantitative stability analysis of complex nonlinear hydraulic turbine regulation system based on accurate calculation [J]. Applied Energy, 2023, 351:121853.

(上接第 85 页)

[3] 刘泽洪.±1100 kV 特高压直流输电工程创新实践[J]. 中国电机工程学报,2020,40(23):7782–7792.

[4] 谷琛,李鹏,何慧雯,等.±1100 kV 以上电压等级直流输电技术研究[J].中国电机工程学报,2020,40(20):6745–6754.

[5] 刘泽洪,郭贤珊,乐波,等.±1100 kV/12000 MW 特高压直流输电工程成套设计研究[J].电网技术,2018,42(4):1023–1031.

[6] YING X,ZHANG X P,YANG C H.Commutation failure elimination of LCC HVDC systems using thyristor-based controllable capacitors[J].IEEE Transactions on Power Delivery,2018,33(3):1448–1458.

[7] SHAO Y,TANG Y.Fast evaluation of commutation failure risk in multi-infeed HVDC systems[J].IEEE Transactions on Power Systems,2018,33(1):646–653.

[8] 黄梦华,傅闯,汪娟娟,等.单相接地时高压直流换相电压相位偏移量特性[J].电力系统自动化,2020,44(12):162–168.

[9] 阮思烨,徐凯,刘丹,等.直流输电系统换相失败统计分析分析及抵御措施建议[J].电力系统自动化,2019,43(18):13–17.

[10] 周博昊,李凤婷,尹纯亚,等.基于直流电流有限时域预测算法的换相失败预防策略[J].电力系统自动化,2020,44(6):178–185.

[11] 周博昊,李凤婷,宋新甫,等.基于直流电流变化量的换相失败预测判别与控制系统优化[J].电网技术,2019,43(10):3497–3504.

[12] 张彦涛,邱丽萍,施浩波,等.考虑不对称故障影响的多馈入直流系统换相失败快速判别方法[J].中国电机工程学报,2018,38(16):4759–4767.

[13] 王璐,李凤婷,尹纯亚,等.考虑直流电流变化的 HVDC 系统不对称故障换相失败分析[J].电力系统保护与控制,2021,49(1):17–23.

[14] 王峰,刘天琪,由新红,等.基于暂态直流电流预测的

作者简介:

卢旭东(1976),男,硕士,高级工程师,从事水电运检管理;

何璇(1992),女,工程师,从事计算机、网络安全、信息运维管理;

汤雨(1992),男,工程师,从事水电机组检修管理;

陈金保(1992),男,博士,从事水电机组优化控制方面研究;

肖志怀(1968),男,教授,博士生导师,从事水电机组优化控制方面研究。(收稿日期:2024-04-19)

换相失败临界电压瞬时值判据[J].高电压技术,2021,47(1):129–137.

[15] 马星,李凤婷,尹纯亚.整流侧换流母线电压恢复对逆变器换相的影响[J].电网技术,2020,44(8):2950–2960.

[16] 尹纯亚,李凤婷,宋新甫,等.多馈出直流系统换相失败快速判别方法[J].电网技术,2019,43(10):3459–3465.

[17] MIRSAEIDI S,DONG X Z,TZELEPIS D,et al.A predictive control strategy for mitigation of commutation failure in LCC-based HVDC systems[J].IEEE Transactions on Power Electronics,2019,34(1):160–172.

[18] XIAO H,LI Y H,LAN T K,et al.Sending end AC faults can cause commutation failure in LCC-HVDC inverters[J].IEEE Transactions on Power Delivery,2020,35(5):2554–2557.

[19] 汤奕,郑晨一,楼伯良,等.抑制连续换相失败的直流功率控制策略[J].电网技术,2019,43(10):3514–3522.

[20] LIU L,LIN S,SUN P Y,et al.A calculation method of pseudo extinction angle for commutation failure mitigation in HVDC[J].IEEE Transactions on Power Delivery,2019,34(2):777–779.

[21] 尹纯亚,李凤婷,陈伟伟,等.单极闭锁引起直流健全极换相失败分析[J].电力自动化设备,2019,39(11):114–119.

[22] 夏海涛,周小平,洪乐荣,等.一种抑制后续换相失败的自适应电流偏差控制方法[J].中国电机工程学报,2019,39(15):4345–4355.

[23] 马星,李凤婷,尹纯亚,等.整流侧换流母线电压恢复导致逆变器换相失败的机理分析[J].电力工程技术,2021,40(4):83–88.

作者简介:

马星(1996),男,硕士,工程师,从事电力系统规划、多能源系统、电力系统运行、电网安全分析等工作;

尹纯亚(1994),男,博士,副教授,研究方向为交直流系统稳定与控制。(收稿日期:2023-11-29)

变电站一键顺控功能仿真验证平台构建及应用

丁禹¹, 韩忠晖², 吴晋波¹, 洪权¹, 刘志豪¹, 肖遥遥¹

(1. 国网湖南省电力有限公司电力科学研究院, 湖南长沙 410208;

2. 国网湖南省电力有限公司, 湖南长沙 410004)

摘要:针对变电站一键顺控存在验收难度大、改造停电难等问题,提出基于数字孪生技术的一键顺控功能仿真验证方法,在仿真环境构建变电站一键顺控功能仿真验证平台。基于仿真验证平台,模拟站内一、二次设备状态变化,在设备不停电情况下,开展一键顺控功能验证测试,对变电站一键顺控系统配置文件进行全面校验。通过工程实际应用,所提方法与传统人工验收方式相比,验证逻辑更细、更全,基于仿真验证方法,可模拟顺控各种校验条件,提升顺控配置文件逻辑校验的全面性;验收效率更高,验证测试工作可在新建、改造工程开始前开展,提前发现顺控配置文件中存在的问题,确保现场工作顺利实施,从而缩短工程建设周期,提升变电站一键顺控验收质效。

关键词:数字孪生; 一键顺控; 仿真验证; 虚实交互; 自动测试

中图分类号: TM 63 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2024)05-0106-05

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20240516

Construction and Application of Simulation Verification Platform for One-key Sequence Control Function of Substation

DING Yu¹, HAN Zhonghui², WU Jinbo¹, HONG Quan¹, LIU Zhihao¹, XIAO Yaoyao¹

(1. State Grid Hunan Electric Power Research Institute, Changsha 410208, Hunan, China;

2. State Grid Hunan Electric Power Company Limited, Changsha 410004, Hunan, China)

Abstract: In order to solve the problems of one-key sequence control in substation, such as difficult acceptance and difficult transformation of power outage, a simulation verification method of one-key sequence control function based on digital twin technology is proposed, and a simulation verification platform for one-key sequence control function in substation is constructed in simulation environment. Based on the simulation verification platform, the state changes of primary and secondary equipment in substation are simulated, and the one-key sequence control function verification test is carried out without power outage of the equipment, and the configuration file of one-key sequence control system in substation is comprehensively verified. Through practical engineering applications, the proposed method is compared with the traditional manual acceptance method. Firstly, the verification logic is more detailed and comprehensive. Based on the simulation verification method, it can simulate various verification conditions of sequence control and improve the comprehensiveness of logic verification of sequence control configuration files. Secondly, the acceptance efficiency is higher. The verification testing work can be carried out before the start of new construction and renovation projects. Problems in the sequence control configuration files can be discovered in advance to ensure the smooth implementation of site work, thereby shortening the construction cycle of the project and improving the acceptance quality and efficiency of one-key sequence control in substation.

Key words: digital twin; one-key sequence control; simulation verification; virtual-real interaction; automatic testing

0 引言

一键顺控是一种变电站倒闸操作新模式,具备防误智能校核、操作步骤自动顺序执行等功能^[1],

预置顺控票是存储在顺控主机中用于顺控操作的操作序列^[2]。在监控系统或集控系统上调用对应的预置顺控票,即可实现主变压器、母线、断路器、隔离开关、具备电动手车的开关柜等一次设备操作一键自动执行,设备状态自动转换。一键顺控无需人员

直接操作设备,提高了倒闸操作安全性和效率,为变电站倒闸操作提供了便利^[3]。

一键顺控的应用离不开对顺控逻辑的详细测试和验证,但受限于现场设备运行条件和操作本身要求的判据条件,使一键顺控测试工作不能高效率、充分完整地进行全逻辑测试和验证^[4]。大多数变电站的电压等级高、规模大,且一键顺控操作票数量多,导致测试效率较低、测试成本较高。一键顺控操作票的测试过程中,需要变电站长时间停电且一、二次设备需要反复操作,增加了电网的不稳定性并降低了设备的使用寿命,也会增加测试成本^[5]。如何高效、便利、全面地开展顺控逻辑验证,减轻现场工作压力,是本领域需要解决的技术难题。

在一键顺控改造过程中,因一次设备停电难,多采用分间隔轮流停电的方式开展一键顺控改造、调试、验收,进而完成预置顺控票的测试^[6]。但存在以下缺点:1)已投运变电站一般不具备全部停电条件,为验证全站的顺控操作票,必须制定复杂的轮番停电计划,只有具备停电条件的间隔的顺控操作票才有可能被验证;2)需要较长时间才能校验完全站的顺控操作票,校核周期长,工作效率低,实际停电时间短,工作难以安排导致无法顺利开展顺控功能调试和验收的情况时有发生,严重影响电网系统稳定性和设备运行操作效率和安全性^[2]。因此,能否缩短变电站一键顺控改造现场停电时间,提前完成逻辑、功能、通信调试,成为目前亟待解决的技术问题之一。

目前变电站一键顺控仍然完全依赖现场试验校验,一旦顺控操作票的遥控点配置错误,检查修改再重新试验耗费的时间精力较多,将导致现场工作更加紧张;现场试验受制约的条件较多,特别是已投运变电站一键顺控改造和改、扩建变电站一键顺控功能变动,现场停电困难,试验开展难度大。分间隔轮流停电的方式开展一键顺控验收受制于电网的停电计划,同时增加设备倒闸操作安全风险。与一键顺控改造进度相比,顺控验收较为滞后,严重阻碍了一键顺控操作替代常规倒闸操作实用化应用。下面基于数字孪生技术,提出了一种不依赖于停电计划的变电站一键顺控功能验证方法,即构建变电站一键顺控功能仿真验证平台,对顺控配置文件进行全面校验,提前发现其防误逻辑、操作条件、闭锁条件、操作项目、单步执行前后条件、设备态存在的问题,解

决一键顺控验收难度大、逻辑验证不全面、改造停电难等问题。这是在传统一键顺控验收方式上的一种新技术创新。

1 总体架构

变电站一键顺控功能仿真验证平台模拟站内一、二次设备状态变化,为一键顺控功能仿真验证提供仿真测试环境,校核预置顺控票、顺控点位、双确认结果、防误逻辑等关键环节。仿真验证平台基于SCD文件,获取全站间隔层设备模型,保证遥信和遥测数据的对应和关联。仿真验证平台由仿真测试系统和实物设备组成,其中,仿真测试系统包括数字孪生变电站和位置双确认系统,实物设备包括顺控主机和防误主机。总体架构如图1所示。

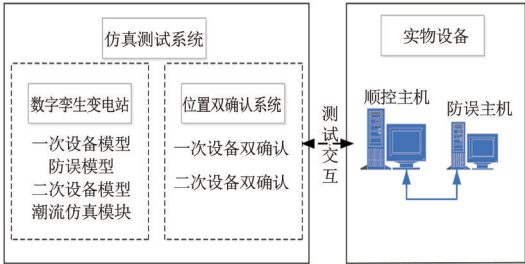


图1 变电站一键顺控功能仿真验证平台

仿真测试系统与顺控主机通过标准协议连接,实现对预置顺控票的逐项、逐条、正向、反向验证,在一次设备不停电的情况下,仿真验证一键顺控功能的正确性。数字孪生变电站包括一次设备模型、二次设备模型、防误模型和电力系统潮流仿真模块。数字孪生变电站和物理实体一样,具有相同的规律和运行机理,是物理实体精细化的数字描述。一次设备模型具备一次设备运行特性和逻辑关系,二次设备模型具备二次设备运行特性以及与一次设备的关联关系,基于智能防误技术和防误推理方法生成防误模型的逻辑规则。

潮流仿真模块依据一次设备网络结构进行潮流计算,提供潮流数据,当收到遥控指令后,能够联动控制改变对应断路器、隔离开关的位置状态,同时网络结构会随之改变,潮流仿真模块会自动重新计算潮流,并更新数据。一次设备在收到分合闸指令后,一次设备的遥测、遥信变化情况将反馈至一键顺控系统。

在一键顺控仿真测试过程中,仿真测试系统模拟一、二次设备状态变化,位置双确认系统产生一、二次设备相关的遥信和遥测数据,并反馈至实物设

备顺控主机,由顺控主机完成设备操作到位的判断。断路器双确认为“位置遥信”和“遥测”^[7-8],隔离开关双确认为辅助开关接点位置以及选择磁感应传感器、微动开关、视频系统^[9]其中之一判断隔离开关位置^[10-11]。对于具备远方操作的保护装置软压板,采用软压板状态及对应的“XX 功能投入/退出”状态作为操作到位的判据^[12-13]。

2 一键顺控功能仿真验证关键技术

数字孪生变电站基于数字模型的仿真实验可真实地反映物理实体的特征和行为,并具备虚实交互能力。高质量的数字孪生变电站是开展一键顺控功能测试验证的基础,仿真验证过程应用数字化建模与仿真技术、协同交互与可视化技术、潮流仿真计算技术、自动测试技术、防误校核技术、一键顺控智能决策技术,其中数字孪生技术是实现实物设备与仿真验证环境之间数据交互关键技术。

2.1 数字化建模与仿真技术

数字化建模是指利用数字化技术对变电站一次设备、二次设备进行数字化建模,作为数字孪生变电站的基础^[14]。数字化模型可以直观地获取设备状态、位置、故障等信息,为分析顺控失败提供信息支撑。同时,能够对一次设备、二次设备等物理实体实现完全复制和高保真模拟,加深人员对物理实体属性和特征的理解,通过语义建模实现模型自动关联^[15]。

仿真是验证数字孪生变电站的重要手段,数字化建模实现物理实体的数字化和模型化,在建模准确、数据完备的前提下,利用具有确定性规律、机制完备的模型,通过软件对物理实体进行仿真,能够反映物理实体在一定时间段内的状态,完成模型的准确性和有效性验证^[16]。

2.2 协同交互与可视化技术

数字孪生作为一种更为复杂的仿真方法,与传统电力系统仿真相比,与真实系统的数据交互更为频繁。协同交互是指利用交互技术,实现仿真测试系统与实物设备、仿真测试系统内部之间的交互与协同。可视化技术运用可视化展示组件,将变电站一键顺控验证过程可视化展现在人员面前,通过对数字孪生变电站的操作与控制,实现对仿真模型的操作与控制,联动测试画面对仿真测试过程进行展示,扩展测试人员的视觉体验。

2.3 稳态实时潮流计算

变电站一键顺控功能在测试过程中,数字孪生变电站收到一键顺控系统的控制指令,能够联动控制改变对应断路器、隔离开关的位置状态,同时网络结构会随之改变,潮流计算模块自适应调整网络结构,重新计算潮流,为顺控主机反馈遥测数据,使得一键顺控功能仿真测试更符合现场实际情况。

2.4 自动测试技术

目前,一键顺控功能验收依赖于人工现场测试,存在测试效率不高、闭锁条件校验不全等问题,还未有技术手段排查预置顺控票隐含的功能隐患。自动测试技术是指利用计算机、测试设备对一键顺控系统内的预置顺控票进行自动化测试的技术,依托系统或仪器设备实现功能。

自动测试技术实现初始状态与目标状态之间的识别与转换,保证一键顺控功能有效的测试闭环,测试流程标准化,测试过程可视化、透明化,测试判据标准化、精细化。这种自动测试技术的优点是可以对大量预置顺控票分场景进行批量测试,从而提高测试效率。

2.5 防误校核技术

防误校核主要是针对断路器、隔离开关和软压板的远方操作^[17],基于防误闭锁规则分析设备运行状态,实现对操作对象的防误判断^[18]。二次设备防误校核^[19]根据防误规则对操作内容进行防误判断,反馈校核结果,从而完成二次设备操作防误判断^[20]。一键顺控功能验证防误校核技术是一种顺控操作的自适应防误验证技术,基于联合防误逻辑,实现一键顺控功能仿真验证的防误判断,提高测试结果的可靠性。在仿真测试前对操作步骤关联设备状态及防误进行校验,反馈校验结果,当状态不一致或者防误校核不满足时,停止测试并给出提示。在每一步顺控操作执行完成后对操作步骤关联设备的目标状态进行校验,反馈校验结果,当状态不一致时,停止测试并给出提示^[21]。

2.6 一键顺控智能决策技术

一键顺控智能决策技术实现顺控仿真测试过程可视化监控、异常分析定位等功能。顺控仿真测试过程可视化监控是指测试全程可视化,实现测试界面设备状态、操作步骤实时展示,通过联动测试画面对操作过程进行展示。异常分析定位支持对顺控测试过程中各类异常情况进行智能判断和快速定位,

当发生测试异常,应立即检测顺控测试各个环节,定位故障异常所在位置,辅助测试人员决策。

3 一键顺控功能验证测试

一键顺控功能验证的目的在于测试预置顺控票的正确性、防误逻辑的完善性、一键顺控操作的连续性、信号闭锁逻辑的全面性。变电站一键顺控功能仿真验证平台不依赖于变电站的停电计划,在测试过程中能够保证设备、人身、网络的安全。

常规变电站通信规约为综自厂家私有协议或者 IEC 61850 与私有协议混合通信,如何兼容综自厂家私有协议实现常规变电站仿真建模以及一键顺控功能验证测试是工作中遇到的技术难点。因此,创新地提出了虚拟 SCD 文件功能,将综自厂家私有配置文件自动构建虚拟 SCD 文件,从而实现常规变电站一键顺控功能建模仿真及验证测试。

3.1 变电站一键顺控功能仿真验证测试

变电站一键顺控功能仿真验证测试由仿真测试系统、网关机、顺控主机、防误主机离线协同完成。顺控主机与仿真测试系统通过标准协议连接,测试人员使用仿真测试系统调用预置顺控操作票,经防误双校核后,由顺控主机发起顺控执行操作,发送顺控指令至仿真测试系统;仿真测试系统接收顺控指令,进行逻辑判断,模拟一、二次设备状态变化,反馈位置信息;状态变位后,仿真测试系统改变潮流结构,自动计算潮流,反馈遥测数据;顺控主机接收遥信和遥测数据,进行顺控逻辑验证,判断此次顺控操作设备位置是否到位;顺控主机发起下一个顺控执行操作,直至预置顺控票中所有顺控操作验证完毕,从而完成一张预置顺控票的验证。一键顺控功能仿真验证测试过程中,仿真测试系统可以发出事故总、SF₆ 气压低、控制回路断线等闭锁信号,校验顺控系统是否能够终止顺控操作。一键顺控功能仿真验证测试原理和流程如图 2、图 3 所示。

3.2 远方一键顺控功能仿真验证测试

远方一键顺控功能仿真验证测试由集控主站、网关机、顺控主机、防误主机、仿真测试系统形成封闭测试环境。集控主站发起顺控操作调用、预演和执行指令,经过网关机、顺控主机传输指令到仿真测试系统,模拟执行顺控操作,并反馈隔离开关位置信号以及一、二次设备双确认信号、遥测数据至集控主

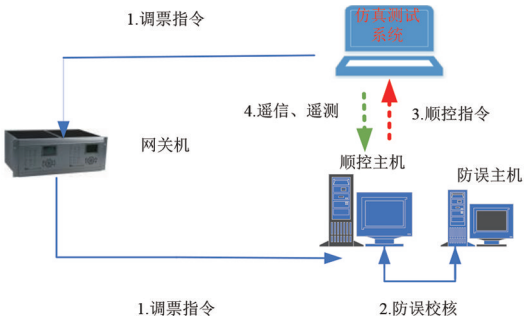


图 2 一键顺控功能仿真验证测试原理

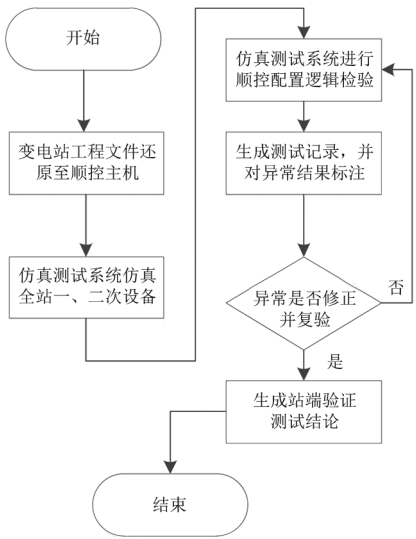


图 3 一键顺控功能仿真验证测试流程

站,直至所有指令执行完毕,从而完成远方一键顺控功能仿真验证测试。远方一键顺控功能仿真验证测试原理和流程如图 4、图 5 所示。

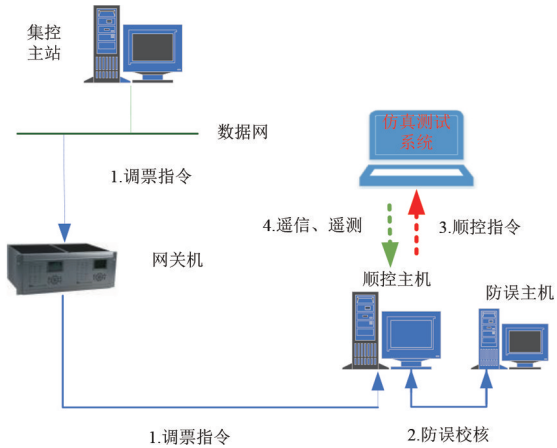


图 4 远方一键顺控功能仿真验证测试原理

4 结 论

上面提出了基于数字孪生技术的一键顺控功能仿真验证方法,基于数字化建模与仿真技术、协同交互与可视化技术、潮流仿真计算技术、自动测试技术、

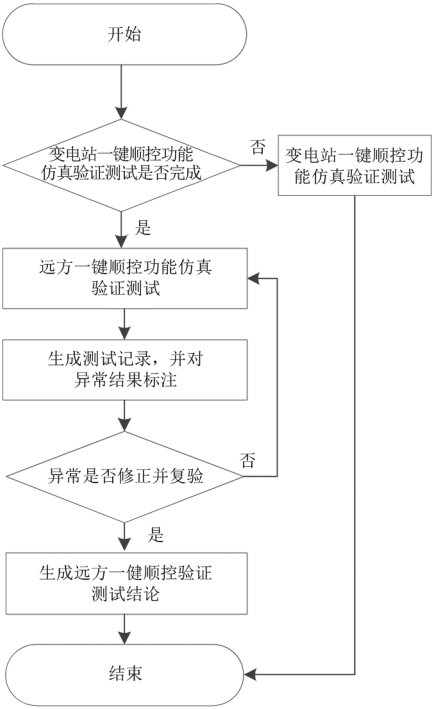


图 5 远方一键顺控功能仿真验证测试流程

防误校核技术、一键顺控智能决策技术等关键技术,在仿真环境构建变电站一键顺控功能仿真验证平台。解决顺控验收难度大、顺控改造停电难等问题,在不依赖于一次设备停电的情况下,基于仿真环境对顺控配置文件进行全面校验,形成了“仿真验证+现场传动”的一键顺控验收新模式,为新、改、扩建变电站高效完成一键顺控功能验收提供新的技术思路。

参考文献

[1] 李广渊,顾颖,郭小江. 虚实结合的 500 kV 智能变电站一键顺控联合验收平台研究与应用[J]. 农村电气化, 2022(2):45-49.

[2] 滕井玉,顾全,王言国,等. 一种顺控操作票不停电校核方法及系统: 112186739B[P]. 2022-05-17.

[3] 张伟,李劲松,刘筱萍,等. 一种智能变电站一键顺控系统的检测方法及其系统: 110989547A[P]. 2020-04-10.

[4] 张骥,张红梅,郑紫尧,等. 一键顺控测试方法、装置及终端设备: 202111391559.8[P]. 2022-02-22.

[5] 蒲鑫,郭飞,李世群,等. 一种变电站的一键顺控操作票测试方法及装置: 113485214A[P]. 2021-10-08.

[6] 徐天天,余栋,张锦龙,等. 基于实验室的变电站一键顺控调试验收平台及装置: 115065163A[P]. 2022-09-16.

[7] 范堃,房萍,王申强. 一键顺控智能化拟票技术研究与应用[J]. 电网与清洁能源, 2019,35(10):43-49.

[8] XIONG Z B, GAN X, GAO Y, et al. Study on application

of one key sequence control in 750 kV substation[C]//2021 6th Asia Conference on Power and Electrical Engineering, April 8 - 11, 2021, Chongqing, China. IEEE, 2021:269-274.

[9] LIU H Y, CAI F D, LV C F, et al. A fish eye recognition algorithm for switch on/off key in sequence control substation[C]//2020 2nd International Conference on Information Technology and Computer Application, December 18 - 20, 2020, Guangzhou, China. IEEE, 2020:143-146.

[10] 陈威,王昊,夏慧,等. 基于调控主站一体化平台的“一键”顺控操作实现方案[J]. 电力系统保护与控制, 2019,47(20): 171-177.

[11] 毛文奇,王舶仲,蒋毅舟,等. 高压隔离开关分合闸位置监测技术的研究综述及展望[J]. 智慧电力, 2019,47(8): 112-119.

[12] 钱海,邱金辉,贾松江,等. 基于 D5000 平台的继电保护远方操作双确认技术研究与应[J]. 电网与清洁能源, 2017,33(7): 19-24.

[13] 尹超勇,李刚,李辉,等. 基于 5G 通信方式的变电站远方备自投原理及实现方法[J]. 湖南电力, 2023, 43(1): 58-62.

[14] 刘海峰,池威威,贾志辉,等. 变电站数字孪生系统的设计与应用[J]. 河北电力技术, 2021,40(3): 8-14.

[15] 宋福海,翟博龙,黄翔宇,等. 面向智能变电站模型应用的二次设备建模优化[J]. 电力自动化设备, 2022,42(11): 218-224.

[16] 王巍,刘永生,廖军,等. 数字孪生关键技术及体系架构[J]. 邮电设计技术, 2021(8): 10-14.

[17] 李琳,阳小丹,黄际元,等. 调度远方顺控关键问题探讨[J]. 湖南电力, 2018,38(6): 70-73.

[18] WANG Y, LI H X, E Shiping, et al. Research on intelligent anti-misoperation technology applied to substation one-button sequential control[C]//2021 4th International Conference on Advanced Electronic Materials, Computers and Software Engineering, March 26 - 28, 2021, Changsha, China. IEEE, 2021:258-261.

[19] 朱磊,曾鹏. 智能变电站二次防误关键点分析及措施[J]. 湖南电力, 2018,38(4):18-20.

[20] 王永明. 智能电网调度控制系统的二次设备防误技术[J]. 电力系统自动化, 2020,44(14):94-100.

[21] 蔡新雷,齐颖. 基于人工智能的电网调度操作智能防误系统建设及实践[J]. 电力大数据, 2020,23(4): 16-23.

作者简介:

丁 禹(1996),男,硕士,工程师,研究方向为电力系统自动化。
(收稿日期:2023-11-21)

Sichuan Shunengdianke Energy Technology Co., Ltd.

四川蜀能电科能源 技术有限公司

四川蜀能电科能源技术有限公司成立于2021年11月19日，注册及建设地为新津区天府智能制造产业园区。注册资本3000万元，为四川科锐得实业集团有限公司与四川蜀电集团有限公司合资企业。

一、业务范围

技术服务、技术开发、技术咨询、技术交流、技术转让、技术推广；信息技术咨询服务；互联网安全服务；互联网数据服务以及检验检测服务等。

1

二、发展方向

依托四川省新型电力系统创新基地的建设，打造成为国网四川省电力公司省管产业单位成果转化与新技术推广重要平台、技术支撑平台 and 专业化物资检测机构。

2

三、发展目标

以专业化高素质检测企业为目标，逐步构建门类齐全、品种完备的调试、检测校验资质体系，不断深入推进科技成果转化，全方位提升公司的社会化竞争能力，力争在两至三年内成功申报高新技术企业。

3

四、重点项目

四川省新型电力系统创新基地建设项目旨在落实国家和四川省“十四五”发展规划，支撑四川省“碳达峰、碳中和”示范样板建设和成渝双城经济圈建设战略部署，实施国家电网公司“一体四翼”战略布局。是国网四川省电力公司考虑当前生产需求和产业发展需要，立足四川，服务西部，面向全国，重点打造的国际领先、国内一流的电网物资质量检测及特高压试验基地。该基地位于新津区天府智能制造产业园区，总用地约69221.67m²，2023年启动建设。

4



四川蜀能电科能源 技术有限公司

Sichuan
Shunengdianke
Energy Technology
Co., Ltd.

致力打造为国网四川省电力公司省管产业单位成果转化平台、新技术推广平台、技术支撑平台、专业化检测机构。

建设四川省新型电力系统创新基地，将成为国际领先、国内一流的电网物资质量检测及特高压试验基地。

门类齐全的调试、检测体系；质量检测、电网分析、新技术集成等领域深厚的技术、人才、软硬件储备。

