中国科技核心期刊

 $\frac{\text{ISSN 1007-9904}}{\text{CN 37-1258/TM}}$





国网山东省电力公司主办

2025.6 第52卷 2025年6月



山东电力技术 SHANDONG ELECTRIC POWER

收录情况

中国科技核心期刊 中国核心期刊(遴选)数据库收录期刊 中国期刊全文数据库(CJFD)收录期刊 中文科技期刊数据库收录期刊 波兰 ICI World of Journals 数据库收录期刊 波兰 ICI Journals Master List 数据库收录期刊 美国《乌利希期刊指南》收录期刊 瑞典开放获取期刊目录(DOAJ)收录期刊

山东电力技术

SHANDONG DIANLI JISHU

(月刊)

1974年创刊 2025年第6期 第52卷(总第331期) 2025年6月25日出版

主管単位: 国网山东省电力公司
主办単位: 国网山东省电力公司
编辑出版: 《山东电力技术》编辑部
地 址: 济南市市中区望岳路 2000 号
邮政编码: 250003
电 话: (0531)67982997
电子信箱: sddljs @ sina.com
网 址: sddljs.cbpt.cnki.net
印 刷: 济南浪宇印刷有限公司
发 行: 公开发行 自办征订

定 价: 18.00 元 / 册

《山东电力技术》编辑委员会

顾问:	陈约	隹江	郑廷	建华	侯伊	荣荣	雷清	青泉	王贞	戊山
主 任:	孙	闵								
副主任:	王作	韦胜	実び	文传	刘王	ΞĦ	陈志	よ 勇	梁作	宾
	田	健								
委 员:	(抱	安姓日	記笔画	面为序	F)					
	1	石砳	1	勇	王	波	王廷	赴东	孙	波
	孙桢	对敏	严元	ド国	苏	洲	吴利	火伟	赵韬	皆
	姜雨	雨泽	郭	锐	彭道	釘刚	董	泽	程亲	劤
青年编委主	E任孝	を员:	姚	伟	李]	E烁				
青年委员:	(抱	安姓日	毛笔 画	面为序	₹)					
	1,	涛	ΞΞ	L柏	王中	冠	王	彬	巨ī	云涛
	牛	涛	刘明	尧明	许	寅	李志	「別	李矢	呓
	杨	越	沈斤	欠炜	陈思	悲捷	郑作	韦业	钟准	軠
	高	嵩	常羣	降月	薛崎	乞洵				
主 编:	吴文	て传	孟	瑜						
执行主编:	马	艳								
责任编辑:	王学	字								

编 辑:郑天茹 娄婷婷 张丹丹 车永强

中国标准连续出版物号: ISSN 1007-9904 CN 37-1258/TM

期刊基本参数: CN 37-1258/TM*1974*m*A4*104*zh*P* ¥18.00*8000*10*2025-6*n

《山东电力技术》入选 中国科教被心期利



きき





余洋,华北电力大学(保定)教授,博导,电自教研室主任,河北省分布式储 能与微网重点实验室副主任,IEEE 中国区储能并网与运行技术分委会/市场与规划 分委会理事,九三学社华电支社副主委,保定市政协委员,保定市委市政府决咨委 委员。承担国家自然科学基金、河北省自然科学基金等 20 余项;在IEEE、IET、《中 国电机工程学报》《电力系统自动化》等国内外权威刊物上发表论文 50 多篇,其中 SCI 检索 20 多篇;申请授权发明专利 60 余项;出版专著 2 部。获得河北省科技进 步二等奖、山西省科技进步二等奖、内蒙古科技进步二等奖、河北省技术发明奖三

等奖各 1 项;入选河北省"三三三人才",燕赵英才 A 卡,获华北电力大学电力工程系首届青年优秀 人才支持计划,南瑞继保奖教金,泰科电子奖教金;主笔提案被省、市级政协采用,连续 3 年被评为 九三学社河北省委参政议政先进个人。



王玉翠,华北电力大学电力工程系教师,东南大学博士。主要从事综合能源系统评估与规划、新型电力系统优化运行等方面的研究工作。近期重点研究方向为电 – 气耦合系统安全性评估与规划等。发表论文 10 余篇,其中 SCI 检索论文 8 篇, EI 检索论文 2 篇,并授权专利两项。参与国家重点研发计划子课题一项,参与国家自然科学基金一项,参与国家电网科技项目十余项。担任国际知名学术期刊《CSEE Journal of Power and Energy Systems》审稿人。

特约主编寄语

在"双碳"目标引领下,构建以新能源为主体的新型电力系统已成为我国能源革命的核心任务。 当前,规模化储能与分布式储能的协同配置、多时间尺度调控、安全防护等核心技术亟待突破,需 要深度融合数字孪生、边缘计算等新兴技术,构建"源-网-荷-储"智能互动新范式。为呈现 储能支撑低碳高品质新型配电系统构建关键技术的全新研究进展与未来走向,解决技术研究与实践 应用中备受关注的难题和热点,《山东电力技术》设立专栏"储能支撑低碳高品质新型配电系统构 建关键技术研究"(此专栏为**第二十七届中国科协年会学术论文专题**),聚焦储能技术在破解新能 源消纳难题、提升供电品质、增强系统韧性等方面的关键作用,以促进技术创新与交流。本期专栏 内容主要包括:虚拟同步发电机调节与控制、微电网多源调度、光储系统容量优化配置等研究方向。 期待通过展示储能领域的前沿理论突破与典型工程实践,促进产学研用协同创新,为新型配电系统 实现"低碳化、高品质、高弹性"三重目标提供系统性解决方案。我们诚挚邀请国内外专家学者分 享真知灼见,共同推动储能技术从"支撑要素"向"核心驱动"转变,为能源电力行业高质量发展 注入新动能。

目 次

储能支撑低碳高品质新型配电系统构建关键技术研究

基于线性自抗扰控制的离网虚拟同步发电机频率调节方法 …… 丁宏志,潘 波,郭晓瑞,文 安,叶 润(1) 计及变流器频率支撑与容量约束的孤岛微电网多源协同调度方法

3利益主体互动下光储系统联合配置的优化方法 …………………………………………. 冯德品,徐 兵,沈 涛,马晓慧(22)

电网运行与控制

基于降阶高增益观测器的构网型光储系统滑模控制 ……… 薛瑞泽,李 星,王嘉力,任俊恒,皇金锋(33) 基于二阶混合卷积窗双谱线插值的谐波检测算法 ………………………………………………… 龙艳萍(44)

数字新基建

基于无监督自适应机制的电力工控流量异常检测方法 ……… 马 力,王 丹,计士禹,刘锦利,石 贺(52) 基于自注意力混合模型的电力物联网流量分类 ……… 王 聪,郑海杰,黄 振,王高洲,曲海鹏(62) 面向智能变电站的时间敏感网络动态时间窗口划分方法 ……… 李 伟,白 杨,祁步仁,徐 建(75)

设备检测与故障诊断

碰摩诱发大型同步调相机转子低频振动故障机理研究 …… 汪海洋,刘晓锋,刘一丹,何小锋,蔡 丹(86) 调相机空冷岛风机故障仿真分析及措施建议 …… 郝亚楠,王 俊,颜 庆,李贵海,郭 语(95)

SHANDONG ELECTRIC POWER

CONTENTS

• Key Technologies for Constructing a Low-carbon and High-quality New Distribution System Supported by
Energy Storage •
Frequency Regulation Method for Off–grid Virtual Synchronous Generators Based on Linear Active Disturbance
Rejection Control
Multi-source Collaborative Scheduling Method for Islanded Microgrids Considering Converter Frequency Support and
Capacity Constraints DENG Meiling, JIANG Tongcai, BAI Zhenyi, LIN Jian, CHEN Yongjin, WU Zilong(10)
Optimal Method for Joint Configuration of Photovoltaic Storage Systems Under Multi–stakeholder Interaction
FENG Depin, XU Bing, SHEN Tao, MA Xiaohui(22)
Power Grid Operation and Control
Sliding Mode Control of Grid-forming PV-storage System Based on Reduced-order High Gain Observer
Harmonic Detection Algorithm Based on Second-order Hybrid Convolutional Window Bispectral Line Interpolation
LONG Yanping(44)
•Digital New Infrastructure•
LONG Yanping(44) Digital New Infrastructure Anomaly Detection Method for Power Industrial Control System Flow Based on Unsupervised Adaptive Mechanism
 Digital New Infrastructure Anomaly Detection Method for Power Industrial Control System Flow Based on Unsupervised Adaptive Mechanism MA Li, WANG Dan, JI Shiyu, LIU Jinli, SHI He(52)
 LONG Yanping(44) Digital New Infrastructure Anomaly Detection Method for Power Industrial Control System Flow Based on Unsupervised Adaptive Mechanism MA Li, WANG Dan, JI Shiyu, LIU Jinli, SHI He(52) Traffic Classification of Power IoT Based on Self-attention Hybrid Model
 LONG Yanping(44) Digital New Infrastructure Anomaly Detection Method for Power Industrial Control System Flow Based on Unsupervised Adaptive Mechanism MA Li, WANG Dan, JI Shiyu, LIU Jinli, SHI He(52) Traffic Classification of Power IoT Based on Self-attention Hybrid Model WANG Cong, ZHENG Haijie, HUANG Zhen, WANG Gaozhou, QU Haipeng(62)
 LONG Yanping(44) Digital New Infrastructure • Anomaly Detection Method for Power Industrial Control System Flow Based on Unsupervised Adaptive Mechanism MA Li, WANG Dan, JI Shiyu, LIU Jinli, SHI He(52) Traffic Classification of Power IoT Based on Self-attention Hybrid Model WANG Cong, ZHENG Haijie, HUANG Zhen, WANG Gaozhou, QU Haipeng(62) Dynamic Time Window Division of Time-sensitive Networking in Intelligent Substation
 LONG Yanping(44) Digital New Infrastructure Anomaly Detection Method for Power Industrial Control System Flow Based on Unsupervised Adaptive Mechanism MA Li, WANG Dan, JI Shiyu, LIU Jinli, SHI He(52) Traffic Classification of Power IoT Based on Self-attention Hybrid Model WANG Cong, ZHENG Haijie, HUANG Zhen, WANG Gaozhou, QU Haipeng(62) Dynamic Time Window Division of Time-sensitive Networking in Intelligent Substation LI Wei, BAI Yang, QI Buren, XU Jian(75)
 Digital New Infrastructure Anomaly Detection Method for Power Industrial Control System Flow Based on Unsupervised Adaptive Mechanism MA Li, WANG Dan, JI Shiyu, LIU Jinli, SHI He(52) Traffic Classification of Power IoT Based on Self-attention Hybrid Model WANG Cong, ZHENG Haijie, HUANG Zhen, WANG Gaozhou, QU Haipeng(62) Dynamic Time Window Division of Time-sensitive Networking in Intelligent Substation LI Wei, BAI Yang, QI Buren, XU Jian(75) Equipment Inspection and Fault Diagnosis
 Digital New Infrastructure Anomaly Detection Method for Power Industrial Control System Flow Based on Unsupervised Adaptive Mechanism MA Li, WANG Dan, JI Shiyu, LIU Jinli, SHI He(52) Traffic Classification of Power IoT Based on Self-attention Hybrid Model WANG Cong, ZHENG Haijie, HUANG Zhen, WANG Gaozhou, QU Haipeng(62) Dynamic Time Window Division of Time-sensitive Networking in Intelligent Substation LI Wei, BAI Yang, QI Buren, XU Jian(75) Equipment Inspection and Fault Diagnosis Study on Mechanism of Low Frequency Vibration Fault of Large Synchronous Condenser Rotor Induced by Rubbing
 Digital New Infrastructure • Anomaly Detection Method for Power Industrial Control System Flow Based on Unsupervised Adaptive Mechanism MA Li, WANG Dan, JI Shiyu, LIU Jinli, SHI He(52) Traffic Classification of Power IoT Based on Self-attention Hybrid Model WANG Cong, ZHENG Haijie, HUANG Zhen, WANG Gaozhou, QU Haipeng(62) Dynamic Time Window Division of Time-sensitive Networking in Intelligent Substation LI Wei, BAI Yang, QI Buren, XU Jian(75) *Equipment Inspection and Fault Diagnosis • Study on Mechanism of Low Frequency Vibration Fault of Large Synchronous Condenser Rotor Induced by Rubbing WANG Haiyang, LIU Xiaofeng, LIU Yidan, HE Xiaofeng, CAI Dan(86)
 Digital New Infrastructure • Anomaly Detection Method for Power Industrial Control System Flow Based on Unsupervised Adaptive Mechanism MA Li, WANG Dan, JI Shiyu, LIU Jinli, SHI He(52) Traffic Classification of Power IoT Based on Self-attention Hybrid Model WANG Cong, ZHENG Haijie, HUANG Zhen, WANG Gaozhou, QU Haipeng(62) Dynamic Time Window Division of Time-sensitive Networking in Intelligent Substation LI Wei, BAI Yang, QI Buren, XU Jian(75) Equipment Inspection and Fault Diagnosis • Study on Mechanism of Low Frequency Vibration Fault of Large Synchronous Condenser Rotor Induced by Rubbing WANG Haiyang, LIU Xiaofeng, LIU Yidan, HE Xiaofeng, CAI Dan(86) Fault Simulation Analysis and Measures for the Synchronous Condenser Air Cooling Island Fan

SHANDONG ELECTRIC POWER

(Monthly, Started in 1974)

Administration State Grid Shandong Electric Power Company Sponsor State Grid Shandong Electric Power Company Edited by Editorial Department of Shandong Electric Power Chief Editor WU Wenchuan MENG Yu Address No.2000, Wangyue Road, Jinan, China 250003 DOI:10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2025.06.001

 ·储能支撑低碳高品质新型配电系统 构建关键技术研究・

基于线性自抗扰控制的离网虚拟同步发电机频率调节方法

丁宏志1,潘 波2,郭晓瑞1*,文 安3,叶 润3,4

(1.湖州师范学院,浙江 湖州 313000;2.国网浙江省安吉县供电有限公司,浙江 湖州 313300;
 3.电子科技大学长三角研究院(湖州),浙江 湖州 313001;4.电子科技大学自动化工程学院,四川 成都 611731)

摘要:现有虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)离网模式下负载突变引起频率波动,传统比例积分 (proportional-integral, PI)控制存在的动态响应不足,针对上述问题,提出一种基于线性自抗扰控制(linear active disturbance rejection control,LADRC)的VSG二次调频策略。首先建立离网VSG的数学模型,并设计LADRC频率控制方案,其核心采用线性扩张状态观测器(linear extended state observer,LESO)实时观测并估计系统总扰动,通过线性状态误差反馈(linear state error feedback,LSEF)实现动态补偿。最后通过MATLAB/Simulink平台搭建仿真模型,对比分析 PI控制和LADRC在不同负载突变场景下的频率调节性能。仿真结果显示,相较于传统 PI控制,LADRC具有更优的抗扰能力和更快的动态响应速度,可显著降低频率波动,增强微电网频率动态稳定特性,尤其在多次连续负荷扰动下仍能保持稳定的控制效果。研究结果为离网 VSG频率控制策略的优化设计提供了理论依据和技术参考,对提高微电网或独立电力系统的稳定性具有实际应用价值。

关键词:虚拟同步发电机;线性自抗扰控制;二次调频;动态响应;负荷扰动
 中图分类号:TM761
 文献标志码:A
 文章编号:1007-9904(2025)06-0001-09

Frequency Regulation Method for Off-grid Virtual Synchronous Generators Based on Linear Active Disturbance Rejection Control

DING Hongzhi¹, PAN Bo², GUO Xiaorui^{1*}, WEN An³, YE Run^{3,4}

(1.Huzhou University, Huzhou 313000, China;

2. State Grid Zhejiang Anji County Power Supply Company, Huzhou 313300, China;

3. Yangtze Delta Region Institute (Huzhou), University of Electronic Science and Technology of China, Huzhou, 313001, China; 4. School of Automation Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: To address the frequency fluctuation issue caused by load mutations in the offline mode of virtual synchronous generators (VSG) and the insufficient dynamic response of traditional proportional-integral (PI) control, this paper proposes a VSG secondary frequency regulation strategy based on linear active disturbance rejection control (LADRC). First, the mathematical model of the off-grid VSG is established, and a LADRC-based frequency control scheme is designed. Its core employs a linear extended state observer (LESO) to observe and estimate the total system disturbances in real time, achieving dynamic compensation through linear state error feedback (LSEF).Finally, a simulation model is built on the Matlab/Simulink platform to conduct comparative analysis of the frequency regulation performance of PI control, LADRC exhibits superior anti-disturbance capability and faster dynamic response speed, significantly reducing frequency fluctuations and enhancing the dynamic stability characteristics of microgrid frequency.Notably, it maintains stable control performance even under multiple continuous load disturbances. The research results provide a theoretical basis and technical reference for optimizing the frequency control strategy of off-grid VSGs, offering practical application value for improving the stability of microgrids or independent power systems.

Keywords: virtual synchronous generator; linear active disturbance rejection control; secondary frequency regulation; dynamic response; load disturbance

基金项目:浙江省电力有限公司集体企业科技项目资助(HZTLKJ2023-01);四川省科技计划区域创新项目(2024YFHZ0089)。

Zhejiang Electric Power Corporation Collective Enterprise Technology Project Funding (HZTLKJ2023-01); Sichuan Regional Innovation Project of Science and Technology Program (2024YFHZ0089).

0 引言

随着新能源技术的快速发展,风力发电、光伏发 电等分布式电源在微电网中的渗透率持续增加^[1]。 然而,这些新能源发电方式缺乏惯性支撑,导致微电 网在离网运行时频率稳定性较差,特别是在负荷突 变时,容易产生较大频率波动^[2],从而影响系统的安 全性与供电质量。基于虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)原理的控制技术能够复 现同步电机特有的机械惯性与阻尼特性,使逆变电 源具备类似同步机的动态响应能力,从而提升微电 网的频率调节能力^[3]。然而, VSG 的频率调节效果 受控制策略的影响较大,如何优化控制方法以提高 其对负荷扰动的适应性,仍然是当前研究的热点^[4]。

近年来,二次调频技术在微电网频率调节中的 应用日益广泛^[5]。在离网模式下,二次调频的主要 目标是弥补 VSG 惯量模拟的不足^[6],并有效提高频 率的动态响应能力与稳态恢复性能。传统二次调频 方 法 通 常 基 于 经 典 控 制 理 论,如 比 例 积 分 (proportional-integral, PI)控制及变参数 PI 控制^[7], 实现稳态频率恢复。然而,这些方法在面对复杂负 荷扰动时,存在动态调节速度与静态控制精度之间 的优化矛盾,容易导致频率超调或恢复缓慢等问题。

线性自抗扰控制 (linear active disturbance rejection control,LADRC)作为一种基于总扰动估计 与补偿的鲁棒控制方法,通过线性扩张状态观测器 (linear extended state observer, LESO)实现系统内外 扰动的实时动态估计,并利用反馈控制律主动抵消 扰动^[8]。在电力电子变换器、电机驱动等快速动态 系统中,LADRC已被验证可有效抑制高频扰动并提 升动态响应速度[9]。值得关注的是,相较于需要增 加硬件的电容电流反馈有源阻尼或存在微分困难的 并网电流反馈方案,LADRC已被成功应用于 LCL 型 逆变器的无传感器谐振控制^[10],验证了其在复杂电 气系统中的扰动抑制潜力。在新能源发电领域,基 于 LADRC 的最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT) 控制器能显著提升光伏系统动态性 能,在剧烈环境变化下仍可减少功率振荡并加速最 大功率点跟踪^[11],这充分体现了 LADRC 在新能源功 率控制中的强鲁棒性。进一步地,针对 VSG 系统中 负载突变导致的频率波动问题,文献[12]提出的基 于二阶 LADRC 的频率无静差调节策略,可实现快速 二次调频。此外,文献[13]则通过将二阶 LADRC 引 入 VSG 并网预同步控制环节,替代传统 PI 控制器, 不仅实现了对电网电压幅值、相位和频率的高精度 跟踪,还显著改善了并网过程的平滑性。

为解决离网模式下 VSG 系统在负载突变的频 率稳定问题,提出将一阶 LADRC 应用于二次调频环 节。建立 VSG 机电暂态模型与 LADRC 扰动观测器 的耦合关系,通过带宽参数化设计方法以简化控制 器整定过程。基于仿真平台 MATLAB/Simulink 建立 系统模型,通过模拟不同负荷扰动工况,对比分析 LADRC 与传统 PI 控制在系统超调量、稳态精度及动 态响应速度等方面的性能差异。仿真结果表明,所 提出的 LADRC 控制策略能有效改善 VSG 系统的功 率输出特性与频率动态响应,为提升微电网离网运 行时的频率支撑提供了新的理论依据。

1 VSG基本原理

以构网型 VSG 控制的离网微电网系统为研究 对象。离网微电网需要自主维持频率和电压的稳 定,并实现功率平衡^[14]。基于同步发电机转子运动 方程,有功频率调节使 VSG 能够响应电网频率变化, 提供惯性支撑和阻尼作用^[15];无功电压控制则通过模 拟励磁系统或电压外环调节输出电压,以维持电网电 压稳定^[16]。建立的 VSG 系统拓扑如图 1 所示。



图 1 VSG主电路拓扑及控制 Fig.1 Main circuit topology and control structure of VSG

图 1 中, U_{dc} 为直流侧等效电压源; L_{f} 和 C_{f} 构成

LC型滤波器, $R_{\rm f}$ 与滤波电感串联; $L_{\rm I}$ 和 $R_{\rm I}$ 为 VSG 所 带负载; $e_{\rm a}$ 、 $e_{\rm b}$ 、 $e_{\rm c}$ 分别为逆变器输出电压; $i_{\rm a}$ 、 $i_{\rm b}$ 、 $i_{\rm c}$ 和 $i_{\rm abc}$ 为逆变器输出电流; $u_{\rm abc}$ 为逆变器机端电压; ω 为机 械角速度; $\omega_{\rm n}$ 为额定角速度; $P_{\rm e}$ 和 $Q_{\rm e}$ 分别为 VSG 输 出有功功率和无功功率; $P_{\rm ref}$ 和 $Q_{\rm ref}$ 分别为有功功率 和无功功率给定值; $E_{\rm n}$ 为 VSG 空载电动势。 VSG 控 制器输出参考电压的相角 φ 和相电压幅值 $E_{\rm m}$, 经过 电压电流双闭环控制, 最后通过空间矢量脉宽调制 (space vector pulse width modulation, SVPWM)得到逆 变器的开关信号^[17]。

为准确复现同步发电机的动态响应特性,基于 机电暂态二阶模型构建的 VSG 有功频率调节方 程为^[18]

$$\begin{cases} J \frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} = \frac{P_{\mathrm{m}}}{\omega_{\mathrm{n}}} - \frac{P_{\mathrm{e}}}{\omega_{\mathrm{n}}} - D(\omega - \omega_{\mathrm{n}}) \\ \frac{\mathrm{d}\delta}{\mathrm{d}t} = \omega - \omega_{\mathrm{n}} \end{cases}$$
(1)

式中: P_m 为 VSG 机械功率;D为阻尼系数;J为转动 惯量; δ 为 VSG 功角。

输出功率由调速器决定,调速器方程为

 $P_{m} = P_{ref} - K_{f}(\omega - \omega_{n})$ (2) 式中:K_f为有功调节系数。

VSG 通过模拟同步发电机的惯性响应和调频特性,实现有功功率和频率的动态平衡。当有功负荷 突变时,依靠惯性平缓频率波动,减少冲击。并通过 下垂控制调整有功功率输出,促使系统频率逐步恢 复稳态,从而提升电网稳定性和调节能力^[19]。

通过调节 VSG 的虚拟电势来实现端电压及无 功功率的调整,对无功功率调压可增加误差积分进 行优化,实现微电网运行时电压稳态特性,控制方 程为^[20]

 $E_{\rm m} = E_{\rm n} + K_{\rm q}(Q_{\rm ref} - Q_{e}) + K_{\rm u}(U_{\rm ref} - U)$ (3) 式中: $K_{\rm q}$ 为无功调节系数; $K_{\rm u}$ 为电压调节系数; $U_{\rm ref}$ 为逆变器端电压指令值;U为逆变器端电压实际值。

VSG的无功控制策略具有双重调节功能,不仅 实现精确无功功率跟踪,还能根据并网点电压偏差 动态提供无功支撑,有效参与微电网电压调节^[21]。

2 基于PI控制的二次调频

当 VSG 处于离网独立运行工况时,负载的突增 或突降会导致功率失衡,引起系统频率波动。由于 VSG一次调频的补偿能力有限,难以完全恢复频率,可能影响系统稳定性。此时,二次调频对于维持系统长期稳定至关重要^[22]。图 2 为基于 PI 控制的 VSG二次调频方法,在阻尼环节引入积分控制,与阻 尼转矩构成 PI 控制器,实现额定频率跟踪,使 VSG 随负荷变化调整功率输出,恢复系统频率并提供支 撑,其控制方程可表示为

$$J\omega_{n} \frac{d\omega}{dt} = P_{ref} - P_{e} - K_{d} (\omega - \omega_{n}) - K_{i} \omega_{n} \int (\omega - \omega_{n}) dt$$
(4)

式中: $K_{d} = K_{f} + D\omega_{n} \pi K_{i}$ 分别为 PI 控制的比例和积 分系数。



Fig.2 Block diagram of secondary frequency regulation system based on PI control

基于 PI 控制的二次调频可逐步恢复系统频率, 但动态响应较慢,调节时间长,对突发扰动适应性较 差。此外,二次调频依赖 PI 控制,不同负载下需重 新调节参数,整定困难,可能导致稳态误差或系统振 荡^[23]。LADRC 通过实时观测扰动并主动补偿,实现 更快的频率恢复和更强的抗扰动能力,显著提升系 统动态性能和稳定性。因此,本文采用基于 LADRC 的二次调频策略。

3 基于LADRC的二次调频

针对离网模式下 VSG 因缺乏大电网支撑导致的频率稳定性问题,本节在二次调频环节引入 LADRC策略,从扰动估计-补偿机制和带宽参数化 设计两方面,详细分析 LADRC 如何通过抑制负荷扰 动来提升频率调节性能。为明确 LADRC 对系统动 态特性的改善作用,需要建立其与 VSG 转子运动方 程的耦合关系,揭示观测器带宽与频率恢复速度的 内在联系。接下来,将推导 LADRC 控制下的 VSG 频率调节模型,并分析其控制特性。 根据式(1)可知, VSG 为一阶系统, 对其变换可得

$$\frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{J\omega_{\mathrm{n}}} \left[P_{\mathrm{ref}} - P_{\mathrm{e}} - K_{\mathrm{f}}(\omega - \omega_{\mathrm{n}}) - D\omega_{\mathrm{n}}\omega \right] - \frac{D}{I}\omega_{\mathrm{n}}$$
(5)

假设系统的精确数学模型未知,并考虑外部干扰 w,被控对象 VSG 的时域表达式可表示为

$$\dot{y} = f(t, y, w) + b_0 u \tag{6}$$

式中: y 为系统对象的输入; f 为 VSG 内部不确定性 和外部扰动的总扰动函数, 如式(7)所示; b₀ 为补偿 因子, 如式(8)所示; u 为系统对象的输入, 如式(9) 所示。

$$f(t, y, w) = \frac{1}{J\omega_{n}} \left[P_{ref} - P_{e} - K_{f}(\omega - \omega_{n}) - D\omega_{n}\omega \right] (7)$$

$$b_0 = -\frac{D}{J} \tag{8}$$

$$u = \omega_n \tag{9}$$

系统的动态特性可在状态空间形式中表示为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + E\dot{f}(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases}$$
(10)

式中: $A \ B \ E \ C$ 为状态空间系数矩阵,依次取为 $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} b \\ 0 \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}.$

建立 LESO 的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = \beta_1 (y - z_1) + z_2 + b_0 u \\ \dot{z}_2 = \beta_2 (y - z_1) \end{cases}$$
(11)

式中: β_1 和 β_2 为待定系数; z_1 和 z_2 为控制器中间变量。由此可得 LESO 的状态方程如式(12)所示。

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_1 \\ \dot{z}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\beta_1 & 1 \\ -\beta_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_0 & \beta_1 \\ 0 & \beta_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ y \end{bmatrix}$$
(12)

对式(12)进行频域转换,推导得到其复频域表 达式为

$$\begin{bmatrix} z_1(s) \\ z_2(s) \end{bmatrix} = \frac{1}{s^2 + \beta_1 s + \beta_2} \begin{bmatrix} b_0 s & \beta_1 s + \beta_2 \\ -b_0 \beta_2 & \beta_2 s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U(s) \\ Y(s) \end{bmatrix} (13)$$

根据式(13)可求得 LESO 的特征方程为

$$\lambda(s) = s^2 + \beta_1 s + \beta_2 \tag{14}$$

选取理想的特征方程 $\lambda(s) = (s + \omega_0)^2$,则满足 式(15)。

$$\begin{cases} \beta_1 = 2\omega_0 \\ \beta_2 = \omega_0^2 \end{cases}$$
(15)

式中:ω。为观测器带宽。

一阶 LADRC 结构如图 3 所示,主要由两个控制 回路组成,用于控制被控对象 PLANT。内环为扰动 抑制环,通过 LESO 实时估计并补偿系统的总扰动, 其有效性取决于 LESO 对扰动的准确估计^[24]。外环 为反馈控制环,通过反馈控制器调节控制输入,使系 统输出跟踪期望值,图中r是期望值的参考输入。



图 3 一阶 LADRC 模型 Fig.3 First-order LADRC model

根据图 3,可以推导 LSEF 控制律的表达式为

$$u = \frac{K_{\rm p}(r - z_1) - z_2}{b_0} \tag{16}$$

式中:K_p为LSEF的增益,为待定参数。

由式(13)可得

$$\begin{cases} z_1(s) = \frac{b_0 s U(s) + \beta_1 s Y(s) + \beta_2 Y(s)}{s^2 + \beta_1 s + \beta_2} \\ z_2(s) = \frac{\beta_2 s Y(s) - b_0 \beta_2 U(s)}{s^2 + \beta_1 s + \beta_2} \end{cases}$$
(17)

对式(16)拉普拉斯变换可得

$$U(s) = \frac{K_{p}[R(s) - z_{1}(s)] - z_{2}(s)}{b_{0}}$$
(18)

将式(17)代入式(18)化简可得:

$$U(s) = \frac{1}{b_0} C(s) \left[K_p R(s) - Y(s) H(s) \right]$$
(19)

$$C(s) = \frac{s^2 + \beta_1 s + \beta_2}{(s + K_p + \beta_1) s}$$
(20)

$$H(s) = \frac{(K_{\rm p}\beta_1 + \beta_2)s + K_{\rm p}\beta_2}{s^2 + \beta_1 s + \beta_2}$$
(21)

根据式(19)可得到 VSG 的一阶 LADRC 框图如 图 4 所示。

为了利用频率响应来研究系统的稳定性和性能,通过结合式(13)和式(16),代入S域中的式(6),得到控制输出为



图 4 一阶 LADRC 框图 Fig.4 Block diagram of first-order LADRC

$$Y(s) = \frac{1}{s} \left(F(s) + b_0 U(s) \right)$$
(22)

控制输出由参考跟踪项 *U*(*s*)和干扰抑制项 *F*(*s*)组成,简化可得:

$$Y(s) = G_{fy}(s)F(s) + G_{ry}(s)R(s)$$
(23)

$$G_{\rm fy}(s) = \frac{(s + \beta_1 + K_{\rm p})s}{(s + K_{\rm p})(s^2 + \beta_1 s + \beta_2)}$$
(24)

$$G_{\rm ry}(s) = \frac{K_{\rm p}}{s + K_{\rm p}} \tag{25}$$

基于 LADRC 参数整定方法^[25], $K_p = \omega_e, \omega_e$ 为控 制器带宽。显然,闭环控制的稳定性主要受 ω_e 和 ω_0 的影响。在不考虑外部扰动F(s)的情况下,闭环系 统的传递函数可简化为仅包含参考输入响应的形 式为

$$Y(s) = \frac{K_{\rm p}}{s + K_{\rm p}} \tag{26}$$

与传统方法相比,LADRC不依赖于精确的系统 模型,能够自适应不同负载变化,减少参数整定的复 杂性。

在这种情况下,系统的跟踪性能主要受 ω_e 的影响。合理选择 ω_e 能够在保证快速跟踪参考信号的同时,有效抑制超调^[26]。从图 5 的伯德图可以看出,随着 ω_e 的增大,频率特性曲线右移,加快系统的动态响应速度。这是因为 ω_e 的增加使得控制器能够更快地响应参考信号的变化,从而缩短系统的调节时间。然而,过高的 ω_e 可能会降低系统的稳定裕度,增加系统的不稳定风险。因此,在实际设计中,需要权衡响应速度与稳定性,以达到最佳效果。



control bandwidth $\omega_{
m c}$

在考虑外部扰动F(s)时,系统的抗干扰能力主要取决于 ω_{0} 和 ω_{0} 。从图6的频率响应结果可以看出,增大 ω_{0} 可提升中频段的相位裕度,从而增强系统对干扰的抑制能力并优化动态响应特性。同时,该措施还能显著降低低频扰动的影响。研究结果表明,在确保系统稳定性的前提下,合理增加 ω_{0} 有助于提高整体控制性能。





同理,从图7的伯德图可以看出,增加 ω_{o} 可提

升中频段的相位裕度,从而有助于提高系统的抗干 扰能力。但随着ω。的增大,系统能够有效跟踪和响 应的频率范围变大,带宽越高,系统能更快地响应高 频输入信号以及噪声,可能会降低系统的噪声抑制 性能。因此,在实际应用中,ω。的选取需要综合考虑 状态估计的快速性和系统对测量噪声的鲁棒性,以 在动态性能和抗扰性能之间取得最佳平衡。



bandwidth ω_{c}

4 仿真分析

4.1 仿真参数设置

所构建的离网微电网系统额定容量为50kW, 由1台50kW储能支撑型VSG和30kW阻性负载组 成。VSG通过阻抗线路接入负载母线,无其他分布 式电源。通过在MATLAB/Simulink环境中建立了 VSG控制仿真系统,结果表明该策略在系统稳定性 和动态调节性能方面表现显著优势。该模型用于模 拟逆变器在不同工况下的运行特性,并评估控制策 略对系统稳定性、动态响应及抗干扰能力的影响。 系统的主要仿真参数如表1所示。

4.2 仿真结果及分析

在离网模式下,采用时域仿真方法对 VSG 进行 动态特性测试。初始时刻,有功功率指令值和负载 均为 20 kW。在 0.5 s 时负荷突增 10 kW,在 1 s 时负 荷突降 10 kW,仿真时长为 1.5 s。

图 8 展示了负荷阶跃变化工况下系统频率的动

态响应过程。采用传统 VSG 控制策略时,由于无法 消除频率偏差,负荷突变导致系统输出频率骤降至 49.51 Hz,这种频率波动可能对系统其他元件造成较 大冲击。而 PI 控制的 VSG 方案虽然最终能够消除 频率偏差,但其动态响应较慢,并伴随较大的超调。 仿真结果表明,在 PI 控制下,系统频率的恢复时间为 0.24 s,超调 幅度达到 0.26 Hz。相比之下,基于 LADRC 的 VSG 频率控制策略通过扰动观测与前馈 补偿,显著提升了系统的动态响应性能。在相同工况 下,该策略的恢复时间缩短至 0.08 s,超调幅度降低至 0.03 Hz,能够更快地稳定系统频率,并实现无静差调 节。因此,相较于传统控制方案,所提 LADRC 方案在 动态响应速度和频率稳定性方面均表现出明显优势。

表1 VSG 系统参数 Table 1 Parameters of VSG system

参数	数值	参数	数值
$P_{\rm ref}/{\rm kW}$	20	$U_{ m dc}/ m V$	800
$Q_{\rm ref}/{\rm kvar}$	5	$U_{\rm g}/{ m V}$	220
$L_{\rm f}/{\rm mH}$	5	$R_{\rm f}/\Omega$	1
$C_{\rm f}/{\rm mF}$	0.2	K _q	20
$\omega_n/(\text{ rad/s})$	100π	$K_{\rm f}$	0.05
$J/(\mathrm{kg}\cdot\mathrm{m}^2)$	0.2	$K_{\rm i}$	600
$D/(N \cdot m \cdot s/rad)$	10	K_{u}	0.01





VSG输出有功功率波形如图9所示。从波形可以看出,LADRC控制策略能够快速调整VSG的有功

功率输出,以适应负荷变化。在负荷突增时,系统功 率迅速上升,基本无超调,短时间内达到新的稳态; 在负荷突降时,系统功率同样能够迅速下降,并稳定 在额定值。



从图 10 可以看出,LADRC 控制能够有效维持 系统电压与电流的稳定性,并在负荷突变时展现 出良好的动态响应特性。在 0.5 s 负荷突增 10 kW 时,电流幅值迅速上升以匹配负荷需求,而电压仅出 现极小波动,并能迅速恢复稳态。在 1.0 s 负荷突降 10 kW 时,电流幅值迅速下降,系统电压仍保持稳 定,无明显震荡或过冲。



从图 11 与图 12 可以看到中间状态变量 u 和 z₁ 的变化情况。当 0.5 s 发生负荷扰动时, LADRC 的控 制量 u 迅速提高, 通过调节 VSG 的功率参考值来补 偿负荷扰动, 最终使系统恢复频率稳定; 同时, LESO 的状态估计量 z₁ 能快速跟踪实际频率, 为控制器提 供实时扰动观测。



enlarged view



因此,基于 LADRC 的 VSG 控制策略的动态调整能力较强,能够在负荷突变后快速恢复稳态,表现

出恢复时间短、超调小、波动幅度低的优势。相比传 统控制方法,LADRC能够实时观测系统扰动并进行 补偿,提升 VSG 的抗干扰能力。在实际应用中,该 策略有助于增强离网 VSG 的电压频率支撑能力,提 高微电网在孤岛模式下的稳定性,为复杂工况下的 稳定运行提供保障。

5 结论

针对离网模式下 VSG 的二次调频问题,提出一种 基于 LADRC 的控制策略。通过建立详细的 VSG 数学 模型,在 MATLAB/Simulink 仿真平台上进行了系统的 对比研究,通过理论分析与仿真验证得出以下结论:

1)在负载突变情况下,对比 VSG 传统 PI 控制的 二次调频,LADRC 有着显著性能优势。频率最大偏 差降低 88%(从 0.26 Hz 至 0.03 Hz),恢复时间缩短 66%(从 0.24 s 至 0.08 s)。

2)LADRC 控制策略不仅提升了频率稳定性,还 能增强系统的抗干扰能力,使 VSG 能够适应更复杂 的工况。

3)所提方法适用于小容量离网微电网,在单台 VSG场景下能够维持频率稳定,且无需精确的系统 模型参数。

综上,基于 LADRC 的 VSG 频率控制方法能够 有效提升系统的动态性能和频率稳定性。针对离网 模式下 VSG 的频率动态响应快速性问题,通过 LADRC 改善系统的动态惯量支撑能力。二次调频 在维持系统频率稳定的同时,往往面临显著的经济 性约束(如储能寿命损耗、燃料成本)。尽管本文未 显著考虑此类参数,但未来研究可进一步结合经济 性优化目标,对 VSG 的调频参数进行多目标协同设 计,并深入探讨多 VSG 协同调频策略。

参考文献

- [1] 陈哲,李山林,林达,等.考虑拓扑切换暂态波动的微电网群分 布式协同控制策略[J].浙江电力,2023,42(11):1-10.
 CHEN Zhe, LI Shanlin, LIN Da, et al. A distributed cooperative control strategy for MGC considering transient fluctua-tions in topology switching [J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42 (11): 1-10.
- [2] 郝晓光,马瑞,李剑锋,等.考虑负荷变化的VSG并网模型预测 有功补偿控制方法[J].电力系统及其自动化学报,2024,36 (10):135-142.

HAO Xiaoguang, MA Rui, LI Jianfeng, et al. Predictive active

power compensation control method for VSG grid-connected model considering load variation [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2024, 36(10):135-142.

- [3] 施凯,赵棒棒,徐培凤,等.多虚拟同步发电机并联系统的改进 控制策略[J].分布式能源,2023,8(2):11-18.
 SHI Kai, ZHAO Bangbang, XU Peifeng, et al. Improved control strategy of multi virtual synchronous generators parallel system[J].
 Distributed Energy,2023,8(2):11-18.
- [4] 刘彦军,何维,朱东海,等.基于二阶 VSG 的变换器频率支撑能 力评估及提升方法[J].电力建设,2024,45(11):102-113.
 LIU Yanjun, HE Wei, ZHU Donghai, et al. Evaluation and improving method of frequency support of converters based on second-order VSG section[J].Electric Power Construction,2024, 45(11):102-113.
- [5] 李大勇,孙健威,黄永胜,等.新能源发电侧储能技术应用研究
 [J].能源与节能,2024(10):27-29.
 LI Dayong, SUN Jianwei, HUANG Yongsheng, et al. Application of energy storage technology on side of new energy generation [J].
 Energy and Energy Conservation,2024(10):27-29.
- [6] 杨朋威,常圆圆,任正.基于 VSG 的孤岛微网电压及频率二次调 节控制方法[J].分布式能源,2024,9(1):19-25. YANG Pengwei, CHANG Yuanyuan, REN Zheng. Secondary regulation control method of voltage and frequency for isolated island microgrid based on VSG [J]. Distributed Energy, 2024, 9 (1):19-25.
- [7] 朱子民,张锦芳,常清,等.大规模新能源接入弱同步支撑柔直
 系统的送端自适应 VSG 控制策略[J].中国电力,2024,57(5):
 211-221.

ZHU Zimin, ZHANG Jinfang, CHANG Qing, et al. Adaptive VSG control strategy of sending end for large-scale renewable energy connected to weakly-synchronized support VSC-HVDC system [J].Electric Power, 2024, 57(5);211-221.

- [8] 韩京清.自抗扰控制技术[J].前沿科学,2007,1(1):24-31.
 HAN Jingqing. Auto disturbances rejection control technique [J].
 Frontier Science, 2007,1(1):24-31.
- [9] 周凯,孙彦成,王旭东,等.永磁同步电机的自抗扰控制调速策略[J].电机与控制学报,2018,22(2):57-63.
 ZHOU Kai, SUN Yancheng, WANG Xudong, et al. Active disturbance rejection control of PMSM speed control system [J].
 Electric Machines and Control,2018,22(2):57-63.
- [10] 杨林,曾江,黄仲龙.线性自抗扰技术在LCL逆变器并网电流控 制及有源阻尼中的应用[J].电网技术,2019,43(4):1378-1386. YANG Lin,ZENG Jiang, HUANG Zhonglong.Application of linear active disturbance rejection technique in grid-connected current control and active damping of LCL type inverter[J].Power System Technology,2019,43(4):1378-1386.
- [11] 高志强,李松,周雪松,等.线性自抗扰在光伏发电系统 MPPT 中的应用[J].电力系统保护与控制,2018,46(15):52-59.
 GAO Zhiqiang, LI Song, ZHOU Xuesong, et al. Design of MPPT controller for photovoltaic generation system based on LADRC[J].

Power System Protection and Control, 2018, 46(15): 52-59.

 [12] 葛胜升,王鹏,施凯.基于二阶线性自抗扰的虚拟同步发电机二次调频控制[J].电力系统及其自动化学报,2022,34(10): 81-88.

GE Shengsheng, WANG Peng, SHI Kai. Secondary frequency modulation control of virtual synchronous generator based on second – order linear active disturbance rejection control [J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2022,34(10):81-88.

- [13] 张礼波,李洪波,毛雅茹,等.线性自抗扰在虚拟同步机预同步 控制中的应用[J].电网与清洁能源,2024,40(10):40-49.
 ZHANG Libo, LI Hongbo, MAO Yaru, et al. Application of linear self - immunity to the pre - synchronization control of virtual synchronous generators[J].Power System and Clean Energy,2024, 40(10):40-49.
- [14] 邹家惠,周步祥,张致强.微电网多源协调优化的研究与应用
 [J].电力系统及其自动化学报,2021,33(1):144-150.
 ZOU Jiahui, ZHOU Buxiang, ZHANG Zhiqiang. Research and application of multi-source coordinated optimization of micro-grid
 [J].Proceedings of the CSU-EPSA,2021,33(1):144-150.

[15] 郑天文,陈来军,陈天一,等.虚拟同步发电机技术及展望[J].
 电力系统自动化,2015,39(21):165-175.
 ZHENG Tianwen, CHEN Laijun, CHEN Tianyi, et al. Review and prospect of virtual synchronous generator technologies [J].
 Automation of Electric Power Systems,2015,39(21):165-175.

[16] 袁雅琳.分布式风力发电并网对电力系统的影响和应对策略
[J].光源与照明,2023(4):201-203.
YUAN Yalin. Influence of distributed wind power generation on power system and its countermeasures [J].Lamps & Lighting, 2023 (4):201-203.

- [17] 李楚韵,王潇.基于虚拟同步发电机技术的矩阵变换器新型 SVPWM方法研究[J].自动化与仪器仪表,2025(1):163-167.
 LI Chuyun, WANG Xiao. Study of a novel SVPWM method for matrix converter based on virtual synchronous generator technology
 [J].Automation & Instrumentation,2025 (1):163-167.
- [18] 余果,吴军,夏热,等.构网型变流器技术的发展现状与趋势研究[J].综合智慧能源,2022,44(9):65-70.
 YU Guo, WU Jun, XIA Re, et al. Study on the status quo and development trend of grid forming converter technology [J]. Integrated Intelligent Energy,2022,44(9):65-70.
- [19] 石晓艳,王宾,刘瑞祺.分布式能源并网逆变器小信号稳定性分析[J].现代电子技术,2022,45(15):88-92.
 SHI Xiaoyan, WANG Bin, LIU Ruiqi.Small signal stability analysis of grid connected inverter for distributed energy [J]. Modern Electronics Technique,2022,45(15):88-92.
- [20] 吕志鹏,盛万兴,钟庆昌,等.虚拟同步发电机及其在微电网中的应用[J].中国电机工程学报,2014,34(16):2591-2603.
 LÜ Zhipeng, SHENG Wanxing, ZHONG Qingchang, et al. Virtual synchronous generator and its applications in micro-grid [J].
 Proceedings of the CSEE,2014,34(16):2591-2603.
- [21] 吴浙勋,高文根,汪石农,等.基于下垂系数自适应调节的VSG 控制策略[J].四川理工学院学报(自然科学版),2018,31(2):

62-68.

WU Zhexun, GAO Wengen, WANG Shinong, et al. An adaptive drooping coefficient adjustment strategy for the virtual synchronous generator [J]. Journal of Sichuan University of Science & Engineering(Natural Science Edition), 2018, 31(2):62–68.

- [22] 石荣亮,张兴,刘芳,等.提高光储柴独立微网频率稳定性的虚拟 同步发电机控制策略[J].电力系统自动化,2016,40(22):77-85. SHI Rongliang, ZHANG Xing, LIU Fang, et al. Control strategy of virtual synchronous generator for improving frequency stability of islanded photovoltaic-battery-diesel microgrid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016,40(22):77-85.
- [23] 徐诚,刘念,赵泓,等.基于电力系统二次调频原理的微电源频率控制策略[J].电力系统保护与控制,2013,41(3):14-20.
 XU Cheng,LIU Nian,ZHAO Hong, et al. A novel frequency control strategy of micro-grid based on the secondary frequency regulation of power system[J].Power System Protection and Control,2013,41 (3):14-20.
- [24] 蔡维正,郭昆丽,刘璐雨,等.基于一阶LADRC控制的直驱风机 次同步振荡抑制策略[J].中国电力,2022,55(4):175-184.
 CAI Weizheng, GUO Kunli, LIU Luyu, et al. Subsynchronous oscillation mitigation strategy based on first -order LADRC for direct - drive wind turbines [J]. Electric Power, 2022, 55(4): 175-184.
- [25] 袁东,马晓军,曾庆含,等.二阶系统线性自抗扰控制器频带特 性与参数配置研究[J].控制理论与应用,2013,30(12):1630-1640.

YUAN Dong, MA Xiaojun, ZENG Qinghan, et al. Research on frequency – band characteristics and parameters configuration of linear active disturbance rejection control for second-order systems [J].Control Theory & Applications, 2013, 30(12):1630–1640.

[26] 孙碧原,邰源政,谷琼婵,等.基于自适应自抗扰的惯性稳定平 台控制系统研究[J].组合机床与自动化加工技术,2025(3): 129-134.

SUN Biyuan, TAI Yuanzheng, GU Qiongchan, et al. Research on inertial stability platform control system based on adaptive self disturbance rejection [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2025(3):129-134.

收稿日期:2025-03-27

修回日期:2025-04-28

作者简介:

丁宏志(2000),男,硕士研究生,研究方向为新能源发电技术;

潘 波(1993),男,硕士,工程师,主要从事电力调度控制运行专 业方面的研究工作;

郭晓瑞(1978),通信作者(guoxr@zjhu.edu.cn),女,博士,副教授, 硕士生导师,研究方向为新能源发电技术、电力电子前沿技术等;

文 安(1966),男,博士,长期从事电网控制保护和柔性直流控 制保护方面的研究工作;

叶 润(1986),男,博士,副教授,长期从事电网控制方面的研究 工作。

(责任编辑 娄婷婷)

DOI:10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2025.06.002

计及变流器频率支撑与容量约束的孤岛微电网 多源协同调度方法

邓美玲,江通财,白振毅*,林 健,陈永进,吴子龙 (广东电网有限责任公司韶关仁化供电局,广东 韶关 512300)

摘要:孤岛微电网高比例新能源强不确定性导致系统频率波动大,极端情况下超出边界阈值,触发电网保护装置动作,危 及电网安全稳定的挑战,针对此情况,提出一种计及变流器频率支撑与容量约束的孤岛微电网多源协同调度方法。首 先,构建风光水储多源参与动态频率支撑的孤岛微电网动态频率响应模型,建立系统多源功率-频率的时域表达式和动 态频率安全约束。其次,探讨变流器容量限制与有功调频和无功调压的需求关系,提出一种基于变流器剩余空闲容量约 束的动态频率支撑策略,以系统运行经济性和频率电压安全性为优化目标,考虑动态频率和电压安全等约束,提出一种 风光水储多源协同调频调压的孤岛微电网优化调度方法。最后,以改进IEEE 33节点系统为例对所提优化调度方法进行 仿真,结果表明,所提方法提升了孤岛微电网在强不确定性下的频率和电压安全水平。

关键词:孤岛微电网;风光水储;频率支撑;电压安全;优化调度

中图分类号:TM732 文献标志码:A 文章编号:1007-9904(2025)06-0010-12

Multi-source Collaborative Scheduling Method for Islanded Microgrids Considering Converter Frequency Support and Capacity Constraints

DENG Meiling, JIANG Tongcai, BAI Zhenyi^{*}, LIN Jian, CHEN Yongjin, WU Zilong (Guangdong Power Grid Co., Ltd. Shaoguan Renhua Power Supply Bureau, Shaoguan 512300, China)

Abstract: In response to the challenge posed by the high proportion of new energy intensity uncertainty within island microgrids, which can lead to significant frequency fluctuations and exceed the boundary threshold in extreme cases, thereby triggering the protective action of power grid devices and endangering the security and stability of the power grid, we propose a multi-source collaborative scheduling method for islanded microgrids. This method considers converter frequency support and capacity constraints. Firstly, a dynamic frequency response model for the islanded microgrid with multi-source participation (wind, photovoltaic, hydro, and storage) in dynamic frequency support is established. This model includes the system's multi-source power-frequency time-domain expression and dynamic frequency safety constraints. Secondly, the relationship between the capacity limitations of converter and the demands for active frequency modulation and reactive voltage regulation is discussed. A dynamic frequency support strategy based on the remaining available capacity of inverters is proposed. With dual optimization objectives of system operational economy and frequency-voltage security, and considering constraints such as dynamic frequency and voltage regulation by wind, photovoltaic, hydro, and storage. Finally, simulation results based on an improved IEEE 33–node system validate the effectiveness of the proposed method in enhancing the frequency and voltage stability of islanded microgrids under large disturbances and uncertainties.

Keywords: isolated microgrid; wind, photovoltaic, hydro and storage; frequency support; voltage safety; optimal dispatch

基金项目:中国南方电网有限责任公司科技项目(GDKJXM20230364)。 Science and Technology Foundation of China Southern Power Grid Company Limited(GDKJXM20230364).

0 引言

随着"双碳"战略的深入推进,以风电机组、光伏

机组为代表的高比例可再生能源并网给电力系统的 频率电压安全稳定带来了严峻挑战[1-2]。高比例新 能源接入的孤岛微电网,由于缺乏传统发电机组的 惯量支撑和调频能力,在面对负荷功率和可再生能 源出力的强不确定性扰动时,极易触发电网保护装 置动作,发生低频减载、电网解列等事故,严重影响 系统的供电可靠性。电池储能具有响应速度快、可 调节功率大、控制灵活等优势,为解决孤岛微电网频 率电压失稳、电压波动、机组震荡等问题提供了新方 案^[3],但电池储能变流器容量有限,在负荷高峰期同 时承担调峰调压任务,容易导致电池储能变流器空 闲容量不足,调频能力下降。因此,如何在优化调度 中计及风光储分布式能源的虚拟惯量和虚拟下垂控 制特性,研究风光水储多源协同调频调压的孤岛微 电网优化调度方法,以提高系统在强不确定性下的 频率和电压安全水平,是目前亟须解决的问题。

为兼顾系统运行经济性与频率安全性,有学者 提出构建电网频率响应等值模型,将动态频率安全 约束纳入传统优化调度模型中。常见的电网频率响 应等值模型包括系统频率响应(system frequency response, SFR)模型^[4-6]和平均系统频率(average system frequency, ASF)模型^[7-8],其中,前者将多机调 速系统等效聚合为单机调速器,简化了模型的复杂 性,后者则详细考虑了不同调速器的调频特性。常 见的频率安全约束包括最大频率变化率约束^[9-12]、频 率最低点约束[9-12]以及稳态频差约束[10-12],其中,频 率最低点约束具有高度非线性特性,文献[13]采用 多元分段线性化技术对其进行线性化处理。为提 高系统惯量水平和一次调频能力,也有不少学 者提出考虑风光储多源协同参与系统频率支撑。 文献[14-15]采用综合惯性控制策略使风电机组参 与惯性响应和一次调频的机组组合模型。文献[16] 建立了考虑光伏参与频率支撑的孤立电网优化调度 模型。文献[17]提出电池储能参与系统动态频率控 制策略。文献[18-19]探讨了电池储能参与调峰调 频双重辅助服务的联合优化调度策略。文献[20]则 综合提出风机、光伏、储能等虚拟同步机的调频控制 策略。但上述文献所提方法大多侧重系统有功功率 备用对频率调节的影响,忽略了变流器装置有功-频 率和无功-电压的耦合,导致难以统筹兼顾电力系统 频率电压安全需求。

风、光、储能等可调节资源不仅可以提供有功频 率支撑,也能参与无功电压调节。文献[21]提出了 光伏和储能联合参与电网无功电压优化调度模型。 文献[22]提出了构网型储能电站实时提供电压支撑 的无功优化策略。文献[23]提出了兼顾系统频率电 压支撑能力的储能系统规划模型。文献[24]考虑电 力系统静态电压稳定与暂态频率稳定约束,提出 了多元储能参与频率电压协同支撑的优化策略。 文献[25]研究了光储系统变流器无功与有功的耦合 关系,提出了考虑光储系统变流器容量限制的频率 支撑能力评估方法。但目前鲜少文献涉及变流器参 与频率电压协同优化的作用,实际上,风光储能源无 功功率输出会占用变流器的一部分容量,影响有功 功率输出和频率调节。因此,亟须考虑变流器容量 限制对调频调压的影响,合理优化风光储能源的有 功无功出力,以实现电力系统的全面安全稳定运行。

基于上述分析,提出一种计及变流器频率支撑 与容量约束的孤岛微电网多源协同调度方法。首 先,建立计及风光水储多源频率主动支撑的孤岛微 电网 ASF 模型,并进一步构建线性化动态频率安全 约束的时域表达式;其次,探讨变流器容量限制对系 统调频调压的影响,提出基于变流器容量划束的动 态频率支撑策略,厘清风光储分布式能源参与系统 动态频率支撑的能力;最后,以系统经济运行成本与 节点电压偏差为优化目标,综合考虑动态频率安全、 节点电压安全、水电出力、弃风/弃光、储能充放电等 约束,建立了风光水储多源协同调频调压的孤岛微 电网优化调度模型。仿真结果证明,所提模型考虑 了变流器参与频率电压协同优化的作用,有效提升 系统频率和电压的安全性。

1 孤岛微电网动态频率响应模型

1.1 ASF 模型

提出一种风光水储多源参与孤岛微电网频率主动支撑策略,其中,水电机组主要考虑水轮机的一次调频作用^[26],光伏机组、风电机组及电池储能采用虚拟惯性响应与虚拟下垂控制策略,为系统提供惯性响应与一次调频功率,孤岛微电网的ASF模型^[7-8]如图1所示。



Fig.1 ASF model of isolated island microgrid

图 1 中, $m \setminus n \setminus s$ 分别为水电机组、光伏/风电机组 以及电池储能编号; ΔP_L 为 t 时刻系统扰动功率; $\Delta P_{Hm}^{PFR}(t) \setminus \Delta P_{VNNn}^{PFR}(t) \oplus D$ 别为 t 时刻水电机组 $m \setminus X$ 代/风电机组 n 以及电池储能 s 的一次调频功 率; T_{Hm} 为水电机组 m 的水锤效应系数; R_{Hm} 为水电机 组 m 的水轮机调差系数; $U_{Hm}(t) \oplus t$ 时刻水电机组 m的启停状态; $H_{SYS}(t) \oplus t$ 时刻系统等效惯性常数; K_D 为负荷阻尼频率调节系数; K_{VNNn} 为光代/风电机组 n的虚拟下垂控制系数; K_{ES} 为电池储能 s 虚拟下垂控 制系数; $\Delta f(t)$ 为系统频率偏差。

系统的频率响应方程可表示为

$$\Delta P_{\rm L}(t) = \sum_{m} \Delta P_{\rm Hm}^{\rm PFR}(t) + \left(\sum_{n} K_{\rm V/Wn} + \sum_{s} K_{\rm Es}\right) \Delta f(t) + (1)$$

$$2H_{\rm SYS}(t) \frac{\mathrm{d}\Delta f(t)}{\mathrm{d}t} + K_{\rm D} \Delta f(t)$$

1.2 动态频率安全约束

基于上述频率响应方程推导可得到系统最大频 率变化率约束、准稳态频率偏差约束以及频率最低 点约束,如式(2)一式(4)所示。

$$\Delta P_{\rm L}(t) \leq 2\Delta f_{\rm max}^{\rm RoCoF} H_{\rm SYS}(t)$$
 (2)

$$\Delta P_{\rm L}(t) \leq \Delta f_{\rm max}^{\rm ss} \left(\frac{\sum_{m} U_{\rm Hm}(t) \left(1/R_{\rm Hm} \right) +}{\sum_{n} K_{\rm V/Wn} + \sum_{r} K_{\rm Es} + K_{\rm D}} \right)$$
(3)

 $\Delta P_{\rm L}(t) \leq \sum_{m} \Delta P_{\rm Hm}^{\rm PFR}(t_{\rm d}) + \left(\sum_{n} K_{\rm V/Wn} + \sum_{s} K_{\rm Es} + K_{\rm D}\right) \Delta f_{\rm max} \tag{4}$

式中: Δf_{max}^{RoCoF} 为最大频率变化率允许值; Δf_{max}^{ss} 为准稳态频率偏差允许值; Δf_{max} 为频率最大偏差允许值; t_d 为频率最低点出现的时刻。

在频率最低点约束中, ΔP^{PFR}(t_d)的时域表达式 和频率最低点时刻 t_d未知, 但 t_d可由频率偏差曲线 近似求出。频率偏差曲线从初始点到频率最低点可 近似为一段无衰减的正弦曲线,并进一步将其线性 化^[27],得到

$$\Delta f'(t) = \frac{2}{\pi} \frac{\Delta P_{\rm L}(t)}{2H_{\rm SYS}(t)} t = \frac{\Delta P_{\rm L}(t)}{\pi H_{\rm SYS}(t)} t \tag{5}$$

线性化频差 $\Delta f'(t)$ 达到最大频差允许值 Δf_{max} 经 过的时间 t_d 为

$$t_{\rm d} = \frac{\pi H_{\rm SYS} \Delta f_{\rm max}}{\Delta P_{\rm L}(t)} \tag{6}$$

水电机组的一次调频响应功率的频域表达式经 拉普拉斯反变换得

$$\Delta P_{\mathrm{H}m}^{\mathrm{PFE}}(t) = \frac{U_{\mathrm{H}m}(t)\,\Delta P_{\mathrm{L}}(t)}{\pi H_{\mathrm{SYS}}(t)\,R_{\mathrm{H}m}} \times \left(t - kT_{\mathrm{H}m} + kT_{\mathrm{H}m} \mathrm{e}^{-\frac{t}{0.5T_{\mathrm{H}m}}}\right) (7)$$

式中:k为常系数,此处取值为1.5。

由式(7)可知,若 $U_{Hm}(t)$ 为1,则 $\Delta P_{Hm}^{PFE}(t)$ 是关于 $H_{sys}(t)$ 变量的非线性表达式,为方便求解,需求对其 进行线性化处理^[28]。

 $\Delta P_{Hm}^{PFE}(t)$ 对 $H_{SYS}(t)$ 求导得到:

$$\frac{\mathrm{d}\Delta P_{\mathrm{Hm}}^{\mathrm{PFE}}(t)}{\mathrm{d}H_{\mathrm{SYS}}} = \frac{kU_{\mathrm{Hm}}(t)\Delta P_{\mathrm{L}}(t)T_{\mathrm{Hm}}}{\pi \left(H_{\mathrm{SYS}}(t)\right)^{2}R_{\mathrm{Hm}}} \left(1 - \frac{1 + \frac{t}{0.5T_{\mathrm{Hm}}}}{\mathrm{e}^{\frac{t}{0.5T_{\mathrm{Hm}}}}}\right) (8)$$

经证明可知, $\Delta P_{Hm}^{PFE}(t)$ 随 $H_{SYS}(t)$ 单调递增, 当 $H_{SYS}(t)$ 取得最小值时, $\Delta P_{Hm}^{PFE}(t)$ 也为最小值, 即

$$\Delta P_{\mathrm{H}_{m}}^{\mathrm{PFE,min}}(t) = \frac{U_{\mathrm{H}_{m}}(t)\Delta P_{\mathrm{L}}(t)}{\pi H_{\mathrm{SYS}}^{\mathrm{min}}(t)R_{\mathrm{H}_{m}}} \times \left(t - kT_{\mathrm{H}_{m}} + kT_{\mathrm{H}_{m}} \mathrm{e}^{\frac{t}{0.5T_{\mathrm{H}_{m}}}}\right) (9)$$

式中: $H_{\text{SYS}}^{\min}(t)$ 为 $H_{\text{SYS}}(t)$ 的下界,可通过求解(10)获得^[28]。

$$\min H_{\text{SYS}}(t) = \min \begin{pmatrix} \sum_{m} \left(U_{\text{Hm}}(t) H_{\text{Hm}} \times \frac{S_{\text{Hm}}}{S_{\text{B}}} \right) + \\ H_{\text{V/Wn}} \times \frac{S_{\text{V/Wn}}}{S_{\text{B}}} + H_{\text{Es}} \times \frac{S_{\text{Es}}}{S_{\text{B}}} \end{pmatrix}$$
(10)

式中:H_{Hm}、H_{V/Wn}、H_{Es}分别为水电机组m、光伏/风电机 组n以及电池储能s惯性常数;S_{Hm}、S_{V/Wn}、S_{Es}分别为 水电机组m、光伏/风电机组n以及电池储能s装机 容量;S_B为基准容量。

该模型约束条件包括除最低点频率约束以外的本 文其他约束条件。最终,经转换得到频率最低点约束为

$$\Delta P_{\rm L}(t) \leq \sum_{m} \Delta P_{\rm Hm}^{\rm PFR,\min}(t_{\rm d}) + \left(\sum_{n} K_{\rm V/Wn} + \sum_{s} K_{\rm Es} + K_{\rm D}\right) \Delta f_{\rm max}$$
(11)

2 风光储分布式能源频率支撑策略

风光储分布式能源不仅可以提供有功频率支 撑,也能参与无功电压调节。因此,分析变流器容量 限制与有功调频和无功调压的需求关系,提出一种 基于变流器剩余空闲容量约束的动态频率支撑策 略,如图 2 所示。图中, $P_{Es}(t)$ 为电池储能 s 交换的 有功功率; $Q_{Es}(t)$ 为电池储能 s 交换的无功功率; $P_{Es}^{max}(t)$ 为电池储能 s 最大有功出力; $\Delta P_{Es}^{max}(t)$ 为电池储能 s 最大可增发有功功率; $P_{VWn}(t)$ 、Q $_{VWn}(t)$ 分别 为光伏/风电机组 n 常规有功出力和无功出力; $P_{VWn}^{max}(t)$ 为光伏/风电机组 n 最大有功功率出力; $D_{VWn}(t)$ 为光伏/风电机组 n 最大可增发有功功率; $P_{VWn}(t)$ 为光伏/风电机组 n 的弃风/弃光率; $P_{VWn}^{max}(t)$ 为光伏/风电机组 n 的预测功率。

考虑到变流器容量限制,电池储能有功出力最 大值如式(12)所示,减去电池储能常规有功出力,电 池储能最大可增发有功功率如式(13)所示。

$$P_{\rm Es}^{\rm max}(t) = \sqrt{(S_{\rm Es}^{\rm max})^2 - (Q_{\rm Es}(t))^2}$$
(12)

$$\Delta P_{\mathrm{E}s}^{\mathrm{max}}(t) = P_{\mathrm{E}s}^{\mathrm{max}}(t) - P_{\mathrm{E}s}(t)$$
(13)

式中:SEs 为电池储能s变流器最大视在功率。

保证逆变器容量不越限条件下,光伏/风电机组 最大有功出力如式(14)所示,减去光伏/风电机组常 规有功出力,光伏/风电机组最大可增发有功功率如 式(15)所示。

$$P_{V/Wn}^{\max}(t) = \sqrt{\left(S_{V/Wn}^{N}\right)^{2} - \left(Q_{V/Wn}(t)\right)^{2}}$$
(14)

$$\Delta P_{\rm V/Wn}^{\rm max}(t) = P_{\rm V/Wn}^{\rm max}(t) - P_{\rm V/Wn}(t)$$
(15)

式中: S_{V,W_n}^{N} 为光伏/风电机组n逆变器容量。

3 风光水储孤岛微电网优化调度模型

3.1 目标函数

电池储能不仅可以参与系统无功电压优化,也 能提供有功频率支撑,但储能变流器容量有限,向系 统提供过多的无功补偿会导致变流器空闲容量减 少,调频能力下降,而电池储能预留的备用容量过 多,也会导致无功电压调节能力下降。因此,以系统 经济运行成本与节点电压质量为优化目标,综合考 虑动态频率安全、节点电压安全、水电出力、弃风/弃 光、储能充放电等约束,建立风光水储多源协同调频 调压的孤岛微电网优化调度模型。



图 2 风光储频率支撑策略

Fig.2 Frequency support strategy of wind, photovoltaics and energy storage

1)运行成本。

主要考虑孤岛微电网的水电机组启停成本、机 组运行维护成本、弃风/弃光成本以及储能运行维护 与充放电成本,如式(16)所示。

$$\min F_{1} = \sum_{t} \begin{cases} \sum_{m} \left[c_{m}^{u} U_{Hm}(t) \left(1 - U_{Hm}(t-1) \right) + \\ c_{m}^{d} U_{Hm}(t-1) \left(1 - U_{Hm}(t) \right) + \\ c_{h} P_{Hm}(t) \end{bmatrix} \right] \\ + \sum_{n} \left[\frac{c_{v/w}(1 - D_{v/Wn}(t)) P_{v/Wn}(t)}{c_{d} D_{v/Wn}(t) P_{v/Wn}^{pre}(t)} \right] \\ + \sum_{s} \left\{ \frac{c_{b}(P_{Es}^{dis}(t) + P_{Es}^{cha}(t))}{c_{b}(P_{Es}^{dis}(t) + P_{Es}^{cha}(t))} \right\}$$
(16)

式中: $P_{Hm}(t)$ 为水电机组 m 有功功率; $P_{Es}^{cha}(t)$ 、 $P_{Es}^{dis}(t)$ 分别为电池储能 s 的充电、放电有功功率; c_m^u 、 c_m^d 分别为水电机组 m 的开机和停机成本系数; c_h 、 $c_{v/w}$ 、 c_b 分别为水电机组、光伏/风电机组、电池储能的运行维护成本系数; c_d 为弃光/弃风惩罚成本系数; c_p 为电池储能充放电电价。

2) 电压偏移如式(17) 所示。

$$\min F_{2} = \sum_{i} \sum_{i} |U_{i}(t) - U_{0}| \qquad (17)$$

式中:*i*为节点编号;*U_i*(*t*)为节点电压幅值;*U*₀为节 点电压额定值。

3.2 约束条件

1)水电机组。

水电机组有功功率和无功功率约束为:

$$U_{\rm Hm}(t) P_{\rm Hm}^{\rm min} \leq P_{\rm Hm}(t) \leq U_{\rm Hm}(t) P_{\rm Hm}^{\rm max}$$
(18)

$$U_{\rm Hm}(t)Q_{\rm Hm}^{\rm min} \leq Q_{\rm Hm}(t) \leq U_{\rm Hm}(t)Q_{\rm Hm}^{\rm max}$$
(19)

式中: $Q_{Hm}(t)$ 为水电机组 m 的无功功率, P_{Hm}^{max} 、 P_{Hm}^{min} 分别为水电机组 m 的有功功率上、下限, Q_{Hm}^{max} 、 Q_{Hm}^{min} 分别为水电机组 m 的无功功率上、下限。

有功功率爬坡约束为

$$-P_{\mathrm{H}m}^{\mathrm{rate}} \leq P_{\mathrm{H}m}(t) - P_{\mathrm{H}m}(t-1) \leq P_{\mathrm{H}m}^{\mathrm{rate}}$$
(20)

式中:Prate 为水电机组m最大爬坡功率。

旋转备用功率约束为

$$\begin{cases} \sum_{m} P_{Hm}^{\max} - P_{Hm}(t) \ge D_{L}P_{L}(t) \\ \sum_{m} P_{Hm}(t) - P_{Hm}^{\min} \ge D_{L}P_{L}(t) \end{cases}$$
(21)

式中: D_{L} 为系统负荷的旋转备用率; $P_{L}(t)$ 为系统有功负荷功率。

启停时间约束为

$$\begin{cases} \sum_{k=t}^{t+T_{m}^{o}-1} U_{Hm}(\tau) \ge T_{Hm}^{on} \left(U_{Hm}(t) - U_{Hm}(t-1) \right) \\ \sum_{\tau=t}^{t+T_{m}^{o}-1} \left(1 - U_{Hm}(\tau) \right) \ge T_{Hm}^{off} \left(U_{Hm}(t-1) - U_{Hm}(t) \right) \end{cases}$$
(22)

式中:*T*^{on}_{Hm}、*T*^{off}_{Hm}为水电机组 *m* 的最小开机和停机时间。 2)光伏/风电机组。

光伏/风电逆变器的有功和无功出力约束可表 示如下:

$$0 \le D_{V/W_n}(t) \le 1 \tag{23}$$

$$Q_{\rm V/Wn}(t) = \left(1 - D_{\rm V/Wn}(t)\right) P_{\rm V/Wn}^{\rm pre}(t) \tan \theta_{\rm V/Wn} \qquad (24)$$

$$\sqrt{\left(P_{V/Wn}(t)\right)^{2} + \left(Q_{V/Wn}(t)\right)^{2}} \leq S_{V/Wn}^{N}$$
(25)

式中: θ_{VWn} 为光伏/风电机组n的功率因数角。

3)电池储能。

电池储能有功和无功出力可以表示为:

 $\begin{cases} 0 \leq P_{E_s}^{cha}(t) \leq \alpha_{E_s}^{cha}(t) P_{E_s}^{up} \\ 0 \leq P_{E_s}^{dis}(t) \leq \alpha_{E_s}^{dis}(t) P_{E_s}^{up} \end{cases}$ (26)

$$\begin{cases} 0 \leq Q_{E_s}^{cha}(t) \leq \beta_{E_s}^{cha}(t) Q_{E_s}^{up} \\ 0 \leq Q_{E_s}^{dis}(t) \leq \beta_{E_s}^{dis}(t) Q_{E_s}^{up} \end{cases}$$
(27)

$$P_{E_{s}}(t) = P_{E_{s}}^{dis}(t) - P_{E_{s}}^{cha}(t)$$
(28)

$$Q_{\rm Es}(t) = Q_{\rm Es}^{\rm dis}(t) - Q_{\rm Es}^{\rm cha}(t)$$
(29)

$$\sqrt{\left(P_{E_s}(t)\right)^2 + \left(Q_{E_s}(t)\right)^2} \leq S_{E_s}^{\max}$$
(30)

式中: P_{Es}^{max} 、 Q_{Es}^{up} 分别为电池储能 s 充放电有功功率 和无功功率上限; $Q_{Es}^{cha}(t)$ 、 $Q_{Es}^{dis}(t)$ 分别为电池储能 s 吸收和释放的无功功率; $\alpha_{Es}^{cha}(t)$ 、 $\alpha_{Es}^{dis}(t)$ 分别为电 池储能 s 吸收和释放有功功率的状态; $\beta_{Es}^{cha}(t)$ 、 $\beta_{Es}^{dis}(t)$ 分别为电池储能 s 吸收和释放无功功率的状态。

电池储能剩余电量可表示为

$$E_{s}(t+1) = E_{s}(t) + \eta_{Es}^{cha} P_{Es}^{cha}(t+1) - \frac{P_{Es}^{dis}(t+1)}{\eta_{Es}^{dis}} (31)$$

$$\begin{cases} E_{s}^{init} = E_{s}^{end} \\ E_{s}^{min} \leq E_{s}(t) \leq E_{s}^{max} \end{cases} (32)$$

式中: $E_s(t)$ 为t时刻电池储能s的电量; E_s^{init} 、 E_s^{end} 分别 为电池储能s初始值与最终值; E_s^{max} 、 E_s^{inin} 分别为电池 储能s剩余电量上、下限; η_{Es}^{cha} 、 η_{Es}^{dis} 分别为电池储能s的有功充电、放电效率。

4)动态频率安全约束。

风光水储能源提供频率支撑时,需考虑机组备用

容量、爬坡速率或变流器剩余容量的影响,如式 (33)—式(38)所示。

$$\Delta P_{\mathrm{H}m}^{\mathrm{nadir}}(t) = \min\left(\Delta P_{\mathrm{H}m}^{\mathrm{PFR,\min}}(t_{\mathrm{d}}), P_{\mathrm{H}m}^{\mathrm{rate}}, P_{\mathrm{H}m}^{\mathrm{max}} - P_{\mathrm{H}m}(t)\right) (33)$$

$$\Delta P_{\text{VWn}}^{\text{nadir}}(t) = \min \begin{pmatrix} K_{\text{V/Wn}} \Delta f_{\text{max}}, \Delta P_{\text{VWn}}^{\text{max}}(t), \\ D_{\text{V/Wn}}(t) P_{\text{V/Wn}}^{\text{pre}}(t) \end{pmatrix}$$
(34)

$$\Delta P_{Es}^{\text{nadir}}(t) = \min(K_{Es}\Delta f_{max}, \Delta P_{Es}^{max}(t))$$
(35)

$$\Delta P_{\mathrm{H}m}^{\mathrm{ss}}(t) = \min\left(\frac{1/R_{\mathrm{H}m}U_{\mathrm{H}m}(t)\Delta f_{\mathrm{max}}^{\mathrm{ss}}, P_{\mathrm{H}m}^{\mathrm{rate}}}{P_{\mathrm{H}m}^{\mathrm{max}} - P_{\mathrm{H}m}(t)}\right)$$
(36)

$$\Delta P_{V/Wn}^{ss}(t) = \min \begin{pmatrix} K_{V/Wn} \Delta f_{max}^{ss}, \Delta P_{V/Wn}^{max}(t), \\ D_{V/Wn}(t) P_{V/Wn}^{pre}(t) \end{pmatrix}$$
(37)

$$\Delta P_{\rm Es}^{\rm ss}(t) = \min\left(K_{\rm Es}\Delta f_{\rm max}^{\rm ss}, \Delta P_{\rm Es}^{\rm max}(t)\right)$$
(38)

式中: $\Delta P_{Hm}^{nadir}(t), \Delta P_{VWn}^{nadir}(t), \Delta P_{Es}^{nadir}(t)$ 分别为水电机组 m、光伏/风电机组 n 以及电池储能 s 在频率最低点提 供的频率响应功率; $\Delta P_{Hm}^{ss}(t), \Delta P_{VWn}^{ss}(t), \Delta P_{Es}^{ss}(t)$ 分别 为水电机组 m、光伏/风电机组 n 以及电池储能 s 在 频率达到稳态时提供的频率响应功率。

则改进的频率最低点约束和准稳态频率偏差约 束如式(39)和式(40)所示。

$$\Delta P_{\rm L}(t) \leq \sum_{m} \Delta P_{\rm Hm}^{\rm nadir}(t) + \sum_{n} \Delta P_{\rm VWn}^{\rm nadir}(t) + \sum_{s} \Delta P_{\rm Es}^{\rm nadir}(t) + K_{\rm D} \Delta f_{\rm max}$$
(39)

$$\Delta P_{\rm L}(t) \leq \sum_{m} \Delta P_{\rm Hm}^{\rm ss}(t) + \sum_{n} \Delta P_{\rm V/Wn}^{\rm ss}(t) + \sum_{s} \Delta P_{\rm Es}^{\rm ss}(t) + K_{\rm D} \Delta f_{\rm max}^{\rm ss}$$

$$(40)$$

式(33)—式(38)的最小函数等式约束可参考文 献[7]进行线性化处理。

5)其他约束。

其他的无功调压装置如静止无功补偿器(static var compensator, SVC)、并联电容器(shunt capacitor, SC)、有载调压变压器(on-load tap changer, OLTC)的相关约束以及系统网络潮流安全约束可参考 文献^[21]。

3.3 模型求解

构建计及动态频率安全约束的风光水储孤岛微 电网优化调度模型,为方便求解,采用了多种线性化 技术对模型中的非线性约束条件进行了线性化处 理,最后,基于权重系数法,将所提模型转化为了单 目标优化模型,并采用 MATLAB/Gurobi 求解器 求解。 本文设置稳态优化调度周期为 24 h,时间分辨 率为1 h,因此,所提模型优化求解得到每小时的系 统状态变量,为分析系统的频率暂态过程,基于 Simulink 平台搭建如图 1 所示的孤岛微电网 ASF 模 型,时间分辨率为 0.01 s。假设在一个时段内系统状 态(包括机组组合安排、出力计划及备用容量等)维 持不变,输入系统每小时的优化调度结果,并在初始 时刻施加 8% 的负荷功率阶跃扰动,设置仿真时长 为 30 s,记录系统在该状态下每小时的频率响应过 程以及对应的最大频率变化率、最大频率偏差和准 稳态频率偏差。稳态优化调度与暂态频率计算的时 间尺度协调策略如图 3 所示。





4 仿真分析

4.1 参数设置

以改进的 IEEE 33 节点系统为例进行仿真分 析,在系统接入5台水电机组、2台风电机组、3台光 伏机组和1台储能装置,调压设备包括1台 SVC、2 台 SC 和1台 OLTC,其中,SVC 无功功率补偿范围 为-1~1 Mvar,SC 的最大补偿无功功率为 0.5 Mvar, 单元并联电容器补偿功率为 0.05 Mvar,OLTC 变 比范围为 0.95~1.05,调节步长为 0.01。各发电机组 和调压设备接入的节点如图 4 所示,系统参数如 表 1—表 3 所示,风电机组、光伏机组及负荷预测功 率如图 5 所示。



图 4 改进的 IEEE 33 节点系统 Fig.4 Improved IEEE 33-node system

表1 成本相关参数 Table 1 Cost-related parameters

参数名称	参数值	参数名称	参数值
$c_1^u/c_1^d/(元/次)$	2 500	c _h /(元/kW)	0.21
$c_2^u/c_2^d/(元/次)$	1 800	c _v /(元/kW)	0.08
c ₃ ^u /c ₃ ^d /(元/次)	3 000	e _w /(元/kW)	0.08
$c_4^u/c_4^d/(元/次)$	2 000	c _s /(元/kW)	0.10
$c_5^u/c_5^d/(元/次)$	1 800	c _b /(元/kW)	0.18

表 2 发电机组参数 Table 2 Generator units' parameters

机组	最大出力 /MW	最小出力 /MW	启停时间 /h	惯性 常数	调节 系数	响 <u>应</u> 时间 /s
H1	1.0	0.2	8	7	20	1.2
H2	0.5	0.1	6	3	15	1.2
Н3	1.0	0.2	8	6	15	1.2
H4	0.8	0.16	6	5	10	1.2
Н5	0.6	0.12	8	4	15	1.2
W1	0.5	0	—	5	20	0
W2	0.5	0	—	5	20	0
PV1	0.5	0	—	5	20	0
PV2	0.5	0	—	5	20	0
PV3	0.5	0	—	5	20	0
ES1	1.0	0		6	25	0

表3 系统其他参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
$\Delta \! f_{\rm max}^{\rm RoCoF} \! / ({\rm Hz/s})$	0.24	$S_{E_s}^{\max}/(MVA)$	0.8
$\Delta \! f_{max}^{ss} \! / (\mathrm{Hz})$	0.2	$E_s^{\rm max}/({\rm MWh})$	1.5
$\Delta f_{\rm max}/({\rm Hz})$	0.5	$E_s^{\min}/(MWh)$	0.2
K_{D}	1.0	$\eta_{\scriptscriptstyle\mathrm{E}s}^{\scriptscriptstyle\mathrm{dis}}$	0.95
$ heta_{_{ m V/Wn}}$	0.95	$\eta_{{ m E}s}^{{ m cha}}$	0.95





4.2 优化调度结果分析

为验证本文所提方法的有效性,本文对比分析 以下3种优化调度方案:方案1,风光储分布式能源 不参与调频,不考虑动态频率安全约束;方案2,风光 储分布式能源参与调频,不考虑动态频率安全约束; 方案3,风光储分布式能源参与调频,考虑动态频率 安全约束。

方案 2 和方案 3 的水电机组开机停状态如图 6 所示,可以看出,方案 2 和方案 3 的开停机方式存在 显著差异。方案 2 在满足负荷功率需求的基础 上,为降低开机成本,采取全天停运机组 2 和机组 4 的策略。方案 3 因受动态频率安全约束,需保障足 够的惯量水平和调频备用功率,相较于方案 2,方案 3 在 07:00—24:00 时段增开了机组 4,在 01:00— 06:00 时段,系统扰动功率较小,机组 4 处于停机状 态,而机组 2 全天停机,因此,在优化模型中增加考 虑动态频率安全约束,可以进一步优化机组组合安 排,以满足系统调频需求。



Fig.6 On-off state of hydropower units

表4展示了方案2和方案3的系统运行优化结 果,可以看出,方案3的开机成本较方案2有所增 加,表明提升系统频率安全水平有时需要牺牲一定 的经济成本。弃风和弃光成本为0,说明系统实现了 风电机组和光伏机组的全额消纳,有效提高了能源 利用率,但也导致风电和光伏机组丧失了调频能力。 在07:00—24:00时段,方案3的水电机组开机容量 更大,有更高的有功和无功调节能力,降低了储能的 调压负担,因此,方案3的总电压偏差水平较低,电 池储能的充放电收益偏高,但方案3的总运行成本 仍略高于方案2。

表4 系统运行优化结果 Table 4 System operation optimization results

指标	方案 2	方案 3
水电机组开停机成本/元	7 300.00	9 300.00
弃风和弃光成本/元	0.00	0.00
机组运行维护成本/元	10 060.45	10 051.53
储能运行维护成本/元	383.60	487.33
储能充放电成本/元	-486.64	-881.54
系统总运行成本/元	17 257.41	18 957.32
节点电压总偏差/pu	7.686 5	6.111 8

图7展示了方案2和方案3的水电机组出力及 上备用功率,可以看出,在负荷高峰期时段,水电机 组出力较高,导致其上备用功率较低。相较于方案 2,方案3在表4展示了方案2和方案3的系统运行 优化结果,可以看出,方案3的开机成本较方案2有 所增加,表明提升系统频率安全水平有时需要牺牲 一定的经济成本。弃风和弃光成本为0,说明系统实 现了风电机组和光伏机组的全额消纳,有效提高了 能源利用率,但也导致风电和光伏机组丧失了调频 能力。在07:00—24:00时段,方案3的水电机组开 机容量更大,有更高的有功和无功调节能力,降低了 储能的调压负担,因此,方案3的总电压偏差水平较 低,电池储能的充放电收益偏高,但方案3的总运行 成本仍略高于方案2。

时段增开了机组4,因此,在该时段内方案3的 开机机组总容量相较于方案2有所增大,上备用功 率也更为充裕,表明方案3的惯性响应和一次调频 能力更高,抗扰动能力更大。



Fig.7 Output and standby power of hydropower unit

图 8 展示了方案 2 和方案 3 的储能充放电功率 和变流器剩余空闲容量,可以看出,为降低充放电成 本,方案 2 与方案 3 的储能有功功率均倾向于在负 荷高峰期放电,以满足系统负荷需求,而在负荷低谷 期进行充电,以储备能量。储能的无功功率基本处 于释放状态,说明系统无功功率不足,依赖于储能补 偿无功功率,避免节点电压幅值较低。在 09:00— 11:00 时段和 16:00—19:00 时段,储能的有功和无 功输出较大,导致变流器的剩余空闲容量减少,其调 频能力也随之降低。







4.3 动态频率结果分析

图9展示了方案2和方案3的系统动态频率安

全指标以及稳态电压偏差,可以看出,在负荷高峰 期,由于系统扰动功率较大,水电机组的上备用功率 和储能变流器的剩余空闲容量较小,导致系统的3 个频率安全指标均呈现出较高水平。其中,方案2 的最大频率变化率在 09:00-11:00 时段和 16:00-19:00 时段发生越限, 而准稳态频率偏差在 17:00 发 牛越限,相比之下,方案3的整体惯量水平更高,调 频备用功率更充裕,能快速响应系统功率需求,抑制 频率跌落,其最大频率变化率、最大频率偏差及准稳 态频率偏差均能维持在安全范围内,且基本在所有 时段,方案3的频率安全指标均小于方案2,因此,将 动态频率安全约束纳入优化调度模型中,可以有效 提高系统的频率安全水平。方案2和方案3均考虑 了系统节点电压安全约束,因此,其最大稳态电压偏 差均能维持在安全范围内(0~0.05)。综上分析,所 提方法综合考虑了系统调频调压需求,有效提升了 系统频率和电压安全性。

图 10 展示了初始时刻 15:00 受到阶跃功率扰 动后系统频率跌落过程,可以看出,相较于方案 3, 方案 2 的总惯量水平较小,因此,在扰动发生的初始 几秒内,方案 2 的频率跌落速率显著快于方案 3。大 约在扰动发生后的 15 s,系统频率基本进入准稳态 阶段。在该阶段,系统的惯性响应功率已经降为 0, 频率的稳定主要依靠水电机组和储能提供的一次调 频响应功率以及负荷阻尼频率响应功率来维持。方 案 2 的最低点频率为 49.84 Hz,符合频率安全范围, 但相较于方案 3,其最大频率变化率、最大频率偏差 和准稳态频率偏差更大,频率安全裕度相对较小。 当发生的扰动功率较大时,方案 2 的频率安全指标 更容易发生越限,这可以从图 8 和图 11 中看出,因 此,方案 3 考虑频率安全约束后,其频率安全水平明 显提升。

在初始时刻 15:00 设置不同的扰动功率,系统 的动态频率响应曲线如图 11 所示,可以看出,方案 1 仅考虑水电机组参与系统调频,导致总的惯量水平 和功率调节系数较低。因此,相较于方案 2 和方案 3,方案 1 的频率安全指标更容易超出安全阈值,频 率震荡幅度也较大,且进入稳态所需时间较长,需要 30s 后才能进入准稳态过程。方案 2 在方案 1 的基 础上,增加了风光储分布式能源参与调频,但未考虑

 $(b)\Delta P_{\rm L}=0.2$ MW

图 11 不同扰动功率下系统的动态频率曲线 Fig.11 Dynamic frequency curve of system under different disturbance power

频率安全约束,因此,在扰动功率达到0.4 MW时,方 案2的频率变化率及稳态频率偏差超出安全阈值。 方案3则将频率安全约束纳入优化调度模型中,通 过优化机组组合安排和系统调频备用功率,有效确 保各项频率安全指标维持在安全范围内。

5 结论

针对高比例新能源孤岛微电网不确定性高、传统惯量水平低、抗干扰能力弱的问题,提出一种计及 变流器频率支撑与容量约束的孤岛微电网多源协同 调度方法,所得结论如下:

1) 仅考虑系统运行经济性的传统优化调度方法 难以应对含高比例新能源接入的孤岛微电网频率电 压安全问题,将动态频率安全约束纳入优化调度模 型中,能有效规划机组组合安排和预留充足的调频 备用功率,以满足系统调频需求。

2)考虑变流器的容量限制,可以保证变流器参与频率响应时不超出其容量限制,并合理安排变流器的有功功率和无功功率输出,预留一定的变流器

空闲容量,有效兼顾系统调频和调压需求。

3)仅依赖水电机组参与孤岛微电网调频,易导 致系统频率震荡加剧,暂态时间延长。增加考虑风 光储分布式能源主动参与系统频率支撑,可以显著 提高系统惯性响应和一次调频能力,优化系统动态 频率响应过程,提升系统动态频率安全。

然而,本文所采用基于二阶锥松弛技术的交流 潮流模型只能得到每时段系统节点电压稳态值,无 法保证系统暂态电压安全,因此,下一步研究可以从 潮流计算算法与暂态电压安全方向改进。

参考文献

- [1] 谢小荣,贺静波,毛航银,等."双高"电力系统稳定性的新问题 及分类探讨[J].中国电机工程学报,2021,41(2):461-475.
 XIE Xiaorong, HE Jingbo, MAO Hangyin, et al. New issues and classification of power system stability with high shares of renewables and power electronics [J]. Proceedings of the CSEE, 2021,41(2):461-475.
- [2] 韩泽雷,鞠平,秦川,等.面向新型电力系统的频率安全研究综述与展望[J].电力自动化设备,2023,43(9):112-124.
 HAN Zelei, JU Ping, QIN Chuan, et al. Review and prospect of research on frequency security of new power system [J]. Electric Power Automation Equipment,2023,43(9): 112-124.
- [3] 谢小荣,马宁嘉,刘威,等.新型电力系统中储能应用功能的综述与展望[J].中国电机工程学报,2023,43(1):158-169.
 XIE Xiaorong, MA Ningjia, LIU Wei, et al. Functions of energy storage in renewable energy dominated power systems: review and prospect[J].Proceedings of the CSEE,2023,43(1): 158-169.
- [4] 张峰,田宇,丁磊.风电虚拟惯量延时的影响机理模型解析及替 代性研究[J].电力系统自动化,2024,48(7):267-276. ZHANG Feng, TIAN Yu, DING Lei. Analytical solution for influential mechanism model of virtual inertia delay of wind power and its substitutability research [J]. Automation of Electric Power Systems,2024,48(7):267-276.
- [5] 王廷涛. 计及动态频率响应约束的高比例风电电力系统优化调度技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2023.
- [6] 王涛,王廷涛,刘芮,等.计及动态频率响应约束的高比例风电电力系统机组组合模型[J].高电压技术,2021,47(10):3463-3479.

WANG Tao, WANG Tingtao, LIU Rui, et al. Unit commitment model of high proportion wind power system considering dynamic frequency response constraints [J]. High Voltage Engineering, 2021,47(10): 3463-3479.

 [7] 林恒先,侯凯元,陈磊,等.高比例风电电力系统考虑频率安全 约束的机组组合[J].电网技术,2021,45(1):1-13.
 LIN Hengxian, HOU Kaiyuan, CHEN Lei, et al. Unit commitment of power system with high proportion of wind power considering frequency safety constraints [J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 1-13.

- [8] LI K, LIU D, GU P, et al. Linearized frequency deviation based frequency-constrained unit commitment with support from wind farm [C]//2022 IEEE 5th International Electrical and Energy Conference (CIEEC).IEEE, 2022; 1679–1685.
- [9] 李世春,田冰杰,李惠子,等.基于频率安全约束与临界惯量计 算的分时段限制风电出力方法[J].电力系统保护与控制, 2022,50(15):60-71.

LI Shichun, TIAN Bingjie, LI Huizi, et al.Method for limiting wind power output in time periods based on frequency safety constraints and a critical inertia calculation [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(15): 60-71.

- [10] 杨德友,孟振,王博,等.暂态频率约束下考虑新能源最优减载 的机组组合双层优化策略[J].电力建设,2023,44(2):74-82. YANG Deyou, MENG Zhen, WANG Bo, et al. Two-layer optimization strategy for unit commitment with transient frequency constraint considering optimized reserve of renewable energy [J]. Electric Power Construction,2023,44(2):74-82.
- [11] 曹润杰.计及风电调频和频率约束的电力系统优化调度研究 [D].宜昌: 三峡大学,2020.
- [12] 申家锴,李卫东,李正文,等.计及一次调频死区与限幅的高比 例风电电力系统机组组合[J].电网技术,2022,46(4):1326-1337.

SHEN Jiakai, LI Weidong, LI Zhengwen, et al.Unit commitment of power system with high proportion of wind power considering the deadband and limiter of primary frequency response [J]. Power System Technology, 2022, 46(4): 1326-1337.

- [13] ZHANG Z Y, DU E S, TENG F, et al.Modeling frequency dynamics in unit commitment with a high share of renewable energy [J].
 IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(6): 4383-4395.
- [14] 毛颖群,张建平,程浩忠,等.考虑频率安全约束及风电综合惯 性控制的电力系统机组组合[J].电力系统保护与控制,2022, 50(11):61-70.

MAO Yingqun, ZHANG Jianping, CHENG Haozhong, et al. Unit commitment of a power system considering frequency safety constraint and wind power integrated inertial control [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(11): 61-70.

[15] 张嘉琪,胥国毅,王程,等.考虑同步机调差系数灵敏度与频率 约束的机组组合[J].电力系统保护与控制,2023,51(13): 102-110.

ZHANG Jiaqi, XU Guoyi, WANG Cheng, et al. Unit commitment considering the sensitivity of the synchronous generator adjustment coefficient and frequency constraint [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(13): 102–110.

[16] 叶婧,林涛,张磊,等.考虑动态频率约束的含高渗透率光伏电 源的孤立电网机组组合[J].电工技术学报,2017,32(13): 194-202.

YE Jing, LIN Tao, ZHANG Lei, et al. Isolated grid unit commitment with dynamic frequency constraint considering photovoltaic power plants participating in frequency regulation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(13): 194–202.

- [17] WEN Y F, LI W Y, HUANG G, et al. Frequency dynamics constrained unit commitment with battery energy storage[J].IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(6): 5115-5125.
- [18] 刘行,黎灿兵,刘健哲,等.机组组合中电池储能调峰调频联合 调度方法[J/OL].上海交通大学学报:1-26[2025-02-09]. https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2024.404.
 LIU Xing, LI Canbing, LIU Jianzhe, et al. Joint scheduling method for peak regulation and frequency regulation in unit commitment using battery energy storage systems [J/OL]. Journal of Shanghai Jiaotong University: 1-26 [2025-02-09]. https://doi. org / 10.16183/j.cnki.jsjtu.2024.404.
- [19] 周校聿.大规模电化学储能参与双重辅助服务调度研究[D].大 连:大连理工大学,2022.
- [20] 况理,文云峰,陆艺丹,等.含虚拟同步机的微电网频率稳定约 束优化调度模型研究[J].中国电机工程学报,2022,42(1): 71-83.
 KUANG Li, WEN Yunfeng, LU Yidan, et al. Frequency stability

constrained optimal dispatch model of microgrid with virtual synchronous machines[J].Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 71–83.

- [21] 王林,孔小民,周忠玉,等.云储能模式下的配电网分布式光伏-储能无功优化方法[J].综合智慧能源,2024,46(6):44-53.
 WANG Lin, KONG Xiaomin, ZHOU Zhongyu, et al. Distributed photovoltaic-energy storage reactive power optimization method for distribution networks under cloud energy storage mode [J].
 Integrated Intelligent Energy,2024,46(6): 44-53.
- [22] 林俐,马笑寒,丁文敏.计及构网型储能电站的新能源基地无功 协调优化控制[J].电力系统自动化,2025,49(1):59-68.
 LIN Li, MA Xiaohan, DING Wenmin.Coordinated optimal reactive power control of renewable energy base considering grid-forming energy storage station [J]. Automation of Electric Power Systems, 2025,49(1):59-68.
- [23] 胡泽春,蔡福霖,冯建洲.兼顾新能源消纳与频率电压支撑的
 电池储能系统优化规划[J].电力自动化设备,2024,44(7):
 3-12.

HU Zechun, CAI Fulin, FENG Jianzhou. Optimal planning of battery energy storage system considering renewable energy consumption and frequency and voltage support[J].Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(7): 3–12.

[24] 王廷涛, 苗世洪, 姚福星, 等. 计及频率电压稳定性约束的电力 系统多层级储能协同优化运行策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(21):6759-6777.

(下转第51页)

DOI:10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2025.06.003

多利益主体互动下光储系统联合配置的优化方法

冯德品1,徐 兵1,沈 涛1,马晓慧2*

(1.国网山东省电力公司临沂供电公司,山东 临沂 276000;2.天津大学 电气自动化与信息工程学院,天津 300072)

摘要:针对现有开发商在分布式光储规划中,难以充分考虑不同利益主体驱动下网络重构、储能运行策略、有功削减对光储配置结果的影响,提出一种多利益主体互动下光储系统联合配置的优化方法。首先,构建开发商和配电网运营商(distribution network operator, DNO)互动下的光储联合配置框架,揭示各主体的决策变量及互动影响机制;其次,建立开发商和DNO互动下的光储联合配置模型,在开发商规划层以开发商年投资运营收益最大决策分布式光伏容量和储能容量、在开发商运行层以开发商年运营收益最大决策储能运行策略、在DNO运行层以供电收益最大决策网络重构、有功削减及与开发商和上级电网的购售电功率;然后,将开发商规划运行模型进行耦合,并采用KKT(Karush-Kuhn-Tucker)条件和大M法将开发商规划运行模型转为DNO模型的约束条件求解;最后,通过某地区实际算例,验证所提光储联合配置方法的有效性和经济性。

 关键词:分布式光伏;储能;多利益主体;互动运行;联合配置

 中图分类号:TM715

 文献标志码:A

文章编号:1007-9904(2025)06-0022-11

Optimal Method for Joint Configuration of Photovoltaic Storage Systems Under Multi-stakeholder Interaction

FENG Depin¹, XU Bing¹, SHEN Tao¹, MA Xiaohui^{2*}

(1.State Grid Linyi Power Supply Company, Linyi 276000, China;

2. School of Electrical and Information Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: To address the challenge faced by existing developers in distributed photovoltaic and storage planning, specifically the difficulty in adequately considering the impacts of network reconfiguration, storage operation strategies, and active power reduction on the configuration results of optical storage under the drive of different stakeholders, an optimization method for the joint configuration of photovoltaic and storage systems under multi-stakeholder interaction is proposed. First, a joint configuration framework is constructed under the interaction between developers and distribution network operators (DNO), revealing the decision variables and interaction mechanisms of each stakeholder. Secondly, a joint configuration model for photovoltaic and storage systems under the interaction between developers and DNO is established. In the developer planning stage, the distributed photovoltaic capacity and storage capacity are determined by maximizing the developer's annual investment and operational revenue. In the DNO operation stage, the network reconfiguration, active power curtailment, and power purchase and sale with developers and the upstream grid are decided by maximizing the supply revenue. Then, the planning and operation models of developer's planning and operation models of developer's planning and operation models for solution. Finally, the effectiveness and economic feasibility of the proposed photovoltaic storage joint configuration method are validated through a case study in a specific region.

Keywords: distributed photovoltaic generation ; energy storage system ; multi-stakeholder ; interactive operation ; joint allocation

基金项目:国网山东省电力公司科技项目(520607220006)。

Science and Technology Project of State Grid Shandong Electric Power Company (520607220006).

0 引言

我国农村地区户用分布式光伏(distributed photovoltaic generation, DPV)累计安装户数已超过 500万户,与预测可安装户数8000万户相比,开发 潜力巨大^[1]。然而,部分省份已面临 DPV 并网消纳 形势严峻等问题,迫使暂停新增 DPV 的接入。通过 在 DPV 侧配置储能(energy storage system, ESS)削峰 填谷,有利于减缓光伏出力在高峰时段对电网的冲 击[2]。2023年6月,国家能源局下发《关于印发开展 分布式光伏接入电网承载力及提升措施评估试点工 作的通知》,提出"电源侧配置储能系统"要求[3],河 南[4]、山东[5]等地也出台了分布式光伏配储相关文 件,配储要求在装机容量的8%~30%之间,可见,光 储系统联合配置已逐渐成为 DPV 开发的重要途径。 在此背景下,光储系统开发商(以下简称"开发商") 通过租赁用户屋顶投资建设 DPV 和配套 ESS,并向 配电网运营商(distribution network operator, DNO)售 电而从中获利^[6],具有光储集群开发及调度管控的 优势[7],开发商为避免高峰出力时段的潮流越限,可 通过储能运行策略将电量转移到其他时段售出, DNO 还可通过网络重构措施协调不同馈线间的源荷 时序差异,开发商与DNO之间存在互动运行及利益 耦合的复杂关系,因此,研究计及多利益主体互动运 行的光储系统联合配置具有实际意义。

已有文献以单一主体利益最优在光储系统配置 过程中嵌入了运行策略^[8-11],然而,开发商还需考虑 与 DNO 之间的互动关系对光储配置结果的影响。 文献[12]建立了源网规划和运行调度的三层模型, DNO 根据馈线负载率约束决策 DPV 的接入位置,再 由用户以收益最大决策 DPV 的接入容量;与文献 [12]的规划层思路类似,文献[13]由 DNO 决策光储 接入位置,开发商决策光储容量,储能按照响应光伏 出力预测误差进行充放;然而,文献[12-13]均以 DNO 为主导根据线路负载需求决策光伏接入位置, 而对于既定配电网架而言,需由开发商根据光照资 源、屋顶面积等条件决策接入位置,且文献[13]中的 储能运行策略并未考虑系统潮流分布及运行安全约 束,未能充分发挥储能的灵活性;文献[14]由开发商 决策 DPV 的接入容量,并在运行层考虑了网络重构 对容量配置结果的影响;文献[15]对网络重构时段进行遍历寻优以实现双向重构,并在该网络拓扑下进行光储容量配置,然而储能的容量及功率取决于净负荷偏差,对源荷数据的准确度和完整度要求高; 文献[16]以开发商综合收益最大决策 DPV 接入容量,DNO 以光伏削减最小为目标优化光伏出力、无功补偿和有载调压,然而模型中并未涉及储能优化配置问题;文献[17]以中压、低压交直流配电网的光储容量为决策对象,并通过优化不同电压等级之间的交易电价,实现合作博弈最大化,然而,所提方法是以中、低压 DNO 为投资主体,难以解决由第三方开发商在运行层与 DNO 互动并进行光储协同配置的问题。因此,如何在光储联合配置问题中设计不同利益驱动下的储能运行策略、有功削减及网络重构的运行环节是亟待解决的难题。

针对以上问题,本文建立多利益主体互动运行 下的光储系统联合配置框架,开发商以投资收益最 大为目标决策光储容量及储能运行策略,DNO以供 电收益最大决策有功削减、网络重构及与上级电网 和开发商之间的交易功率,同时,采用KKT(Karush-Kuhn-Tucker)条件、对偶原理和大M法将双层max 问题转为单层混合整数二阶锥优化模型,并利用求 解器求解。

1 开发商和DNO互动下光储系统联合配置 框架

光储联合配置问题涉及开发商、DNO、上级电网和用户负荷,各主体之间的互动运行框架如图1 所示。

开发商根据用户屋顶光伏资源、购售电价、储能运行策略决策光储配置容量,通过光伏出力售电和储能充放电实现自身收益最大化。DNO的供电收益源自向用户、上级电网、开发商售电,DNO实质上应在满足电网安全运行的前提下促进光伏就地消纳,因此,为避免DNO将光伏出力大规模售出至上级电网造成反向倒送重载,规定DNO向上级电网的售电价格应低于DNO从开发商的购电价格。

2 开发商和DNO互动下的光储联合配置模型

开发商与 DNO 互动下的光储联合配置模型分 为开发商规划运行模型和 DNO 运行模型两层,其中 开发商决策待接入节点下的光伏容量、储能容量、储 能充放电功率;DNO 决策网络重构、光伏削减功率和 与开发商、上级电网之间的交互功率。

2.1 开发商规划运行模型

2.1.1 规划层的目标函数

开发商规划层的目标函数为年投资运营收益最 大,表达式为

 $maxC = C_{s} - C_{o} - C_{M} - C_{R} - C_{ESS}$ (1) 式中:C 为综合投资运行收益, C_{s} 为年售电收益,包 括全额上网收益和储能售电收益; C_{o} 为年等值光储 建设成本; C_{M} 为年光储运维成本; C_{R} 为年屋顶租赁成 本; C_{FSS} 为储能购电成本。

年售电收益为

$$C_{\rm S} = \sum_{T=1}^{365} \sum_{t=1}^{24} c_{\rm s}^{\rm pv}(t) \left[\sum_{i=1}^{N} P_i^{\rm pv}(t) + \sum_{i=1}^{N} P_{\rm ESS,i}^{\rm dis}(t) \right] \Delta t (2)$$

式中: $c_s^{\text{pv}}(t)$ 为第t时段开发商向 DNO 的售电电价; $P_i^{\text{pv}}(t)$ 为t时段第i个节点的光伏出力; $P_{\text{ESS},i}^{\text{ds}}(t)$ 为t时段第i个节点的储能售电功率;N为节点总数。

等值光储建设成本为

$$C_{0} = \frac{r(1+r)^{Y_{r}}}{(1+r)^{Y_{r}} - 1} c_{\text{PV}} \sum_{i=1}^{N} S_{\text{PV},i} + \frac{r(1+r)^{Y_{m}}}{(1+r)^{Y_{m}} - 1} c_{\text{ESS}} \sum_{i=1}^{N} S_{\text{ESS},i}$$
(3)

式中:r为贴现率;Y_{pv}和Y_{ess}分别为光伏和储能的运行 年限;c_{pv}和c_{ESS}分别为单位容量光伏和储能的建设成 本;S_{pv,i}为第i个节点的光伏安装容量;S_{ESS,i}为第i个 节点的储能安装容量。

年光储运维成本为

$$C_{\rm M} = c_{m,\rm PV} \sum_{i=1}^{N} S_{\rm PV,i} + c_{m,\rm ESS} \sum_{i=1}^{N} S_{\rm ESS,i}$$
(4)

式中: c_{m, PV}和 c_{m, ESS}分别为光伏和储能年单位功率的运维成本。

年屋顶租赁成本为

$$C_{\rm R} = \sum_{i=1}^{N} \delta_r A_i \tag{5}$$

式中: *δ*, 为单位面积的屋顶租赁成本; *A*, 为光伏 *i* 的场地面积。

年储能购电成本为

$$C_{\rm ESS} = \sum_{T=1}^{365} \sum_{t=1}^{24} c_{\rm b}^{\rm net}(t) \sum_{i=1}^{N} P_{{\rm ESS},i}^{\rm ch}(t) \Delta t$$
(6)

式中: $c_{b}^{\text{ret}}(t)$ 为t时段购电的分时电价; $P_{\text{ESS},i}^{\text{ch}}(t)$ 为t时段第i节点的储能购电功率。

2.1.2 规划层的约束条件

DPV 开发约束为:

$$A_i \leq A_{i,\max}: u_i \tag{7}$$

$$S_{\text{PV},i} = k_i A_i : \alpha_i \tag{8}$$

式中:A_i为第i个节点光伏的实际安装面积;A_{i,max}为 第i个节点所允许的最大光伏安装面积;k_i为第i个 节点光照利用系数,根据组件安装倾角、间距、光照 利用率测算而定;u_i为对应不等式约束的拉格朗日 乘子;α_i为对应等式约束的拉格朗日乘子。

储能开发约束为

$$0 \leq S_i^{\text{ESS}} \leq S_{\text{ESS}}^{\text{max}} : \gamma_{\text{ESS},i}^1, \gamma_{\text{ESS},i}^u$$
(9)

式中: S_{ESS}^{max} 分别为单个储能所允许配置的最大容量; $\gamma_{ESS,i}^{l}\gamma_{ESS,i}^{u}$ 为对应不等式约束的拉格朗日乘子。

2.1.3 运行层的目标函数

对于开发商而言,运行层的目标函数为

$$\max f = C_{\rm s} - C_{\rm R} - C_{\rm ESS} \tag{10}$$

式中:f为开发商的年运行收益。

由于规划层中的目标函数中包含了运行层的目标函数,而运行层要在给定的规划边界下寻优,并由 此求出规划层结果,运行层的最优解也是规划层中 运行问题的最优解,因此,将开发商的规划运行目标 耦合。

2.1.4 运行层的约束条件

开发商运行模型的约束条件包括配套储能运行 约束。

$$0 \leq P_{\text{ESS},i}^{\text{ch}}(t) \leq S_{\text{ESS},i}/h: u_i^{\text{ch},1}(t), u_i^{\text{ch},u}(t)$$
(11)

$$0 \leq P_{\text{ESS},i}^{\text{dis}}(t) \leq S_{\text{ESS},i}/h: u_i^{\text{dis},1}(t), u_i^{\text{dis},u}(t)$$
(12)

$$E_{\text{ESS},i}(t) = E_{\text{ESS},i}(t-1) + P_{\text{ESS},i}^{\text{ch}}(t) \Delta t \eta_{c} - \frac{P_{\text{ESS},i}^{\text{dis}}(t) \Delta t}{\eta_{d}} : \alpha_{\text{ESS},i}(t)$$
(13)

$$E_{\text{ESS},i}(0) = E_{\text{ESS},i}(T) : \boldsymbol{\beta}_{\text{ESS},i}(t)$$
(14)

 $\delta_{\min}S_{ESS,i} \leq E_{ESS,i}(t) \leq \delta_{\max}S_{ESS,i}:u_{ESS,i}^{l}(t), u_{ESS,i}^{u}(t)$ (15) 式中:h为储能额定容量与额定功率的比值; $E_{ESS,i}(t)$ 为t时刻第i个节点储能的电量; η_{c} 为储能的充电效 率; η_{d} 为储能的放电效率; $E_{ESS,i}(0)$ 和 $E_{ESS,i}(T)$ 分别为 调度周期初始时刻和结束时刻第i个节点储能的电 量; δ_{\min} 和 δ_{\max} 分别为储能电量的最小值系数和最大 值系数; $u_{i}^{ch,1}(t), u_{i}^{ch,u}(t), u_{i}^{dis,1}(t), u_{i}^{dis,u}(t), u_{ESS,i}^{l}(t),$ $u_{ESS,i}^{u}(t)$ 为对应不等式约束的拉格朗日乘子; $\alpha_{ESS,i}(t), \beta_{ESS,i}(t)$ 为对应等式约束的拉格朗日乘子。

2.2 DNO运行模型

2.2.1 目标函数

DNO 的目标函数为供电收益最大化,表达式为:

$$\begin{cases} \max F = C_{\text{load}} + C_{\text{g2up}} - C_{\text{gfup}} - C_{\text{DPV}} \\ C_{\text{load}} = \sum_{T=1}^{365} \sum_{t=1}^{24} c_s^{\text{load}}(t) \sum_{i=1}^{N} P_i^{\text{load}}(t) \Delta t \\ C_{\text{g2up}} = \sum_{T=1}^{365} \sum_{t=1}^{24} c_s^{\text{up}}(t) P_i^{\text{g2up}}(t) \Delta t \\ C_{\text{gfup}} = \sum_{T=1}^{365} \sum_{t=1}^{24} c_b^{\text{up}}(t) P_i^{\text{gfup}}(t) \Delta t \\ C_{\text{DPV}} = C_S + \sum_{T=1}^{365} \sum_{t=1}^{24} c_{\text{cut}} P_i^{\text{cut}}(t) \Delta t \end{cases}$$
(16)

式中:maxF为DNO的运行目标, C_{load} 为DNO向负荷 售电的收益, $c_s^{load}(t)$ 为t时刻DNO向负荷的售电电 价, $P_i^{load}(t)$ 为t时刻第i个节点的负荷功率; $C_{g^{2up}}$ 为 DNO向上级电网售电的成本, $c_s^{up}(t)$ 为t时刻DNO 向上级电网的售电价格, $P_i^{g^{2up}}(t)$ 为t时刻第i个节点 向上级电网的售电功率; C_{gup} 为DNO从上级电网购 电的成本, $c_t^{up}(t)$ 为t时刻DNO从上级电网购电价 格, $P_i^{gup}(t)$ 为t时刻第i个节点从上级电网的购电功 率; C_{DPV} 为DNO从开发商购电的成本, c_{cut} 为光伏削 减成本, $P_i^{cut}(t)$ 为t时刻第i个节点的光伏削减功率。 2.2.2 约束条件

采用 Distflow 潮流模型, 节点电压约束^[18]为:

 $\begin{cases} V_{j,\iota} = V_{i,\iota} + (R_{ij}^2 + X_{ij}^2) L_{ij,\iota} - 2(R_{ij}P_{ij,\iota} + X_{ij}Q_{ij,\iota}) \\ P_{ij,\iota}^2 + Q_{ij,\iota}^2 = L_{ij,\iota}V_{j,\iota} \end{cases}$ (17)

式中: $V_{j,i}=U_{j,i}^{2}, U_{j,i}$ 为第 t 时刻第 j节点的电压; R_{ij} 为支路 ij的电阻; X_{ij} 为支路 ij的电抗; $L_{ij,i} = I_{ij,i}^{2}, I_{ij,i}$ 为支路 ij

在 *t* 时刻的电流; *P_{ij,t}*为从节点 *i* 到节点 *j* 的支路在 *t* 时刻的有功功率; *Q_{ij,t}*为从节点 *i* 到节点 *j* 的支路在 *t* 时刻的无功功率。

节点电压和支路电流应满足安全要求:

$$\begin{cases} V_{i,\min} \leq V_{i,t} \leq V_{i,\max} \\ 0 \leq L_{ii,t} \leq L_{ii,\max} \end{cases}$$
(18)

式中:V_{i,min}为各节点电压下限;V_{i,max}为各节点电压上限;L_{ii,max}为支路 ij 的电流上限。

支路潮流约束为:

$$\begin{cases} \sum_{i \in \beta(j)} (P_{ij,t} - L_{ij,t}R_{ij}) + P_i^{pv}(t) - P_i^{cut}(t) - P_i^{dut}(t) - P_i^{dis}(t) - P_i^{glup}(t) - P_i^$$

式中: $\beta(j)$ 、 $\gamma(j)$ 分别为以j为首端节点的支路末端 节点集合、以j为末端节点的支路首节点集合; $Q_i^{up}(t)$ 是第t时刻第i节点和上级电网交互的无功功率; $Q_i^{load}(t)$ 是第t时刻第i节点的无功负荷。

支路容量约束满足:

$$P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2 \le S_{\max}^2$$
 (20)

式中:Smax为线路允许流过的最大视在功率。

当光伏出力过大导致配电网安全约束越限时,DNO可对光伏各个节点的有功功率进行优化削减:

$$0 \le P_i^{\text{cut}}(t) \le S_{\text{pv},i} \tag{21}$$

DNO 通过网络重构可改善配电网潮流分布,有利于提高光伏的就地消纳^[19]。为确保网络重构后配电网呈现辐射状,所有节点(除首节点外)应满足只有一个父节点,设置约束如下:

$$N_{\rm e} + \sum_{ij \in \Omega_t} \alpha_{ij,t} = N_1 - N_{\rm c}$$
⁽²²⁾

式中:N_e为不含联络开关的支路总数; α_{ij,t}为 0-1 变量,用于描述在第 t 时刻支路 ij 的通断状态,取 0 时 支路断开,取 1 时支路闭合; N_i为含联络开关的支路 总数; N_e为联络开关的数量。

并且,引入大*M*法对支路上的有功功率、无功功率进行约束^[20-21]:

$$\begin{cases} -\alpha_{ij,\iota}M_1 \leq P_{ij,\iota} \leq \alpha_{ij,\iota}M_1 \\ -\alpha_{ij,\iota}M_2 \leq Q_{ij,\iota} \leq \alpha_{ij,\iota}M_2 \end{cases}$$
(23)

式中:M1和M2分别为足够大的正数,从而保证当断

开支路时,对应支路上的功率值为零。

当支路断开后,两个节点之间的电压不满足式 (17),为保证模型的通用性,进一步改写为:

$$\begin{cases} V_{i,t} + (R_{ij}^{2} + X_{ij}^{2}) L_{ij,t} - 2(R_{ij}P_{ij,t} + X_{ij}Q_{ij,t}) - \\ V_{j,t} \leq (1 - \alpha_{ij,t}) M_{3} \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_{i,t} + (R_{ij}^{2} + X_{ij}^{2}) L_{ij,t} - 2(R_{ij}P_{ij,t} + X_{ij}Q_{ij,t}) - \\ V_{j,t} \geq (\alpha_{ij,t} - 1) M_{3} \end{cases}$$

$$P_{ij,t}^{2} + Q_{ij,t}^{2} - L_{ij,t}V_{j,t} \leq (1 - \alpha_{ij,t}) M_{4} \\ P_{ij,t}^{2} + Q_{ij,t}^{2} - L_{ij,t}V_{j,t} \geq (\alpha_{ij,t} - 1) M_{4} \end{cases}$$

$$(24)$$

式中: M3, M4为足够大的正数。

3 求解方法

由于模型涉及开发商和 DNO 两个主体,开发商 的决策变量 $\mathbf{x}=\{S_{\text{pv},i}, S_{\text{ESS},i}, P_{\text{ESS},i}^{\text{ch}}(t), P_{\text{ESS},i}^{\text{dis}}(t), E_{\text{ESS},i}(t)\},$ $(t)\},$ DNO 的决策变量 $\mathbf{y}=\{\alpha_{ij,t}, P_i^{\text{cut}}(t), P_i^{\text{g2up}}(t), P_i^{\text{g2up}}(t)\},$ $P_i^{\text{gfup}}(t)\},$ 双层模型可以表示为:

式中:*X*、*Y*分别为开发商和 DNO 决策变量的可行 域;*x*∈argmax {●}表示开发商的决策变量 *x* 取得最 优解时的解集;式(18)—式(24)为 DNO 的约束条 件,式(7)—式(9)和式(11)—式(15)为开发商的 约束条件。

由于 DNO 中含有 0-1 变量和连续变量,直接求 解存在一定难度,而开发商问题为凸问题,因此,采用 KKT 条件和大 M 转换将开发商模型转化为 DNO 模 型中的部分约束^[22-23],转换后的 KKT 紧凑表达式 如下:

$$\begin{cases} \nabla L(\mathbf{x}) = 0\\ h(\mathbf{x}) = 0\\ 0 \le \pi \perp - \mathbf{o}(\mathbf{x}) \ge 0 \end{cases}$$
(26)

式中: $\nabla L(\mathbf{x})$ 为拉格朗日函数的梯度; $h(\mathbf{x})=0$ 为开 发商模型中的等式约束,如式(8)、(13)、(14)所示; $g(\mathbf{x}) \leq 0$ 为开发商模型中的不等式约束,如式(7)、 (9)、(11)、(12)、(15)所示; π 为不等式约束的拉格 朗日乘子的集合, $\pi \perp - g(\mathbf{x})$ 为KKT条件中的互补松 弛条件,表示 π 和 $-g(\mathbf{x})$ 至多一个可以大于0。需采 用大M法将双线性项转换为线性模型。

$$\begin{cases} \nabla L(\mathbf{x}) = 0\\ \mathbf{h}(\mathbf{x}) = 0\\ 0 \le \pi \le \mathbf{M}(1 - \mathbf{B})\\ 0 \le -\mathbf{g}(\mathbf{x}) \le \mathbf{MB} \end{cases}$$
(27)

式中: *M* 为一个很大的常数, *B* 为 0-1 变量。转换过 程见附录 A 式 A(1)—式 A(19)所示。采用 MATLAB 环境下商业求解器 YALMIP/GUROBI 求解。

4 算例分析

4.1 算例及参数说明

以某地区实际配电网结构进行算例分析,某区 域配电网的拓扑结构见图 2 所示,DPV 和 ESS 拟接 入 14、18、24、27、36、41 节点。

图2 某区域配电网的拓扑结构图

Fig.2 Topology diagram of a regional distribution network

配电线路及负荷数据见附录 A 表 A1,光伏出力及 工业、居民、商业负荷归一化时序曲线见图 3。

Fig.3 Source-load normalised timing curve

线路型号均为LGJ-120,线路最大容量为 5.42 MVA,单位长度的线路阻抗为(0.025+j0.006)Ωkm。 折现率为8%,DPV使用年限20年,ESS使用年限15 年,储能连续充放电时长设为2h,节点电压范围为 0.93~1.07 pu。α₁为0.2,α_x为0.5。光储投资成本及 运行参数见附表A2所示。开发商向DNO的售电 电价为标杆电价0.3469元/kWh,DNO向上级电网 的售电电价为0.32元/kWh,光伏有功削减成本为 3.6元/kWh^[24],DNO向用户的售电电价采用山东省 分时电价^[25],DNO从上级电网的购电价格为0.95 倍的分时电价,各主体购售电价曲线如图4所示。

图4 各主体购售电价曲线

4.2 光储联合配置结果及经济性分析

为验证本文所提多利益主体互动运行下的光储 系统联合配置模型的有效性和经济性,设置4种不 同的光储联合配置方案进行对比分析。方案1为仅 考虑开发商利益最大化的光储配置;方案2仅考虑 DNO供电收益最大化的光储配置;方案3为仅考虑 多主体利益的光储配置;方案4为考虑多主体利益 及有功削减、网络重构的光储配置。上述方案的光 储联合配置结果如表1和表2所示,各主体的投资 成本及收益见表3所示。

对比表1、表2和表3的结果可见:

方案1对于开发商而言,当仅以其利益最大化 配置光储时,光伏可按照屋顶资源边界条件应装尽 装,开发商收益来自光伏售电及储能放电两部分,此 时开发商的年综合收益最高为693万元,然而,对 DNO而言,此时 DNO 的购电成本大幅增加,原因在 于光伏出力在 09:00—14:00 时段,结合图 4 可见, 此时段正处于分时电价的深谷时段和谷时段, DNO 按照 0.346 9 元/kWh 从开发商购电,却按照 0.090 7 元/kWh 和 0.055 元/kWh 向用户亏损售电,因 此 DNO 的经济性差,年供电收益损失 432 万元。

表1 光伏配置结果 Table 1 Results of DPV configuration

接入节点 —	光伏容量/MW							
	方案1	方案2	方案3	方案 4				
14	2	0	2	2				
18	2	0	2	2				
24	2	0	2	2				
27	2	0	2	2				
36	2	0	2	2				
41	2	0	2	2				

表2 储能配置结果 Table 2 Results of ESS configuration

接入节点 —	储能容量/MWh					
	方案 1	方案2	方案3	方案4		
14	1.04	0	1.43	1.64		
18	1.09	0	1.64	1.42		
24	0.86	0	1.34	0.98		
27	1.11	0	2.06	1.57		
36	0.92	0	1.52	1.23		
41	1.18	0	1.05	1.06		

表3 光储投资成本及收益

Table 3 DPV and ESS Investment Costs and Benefits

单位:万元

项目	方案1	方案2	方案3	方案4
DPV 年投资成本	489	0	489	489
DPV 年运维成本	72	0	72	72
年屋顶租赁成本	93	0	93	93
DPV 年弃光成本	0	0	0	19
ESS 年投资成本	1 116	0	1 627	1 422
ESS 年运维成本	22	0	32	28
ESS 的购电成本	397	0	578	505
开发商年收益	693	0	447	513
DNO 年供电收益	-432	1 627	1 350	1 489

方案 2 对于 DNO 而言,当仅以其利益最大化配 置光储时,此时光储容量均为 0,原因在于如配置光 储则在 09:00—14:00 时段会造成高买低卖的经济 损失,因此 DNO 倾向于全从上级电网购电,获得年 供电收益为 1 627 万元。

方案 3 从开发商和 DNO 的双重利益出发,由于 在当前购售电价的驱动下,DNO 倾向于在 06:00— 09:00、14:00—17:00 时段从开发商购电,在 09:00—14:00 从上级电网购电,DNO 通过低买高卖 获取差价收益。由于 09:00—14:00 正处于光伏出 力高峰时段,通过储能充电可实现高峰出力的转移, 同时,储能在 00:00—07:00 和 18:00—22:00 时段 放电,且受起始和终止时刻电量相等的约束,需要在 22:00—24:00 之间将剩余电量充满至 50%,由此, 开发商通过削峰填谷获得收益,值得注意的是,由于 储能的对外售电价格也为标杆电价,因此难以具备 峰谷套利的条件。

方案4在方案3的基础上,引入了有功削减和 网络重构的措施,而由于削减光伏所造成的经济补 偿较高,因此当前DNO优化出的削减结果较少,仅 为19万元。

4.3 网络重构对光储配置结果的影响

方案4中网络重构的结果如表4所示。

Table 4 Results of network reconfiguration					
对比	重构结果(断开开关)				
重构前	8-43,18-19,30-31				
重构后	8-43.26-27.14-15				

表4 网络重构的结果 Table 4 Besults of network reconfiguration

通过重构延长了 F2 和 F3 馈线的末端线路,对 于节点 18、24、27、36 而言,所在馈线上的负荷增多 后,将有利于整条馈线的光伏就地消纳,配套储能容 量较方案 3 均呈下降趋势,共计减少了 1.36 MWh, 节点 14 在重构后变成了末端节点,其就地消纳能力 减弱,储能容量较方案 3 增加了 0.21 MWh,节点 41 受网络重构的影响较小。可见,网络重构通过改变 网络拓扑以改善潮流分布,有利于实现馈线间的源 荷互济,进而提升配电网对光伏的承载能力,减少了 对储能容量的配置需求,降低了储能的投资运营 成本。

4.4 不同方案下的储能充放策略结果

对比不同方案下的储能充放电策略结果如图 5 所示。

Fig.5 Energy storage charging and discharging strategies

图 5(a)为仅考虑开发商自身利益下的储能充 放电策略,可见储能在 00:00—11:00 和 16:00— 24:00 时段持续放电,在 11:00—16:00 持续充电, 与光伏出力曲线基本吻合,从而实现光伏售电收益 的最大化,并未考虑 DNO 的购售电分时电价的影 响;图 5(b)为考虑多主体利益下的储能充放电策 略,储能在 00:08:00 持续放电,由于 09:00—14:00 的谷时电价低,DNO 更倾向于从上级电网购电,因 此,储能充满后在 10:00—13:00 时保持电量不变, 然后从 14:00 开始持续放电到 17:00,以响应开发 商售电收益最大的目标,最后在 22:00—24:00 将 电量重新充至 50%,以满足第二天起始时刻的用电 需求。

5 结束语

针对现有光储开发商光储联合配置中难以充分 考虑多主体下互动运行的局限性,本文提出了一种 多利益主体互动运行下的光储系统联合配置的优化 方法。该方法在光储配置中考虑了开发商配套储能 的运行策略及 DNO 在网络重构和有功削减下的措 施,通过算例分析得出以下结论:

1)在开发商和 DNO 各自利益驱动下的光储配 置结果差别较大,说明光储优化配置问题应充分考 虑运行层面的互动关系,本文方法验证得出通过所 提模型与算法进行光储配置能够均衡开发商和 DNO 之间的收益分配,避免出现"一方盈利、一方亏损"的 不公平现象发生。

2)网络重构措施可将区域内源荷分布进行均衡,从而有助于提高光伏就地消纳的能力,在光储协同规划问题中考虑网络重构措施有利于降低储能配置的投资成本,具有一定的工程应用价值。

3)通过对比不同方案下的储能运行策略,可见 DNO与上级电网和开发商之间的购电价格对充放电 策略起到关键作用,验证了储能具备均衡不同利益 主体之间的调节能力,有利于为整县分布式光伏健 康有序发展提供光储规划及运行一体的优化方案。

参考文献

- [1] 国家发展改革委,国家能源局.我国户用光伏装机突破1亿千 瓦[EB/OL].(2023-11-20)[2024-04-23].https://www.nea.gov. cn/2023-11/20/c_1310751324.htm.
- [2] 赵中华,徐海玲,郑志杰,等.山东电网"十四五"调峰能力分析
 [J].山东电力技术,2023,50(10):35-42.
 ZHAO Zhonghua, XU Hailing, ZHENG Zhijie, et al. Analysis on peak load modulation capability of Shandong power grid in the 14th Five-Year Plan period[J].Shandong Electric Power,2023,50 (10):35-42.
- [3] 国家发展改革委,国家能源局.关于印发开展 DPV 接入电网承 载力及提升措施评估试点工作的通知[EB/OL].(2023-06-01) [2024-04-23]. http: // zfxxgk. nea. gov. cn / 2023 - 06 / 01 / c_ 1310726992.htm.
- [4] 河南省发展和改革委员会.关于促进DPV发电健康可持续发展的通知[EB/OL].(2023-11-02)[2024-04-23].https://fgw.henan.gov.cn/2023/11-02/2840540.html.
- [5] 枣庄市能源局.关于印发枣庄市 DPV 建设规范(试行)的通知 [EB/OL].(2021-11-26)[2024-04-23].http://nyj.zaozhuang.gov.

 $cn/zcfg/xny/202201/t20220114_1378879.html.$

- [6] 国家发展改革委,国家能源局.关于开展分布式发电市场化交易试点的通知[EB/OL].(2017-10-31)[2024-04-23].http://zfxxgk.nea.gov.cn/auto87/201711/20171113_3055.htm.
- [7] 孙玲玲,李海滨,贾清泉,等.面向用户侧分布式光伏资源集群 开发的博弈策略[J].电力系统自动化,2023,47(10):26-37.
 SUN Lingling, LI Haibin, JIA Qingquan, et al. Game strategy for cluster development of user-side distributed photovoltaic resources
 [J].Automation of Electric Power Systems, 2023,47(10):26-37.
- [8] 陈柯蒙,肖曦,田培根,等.一种建筑集成光储系统规划运行综 合优化方法[J].中国电机工程学报,2023,43(13):5001-5012.
 CHEN Kemeng, XIAO Xi, TIAN Peigen, et al. Comprehensive optimization method for planning and operation of building integrated optical storage system [J]. Proceedings of the CSEE, 2023,43(13):5001-5012.
- [9] 周步祥,吴晨旭,邱一苇,等.计及光伏出力时序不确定性的电 制氢多机集群优化调度[J].电力建设,2023,44(9):108-117.
 ZHOU Buxiang, WU Chenxu, QIU Yiwei, et al.Optimal scheduling of multi-electrolyzer power-to-hydrogen clusters considering the temporal uncertainty of photovoltaic power [J]. Electric Power Construction, 2023,44(9):108-117.
- [10] 桑丙玉,王德顺,杨波,等.基于经济性的互联网数据中心光-储协同优化配置[J].电力系统保护与控制,2020,48(17): 131-138.

SANG Bingyu, WANG Deshun, YANG Bo, et al. Collaborative optimization configuration of photovoltaic-energy storage based on economy in an internet data center [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(17):131-138.

- [11] 吴杰,温晨阳,李珊,等.基于分时电价的光伏-储能系统容量优 化配置[J].电工电能新技术,2018,37(1):23-30.
 WU Jie, WEN Chenyang, LI Shan, et al. Optimal allocation of PV and accumulator system based on time-of-use price[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2018, 37(1): 23-30.
- [12] 刘洪,郑楠,葛少云,等.内嵌需求响应与优化运行策略的主动
 配电系统源网协同规划[J].电力系统自动化,2020,44(3):
 89-97.

LIU Hong, ZHENG Nan, GE Shaoyun, et al.Coordinated planning of source and network in active distribution system with demand response and optimized operation strategy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(3):89–97.

- [13] 饶萍,向月,姚昊天,等.市场环境下配电网分布式光储协同规划[J].中国电力,2022,55(1):178-188.
 RAO Ping, XIANG Yue, YAO Haotian, et al. Collaborative planning for distribution network and PV-ESS in the marketization environment[J].Electric Power,2022,55(1):178-188.
- [14] 张沈习,袁加妍,程浩忠,等.主动配电网中考虑需求侧管理和 网络重构的分布式电源规划方法[J].中国电机工程学报,

2016,36(增刊1):1-9.

ZHANG Shenxi, YUAN Jiayan, CHENG Haozhong, et al. Optimal distributed generation planning in active distribution network considering demand side management and network reconfiguration [J].Proceedings of the CSEE, 2016, 36(S1):1–9.

- [15] 李诗颖,杨晓辉.基于双向动态重构与集群划分的光伏储能选 址定容[J].电力系统保护与控制,2022,50(3):51-58.
 LI Shiying, YANG Xiaohui. Capacity and location optimization of photovoltaic and energy storage based on bidirectional dynamic reconfiguration and cluster division [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(3):51-58.
- [16] 孙建梅,胡嘉栋,蔚芳.考虑利益主体合作的分布式电源运营商 电源优化配置[J].电力建设,2021,42(6):127-134.
 SUN Jianmei, HU Jiadong, YU Fang. Optimal power configuration of distributed generation operator considering cooperation of

stakeholders [J]. Electric Power Construction, 2021, 42 (6) : 127-134.

- [17] 刘顺成,何禹清,乔学博,等.基于合作博弈的交直流配电网光 储协调规划方法[J].太阳能学报,2024,45(1):534-544.
 LIU Shuncheng, HE Yuqing, QIAO Xuebo, et al. Photovoltaicstorage coordinated planning method of AC / DC distribution network based on cooperative game [J]. Acta Energiae Solaris Sinica,2024,45(1):534-544.
- [18] BARAN M, WU F F.Optimal sizing of capacitors placed on a radial distribution system [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989,4(1):735-743.
- [19] 王星海,李鑫,王世坤,等.考虑分布式电源接入的配电网多目标优化重构方法研究[J].山东电力技术,2023,50(11):60-67.
 WANG Xinghai, LI Xin, WANG Shikun, et al. Research on multi-objective optimization and reconfiguration method of distribution network considering distributed generation access [J]. Shandong Electric Power,2023,50(11):60-67.
- [20] 张忠会, 雷大勇, 蒋昌辉, 等. 基于二阶锥规划和 NNC法的交直 流混合配电网双层规划模型及其求解方法[J]. 中国电机工程 学报, 2023, 43(1):70-85.

ZHANG Zhonghui, LEI Dayong, JIANG Changhui, et al. A bi-level planning model and its solution method of AC / DC hybrid distribution network based on second-order cone programming and NNC method[J].Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1):70–85.

[21] 章博,刘晟源,林振智,等.高比例新能源下考虑需求侧响应和
 智能软开关的配电网重构[J].电力系统自动化,2021,45(8):
 86-94.

ZHANG Bo, LIU Shengyuan, LIN Zhenzhi, et al. Distribution network reconfiguration with high penetration of renewable energy considering demand response and soft open point [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8):86–94. [22] 胡银龙,叶梓松,解振霖,等.基于机会约束的售电公司共享储 能经济运行优化[J].电力自动化设备,2024,44(5):44-50.
HU Yinlong, YE Zisong, XIE Zhenlin, et al. Economic operation optimization of shared energy storage for electricity retailer based on chance constraint [J]. Electric Power Automation Equipment, 2024,44(5):44-50.

 [23] 葛少云,杜咏梅,郭玥,等.基于分布鲁棒优化的车-站-网日前 能量管理与交易[J].电力系统自动化,2024,48(5):11-20.
 GE Shaoyun, DU Yongmei, GUO Yue, et al. Day - ahead energy management and trading of electric vehicles, charging stations and distribution networks based on distributionally robust optimization [J].Automation of Electric Power Systems,2024,48(5):11-20.

[24] 李勇,姚天宇,乔学博,等.基于联合时序场景和源网荷协同的 分布式光伏与储能优化配置[J].电工技术学报,2022,37(13): 3289-3303.

LI Yong, YAO Tianyu, QIAO Xuebo, et al. Optimal configuration of distributed photovoltaic and energy storage system based on joint sequential scenario and source – network – load coordination [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37 (13) : 3289–3303.

[25] 孙树敏,程艳,于芃,等.考虑运行调度策略的工商业用户侧光 储联合系统协同规划[J].电工电能新技术,2022,41(10): 81-88.

SUN Shumin, CHENG Yan, YU Peng, et al. Coordinated planning of photovoltaic-BESS hybrid system for industrial and commercial users considering scheduling strategy [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2022, 41(10); 81-88.

收稿日期:2024-04-29

修回日期:2024-06-25

作者简介:

冯德品(1984),男,硕士,高级工程师,主要研究方向:电力系统 及其自动化、电网调控运行、继电保护技术;

徐 兵(1988),男,硕士,高级工程师,研究方向:电网调控运行、 继电保护技术;

沈 涛(1980),男,高级工程师,研究方向:电力系统及其自动 化、电网调控运行;

马晓慧(1989),通信作者(mxh0927@126.com),女,硕士,工程师,主要研究方向:智能配电网规划与运行优化。

(责任编辑 王学厚)

附录A

将开发商和 DNO 的双层问题转为单层问题求 解的步骤如下:

首先,构造开发商问题的拉格朗日函数如下:
$$\begin{split} L &= \sum_{i=1}^{8} \Biggl\{ 365 \sum_{i=1}^{24} c_{i}^{\text{m}}(t) \left[P_{i}^{\text{r}}(t) + P_{\text{ESS}i}^{\text{ds}}(t) \right] \Delta t - \frac{r(1+r)^{Y_{r}}}{(1+r)^{Y_{r}} - 1} c_{\text{PV}} S_{\text{PV},i} - \frac{r(1+r)^{Y_{r}}}{(1+r)^{Y_{r}} - 1} c_{\text{ESS}} S_{\text{ESS}i} - \\ c_{\text{m},\text{PV}} S_{\text{PV},i} - c_{\text{m},\text{ESS}} S_{\text{ESS}i} - \delta_{i} A_{i} - 365 \sum_{i=1}^{24} c_{\text{b}}^{\text{ms}}(t) P_{\text{ESS}i}^{\text{ds}}(t) \Delta t + u_{i} (A_{i} - A_{i,\text{max}}) + \alpha_{i} (S_{\text{PV},i} - k_{i} A_{i}) + \\ \sum_{i=1}^{24} \Biggl[u_{i}^{\text{chu}}(t) (P_{\text{ESS}i}^{\text{ch}}(t) - S_{\text{ESS}i}(t) - 1 - P_{\text{ESS}i}^{\text{ds}}(t) P_{\text{ESS}i}^{\text{ds}}(t) + u_{i}^{\text{ds}}(t) (P_{\text{ESS}i}^{\text{ds}}(t) - S_{\text{ESS}i}/h) - u_{i}^{\text{ch}}(t) P_{\text{ESS}i}^{\text{ds}}(t) \Biggr] + \\ \sum_{i=2}^{24} \alpha_{\text{ESS}i}(t) \Biggl[E_{\text{ESS}i}(t) - E_{\text{ESS}i}(t) - P_{\text{ESS}i}^{\text{ds}}(t) \Delta t \eta_{e} + \frac{P_{\text{ESS}i}^{\text{ds}}(t) \Delta t}{\eta_{d}} \Biggr] + \sum_{i=1}^{24} \Biggl[\beta_{\text{ESS}i}(t) (C_{\text{ESS}i}(0) - E_{\text{ESS}i}(T) + u_{\text{ds}}^{\text{ds}}(t) (E_{\text{ESS}i}(t) - \delta_{\text{mas}} S_{\text{ESS}i}) \Biggr] \Biggr\} \\ \\ \mu_{1}^{\text{ds}}_{\text{ESS}i}(t) \Biggl[E_{\text{ESS}i}(t) - E_{\text{ESS}i}(t) + u_{\text{ESS}i}^{\text{ds}}(t) (E_{\text{ESS}i}(t) - \delta_{\text{mas}} S_{\text{ESS}i}) \Biggr] \Biggr\} \\ \\ \mu_{1}^{\text{ds}}_{\text{ESS}i}(t) \Biggl[\delta_{\text{min}} S_{\text{ESS}i} - E_{\text{ESS}i}(t) + u_{\text{ESS}i}^{\text{ds}}(t) (E_{\text{ESS}i}(t) - \delta_{\text{mas}} S_{\text{ESS}i}) \Biggr] \Biggr\} \\ \\ \mu_{1}^{\text{ds}}_{\text{ESS}i}(t) \Biggl[\delta_{\text{min}} S_{\text{ESS}i} - E_{\text{ESS}i}(t) + u_{\text{ESS}i}^{\text{ds}}(t) \Biggl[E_{\text{ESS}i}(t) - \delta_{\text{mas}} S_{\text{ESS}i} \Biggr] \Biggr\} \\ \\ \mu_{1}^{\text{ds}}_{\text{ESS}i}(t) \Biggl[\delta_{\text{min}} S_{\text{ESS}i}(t) + u_{\text{ESS}i}^{\text{ds}}(t) \Biggr] \Biggr\} \\ \\ \mu_{1}^{\text{ds}}_{\text{ESS}i}(t) \Biggl[\delta_{\text{min}} S_{\text{ESS}i}(t) + u_{1}^{\text{max}}(t) \Biggr] \Biggl\{ \delta_{\text{min}} S_{\text{ESS}i} \Biggr] \Biggr\} \\ \\ \mu_{1}^{\text{ds}}_{\text{ESS}i}(t) \Biggr\} \\ \\ \mu_{1}^{\text{ds}}_{\text{ESS}i}(t) \Biggr\} \\ \\ \\ \mu_{1}^{\text{ds}}_{\text{ESS}i}(t) \Biggr\} \\ \\ \mu_{1}^{\text{ds}}_{\text{eSS}i}(t) \Biggr\} \\ \\ \mu_{1}^{\text{ds}}_{\text{ESS}i}(t) \Biggr\} \\ \\ \mu_{1}^{\text{ds}}_{\text{eSS}i}(t) \Biggr\} \\ \\ \\ \mu_{1}^{\text{ds}}_{\text{eSS}i$$

$$\begin{array}{l} 0 \leq u_i^{\text{dis,u}}(t) \leq M(1 - B_{\text{dis}}^{u,t}), 0 \leq S_{\text{ESS},i}/h - \\ P_{\text{ESS},i}^{\text{dis}}(t) \leq MB_{\text{dis}}^{u,t} \end{array}$$
 (A17)

$$0 \leq u_{\text{ESS},i}^{\text{l}}(t) \leq M(1 - B_{\text{ESS}}^{\text{l}}),$$

$$0 \leq E_{\text{ESS},i}(t) - \delta_{\min} S_{\text{ESS},i} \leq M B_{\text{ESS}}^{\text{l}}$$
(A18)

$$0 \le u_{\text{ESS},i}^{\text{u}}(t) \le M(1 - B_{\text{ESS}}^{\text{u}}), 0 \le \delta_{\max} S_{\text{ESS},i} - E_{\text{ESS},i}(t) \le M B_{\text{ESS}}^{\text{u}}$$
(A19)

式中: $B_i \ B_{\gamma} \ B_{\gamma}^{u} \ B_{ch}^{u} \ B_{ch}^{u,t} \ B_{dis}^{l,t} \ B_{dis}^{u,t} \ B_{ESS}^{u} \ B_{ESS}^{u} \ b \ 0-1$ 变量。

附表A1 配电线路及负荷数据参数

(A5)

(A6)

(A8)

 $u_{\text{ESS},i}^{u}(t) \delta_{\text{max}} = 0$

 $u_i^{\rm ch,l}(t) - \alpha_{{\rm ESS},i}(t) \eta_c \Delta t = 0$

 $u_{i}^{\mathrm{dis,u}}(t) + \alpha_{\mathrm{ESS},i}(t) / \eta_{d} \Delta t = 0$

 $\nabla L(P_{\mathrm{ESS},i}^{\mathrm{ch}}(t)) = -365c_{\mathrm{b}}^{\mathrm{net}}(t) + u_{i}^{\mathrm{ch},\mathrm{u}}(t) -$

 $\nabla L(P_{\text{ESS},i}^{\text{dis}}(t)) = 365c_{\text{s}}^{\text{pv}}(t) - u_{i}^{\text{dis},1}(t) +$

 $\nabla L(E_{\mathrm{ESS},i}(t)) = \alpha_{\mathrm{ESS},i}(t) - u_{\mathrm{ESS},i}^{1}(t) + u_{\mathrm{ESS},i}^{u}(t) = 0 \text{ (A7)}$

 $S_{\text{PV},i} = k_i A_i$

线路编号	首节点序号	末节点序号	线路长度/km	末端节点有功功率/MW	末端节点无功功率/Mvar	末端节点负荷类型
1	1	2	3.6	0.27	0.129	居民
2	2	3	3.4	0.36	0.172	商业
3	3	4	3.5	0.60	0.287	居民
4	4	5	3.6	0.12	0.057	居民
5	5	6	2.3	0.20	0.096	居民
6	6	7	2.9	0.68	0.134	工业
7	7	8	2.1	0.39	0.186	居民
8	4	9	2.3	0.22	0.105	居民
9	9	10	3.7	0.40	0.191	居民
10	10	11	3.1	0.28	0.134	居民
11	11	12	3.2	0.31	0.148	商业
12	12	13	2.7	0.35	0.167	居民

				续表		
线路编号	首节点序号	末节点序号	线路长度/km	末端节点有功功率/MW	末端节点无功功率/Mvar	末端节点负荷类型
13	13	14	3.3	0.37	0.177	居民
14	14	15	3.5	0.61	0.100	工业
15	15	16	2.7	0.62	0.105	工业
16	16	17	3	0.30	0.143	居民
17	17	18	3.9	0.28	0.134	居民
18	18	19	3.8	0.13	0.062	商业
19	24	23	3.7	0.31	0.148	居民
20	23	22	2.1	0.20	0.096	居民
21	22	21	3.2	0.65	0.311	商业
22	21	20	2.2	0.62	0.153	工业
23	20	19	2.6	0.13	0.062	商业
24	8	43	2	0.34	0.162	居民
25	43	42	2.4	0.31	0.148	商业
26	42	41	3	0.67	0.129	工业
27	41	40	3.3	0.36	0.172	居民
28	40	39	2.4	0.28	0.134	商业
29	39	38	2.6	0.35	0.167	居民
30	38	37	3.7	0.69	0.091	工业
31	37	33	3.6	0.63	0.301	居民
32	36	35	3.4	0.27	0.129	居民
33	35	34	3.5	0.60	0.096	工业
34	34	33	4	0.35	0.167	居民
35	33	32	2.3	0.64	0.162	工业
36	32	31	2.3	0.35	0.167	居民
37	31	30	3.2	0.39	0.186	居民
38	21	25	3.3	0.15	0.072	商业
39	25	26	2.6	0.32	0.153	居民
40	26	27	3.3	0.61	0.148	工业
41	27	28	2.1	0.37	0.177	居民
42	28	29	2.1	0.29	0.139	商业
43	29	30	3.3	0.39	0.186	居民

附表A2 光储投资成本及运行参数

参数	数值
光伏系统建设成本/(元/kW)	4 000
光伏系统运维成本/(元/kW)	60
光伏系统寿命/年	20
单节点光伏最大接入容量/MW	2
单节点储能最大接入容量/MWh	2
光伏屋顶租赁费用/(元/年/块)(每块按450W计算)	35
储能系统建设成本/(元/kWh)	1 800
储能系统运维成本/(元/kWh)	36
储能系统寿命/年	15
储能充/放电效率	0.95
折现率/%	8

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2025.06.004

·电网运行与控制·

基于降阶高增益观测器的构网型光储系统滑模控制

薛瑞泽1,李 星1,王嘉力2,任俊恒3,皇金锋1*

(1.陕西理工大学电气工程学院,陕西 汉中 723001;2.西安星源博锐新能源技术有限公司,陕西 西安 710000;3.陕西理工大学物理与电信工程学院,陕西 汉中 723001)

摘要:针对新能源设备功率变化会引起直流母线电压波动,且在电网频率波动较大的弱电网环境下,有功功率可能 会产生功率振荡,从而使构网型光储系统暂态性能变差的问题,采用虚拟同步发电机技术,提出一种基于降阶高增 益观测器(reduced-order high gain observer, RHGO)的新型终端互补滑模控制(novel terminal complementary sliding mode control,NTCSMC)策略。首先,在观测器中引入高增益系数来抑制瞬态振荡,并通过降阶设计对观测器结构进 行简化;其次,在终端互补滑模面上引入控制系数,增强了被控系统的稳定性,并设计超螺旋切换律来抑制抖振;然 后,从理论上证明 RHGO 和 NTCSMC 的稳定性;最后在 MATLAB 仿真和实验平台上,分别对比例积分(proportional integral,PI)控制、基于传统扩张状态观测器-滑模控制(extended state observer-sliding mode control,ESO-SMC)与改进 ESO-SMC 控制方法进行仿真及实验验证。结果表明,所提控制方法在构网型光伏并网储能系统的暂态性能方面具 有良好的效果。

关键词:虚拟同步发电机;构网型光储系统;降阶高增益观测器;新型终端互补滑模;暂态性能
 中图分类号:TM46
 文献标志码:A
 文章编号:1007-9904(2025)06-0033-11

Sliding Mode Control of Grid-forming PV-storage System Based on Reduced-order High Gain Observer

XUE Ruize¹, LI Xing¹, WANG Jiali², REN Junheng³, HUANG Jinfeng^{1*}

(1.School of Electrical Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China;

2.Xi'an Xingyuan Bo Rui New Energy Technology Co., Ltd., Xi'an 710000, China;

3. School of Physics and Telecommunication Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China)

Abstract: Aiming at the problem that the DC bus voltage fluctuation will be caused by the power change of new energy equipment, and the active power may produce power oscillation under the weak power network environment with large frequency fluctuation of the power grid, thus worsening the transient performance of the grid-type optical storage system, based on the virtual synchronous generator technology, a novel terminal complementary sliding mode control (NTCSMC) strategy based on the reduced-order high gain observer (RHGO) is proposed.Firstly, a high gain coefficient is introduced into the observer to suppress transient oscillations, and the structure of the observer is simplified by a reduced-order design. Secondly, the control coefficient is introduced on the terminal complementary sliding mode surface to enhance the stability of the controlled system, and the superhelical switching law is designed to suppress buffeting.Then, the stability of RHGO and NTCSMC is proved theoretically.Finally, proportional integral (PI) control, traditional extended state observer-sliding mode control (ESO-SMC), and improved ESO-SMC control methods are simulated and verified by experiments on MATLAB simulation and experiment platform. The results show that the proposed control method has a good effect on the transient performance of grid-connected photovoltaic energy storage systems.

Keywords: virtual synchronous generator; grid-forming PV-storage system; reduced-order high gain observer (RHGO); novel terminal complementary sliding mode(NTCSMC); transient characteristics

基金项目:陕西省自然科学基金面上项目(2023-JC-YB-442)。

Shaanxi Provincial Natural Science Foundation (2023-JC-YB-442).

0 引言

随着绿电市场整体的不断扩大,我国可再生能 源的规模将进一步增加。我国绿色电力交易试点正 式启动后的首次交易完成,来自北京、江苏、辽宁等 17个省份的259家市场主体达成了79.35亿kWh的 绿电交易^[1]。在未来,我国光伏等新能源发电仍将 高速发展。同时,高比例新能源设备的投入会使得 电网的电压或频率的支撑调节能力变差等问题的发 生概率增大,从而影响电力系统的稳定运行^[2-3]。

为应对这一问题,以构网技术为核心的电力电 子装置逐渐成为研究热点。构网技术的控制框架包 括功率外环控制、虚拟阻抗以及内环控制三个环节, 经三个环节后生成调制波^[4]。其中,外环控制分为 有功-频率调节和无功-电压调节,从而具备与同步 发电机一样的输出特性;内环控制能够对电压、电流 实现精准控制,从而增强变流器的电流限制能 力^[5-6]。构网型光伏储能系统中光伏模块可等效为一 个恒功率源,用于输出功率以及负载消耗[7]:超级电 容组可用来平抑系统外部的功率波动[8];三电平变流 器具备直流侧中性点钳位作用,能够更好地应对储能 系统充放电所引起的输出直流母线电压变化[9-10]。构 网型逆变器呈现电压源特性,采用虚拟同步发电机 (virtual synchronous generators, VSG)技术^[11]为弱电网 系统提供电压和频率支撑,但VSG技术需要频繁地 调整控制参数,适配不同的电网强度。因此,适用范 围广、鲁棒性更强控制策略的提出是有意义的。

为更好地发挥 VSG 技术的优势,文献[12]对 VSG 中的频率进行调整,提高了系统频率的抗扰动 能力。文献[13]通过自适应调整 VSG 的转动惯量 和阻尼系数,提高了系统的频率稳定性和动态调节 能力。文献[14]设计了有源功率控制器,可以根据 功率基准稳定输出有功功率。

另一方面,许多学者在控制方法上进行了改进。 如能量成型控制、自抗扰控制、粒子群算法、滑模控制^[15-18]等。滑模控制(sliding mode control, SMC)对 系统数学模型精度要求低,适用于非线性系统,因而 在变换器控制领域得到广泛应用。为改善滑模的性 能以及抑制抖振,许多学者对此进行了改进。文献 [19]将反步滑模控制用于孤岛微电网系统可以保证 系统的快速稳定。文献[20]将终端互补滑模控制用 于非线性系统控制。为进一步加强滑模控制对系统 扰动的抑制能力,有学者提出将扩张状态观测器 (extended state observer, ESO)应用到滑模的思想。 文献[21]将级联思想用于观测器中,增加了扰动的 估计速度,但会增加控制的复杂度。

构网型光伏储能系统容易受光照强度、负载波 动等外部扰动的影响,导致系统输出功率波动,一些 具备抗扰性能的非线性控制策略逐渐受到学者们的 高度关注。观测器不依赖于数学模型,在非线性控 制中广泛应用。针对传统观测器对外部噪声敏感的 问题,文献[22]将高增益扰动观测器(high gain observer,HGO)用于磁悬浮球系统的控制,但该观测 器自身结构和参数较为复杂。为加快滑模的趋近速 度,文献[23]将非奇异终端滑模用于控制超声速飞 行器,但非奇异终端滑模存在跟踪误差较大的问题。 文献[24]将分数阶互补滑模用于控制船舶航向,但 互补滑模存在收敛速度慢的问题。文献[25]采用超 螺旋滑模控制磁阻电机,有效抑制电机运转时的转 矩波动。

基于上述文献,为保证含有大量新能源的弱电 网系统在受到功率指令变化以及外界功率波动时仍 能够稳定运行,同时体现滑模控制结合观测器的优 势,提出一种基于降阶高增益观测器(reduced-order high gain observer, RHGO)的新型终端互补滑模控制 (novel terminal complementary sliding mode control, NTCSMC)策略。在观测器中引入高增益系数可以 抑制瞬态振荡,并对观测器结构进行了降阶处理;在 终端互补滑模控制快速收敛的优势上,通过控制系 数可以灵活调整跟踪误差及其导数和指数项对滑模 面的影响程度,并设计超螺旋切换律来抑制抖振现 象,增强了被控系统的稳定性。

1 构网型光伏储能系统拓扑

构网型光伏储能系统的整体结构如图 1 所示, 主要由超级电容组、光伏阵列、配电网、三电平逆变 器和交流负载模块组成。图 1 中, T_{k1}—T_{k4}为三相变 流器模块的开关管, k 表示 a、b、c 三相, 且 T_{k1}和 T_{k3} 互补导通, T_{k2}和 T_{k4}互补导通; S₁、S₂为斩波器模块的 开关管; S₃为 Boost 电路的开关管; VD 为二极管; L_{pv}





为 Boost 电路滤波电感; L_{se} 为斩波器滤波电感;L为 交流侧滤波电感;R为电感的寄生电阻;C为交流侧 滤波电容; L_g 为电网等效电感; R_g 为电网等效电阻; i_{pv} 为经过最大功率追踪(maximum power point tracking, MPPT)控制后输出的电流; u_{se} 为超级电容 组输出电压; i_{se} 为超级电容组输出电流; i_{out} 为直流 母线输入到逆变器中的电流; i_{L_k} 为交流侧电感的相 电流; i_k 为负载侧输出的三相电流; u_k 为交流侧输出 的三相电压; u_{ck} 为交流侧电容两端的相电压; e_k 为 电网侧相电压。

为增加电力系统内部的惯量和阻尼,模拟实际的发电机可得 VSG 的有功-频率方程为

$$\begin{cases} J \frac{\mathrm{d}\omega}{\mathrm{d}t} = \frac{P_{\mathrm{ref}} + K_{\mathrm{f}}(\omega_{\mathrm{n}} - \omega) - P_{\mathrm{e}}}{\omega_{\mathrm{n}}} - D(\omega - \omega_{\mathrm{0}}) \\ \frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}t} = \omega - \omega_{\mathrm{n}} \end{cases}$$
(1)

式中: K_r 为下垂调差系数;J为虚拟转动惯量;D为阻 尼系数; θ 为等效同步发电机的功角; ω 、 ω_0 、 ω_n 分别 为输出角速度、电网角速度和额定角速度; P_e 为等效 电磁功率; P_{rer} 为有功功率参考值。

通过模拟同步发电机的励磁调节器可得 VSG 的无功-电压控制方程为

$$K\frac{\mathrm{d}E}{\mathrm{d}t} = Q_{\mathrm{m}} - Q_{\mathrm{e}} + D_{\mathrm{q}}(U_{\mathrm{n}} - U)$$
(2)

式中:Q_m为参考无功功率;Q_e为 VSG 输出无功功率; D_q为无功调节系数;K 为积分系数;U 为逆变器输出 电压幅值;U_n为系统额定电压幅值;E 为交流侧输出 电压基波分量幅值。

综合上式可得 VSG 控制框图如图 2 所示,其中 U_m为 VSG 输出的虚拟电势。



图 2 VSG 控制框图 Fig.2 VSG control block diagram

为抑制功率之间的耦合影响,VSG 输出参考 电压中引入虚拟阻抗环节进行抑制。将加入虚拟 阻抗后的参考电压经双闭环控制得到调制信号, 再经空间矢量脉宽调制法(space vector pulse width modulation,SVPWM)输出的脉冲信号用于三电平逆 变器的控制。此外,对于三电平逆变器自身还存在 中点电压不平衡的问题,通过在原有调制波的基础 上注入零序分量^[26]解决。根据每个单位周期内中 性点的电荷量为零,可得零序分量 u_0 的表达式为 $u_0 =$

$$\frac{C_{dc1}u_{dc1} - C_{dc2}u_{dc2} + T_s(\sum_{k=a,b,c} i_{1k} - \sum_{k=a,b,c} |u_k| i_{1k})}{T_s \sum_{k=a,b,c} \operatorname{sign}(u_k) i_{1k}}$$
(3)

式中: u_{de1} 、 u_{de2} 分别为两个电容两端的实际电压; T_s 为 开关周期;sign(•)为符号函数; u_k 为k相经过调制算 法后产生的调制波值。

为进一步分析 VSG 在并网系统中的性能,在并 网的条件下,VSG 等效的拓扑如图 3 所示。图 3 中, U_g 为电网电压有效值, δ 为 VSG 的功率角, U_0 为 VSG 三 相电压的均方根, u_{pcc} 为 VSG 与电网耦合点处的电 压,Z 为线路阻抗, 且 Z=R+jX, R 为线路电阻, X 为线 路电抗。



图 3 并网 VSG 等效图 Fig.3 Grid connected VSG equivalent diagram

一般情况下,由于滤波电感的存在,线路是呈感性的,因此 VSG 传输到电网的视在功率表达式为

$$S = 3\frac{U_0 U_g}{X} \sin\delta + j(3\frac{U_0 U_g}{X} \cos\delta - 3\frac{U_g^2}{X}) \qquad (4)$$

由于δ值很小,式(4)可近似线性化为

$$P_{e} = \frac{3U_{0}U_{g}\delta}{X}$$
(5)

于是并网下 VSG 的功率控制框图如图 4 所示。



图4 并网VSG功率控制框图

Fig.4 Grid connected VSG power control block diagram

$$C = 3 \frac{U_{o}U_{g}}{X} \tag{6}$$

假设电网频率波动很小时,输出有功功率的传 递函数表达式为

$$P_{\rm e}(s) = \frac{CK_{\rm f}}{K_{\rm f}J\omega_{\rm n}s^2 + (K_{\rm f}D\omega_{\rm n}+1)s + CK_{\rm f}}P_{\rm ref}(s) \qquad (7)$$

由图1可知,控制超级电容的电路为双向 DC-DC变流器,且变流器的两个开关管S₁、S₂互补导 通。建立超级电容变换器的动态数学模型如式(8) 所示。

$$\begin{cases} \frac{\mathrm{d}u_{\mathrm{dc}}}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{C_{\mathrm{dc}}} \left(D_1 i_{\mathrm{sc}} + i_{\mathrm{pv}} - i_{\mathrm{out}} \right) + f_{\mathrm{u}} \\\\ \frac{\mathrm{d}i_{\mathrm{sc}}}{\mathrm{d}t} = \frac{1}{L_{\mathrm{sc}}} \left(u_{\mathrm{sc}} - D_1 u_{\mathrm{dc}} \right) + f_{\mathrm{i}} \end{cases}$$

$$\tag{8}$$

式中: *D*₁为开关管 S₁的导通占空比; *f*₁ *f*₁分别为电 压、电流的未知扰动。

由式(7)和式(8)可知,构网型光伏储能系统是一个多变量、非线性的系统,传统的控制方法不能满足

响应速度快、精度高、超调小的需求,功率的频繁波动会影响并网质量,并造成直流母线电压波动,降低 MPPT 的控制性能。因此,提出了一种改进 ESO-SMC 策略以提升构网型光伏储能系统的性能。

2 改进ESO-SMC设计

定义一个控制对象为

$$\ddot{y} = b_0 u + f \tag{9}$$

式中:y为系统的输出;u为系统的输入控制;b₀为控制量的增益;f为系统的内外总扰动。

通过采用改进的观测器提升对扰动估计速度以 及相位滞后现象;改进终端互补滑模能够加快滑模 收敛速度,最后得到改进的ESO-SMC。

2.1 ESO改进

2.1.1 改进ESO设计

由式(9)可得,系统状态误差e为

$$e = y_{\rm ref} - y \tag{10}$$

式中:y_{ref}为系统输入参考值。

结合式(9)和式(10)可得

$$\ddot{e} = -bu + f_{\rm d} \tag{11}$$

式中: f_d 为系统外部扰动,满足 $f_d = \ddot{y}_{ref} + (b - b_0)u - f_o$

定义状态变量 $x_1 = e_x_2 = \dot{e}_x_3 = f_d$,则系统的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_{1} = x_{2} \\ \dot{x}_{2} = -bu + x_{3} \\ \dot{x}_{3} = \dot{f}_{d} \end{cases}$$
(12)

为解决传统 ESO 受测量噪声影响大的问题,在 传统 ESO 中引入高增益系数,在瞬态期间呈现高增 益,从而减小测量噪声带来的不利影响,定义观测误 差为 e_e=x₁-q₁,根据式(12)设计高增益观测器为

$$\begin{cases} \dot{\varphi}_{1} = \varphi_{2} + \frac{3\omega_{0}}{\varepsilon}e_{0} \\ \dot{\varphi}_{2} = -bu + \varphi_{3} + \frac{3\omega_{0}^{2}}{\varepsilon^{2}}e_{0} \\ \dot{\varphi}_{3} = \frac{\omega_{0}^{3}}{\varepsilon^{3}}e_{0} \end{cases}$$
(13)

式中: ε 为小于1的正常数; ω_0 为观测器带宽; $\varphi_1,\varphi_2,\varphi_3$ 分别为 x_1,x_2,x_3 的估计值。

由于x₁是已知的,为降低观测器的复杂结构,可 以省去对x₁的估计。对式(13)所示的观测器进行降 阶处理可得

$$\begin{cases} \dot{\varphi}_2 = -bu + \varphi_3 + \frac{2\omega_0}{\varepsilon} (x_2 - \varphi_2) \\ \dot{\varphi}_3 = \frac{\omega_0^2}{\varepsilon^2} (x_2 - \varphi_2) \end{cases}$$
(14)

由于式(14)中观测器的输入量不能够直接获 取,只能获取状态变量 x₁的微分,会给系统增加微分 噪声。为此引入中间变量 z₂、z₃满足

$$\begin{cases} \varphi_2 = z_2 + \frac{2\omega_0}{\varepsilon} x_1 \\ \varphi_3 = z_3 + \frac{\omega_0^2}{\varepsilon^2} x_1 \end{cases}$$
(15)

根据式(15)可得 RHGO 形式为

$$\begin{cases} \dot{z}_2 = -bu + z_3 + \frac{\omega_0^2}{\varepsilon^2} x_1 - \frac{2\omega_0}{\varepsilon} \left(z_2 + \frac{2\omega_0}{\varepsilon} x_1 \right) \\ \dot{z}_3 = -\frac{\omega_0^2}{\varepsilon^2} \left(z_2 + \frac{2\omega_0}{\varepsilon} x_1 \right) \end{cases}$$
(16)

2.1.2 RHGO 仿真分析

对式(14)应用拉普拉斯变换,可得改进 ESO 的 状态变量和扰动估计误差之间的传递函数为

$$\frac{\varphi_3(s)}{x_3(s)} = \frac{\omega_0^2}{(\varepsilon s + \omega_0)^2}$$
(17)

令 ω₀=500 rad/s, ε=0.1, 绘制三种观测器的频率 特性曲线, 在幅值上改进的 ESO 使带宽明显增大, 增 强了扰动估计能力; 在相位上减小了相位滞后现象, 确保了观测的扰动能够准确及时地反馈到控制器中, 扰动估计误差的频率特性曲线如图 5 所示。从图 5 可以看出, 降阶后观测器的带宽范围明显增大, 相位 滞后问题有了明显的改善, 从而进一步提高了观测器 的观测性能, 同时也能够简化观测器的结构。





2.2 滑模控制器的改进

2.2.1 NTCSMC设计

传统终端互补滑模在收敛速度以及精度方面具 备良好的控制性能,但互补滑模面之间的相互影响 会使得被控系统的稳定性降低。因此,通过在终端 互补滑模面上增加控制系数λ₁、λ₂,可以灵活调整跟 踪误差及其导数和指数项对滑模面的影响^[20],因此 将传统终端互补滑模改进为

$$\begin{cases} s_{g} = \lambda_{1}\dot{e} + 2\lambda_{1}\lambda_{2}e + \lambda_{2}e^{n} + \lambda_{2}^{2}\int_{0}^{t} (\lambda_{1}e + e^{n}) d\tau \\ s_{c} = \lambda_{1}\dot{e} + \lambda_{2}e^{n} - \lambda_{2}^{2}\int_{0}^{t} (\lambda_{1}e + e^{n}) d\tau \end{cases}$$
(18)

式中: λ_1 、 λ_2 为正实数;n为滑模面指数项系数,满足 $1 < n < 2; s_g$ 、 s_c 分别为新型广义终端滑模面及其互补滑 模面,满足

$$\dot{s}_{\rm c} + \lambda_2 s = \dot{s}_{\rm g} \tag{19}$$

选择 Lyapunov 函数 V 为

$$V = \frac{1}{2} s_{\rm c}^{\ 2} + \frac{1}{2} s_{\rm g}^{\ 2} \tag{20}$$

对式(20)求导可得

$$V = s\left(\lambda_1 \ddot{e} + \lambda_2 n e^{n-1} \dot{e} + \lambda_2 \left(2\lambda_1 \dot{e} + \lambda_2 \left(\lambda_1 e + e^n\right) + s_g\right)\right) - \lambda_2 s^2 \quad (21)$$

由式(21)可得 NTCSMC 的等效控制律为

$$\frac{1}{b} \left(2\lambda_2 z_2 + \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \left(n e^{n-1} z_2 + \lambda_2 \left(\lambda_1 e + e^n \right) + s_g \right) + z_3 \right) (22)$$

将超螺旋趋近律用于切换控制律中可得

$$u_{sw} = -k_1 |s|^{0.5} \operatorname{sat}(s) - \int k_2 \operatorname{sat}(s) \, \mathrm{d}t \tag{23}$$

式中:*k*₁、*k*₂均为正数;sat(·)为饱和函数。由于超螺 旋趋近律内部的积分作用,可以使切换控制律成为 连续的控制量,并采用饱和函数减小滑模剧烈的不 连续跳变,从而减小抖振。

由上式可得 NTCSMC 的控制律 u 为

$$\frac{u = \frac{2\lambda_2 z_2 + \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \left(ne^{n-1} z_2 + \lambda_2 \left(\lambda_1 e + e^n \right) + s_g \right) + \frac{u_{sw}}{\lambda_1} + z_3}{b} (24)$$

2.2.2 NTCSMC仿真分析

为验证改进滑模控制的有效性,设计二阶被控 对象为 *с* .

$$\begin{cases} \delta_1 = \delta_2 \\ \dot{\delta}_2 = 10u_1 + \delta_1 + d \end{cases}$$
(25)

式中: δ_1 和 δ_2 为状态变量; u_1 为系统输入控制量;d为系统扰动。

定义 e₁=δ_{ref}-δ₁,其中δ_{ref}为控制器输入的参考值。 采用改进滑模控制时,式(25)中被控对象的输入控 制量为

$$u_{1} = \frac{1}{10} \left[\frac{\lambda_{2}}{\lambda_{1}} \left(ne^{n-1} \dot{e} + \lambda_{2} \left(\lambda_{1} e + e^{n} \right) + s_{g} \right) + \ddot{\beta}_{ref} + 2\lambda_{2} \dot{e} - \delta_{1} - d - \frac{k_{1} |s|^{0.5} \operatorname{sat}(s) + \int k_{2} \operatorname{sat}(s) \, dt}{\lambda_{1}} \right]$$
(26)

设定控制器的参考值为 δ_{rel} = 5 sin(($\pi/10$)t),系 统扰动为d=10 sin(πt)。为进一步验证控制器参数 对系统的影响,在系统稳定条件下取 k_2 =20,分别取 k_1 =5、10、15,观察控制参数对滑模抖振以及系统稳 态误差的影响,如图 6 所示。





根据图 6,选择增益系数 k₂=20 可使滑模显现出 良好的效果。通过仿真分析为选取滑模控制的最优 参数提供依据。

针对二阶系统模型,由式(16)和式(24)可得改进 ESO-SMC 整体结构,如图7所示。

3 稳定性证明

3.1 观测器稳定性证明

为分析改进观测器的稳定性,由式(14)可将观测器的状态方程描述为

$$\dot{\boldsymbol{\eta}} = \boldsymbol{A}\boldsymbol{\eta} + \boldsymbol{B}\boldsymbol{x}_2 + \boldsymbol{C}\boldsymbol{u} \tag{27}$$



图7 改进ESO-SMC整体结构框图

Fig.7 Improved ESO-SMC overall structure block diagram

$$\boldsymbol{\eta} = \begin{bmatrix} \varphi_2 & \varphi_3 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$
(28)

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{2\omega_0}{\varepsilon} & 1\\ -\frac{\omega_0^2}{\varepsilon^2} & 0 \end{bmatrix}$$
(29)

$$B = \left[\frac{2\omega_0}{\varepsilon} \quad \frac{\omega_0^2}{\varepsilon^2}\right]^{\mathrm{T}}$$
(30)

$$C = \begin{bmatrix} -b & 0 \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \tag{31}$$

由式(27)中矩阵A得状态方程的特征多项式为

$$\det(\lambda I - A) = \lambda^2 + \frac{2\omega_0}{\varepsilon}\lambda + \frac{{\omega_0}^2}{\varepsilon^2}$$
(32)

令式(32)为零时,对应的特征值为

$$\lambda_1 = \lambda_2 = -\frac{\omega_0}{\varepsilon} \tag{33}$$

由式(33)可知,当带宽ω。和高增益系数ε都为 正数时,系统极点均位于左半平面,那么所设计的观 测器是稳定的。

3.2 控制器稳定性证明

基于二阶对象的数学模型,对式(18)的新型终端互补滑模面求导可得

$$\dot{s}_{g} = \lambda_{1} \left(b_{0} u_{eq} + F \right) + 2\lambda_{1} \lambda_{2} \dot{e} + \lambda_{2} n e^{n-1} \dot{e} + \lambda_{2}^{2}$$

$$\left(\lambda_{1} e + e^{n} \right)$$
(34)

$$\dot{s}_{c} = \lambda_{1} \left(b_{0} u_{sw} + F \right) + \lambda_{2} n e^{n-1} \dot{e} - \lambda_{2}^{2} \left(\lambda_{1} e + e^{n} \right)$$

首先选取 Lyapunov 函数为

I

$$V_{1} = \frac{1}{2} s_{c}^{2} + \frac{1}{2} s_{g}^{2}$$
(35)

将 Lyapunov 函数对时间求导并结合式(34) 可得

$$\dot{V}_{1} = s_{c}\dot{s}_{c} + s_{g}\dot{s}_{g} = -\lambda s^{2} - sF - sbu_{sw}$$

$$\leq -\lambda s^{2} + s|-F| - sbu_{sw} \leq -\lambda s^{2} + s(|F| - \kappa)$$
(36)

式中:F为总体扰动; κ 为F的上界。 此时, $ss \leq -2\rho|s|, \rho$ 为 κ 和系统扰动之间的误

差。由此可得系统在任意状态到达滑模面的时间为 $t_1 \leq |s(0)|/2\rho_o$ 。

当滑模运动到滑模面时可得

$$s=2\lambda_1\dot{e}+2\lambda_1\lambda_2e+2\lambda_2e^n=0$$
(37)

由式(37)条件可得

$$\dot{e} = -\lambda_2 e - \lambda_2 e^n / \lambda_1 \tag{38}$$

由式(38)可得

$$-\lambda_{2}\Delta t = \int_{t_{1}}^{t_{1}+\Delta t} \frac{\lambda_{1}}{\lambda_{1}e - e^{n}} de \qquad (39)$$

故所设计的 NTCSMC 在 Δt 时间段内可以由滑 模面收敛到原点。

由于总扰动存在上界,由式(36)可得 *v* ≤ 0,即 所提控制器能够满足 Lyapunov 稳定条件,那么所设 计的控制器是能够稳定的。

4 构网型光伏储能系统控制策略设计

构网型光伏储能系统的整体控制结构如图 8 所示。图 8 中, ESO-SMC 的具体形式与图 7 相同。

4.1 构网型逆变器的控制器设计

构网型逆变器对有功环采用改进 ESO-SMC 控

制,使 VSG 在能够稳定的情况下具有与系统相适应 的阻尼和较短的响应时间。对式(7)进行拉普拉斯 反变换,可得时域下的数学模型为

$$\ddot{P}_{e} = \frac{C}{J\omega_{n}}P_{r} - \frac{(K_{f}D\omega_{n}+1)}{K_{f}J\omega_{n}}\dot{P}_{e} - \frac{C}{J\omega_{n}}P_{e} = b_{p}P_{r} + f_{p} \quad (40)$$

式中:P_r为有功功率环的控制律;b_p为功率环的控制 增益;f_b为功率环的总扰动变量,相关表达式为:

$$f_{\rm p} = -\frac{\left(K_{\rm f}D\omega_{\rm n}+1\right)}{K_{\rm f}J\omega_{\rm n}}\frac{{\rm d}P_{\rm e}}{{\rm d}t} - \frac{C}{J\omega_{\rm n}}P_{\rm e} + \left(\frac{C}{J\omega_{\rm n}}-b_{\rm p}\right)P_{\rm r} (41)$$

式(9)和式(40)结构相同,令 P_e 为输出量 y,P_r 为 控制输入量 u,P_{ref} 为输出量参考值 y_{ref} ,则有功功率外 环可采用图7所示的 ESO-SMC 控制策略。

4.2 DC/DC 变换器的控制器设计

超级电容组的控制策略对充放电的功率流动以 及直流母线电压波动的抑制效果都会产生一定的影 响。为提高系统整体的控制精度,通过对电压环采 用改进控制策略,使其能够更加平稳、可靠地持续运 作。对式(8)进行变换可得

$$\ddot{u}_{dc} = \frac{u_{sc} - D_1 u_{dc} + L_{sc} f_i}{C_{dc} L_{sc}} D_1 + \frac{\dot{i}_{pv} - \dot{i}_{out} + \dot{f}_u}{C_{dc}} \quad (42)$$
$$= b_+ D_1 + f_{1c}$$

式中:D₁为电压环控制输入量;b_{de}为电压环控制增益;f_{de}为电压环总扰动。

$$f_{\rm dc} \,\overline{\eta} \,\overline{R} \,\overline{\pi} \,\mathcal{H}$$

$$f_{\rm dc} = \frac{\dot{i}_{\rm pv} - \dot{i}_{\rm out} + \dot{f}_{\rm u}}{C_{\rm dc}} + \left(\frac{u_{\rm sc} - D_1 u_{\rm dc} + L_{\rm sc} f_{\rm i}}{C_{\rm dc} L_{\rm sc}} - b_{\rm dc}\right) D_1 (43)$$



图8 构网型光伏储能系统整体控制结构



式(9)与式(43)具有相同的结构,则双向 DC/DC 变换器的控制可采用图 7 所示的 ESO-SMC 控制策略。

5 仿真验证及实验

5.1 仿真分析

为验证所提改进 ESO-SMC 控制策略的可行性, 在 MATLAB/Simulink 平台上搭建构网型光伏储能系 统的仿真模型,其仿真电路参数如表1所示。

为验证所提方法的有效性,将 PI 控制、传统 ESO-SMC 与改进 ESO-SMC 控制进行对比。此外, 被控系统的响应速度和跟踪精度通常是一对矛盾的 性能指标,采用逼近法来选取最优的控制器参数,以 平衡系统的响应速度和跟踪精度。

表1 电路参数 Table 1 Circuit parameter

参数	数值	参数	数值
$u_{\rm dc}/V$	1 600	e _a /V	311
<i>L</i> /mH	2.5	ω_{g}/Hz	314
C/µF	10	$C_{\rm sc}/{ m F}$	80
<i>L</i> /mH	1	$C_{\rm dc1}$ $C_{\rm dc2}/{ m mF}$	4.6
$L_{\rm pv}/{ m mH}$	5	$L_{\rm sc}/{ m mH}$	2

基于 RHGO 和 NTCSMC 的仿真分析,系统控制 参数选取如下。

对于构网型变流器控制器 VSG 参数为: J=0.8, D=20, K=10, D_q =5; NTCSMC 参数为: λ_1 =0.7, λ_2 =0.6, n=17/11, k_1 =50, k_2 =200; RHGO 参数为: ω_0 =200, b=2×10⁵。

为抑制系统状态误差出现的峰值情况,将 RHGO中的参数 *ε*设计为

$$\varepsilon = \begin{cases} 0.1, |e_{\circ}| \leq \varphi \\ 0.05, |e_{\circ}| > \varphi \end{cases}$$
(44)

式中: φ 为误差边界,取 φ =1000。

1)输出功率动态响应。

为验证控制效果的优越性,在仿真中设置系统 初始时给定光伏的输出功率稳定在120 kW,构网型 变流器的有功功率指令为50 kW,分别在0.3 s 时 设置有功功率指令突增为65 kW,在0.5 s 时突降为 55 kW。仿真得到不同控制策略对系统有功功率以 及频率输出响应特性曲线如图9所示。



由图9系统的有功功率曲线对比可知,相较于 传统的控制策略,当功率指令由50kW突变为65kW 时,PI控制下的有功超调量为3kW,动态调节时间 为0.14s,传统ESO-SMC的动态调节时间为0.12s, 改进控制策略能有效抑制超调现象且动态调节时间 由0.14s可以缩短至0.04s,使系统达到稳定,增强 了系统的稳定性。如图11(a)所示,在不同控制策略 下对比暂态响应时间可以发现,当有功功率参考值 发生变化时,改进ESO-SMC可以在更短时间内跟踪 到功率参考值,减小了暂态响应时间。

2) 直流母线电压动态响应。

为模拟外界极端环境的变化,在光伏模块运行 过程中会引起光照强度和温度的突变工况,设定初 始光照强度为1000 W/m²,温度为25℃,并保持构网 型变流器控制输出功率恒定在50 kW,模拟光照强度 在0.3 s时光照强度由1000 W/m²突降为600 W/m², 在0.45 s由600 W/m²突增为800 W/m²,由此所引起 的直流母线电压波动由图10 所示。



从图 10 系统的直流母线电压曲线对比可知,当 光照强度由 1 000 W/m² 突降为 600 W/m²时, PI 控制 下的母线电压超调量为 25.5 V,传统 ESO-SMC 的母 线电压超调量为16 V,改进ESO-SMC策略的母 线电压超调量为14V,且调节时间由0.1s 缩短至 0.05 s。当光照强度由 600 W/m² 突增为 800 W/m² 时,PI控制下的母线电压超调量为10.5 V,传统 ESO-SMC 的母线电压超调量为6V,改进 ESO-SMC 策略的母线电压超调量为5V,且调节时间由0.08s 缩短至 0.02 s。因此,当外界光照变化时,改进 ESO-SMC 策略母线电压超调量最小,调节时间最 短。暂态时间对比如图 11 所示,其中方案 1、2、3 分 别表示 PI 控制、传统 ESO-SMC 和改进 ESO-SMC。 如图 11(b)所示,在不同控制策略下,对比光照强度 变化时直流母线电压暂态响应时间可以发现,当光 照强度发生变化时,改进 ESO-SMC 可以使直流母线 电压更快恢复稳定。



5.2 实验验证

为进一步验证所提改进 ESO-SMC 策略的有效 性,搭建了硬件在环实验平台如图 12 所示。

首先通过上位机将电路拓扑结构和控制方法分 别载入 MT6020 实时仿真器和 RCP1050 控制器中, 然后将电路和控制方法的输入、输出端口相互连接 构成闭合回路,最后通过 Tektronix 示波器对构网型 光伏储能系统输出波形进行观测。

1)实验一:有功功率指令突变。

当构网型光伏储能系统的有功功率指令先由 100 kW 突变为 60 kW,再突变为 80 kW 时,不同控制 策略下母线电压和有功功率波动情况如图 13 所示。 对有功功率指令突变时的工况模拟,实验数据如表 2 所示。



图 12 硬件在环实验平台 Fig.12 Hardware-in-the-loop experiment platform



Fig.13 Transient response when active command changes

表2 有功功率突变时暂态性能对比

Table 2 Comparison of transient performance when active power changes abruptly

有功功率指令/kW	控制策略	超调量	$\Delta P/\mathrm{kW}$	过渡时	间 $\Delta t/s$
	PI 控制	10	6	0.25	0.22
100→60→80	改进 ESO-SMC	_	—	0.18	0.12
	控制策略	超调量	$\Delta u/V$	过渡时	间 $\Delta t/s$
	PI 控制	41	25	0.70	0.69
	改进 ESO-SMC	15	10	0.19	0.16

由表 2 数据可知,相较于 PI 控制,在第一阶段有 功功率指令突降 40 kW 时, P_e 与 u_{de} 的暂态时间分别 减少了 28% 与 73%, u_{de} 的超调量减少了 63%;在第二 阶段有功功率指令突增 20 kW 时, P_e 与 u_{de} 的暂态时 间分别减少了 45% 与 77%, u_{de} 的超调量减少了 60%。

2)实验二:光照强度突变。

构网型光伏储能系统受外界环境影响下,光照强 度由 1000 W/m²突降为 600 W/m²,再由 600 W/m²突 增为 800 W/m²时,光伏电流由 218 A 突降为 127 A, 再突增为 172 A,此时,对比 PI 控制、改进 ESO-SMC 策略下的直流母线电压波动情况如图 14 所示。对 光照强度突变时的工况模拟,实验数据如表 3 所示。



Fig.14 Transient response when light intensity changes

表3 光照强度突变时母线电压暂态性能对比

Table 3 Comparison of bus voltage transient performance when light intensity changes

光照强度/(W/m ²)	控制策略	控制策略 超调量 Δu/V		调量 $\Delta u/V$ 过渡时间 $\Delta t/s$	
1000	PI 控制	39	20	0.60	0.48
1000→600→800	改进 ESO-SMC	28	14	0.25	0.20

由表3数据可知,相较于PI控制,在第一阶段光 照强度突降400 W/m²时,u_{de}的暂态时间和超调量分 别减少了58%和28%;在第二阶段光照强度突增 200 W/m²时,u_{de}的暂态时间和超调量分别减少了 58%和30%。

3)实验三:交流负载投切。

当负载投切时,直流母线电压变化情况如图 15 所示。当构网型光储系统稳定运行后,突然切除 30 kW 的交流负载时,交流侧输出电流幅值由 158 A 突降为 64 A。此时在 PI 控制下 u_{de}的暂态时 间为 1.14 s,超调量为 11 V;改进 ESO-SMC 策略下 的 u_{de}的暂态时间为 0.55 s,超调量为 5 V,相较 PI 控制 u_{de}的暂态时间减少了 51.8%,超调量降低了 55%。





6 结论

针对构网型光伏储能系统功率变化引起的直流 母线电压波动时暂态性能差的问题,设计了一种基 于 RHGO 的 NTCSMC 策略。通过理论和实验,与传 统 PI 控制和传统 ESO-SMC 对比,验证了所提方法 的可行性和有效性,并得出以下结论:

1)针对传统 VSG 构网型变流器的输出有功功 率的超调量和响应速度较大的问题,经仿真和实验 表明,采用改进 ESO-SMC 控制策略减小了有功功率 变化时的超调并提高了响应速度,从而减少了构网 型变流器输出过电流现象的产生。

2)针对构网型光伏储能系统中功率波动、交流负载投切及光照强度变化引起母线电压波动大的问题,在光照强度突降 400 W/m²时,采用改进 ESO-SMC 控制策略对母线电压波动具有明显的抑制效果,相较 PI 控制,超调量下降了 28%,暂态时间减少了 58%,使系统在外部扰动作用下能够保持更强的鲁棒性。

目前主要针对构网型光伏储能系统的控制策略 进行研究,后续工作将对构网型系统的功能,如并离 网平滑切换、黑启动等方面进行研究。

参考文献

- [1] 李姚旺,刘昱良,杨晓斌,等.计及电量交易信息的用电碳计量 方法[J].中国电机工程学报,2024,44(2):439-450.
 LI Yaowang, LIU Yuliang, YANG Xiaobin, et al.Electricity carbon metering method considering electricity transaction information[J].
 Proceedings of the CSEE,2024,44(2):439-450.
- [2] 丁坤,陈博洋,秦建茹,等.大规模新能源集群接入弱电网的消 纳能力评估方法[J].电力建设,2023,44(11):86-94.
 DING Kun, CHEN Boyang, QIN Jianru, et al.Evaluation method of consumption ability of new large scale energy clusters connected to weak grids[J].Electric Power Construction,2023,44(11):86-94.
- [3] 刘旭,张国驹,裴玮,等.构网型变流器的现状与发展趋势[J]. 太阳能学报,2024,45(9):101-111.
 LIU Xu, ZHANG Guoju, PEI Wei, et al. Current status and development trends of grid type converters [J]. Acta Energiae Solaris Sinica,2024,45(9):101-111.
- [4] ZHU Z B, SUN S M, DING Y M, et al. Reserach on VSG LVRT control strategy of photovoltaic storage microgrid [J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2024, 19(7):4059–4071.
- [5] KANG J, WANG Y, WANG J, et al. Seamless switching control strategy for a power conversion system in a microgrid based on extended state observer and super-twisting algorithm [J]. Electronics, 2024, 13(9):1708.

- [6] HU C, CHEN H, TANG A. Sliding mode control strategy of gridforming energy storage converter with fast active support of frequency and voltage[J].Frontiers in Energy Research, 2024, 12: 1416591.
- [7] LIU Y H, WANG Y, WANG M H, et al.Coordinated VSG control of photovoltaic / battery system for maximum power output and grid supporting [J]. IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, 2022, 12(1):301-309.
- [8] XIE W Q, SHI M M HE Y Y, et al. Comparison of configurable modular two-level and three-level isolated bidirectional DC-DC converters for super-capacitor charging in DC Shore power systems [J].Energies, 2024, 17(18): 4630.
- [9] 庆宏阳.储能系统逆变器并网谐波抑制与多模式平滑稳定运行 研究[D].秦皇岛:燕山大学,2023.
- [10] SHEN X N, WU C W, LIU Z, et al. Adaptive-gain second-order sliding-mode control of NPC converters via super-twisting technique [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38 (12):15406-15418.
- [11] 黄伟,翟苏巍,路学刚,等.电压控制对构网型变换器频率响应 特性影响分析[J].南方电网技术,2024,18(5):102-111. HUANG Wei, ZHAI Suwei, LU Xuegang, et al. Analysis of the impact of voltage control on the frequency response characteristics of grid-forming converter[J].Southern Power System Technology, 2024,18(5):102-111.
- [12] QIN B S, XU Y H, YUAN C, et al. A unified method of frequency oscillation characteristic analysis for multi-VSG grid-connected system [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 37 (1): 279-289.
- [13] 刘泽宇,罗朝旭,梁云龙,等.基于虚拟惯量和阻尼双自适应的 光伏 VSG 控制策略[J].电力科学与工程,2024,40(10):1-10. LIU Zeyu, LUO Chaoxu, LIANG Yunlong, et al. An adaptive photovoltaic VSG control strategy based on virtual inertia and damping [J]. Electric Power Science and Engineering, 2024, 40 (10):1-10.
- [14] ZHANG Y Y, ZHU J Z, DONG X Y, et al. A control strategy for smooth power tracking of a grid - connected virtual synchronous generator based on linear active disturbance rejection control [J]. Energies, 2019, 12(15):3024.
- [15] 周静,陈良亮,张慧敏,等.一种基于能量成型控制的并网电流 谐波抑制方法[J].电气工程学报,2022,17(4):218-225.
 ZHOU Jing, CHEN Liangliang, ZHANG Huimin, et al. Harmonic suppression strategy of grid-connected current based on energyshaping control[J].Journal of Electrical Engineering,2022,17(4): 218-225.
- [16] LI W, ZHANG G Z. Frequency control method of GFM converter combined with improved LADRC controller [C] // 2024 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA).IEEE, 2024:90-95.
- [17] 段玉,朱子民,王小云,等.基于改进粒子群算法的自适应构网型变流器控制策略[J].广东电力,2024,37(2):10-17.
 DUAN Yu,ZHU Zimin, WANG Xiaoyun, et al.Adaptive grid-type converter control strategy based on improved particle swarm algorithm[J].Guangdong Electric Power,2024,37(2):10-17.
- [18] KANG J Y, WANG Y, WANG J C. Virtual synchronous generator

control strategy based on fixed-time terminal sliding mode [C] // 2023 7th International Conference on Electrical, Mechanical and Computer Engineering (ICEMCE).IEEE, 2023:760-764.

[19] 程启明,张昕,赖宇生,等.电网不平衡工况下三电平直接矩阵 变换器反步滑模控制策略[J].电力系统保护与控制,2023,51 (8):73-85.

CHENG Qiming, ZHANG Xin, LAI Yusheng, et al.Back-stepping sliding - mode control strategy for a three - level direct matrix converter in unbalanced grid conditions [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(8):73-85.

- [20] JIA C, LI X Y, LIU X H, et al. Finite-time adaptive dynamic programming control for nonlinear systems based on novel complementary terminal sliding mode surface [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I; Journal of Systems & Control Engineering, 2025,239(2):290-302.
- [21] CUI Y Y, YIN Z G, CAO X B, et al. Enhanced linear active disturbance rejection speed control of IPMSM based on interference differential compensation and cascaded linear extended state observer [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(10):13582-13596.
- [22] XU L W, TIAN B L, LI Z Y, et al. Event-triggered MPC with nonlinear high-gain disturbance observer for trajectory tracking of quadrotor [C] // 2024 43rd Chinese Control Conference (CCC). IEEE, 2024; 3000-3005.
- [23] GUO R Y, DING Y B, YUE X K. Active adaptive continuous nonsingular terminal sliding mode controller for hypersonic vehicle [J].Aerospace Science and Technology, 2023, 137:108279.
- [24] CHANG Y F, WANG A L, YAN H C, et al. Adaptive complementary sliding mode control of ship course under environmental disturbance [J]. Ocean Engineering, 2024, 312: 119016.
- [25] XIE K, YUAN Y, SUN Y, et al. Super-spiral sliding mode controller design for single-winding bearingless switched reluctance motor [J]. IET Electric Power Applications, 2022, 16 (12):1492-1501.
- [26] 黄海宏,陈志强,王海欣.零序电压注入法控制三电平NPC中点 电位平衡[J].电子测量与仪器学报,2020,34(6):138-143.
 HUANG Haihong, CHEN Zhiqiang, WANG Haixin.Zero sequence voltage injection to control neutral potential balance of three-level NPC[J].Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020,34(6):138-143.

王嘉力(1984),男,硕士,工程师,从事电力电子产品开发工作;

任俊恒(2001),男,硕士在读,研究方向为新能源发电及电力电 子变换器控制技术;

皇金锋(1978),通信作者(jfhuang2000 @163.com),男,教授,硕 士生导师,研究方向为新能源发电及电力电子变换器控制技术。

(责任编辑 郑天茹)

收稿日期:2025-01-08

修回日期:2025-03-19

作者简介:

薛瑞泽(2001),男,硕士在读,研究方向为新能源发电及电力电 子变换器控制技术;

李 星(1994),男,硕士,工程师,研究方向为新能源发电及电力 电子变换器控制技术;

DOI:10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2025.06.005

基于二阶混合卷积窗双谱线插值的谐波检测算法

龙艳萍*

(济南工程职业技术学院机电工程学院,山东 济南 250200)

摘要:在电力系统谐波分析中,频谱泄漏和栅栏效应是影响信号检测精度的关键因素。为有效减少频谱泄漏和栅栏效应 对谐波检测的影响,构造基于Hanning窗和五项最大旁瓣衰减(Maximum-sidelobe-decay,MSD)窗的二阶混合卷积窗双谱 线插值算法。该算法在保证主瓣宽度满足要求的同时,显著提升了旁瓣特性,并采用双谱线插值算法能够更为精准地检 测复杂谐波信号的幅值、相位和频率。采用复杂谐波信号进行仿真分析,结果表明,在处理复杂电力系统谐波信号,尤其 是在白噪声干扰条件下,所提方法展现出了更高的检测精度和稳定性。

关键词:频谱泄漏;栅栏效应;Hanning窗;五项MSD窗;二阶混合卷积;双谱线插值;谐波信号
 中图分类号:TM935
 文献标志码:A
 文章编号:1007-9904(2025)06-0044-08

Harmonic Detection Algorithm Based on Second-order Hybrid Convolutional Window Bispectral Line Interpolation

LONG Yanping*

(Department of Mechanical and Electrical Engineering Jinan Polytechnic of Engineering, Jinan 250200, China)

Abstract: In harmonic analysis of power system, spectrum leakage and fence effect pose significant challenges to the accuracy of signal detection. In order to effectively reduce the influence of spectrum leakage and fence effect on harmonic detection, a second-order hybrid convolution window bispectral interpolation algorithm based on Hanning window and five-term Maximum-sidelobe -decay (MSD) window is constructed. The algorithm not only ensures that the width of the main lobe meets the requirements, but also significantly improves the sidelobe characteristics, and the bispectral interpolation algorithm can detect the amplitude, phase and frequency of complex harmonic signals more accurately. The simulation analysis of complex harmonic signals shows that the proposed method has higher detection accuracy and stability when dealing with complex harmonic signals, especially in the presence of white noise interference.

Keywords: spectrum leakage; Fence effect; Hanning window; five items MSD window; mixed convolution window; Bispectral interpolation; Harmonic signal

0 引言

谐波进入电力系统导致电压电流发生畸变的现象被称为谐波污染,不仅会降低电网运行的效率,影 响设备寿命,严重时还会造成继电保护装置和控制 设备的不正确动作,给电力系统的安全运行带来巨 大的威胁^[1]。为确保电力系统的安全稳定运行并提 升电网电能质量,进行电网中谐波参数的高精度检 测对于谐波治理具有重要意义^[2]。

用于电力系统谐波分析的方法有很多^[3],比如 瞬时无功功率理论、小波变换、人工神经网络和快速 傅里叶变换法(fast Fourier transform, FFT)^[4]。这些 方法各有特点和适用范围,通常需要根据具体的电 力系统特性和分析目的来选择合适的方法^[5]。瞬时 无功功率理论在谐波检测的实时性和准确性等方面 具有显著的优势,但是在某些情况下,基于瞬时无功 功率理论的检测方法可能会涉及复杂的电路和较多 的低通滤波器,增加了实施的复杂度并可能影响检 测精度。小波变换在处理非稳态和瞬态信号时表现 出了优异的能力,但是其计算复杂度较高,且在实际 应用中需要合理选择小波基函数和分解尺度^[6]。人 工神经网络在谐波检测中表现出了强大的数据处理 和模式识别能力,但同时也面临着训练数据获取、模型设计和计算资源等方面的挑战。FFT在电力系统 检测中提供了一种快速且精确的分析方法,特别适 合用于周期性信号的分析。同时,因其理论基础简 单且易于嵌入检测系统中,已成为应用最普遍的谐 波检测方式^[7]。

在使用 FFT 进行谐波分析和处理时,由于电网频率波动和噪声干扰等因素的影响,FFT 处理过程 出现频谱泄漏和栅栏效应,导致各次谐波之间的相 互干扰,进而导致谐波检测误差^[8]。

目前 FFT 谐波检测改进方法主要采用加窗插 值算法。文献[9]使用 Nuttall 窗结合 FFT 和四谱线 插值校正分析了谐波信号。此外,为了有效抑制 光谱泄漏,该文献通过四谱线加权运算推导了校 正公式,以利用光谱信息。然而,FFT存在更明显 的问题。进行非同步采样时,相位测量不准确,在 识别间谐波时存在重大误差。文献[10]提出了基 于Nuttall双窗口全相FFT算法的可再生能源功率 谐波和间谐波检测方法。另一种常见的改进方法 是通过加窗抑制频谱泄漏[11]。文献[12]提出了一 种基于 Slepian 和 Nuttall 互卷积窗口的精确谐波参 数估计方法,利用Slepian-Nuttall卷积窗口函数,与 单窗口函数相比,该函数显著改善了卷积窗口的 旁瓣特性,并应用双谱线插值方法进行参数校正, 与FFT/apFFT集成相位差方法相比,大大减少了计 算工作量。文献[13]提出用Hanning窗和Nuttall窗 进行卷积得到混合卷积窗并结合三谱线插值算法进 行电力谐波分析。文献[14]利用Nuttall窗和MSD窗 构建了混合卷积窗六谱线插值算法,并结合三次B 样条用于激光多普勒测速系统信号的处理。

近年来,一些研究者相继展开了对二阶混合卷 积窗的研究工作。文献[15]中提出了一种高精度的 电力谐波检测算法,与传统窗函数相比较,改进的混 合卷积窗在抑制频谱泄漏方面表现出显著优势。而 对于栅栏效应的插值算法来说,虽然谱线的增多会 提高谐波检测的精度,但是相应的计算量也会显著 增加,在实践应用中受到限制,因此需要对窗函数进 行相应的调整^[16-17]。

因此,本研究提出一种基于Hanning窗和五项最 大旁瓣衰减(maximum-sidelobe-decay, MSD)窗的二 阶混合卷积窗,优化主瓣和旁瓣的性能表现,并采用 了计算量相对适中的双谱线插值算法用于谐波3个 参数的高精度检测。通过仿真对比分析可以得知, 本文提出的谐波检测方法能够优化窗函数的主瓣和 旁瓣特性,显著提升对谐波频率、幅值和相位的检测 准确度。

1 二阶混合卷积窗

Hanning窗和五项 MSD 窗是通过余弦函数的不同形式组合而成的窗函数。在频谱分析和信号处理中,窗函数用在时域上对信号进行加权,以平衡频谱分辨率和频谱泄漏。Hanning窗和五项 MSD 窗的优势在于它们频域上的性能,特别是减小频谱泄漏和控制主瓣宽度方面的效果显著。通过使用这些窗函数,可以有效地降低频谱分析中的泄漏效应,从而提高频谱估计的准确性和可靠性。在时域中的表达式为

$$w_{M}(n) = \sum_{m=0}^{M-1} (-1)^{m} g_{m} \cos\left(\frac{2\pi nm}{N}\right)$$
(1)

式中:*M*为余弦窗函数的项数;*m*为余弦窗项数的取 值,*m*=0,1,2,…,*M*;*N*为余弦窗函数的宽度;*n*为余 弦窗宽度的取值,*n*=0,1,2,3,…,*N*-1;系数*g_m*遵循 一定的约束条件 $\sum_{m=0}^{N-1} (-1)^m g_m = 0$ 和 $\sum_{m=0}^{N-1} g_m = 1$ 。

常见的余弦窗函数包括Hanning窗、Hamming 窗、Blackman 窗、4项3阶 Nuttall 窗、4项5阶 Nuttall 窗以及5项MSD窗等。Hanning窗也称为升余弦 窗,它是一种平滑的信号窗口,可以减少频谱泄 漏。Hamming 窗类似于 Hanning 窗, 但权重系数不 同,它在减小旁瓣水平的同时,保持了主瓣的宽 度。Blackman 窗又称为四点余弦窗, 它提供了更 大的旁瓣衰减,但代价是主瓣宽度略有增加。4 项3阶Nuttall窗是一种优化的余弦窗,它在保持 较低旁瓣水平的同时,尽量减少主瓣的展宽。4 项5阶Nuttall窗与3阶Nuttall窗相比,它提供了更 好的旁瓣抑制能力,但主瓣可能会更宽一些。5 项 MSD 窗同样是一种改进型的余弦窗, 它通过增 加项数来进一步降低旁瓣的水平,同时尽量保持 主瓣的宽度。常见余弦窗的频谱特性如表1所 示,常见余弦窗函数的归一化对数频谱图如图1 所示。



Table T Common cosine specifial characteristics				
窗的类型	主瓣宽度	旁瓣峰值 电平/dB	每倍频程旁瓣 衰减/dB	
Hanning 窗	$8\pi/N$	-31.5	18	
Hamming 窗	$8\pi/N$	-43	6	
Blackman 窗	$12\pi/N$	-59	18	
4项3阶Nuttall窗	$16\pi/N$	-82.6	30	
4项5阶Nuttall窗	$16\pi/N$	-60.96	42	
5项MSD窗	$16\pi/N$	-75	54	

表1 常见余弦窗频谱特性

由表1和图1可知,虽然Hanning窗和Hamming 窗都具有更宽的主瓣宽度8π/N,但在旁瓣特性 上,相比于Hamming窗,Hanning窗具有更低的旁 瓣峰值电平(-31.5 dB)和更快的衰减速率(每倍频 程18 dB)。另外,五项 MSD 窗的旁瓣衰减速率在表 1 中是最快的,达到每倍频程 54 dB,峰值电平也低 到了-75 dB^[18]。因此,本文选用主瓣性能良好的 Hanning 窗和旁瓣性能优越的五项 MSD 窗构建一阶 混合卷积窗,一阶混合卷积窗的归一化频谱图如图 2 所示。

由图2可知,一阶混合卷积窗的旁瓣峰值电 平为-88 dB,旁瓣衰减速率与传统单个窗函数相 比明显更快,表明构造的一阶混合卷积窗明显改 善了窗函数的旁瓣性能^[19]。下面继续构造了基 于 Hanning 窗和五项 MSD 窗的二阶混合卷积窗, 并得到了二阶混合卷积窗的归一化频谱图如图 3 所示。

由图 3 可知,二阶混合卷积窗的旁瓣峰值电平 下降至-152.3 dB,与一阶混合卷积窗相比表现出更



normalized spectrogram

快的衰减速率,这表明其在抑制频谱泄漏方面更为 有效。因此,本文选择了Hanning窗和五项 MSD 窗 构造二阶混合卷积窗,Hanning窗和五项MSD窗的频 域表达式分别为:

$$W_{H}(\omega) = \frac{N\omega\sin(\omega\pi)}{\pi} e^{-j\omega\pi} e^{j\frac{\pi\omega}{N}} \times \left(\frac{0.5}{\omega^{2}} - \frac{0.5}{\omega^{2} - 1}\right) \quad (2)$$



图3 混合卷积窗归一化频率图

Fig.3 Normalized frequency plot of hybrid convolutional windows

$$W_{M}(\omega) = \frac{N\omega\sin(\omega\pi)}{\pi} e^{-j\omega\pi} e^{j\frac{\pi\omega}{N}} \times \left(\frac{0.273\,437\,5}{\omega^{2}} - \frac{0.437\,5}{\omega^{2} - 1} + \frac{0.218\,75}{\omega^{2} - 4}\right) - \frac{0.062\,5}{\omega^{2} - 9} + \frac{0.007\,812\,5}{\omega^{2} - 16}\right)$$
(3)

基于 Hanning 窗和五项 MSD 窗的二阶混合卷积 窗在频域中的表达式为:

$$W_{HM}(\omega) = W_{H}(\omega) * W_{M}(\omega) = \frac{N^{2} \omega^{2} \sin^{2}(\omega \pi)}{\pi^{2}} e^{-2j\omega \pi} e^{j\frac{2\pi\omega}{N}} \times \left(\frac{0.5}{\omega^{2}} - \frac{0.5}{\omega^{2} - 1}\right) \times \left(\frac{0.273\,437\,5}{\omega^{2}} - \frac{0.437\,5}{\omega^{2} - 1} + \frac{0.218\,75}{\omega^{2} - 4} - \frac{0.062\,5}{\omega^{2} - 9} + \frac{0.007\,812\,5}{\omega^{2} - 16}\right)$$
(4)

$$W_{HM2}(\omega) = [W_{H}(\omega) * W_{M}(\omega)]^{2} = \left[\frac{N^{2}\omega^{2}\sin^{2}(\omega\pi)}{\pi^{2}}e^{-2j\omega\pi}e^{j\frac{2\pi\omega}{N}}\right]^{2} \times \left(\frac{0.5}{\omega^{2}} - \frac{0.5}{\omega^{2} - 1}\right)^{2} \times \left(\frac{0.273\,437\,5}{\omega^{2}} - \frac{0.437\,5}{\omega^{2} - 1} + \frac{0.218\,75}{\omega^{2} - 4} - \frac{0.062\,5}{\omega^{2} - 9} + \frac{0.007\,812\,5}{\omega^{2} - 16}\right)^{2}$$
(5)

基于二阶混合卷积窗的双谱线插值算法 2

假设电网中任意次谐波的离散信号x(n)的表达式为

$$x(n) = A_0 + A_1 \sin\left(2\pi \frac{f_1}{f_s} n + \varphi_1\right)$$
(6)

式中:A_A_和f_分别为直流分量的幅值、谐波信号的幅 值和频率;f,为采样频率;φ,为谐波信号的初始相位。

令理论频点真实谱线为k0,设峰值频点附近两 条谱线频率 k_1, k_2 ,这两条谱线的幅值分别为 y_1 = $|X(k_1)|, y_2 = |X(k_2)|$ 。取理论频点附近两条谱线幅 值 的 平 均 值 作 为 理 论 频 点 幅 值 α, 则 α= $(y_2 - y_1)/(y_2 + y_1)$,变量代换后得到

$$\alpha = \frac{|W(-\delta + 0.5)| - |W(-\delta - 0.5)|}{|W(-\delta + 0.5)| + |W(-\delta - 0.5)|}$$
(7)

式(7)可以被理解为一个以δ作为输入变量. 而 α 作 为 输 出 结 果 的 函 数 关 系 , 表 示 为 α 是 δ 的函数,即 $\alpha=h(\delta)$ 。对该函数求反可以表示为 $\delta = h^{-1}(\alpha)^{[20]}$ 。对谱线 k_1, k_2 加权计算, 推导出幅值 修正公式为[21]

$$A = (y_1 + y_2)\mu(\delta)/N \tag{8}$$

可以得到幅值修正系数μ(δ)的表达式^[22]为

$$\mu(\delta) = \frac{2N}{|W(-\delta+0.5)| + |W(-\delta-0.5)|} \tag{9}$$

频率和相位的修正公式可以表达为:

$$f = k\nabla f = \left(k_1 + \delta\right) f_s / N \tag{10}$$

$$\varphi = \arg \left[X \left(k_1 \nabla f \right) \right] - \pi \left(\delta + 0.5 \right)$$
(11)

`

运用上述方法,可以推导出 Hanning 窗、五项 MSD窗及其一阶混合卷积窗和二阶混合卷积窗的修 正公式可以表示如式(12)一式(19)所示[23]。

1)Hanning窗。

$$\delta = 1.496\ 974\alpha + 0.000\ 889\alpha^3 + 0.000\ 138\alpha^5 \qquad (12)$$
$$\mu(\delta) = 2.354\ 662\ +\ 1.156\ 176\delta^2\ + \qquad (13)$$

$$0.326\ 875\delta^4\ +\ 0.078\ 684\delta^6$$

2) 五项 MSD 窗。

$$\delta = 4.5\alpha \tag{14}$$

$$\mu(\delta) = 3.865\ 632\ +\ 0.770\ 585\delta^2\ + \\ 0.081\ 834\delta^4\ +\ 0.006\ 368\delta^6 \tag{15}$$

$$\delta = 5.5\alpha \tag{16}$$

$$\mu(\delta) = 4.252\ 195\ +\ 0.707\ 075\delta^2\ + \\ 0.062\ 011\delta^4\ +\ 0.003\ 921\delta^6$$
(17)

$$\delta = 10.5\alpha + 0.000\,008\alpha^7 \tag{18}$$

$$\mu(\delta) = 5.812\ 163\ +\ 0.528\ 016\delta^2\ + \\ 0.024\ 708\delta^4\ +\ 0.000\ 804\delta^6$$
(19)

3 仿真分析

3.1 信号分析

为验证基于 Hanning 窗和五项 MSD 窗的构造的 二阶混合卷积窗的有效性,采用复杂谐波信号模型 x(h)对所提算法进行仿真分析^[24]。

$$x(h) = \sum_{i=1}^{9} A_i \cos\left(2\pi f_i h + \varphi_i\right)$$
(20)

式中: A_{i} , f_{i} 和 φ_{i} 分别为第i次谐波的幅值、频率和相 位。具体仿真参数如表2所示。

	. .	
谐波次数	幅值/V	相位/(°)
基波	1	56.2
2	0.03	-12.2
3	0.02	-54.2
4	0.04	81.5
5	0.02	45.2
6	0.03	-12.5
7	0.01	78.6
8	0.2	-26.7
9	0.01	-38.5

采用了 Hanning 窗双谱线插值算法、五项 MSD 窗双谱线插值算法及其一阶混合卷积窗双谱线插值 算法和本文算法分别对复杂谐波信号x(h)的三大参 数进行检测分析。以上几种算法对复杂谐波信号的 检测结果如表3一表5所示。

表3 信号频率相对误差对比

Table 3 Comparison of signal frequency relative error

				单位:%
谐波 次数	Hanning 窗	五项 MSD 窗	一阶混合 卷积窗	二阶混合 卷积窗
基波	7.8×10 ⁻³	5.7×10 ⁻⁷	6.9×10 ⁻⁸	3.5×10 ⁻¹⁰
2	5.8×10 ⁻⁴	2.8×10 ⁻⁸	2.2×10 ⁻⁹	1.4×10 ⁻¹¹
3	7.4×10 ⁻³	3.9×10 ⁻⁷	4.1×10 ⁻⁸	5.2×10 ⁻¹¹
4	3.6×10 ⁻⁴	1.0×10 ⁻⁷	1.4×10 ⁻⁸	8.7×10 ⁻¹¹
5	2.9×10 ⁻⁴	4.9×10 ⁻⁸	6.7×10 ⁻⁹	4.6×10 ⁻¹¹
6	4.3×10 ⁻⁵	1.2×10 ⁻⁸	2×10 ⁻⁹	1.9×10 ⁻¹¹
7	2.9×10 ⁻⁴	1.3×10 ⁻⁸	1.4×10 ⁻⁹	2×10 ⁻¹²
8	5.5×10 ⁻⁴	3.7×10 ⁻⁸	4.5×10 ⁻⁹	1.9×10 ⁻¹¹
9	7.3×10 ⁻⁴	5.3×10 ⁻⁸	6.5×10 ⁻⁹	3.1×10 ⁻¹¹

由表3可知,加二阶 Hanning-MSD 混合卷积 窗插值算法检测谐波信号频率的结果与加 Hanning 窗插值算法相比, 频率检测精度提高了 6~8个数量级;与加五项 MSD 窗插值算法相比,检 测精度提高了 3~4 个数量级; 与一阶 Hanning-MSD 混合卷积窗插值算法相比,检测精度提高了2~3 个数量级。基波频率的检测误差为3.56×10⁻¹⁰%, 比加 Hanning 窗检测得到的结果提高了7个数量 级;比加五项 MSD 窗检测得到的结果提高了3个 数量级;比加一阶混合卷积窗得到的结果提高了 2个数量级。

由表4可知,加二阶 Hanning-MSD 混合卷积窗 插值算法检测复杂谐波信号幅值的相对误差比其他 算法小。与加Hanning窗插值算法相比,二阶混合卷 积窗的幅值检测精度提高了1~3个数量级;与加五 项 MSD 窗插值算法相比,其幅值检测精度提高了1 个数量级;与一阶Hanning-MSD混合卷积窗插值算 法相比,其幅值检测精度整体更低。

表4 信号幅值相对误差对比 Table 4 Comparison of relative error of signal amplitude 单位:%

				1 1== 1 1
谐波	Hanning 窗	五面 MSD 窗	一阶混合	二阶混合
次数	manning 🖂	⊥⊥-у, мыр ⊠	卷积窗	卷积窗
1	2.0×10 ⁻⁵	9.2×10 ⁻⁸	6.5×10 ⁻⁸	4.2×10 ⁻⁸
2	4.9×10 ⁻⁶	9.2×10 ⁻⁸	6.3×10 ⁻⁸	4.6×10 ⁻⁸
3	6.4×10 ⁻⁵	9.4×10 ⁻⁸	6.2×10 ⁻⁸	5.0×10 ⁻⁸
4	8.1×10 ⁻⁶	1.0×10 ⁻⁷	6.3×10 ⁻⁸	5.2×10 ⁻⁸
5	9.2×10 ⁻⁶	1.0×10 ⁻⁷	6.3×10 ⁻⁸	5.3×10 ⁻⁸
6	1.2×10 ⁻⁵	1.0×10 ⁻⁷	6.1×10 ⁻⁸	5.5×10 ⁻⁸
7	1.2×10 ⁻⁵	1.0×10 ⁻⁷	6.0×10 ⁻⁸	5.5×10 ⁻⁸
8	1.1×10 ⁻⁵	1.0×10 ⁻⁷	6.0×10 ⁻⁸	5.5×10 ⁻⁸
9	7.5×10 ⁻⁶	1.0×10 ⁻⁷	6.1×10 ⁻⁸	5.5×10 ⁻⁸

表5 信号相位相对误差对比

Table 5 Comparison of relative error of signal phase

				单位:%
谐波	Hanning 容	玉顶 MSD 窗	一阶混合	二阶混合
次数	manning 🖂	ш-җ мыр ⊠	卷积窗	卷积窗
基波	1.0×10 ⁻³	7.0×10 ⁻⁷	8.6×10 ⁻⁸	4.3×10 ⁻¹⁰
2	9.9×10 ⁻⁵	5.7×10 ⁻⁹	4.5×10 ⁻¹⁰	4×10 ⁻¹²
3	1.1×10 ⁻³	6.7×10 ⁻⁸	7.0×10 ⁻⁹	9×10 ⁻¹²
4	1.7×10 ⁻⁴	1.9×10 ⁻⁸	2.4×10-9	1.4×10 ⁻¹¹
5	1.3×10 ⁻⁴	9.1×10 ⁻⁹	1.1×10 ⁻⁹	7×10 ⁻¹²
6	7.4×10 ⁻⁵	3.3×10 ⁻⁹	4.3×10 ⁻¹⁰	3×10 ⁻¹²
7	2.6×10 ⁻⁵	7.3×10 ⁻⁹	8.9×10 ⁻¹¹	1×10 ⁻¹²
8	1.3×10 ⁻⁵	4.1×10 ⁻⁹	5.2×10 ⁻¹⁰	2×10 ⁻¹²
9	4.6×10 ⁻⁵	6.4×10 ⁻⁹	8.1×10 ⁻¹⁰	4×10 ⁻¹²

由表5可知,在进行谐波信号相位分析时,二阶 Hanning-MSD混合卷积窗插值算法的检测精度与加 Hanning窗插值算法相比提高了7~9个数量级;与加 五项MSD窗插值算法相比,提高了3~5个数量级;与 一阶插值算法相比,提高了2~4个数量级。

根据上述分析可以得出结论,所提出的二阶 Hanning-MSD 混合卷积窗在分析复杂谐波信号幅 值、频率和相位时,其检测精度明显比加Hanning窗、 五项 MSD 窗和一阶 Hanning-MSD 混合卷积窗要高。 其中,频率的相对误差始终低于3.56×10⁻¹⁰%,幅值 的相对误差均低于4.28×10⁻⁸%,而相位的相对误差也 控制在了4.39×10⁻¹⁰%以下。仿真结果表明,所提出的 二阶混合卷积窗能更好地抑制频谱泄漏及栅栏效应现 象,并有效提高各次谐波三大参数的检测精度。

3.2 加入白噪声后的信号分析

在谐波检测中,白噪声的存在会对信号的准确 性和检测精度造成挑战。由于白噪声包含了所有频 率成分的随机干扰,它会与谐波信号混合,使得各个 谐波成分难以准确区分和测量^[25]。因此,在信号处 理过程中,白噪声的普遍性和随机性使得完全滤除 其影响变得十分困难。这意味着在信号预处理阶 段,需要采用更为复杂的算法和技术来抑制白噪声, 以便更好地提取和分析谐波信号,从而确保准确的 检测结果^[26]。为验证本文所提算法的有效性,在采 用复杂谐波信号 *x*(*h*)的基础上增加了信噪比为 10~ 100 dB之间不同的白噪声。同时还对比分析传统的 Hanning 窗、五项 MSD 窗以及一阶 Hanning-MSD 混 合卷积窗仿真结果,如图4所示。



由图4可以明确白噪声对谐波信号参数检测精 度的不利影响,在信噪比较小噪声较大时(信噪比≪ 30 dB),4种算法在谐波幅值、频率和相位的检测相 对误差都比较大,但文中算法相比于其他算法的检 测精度更高。且随着信噪比的增大,文中算法在谐 波3个参数的检测相对误差率逐步降低且误差始终 低于其他3种算法,尤其是在频率和相位的检测上 有明显优势。以上仿真结果表明,二阶 Hanning-MSD混合卷积窗能够更好地抑制白噪声对谐波信号 参数估计的干扰。

4 结束语

提出一种基于 Hanning 窗和 MSD 窗的二阶混合 卷积窗函数,并在此基础上推导了一种新型的双谱 线插值算法。通过利用多项式拟合技术,获得了一 个插值修正公式,该公式能够有效减少频谱泄漏的 影响并提升谐波信号的检测精度。仿真实验的结果 验证了该算法的有效性,与其他先进算法进行对比 分析,结果表明,在处理复杂电力系统谐波信号,尤 其是在白噪声干扰条件下,所提方法展现出了更高 的检测精度和稳定性。

参考文献

- [1] SHEN S Q, LI W, WANG M J, et al. Methane near-infrared laser remote detection under non-cooperative target condition based on harmonic waveform recognition[J].Infrared Physics & Technology, 2022, 120: 103977.
- [2] HUDA A S N, TAIB S. Suitable features selection for monitoring thermal condition of electrical equipment using infrared thermography [J]. Infrared Physics & Technology, 2013, 61: 184-191.
- [3] CHEN D D, XIAO L, YAN W D, et al. A harmonics detection method based on triangle orthogonal principle for shunt active power filter[J].Energy Reports, 2021, 7:98-104.
- [4] 李媛,王海云,王维庆,等.基于Hanning和Nuttall的混合卷积窗 谐波分析方法[J].太阳能学报,2018,39(12):3363-3370.
 LI Yuan, WANG Haiyun, WANG Weiqing, et al. Harmonic analysis method of hybrid convolution window based on hanning and nuttall[J].Acta Energiae Solaris Sinica, 2018, 39(12):3363-3370.
- [5] 张强,王海云,王维庆,等.基于混合卷积窗三谱线插值的介损 角测量方法[J].电力电容器与无功补偿,2020,41(6):125-131. ZHANG Qiang, WANG Haiyun, WANG Weiqing, et al. Dielectric loss angle measurement method based on mixed convolution window with three spectral lines interpolation[J].Power Capacitor

& Reactive Power Compensation, 2020, 41(6): 125-131.

- [6] 汪旭明,田堃,雷可君,等.基于 Blackman 窗六谱线插值 FFT 谐 波分析方法[J].实验室研究与探索,2020,39(6):22-26.
 WANG Xuming, TIAN Kun, LEI Kejun, et al. A harmonic analysis method based on Blackman window six-spectrum-line interpolation FFT [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2020,39(6):22-26.
- [7] 陶顺,郭傲,赵蕾,等.基于六项最快旁瓣衰减速度窗和六谱线 插值算法的谐波间谐波检测方法[J].电力电容器与无功补偿, 2019,40(6):110-116.

TAO Shun, GUO Ao, ZHAO Lei, et al. Harmonic detection method of inter – harmonics based on six term window functions with maximum side lobe decay speed and six-spectrum-line interpolation algorithm [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(6): 110-116.

- [8] 李振华,胡廷和,杜亚伟,等.基于窗函数和谱线插值理论的谐 波检测方法[J].电力系统保护与控制,2019,47(22):78-88.
 LI Zhenhua, HU Tinghe, DU Yawei, et al. Harmonic detection method based on the theory of windows and spectrum line interpolation [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47 (22):78-88.
- [9] ZHAO S S, WANG C J, BIAN X X. Research on harmonic detection based on wavelet threshold and FFT algorithm [J]. Systems Science & Control Engineering, 2018, 6(3): 339–345.
- [10] SU T X, YANG M F, JIN T, et al. Power harmonic and interharmonic detection method in renewable power based on Nuttall double-window all-phase FFT algorithm [J]. IET Renewable Power Generation, 2018, 12(8):953-961.
- [11] 华敏,陈剑云.一种高精度六谱线插值FFT谐波与间谐波分析 方法[J].电力系统保护与控制,2019,47(11):9-15.
 HUA Min, CHEN Jianyun.A high precision approach for harmonic and interharmonic analysis based on six-spectrum-line interpolation FFT[J].Power System Protection and Control,2019, 47(11):9-15.
- [12] LI J M, CAO Y Y, ZHANG X H, et al. An accurate harmonic parameter estimation method based on Slepian and Nuttall mutual convolution window[J].Measurement, 2021, 174:109027.
- [13] 李则漩.分布式光伏并网发电系统的谐波分析[D].西安:西安 石油大学,2023.
- [14] 陈昊.激光多普勒测速系统信号处理方法研究[D].青岛:青岛 科技大学,2023.
- [15] 陈倩,王维庆,王海云,等.基于混合卷积窗四谱线插值和改进 全相位的谐波检测组合优化算法[J].电力系统及其自动化学 报,2020,32(8):1-6.
 CHEN Qian, WANG Weiqing, WANG Haiyun, et al. Combined optimization algorithm based on mixed convolution window fourline interpolation and improved all-phase harmonic detection[J].
 Proceedings of the CSU-EPSA,2020,32(8):1-6.
- [16] 陆东亮.高精度电力谐波检测算法研究[D].武汉:武汉纺织大学,2022.

- [17] 张飞宇.基于混合卷积窗和压缩感知的谐波检测方法研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2021.
- [18] 张恒煜.电力系统间谐波检测方法与实现[D].哈尔滨:哈尔滨 理工大学,2018.
- [19] 谢强.基于加窗插值的高精度谐波检测算法研究[D].徐州:中 国矿业大学,2017.
- [20] 邓高峰,王定员,朱亮,等.最小旁瓣卷积窗加权频谱插值谐波 测量方法 [J].电气应用,2017,36(8):53-57.
 DENG Gaofeng, WANG Dingyuan, ZHU Liang, et al. Harmonic measurement by weighted spectral interpolation with minimum sidelobe convolution window[J].Journal of Electrical Applications, 2017,36(8):53-57.
- [21] 史丽萍,谢强,马晓伟.基于五项 MSD 窗三谱线插值的高精度 谐波分析算法[J].电力系统保护与控制,2017,45(7):108-113.
 SHI Liping, XIE Qiang, MA Xiaowei. High accuracy analysis of harmonic algorithm based on 5-term maximum-sidelobe-decay window and triple-spectrum-line interpolation [J]. Power System Protection and Control,2017,45(7):108-113.
- [22] 杨重良.基于余弦自卷积窗改进FFT电力谐波检测算法研究 [D].合肥:合肥工业大学,2017.
- [23] 张俊敏,刘开培,汪立,等.基于四谱线插值FFT的谐波分析快速算法[J].电力系统保护与控制,2017,45(1):139-145.
 ZHANG Junmin, LIU Kaipei, WANG Li, et al. A rapid algorithm for harmonic analysis based on four-spectrum-line interpolation FFT [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45 (1):

139-145.

- [24] 孙仲民,何正友,臧天磊.一种混合卷积窗及其在谐波分析中的应用[J].电工技术学报,2016,31(16):207-214.
 SUN Zhongmin, HE Zhengyou, ZANG Tianlei. A kind of hybrid convolution window and its application in harmonic analysis [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31 (16): 207-214.
- [25] 王鹤蓉,关焕新,郭祎珅,等.基于混合卷积窗三谱线插值的谐 波分析方法[J].山东电力技术,2021,48(2):30-34.
 WANG Herong, GUAN Huanxin, GUO Yishen, et al. A triplespectrum-line interpolation harmonic analysis method based on hybrid convolution window[J].Shandong Electric Power, 2021,48 (2):30-34.
- [26] 李得民,何怡刚.基于 Nuttall 窗四谱线插值 FFT 的电力谐波分 析[J].电力系统保护与控制,2016,44(3):64-71.

LI Demin, HE Yigang.Harmonic analysis of power system based on Nuttall window four-spectrum-line interpolation FFT [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3):64-71.

收稿日期:2024-04-26

修回日期:2024-11-14

作者简介:

龙艳萍(1979),通信作者(615692267@qq.com),女,硕士,副教 授,研究方向为电气智能化。

(责任编辑 娄婷婷)

(上接第21页)

WANG Tingtao, MIAO Shihong, YAO Fuxing, et al. Multi-level energy storage collaborative optimization operation strategy for power systems considering frequency and voltage stability constraints [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024,39(21):6759-6777.

[25] 胡英杰,李强,李群.考虑容量限制的构网型光储系统惯量与一次调频参数优化配置方法[J].中国电力,2024,57(10): 115-122.

HU Yingjie, LI Qiang, LI Qun. Co-optimization of inertia and droop control coefficient for grid-forming photovoltaic-storage system considering capacity limits [J]. Electric Power, 2024, 57 (10):115-122.

- [26] 饶成骄,郭成,马宁宁,等.考虑水轮机水锤效应的电网频率变 化的解析方法[J].电网技术,2018,42(6):1892-1898.
 RAO Chengjiao, GUO Cheng, MA Ningning, et al. Analytical method of power grid frequency change considering water hammer effect of turbine [J]. Power System Technology, 2018, 42 (6): 1892-1898.
- [27] LIN H X, HOU K Y, CHEN L, et al. Optimization model of highfrequency second defense line of generator tripping based on frequency safety constraints[J].IOP Conference Series: Earth and

Environmental Science, 2020, 512(1): 012108.

[28] LI K, AI X M, FANG J K, et al. Frequency security constrained robust unit commitment for sufficient deployment of diversified frequency support resources [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2024, 60(1): 1725-1737.

收稿日期:2025-03-31

修回日期:2025-05-12

作者简介:

邓美玲(1987),女,工程师,主要研究方向为新能源发电并网技 术、配电网规划运行等研究;

江通财(1989),男,工程师,主要研究方向为新能源发电并网技 术、配电网规划运行等研究;

白振毅(1992),通信作者(3251891556@qq.com),男,工程师,主要研究方向为新能源发电并网技术、配电网规划运行等研究;

林 健(1986),男,工程师,主要研究方向为新能源发电并网技 术、配电网规划运行等研究;

陈永进(1976),男,博士,高级工程师,主要研究方向为新能源发 电并网技术、配电网规划运行等研究;

吴子龙(1995),男,主要研究方向为新能源发电并网技术、配电 网规划运行等研究。

(责任编辑 娄婷婷)

DOI:10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2025.06.006

・数字新基建・

基于无监督自适应机制的电力工控流量异常检测方法

马 力^{1,2},王 丹^{1,2},计士禹^{1,2},刘锦利^{1,2},石 贺^{1,2*} (1.南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院有限公司),江苏 南京 211106; 2.北京科东电力控制系统有限责任公司,北京 100192)

摘要:电力工控流量异常检测是保障工控系统正常运行和识别网络攻击的重要技术。本文以IEC 60870-5-104协议为 例,针对现有电力工控流量异常检测方法存在的检测能力不足、检出可解释性差、缺乏动态调节机制等问题,提出一种基 于卷积自编码器(convolutional autoencoder,CAE)与自适应阈值调整机制的无监督电力工控流量异常检测方法。首先,通 过滑动窗口对大量正常工控流量的会话报文进行特征提取,生成输入向量;然后,训练所构建的CAE模型,采用交叉验证 确定最优超参数固化模型。在检测阶段,实时流量会话报文经模型重构后计算重构误差,结合自适应阈值调整机制动态 生成判定阈值区间,从而实现异常判定和检测输出。最后,通过构建典型异常流量对模型进行实验验证,结果表明该方 法能够在电力工控环境中准确识别多种异常流量,有效提高安全防护能力。

关键词:电力工控流量;异常检测;深度学习;卷积自编码器;自适应阈值
 中图分类号:TP393;TM73
 文献标志码:A
 文章编号:1007-9904(2025)06-0052-10

Anomaly Detection Method for Power Industrial Control System Flow Based on Unsupervised Adaptive Mechanism

MA Li^{1,2}, WANG Dan^{1,2}, JI Shiyu^{1,2}, LIU Jinli^{1,2}, SHI He^{1,2*}

(1.NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China;
 2.Beijing Kedong Power Control System Co., Ltd., Beijing 100192, China)

Abstract: Abnormal flow detection in power industrial control systems (ICS) is a critical technology for ensuring the normal operation of control systems and identifying potential network attacks. This paper takes the IEC 60870-5-104 protocol as an example and proposes an unsupervised abnormal flow detection method for power ICS based on convolutional autoencoder (CAE) and adaptive threshold adjustment. The method addresses the limitations of current ICS flow anomaly detection methods, including inadequate detection capability, poor interpretability, and lack of dynamic adjustment mechanisms. Initially, session packets from large volumes of normal ICS traffic are extracted for feature generation using a sliding window approach, forming input vectors. Subsequently, the constructed CAE model is trained, with optimal hyperparameters determined through cross-validation, and the model is solidified. During the detection phase, real-time traffic session packets are reconstructed by the model, and reconstruction errors are calculated. An adaptive threshold adjustment mechanism is then used to dynamically generate a threshold interval, enabling anomaly determination and detection output. Finally, experiments with typical anomalous traffic are conducted to validate the model, with results showing that the proposed method accurately identifies various anomalies in power ICS environments and effectively improves safety protection capabilities.

 $Keywords: electric \ power \ industrial \ control \ flow; anomaly \ detection; deep \ learning; convolutional \ autoencoder; adaptive \ threshold$

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目"新一代电力网络安全专用安全防护及监测装备关键技术研究"(5108-202413050A-1-1-ZN)。

0 引言

随着智能电网和工业控制系统(industrial control systems, ICS)的深入融合,电力工控系统正面临前所未有的网络安全挑战^[1]。电力工控系统作为电力系统的中枢神经,直接影响电力生产、传输与分

Science and Technology Project of State Grid Corporation of China "Research on Key Technologies of Special Security Protection and Monitoring Equipment for New Generation Power Network Security" (5108-202413050A-1-1-ZN).

配的安全性和可靠性,潜藏在大量正常业务通信下的异常流量不仅存在信息泄露或数据篡改的可能,还可能直接威胁电力系统的稳定性和安全性,尤其在 IEC 60870-5-104 等协议的大量应用下,系统流量呈现高复杂性和多样性,使得传统的基于规则或简单统计的方法难以有效检测潜在的异常流量^[2-3]。面对这些挑战,开发一种能够自动适应复杂工控环境并具备高精度检测能力的流量异常检测方法变得尤为重要^[4]。

在电力工控流量异常检测领域,现已开展了多种方法的研究。文献[5]基于协议特征方法开展 IEC 60870-5-104 协议的报文特征分析,建立了针对 电力工控流量的正常行为模型,并通过多层次的逻 辑校验,实现对异常行为的识别。这些方法在某些 场景下的准确率接近 100%,但其依赖于人工特征提 取,且在应对复杂多变的环境时,表现出一定的局限 性,无法识别未加入特征库的异常流量,只能检测已 知威胁。文献[6]提出一种基于协议解析的电网工 控安全监测系统,通过对 104 规约及 TCP 协议通信 流量进行深度解析和安全威胁监测,通过配置相关 的检测规则实现对恶意代码、旁路控制等恶意行为 的检测。这些基于规则的流量异常检测方法,存在 严重的滞后性,对专家知识依赖大,并且检测能力较 弱,无法检测未知攻击。

此外,机器学习方法也逐步被引入电力工控网络 入侵检测系统(intrusion-detection system, IDS)中。 文献[7] 通过使用一维卷积神经网络(1D convolutional neural network, 1D-CNN)结合飞蛾扑火 优化算法(moth-flame optimization, MFO),提出基于 应用层报文的异常检测模型,通过随机森林选取重要 特征,使用飞蛾扑火优化算法调整深度学习模型超 参,结果显示模型在处理复杂的流量数据时,具备良 好的性能,特别是在应对噪声和未见过的异常时,具 有较高的鲁棒性。文献[8]的研究表明,结合深度残 差收缩网络(deep residual shrinkage networks, DRSN) 与双向长短期记忆网络(bidirectional long short-term memory, Bi-LSTM)的混合深度学习模型能够显著提 高入侵检测的准确性和鲁棒性,为电力信息网络的安 全提供了新的解决方案。上述模型的检测效果过于 依赖人工标注的数据规模和质量,对数据的标注专业 性要求高,需要大量人力投入,导致上述模型的应用 场景有限。且由于模型结构复杂,现有应用深度学习 模型的检测方案普遍缺乏可解释性,对于检出的可疑 流量无法给用户提供可解释性说明^[9]。

文献[10]和文献[11]分别使用随机森林机器学 习模型和深度残差网络的特征提取方法,结合双向 神经网络分类模型方法进行异常流量的分类检测, 通过对 IEC 60870-5-104 协议人工提取协议报文格 式、传输负载大小等多维特征,使用随机森林进行特 征筛选,然后输入 Bi-LSTM 模型进行流量异常分类 训练。在二分类的情况下,模型取得有效结果。以 上检测方法,普遍缺乏对实时流量检测效果的动态 调整机制,无法实时动态调整模型的误报及漏报。

基于以上不足,本文以电力工控典型通信协议 IEC 60870-5-104 协议为例,提出一种基于卷积自编 码器(convolutional autoencoder, CAE)与自适应阈值 调整机制的无监督电力工控流量异常检测方法,通 过大量真实现场协议报文数据获得正常流量重构误 差分布,并在实验环境下构造典型攻击场景。通过 异常流量获取异常重构误差分布,并以此利用动态 阈值调整机制来实现对现网流量的异常检测。

1 IEC 60870-5-104协议分析及报文预处理

1.1 IEC 60870-5-104协议分析

IEC 60870-5-104 是一种基于 TCP/IP 的电力行 业通信协议,主要用于数据远程监测和遥控等功能。 由于其协议简单、兼容性强,并且具备实时性和可靠 性,满足电力行业对数据传输时效性的要求,在各国 电力工控系统中广泛使用。协议采用应答式数据传 输,一般上行数据为遥信、遥测,下行数据为遥控、遥 调。协议有 3 种帧格式,分别为 U 帧控制报文帧、S 帧监视帧和 I 帧信息传输帧^[12]。

报文数据在应用层以应用协议数据单元 (application protocol data unit, APDU)的形式传输, APDU 由应用规约控制信息(application-layer protocol control information, APCI)和应用服务数据单 元(application service data unit, ASDU)组成, 报文格 式如图1所示。

基于业务特征把协议应用层报文异常分为图 2 所示单帧字段异常与多帧关联行为异常两类。



图 1 IEC 60870-5-104协议报文格式 Fig.1 IEC 60870-5-104 protocol message format



图 2 基于业务特征的异常分类 Fig.2 Abnormal classification based on business characteristics

1)单帧字段异常。这类异常通常是单个报文帧 内的格式不规范或字段组合异常。包括不符合协议 规范的畸形报文,控制域或可变标识等字段的异常 篡改,以及多字段联合攻击所引起的报文不满足完 整性或一致性的问题。单帧字段异常可能破坏报文 的格式化规则,影响数据在传输过程中的有效解析。

2)多帧关联行为异常。这类异常涉及协议层上 下文行为,依赖于多帧之间的时序和逻辑关联分析。 典型情况包括中间人攻击、隐秘隧道通信等,其异常 表现仅在多帧会话流中才能识别,单独的帧数据难 以察觉异常^[13-14]。这种异常通常利用 IEC60870-5-104 协议的数据交互模式,在时序和状态控制上制造 误导性或隐秘的异常行为。

1.2 基于会话滑动窗口的报文预处理

基于以上分析,模型的输入报文数据预处理考 虑覆盖所有异常情况,设计基于协议会话的滑动窗 口报文预处理模式。

每个会话通过固定 N 个包长的窗口大小滑动提

取 IEC 60870-5-104 应用层 APCI 报文数据,进行顺 序拼接,生成会话报文序列样本。其中,APDU长度字 段随 IO 信息对象个数不断变化,与协议报文本身的通 信模式无关,在实际的报文预处理中去除该字段。

获得基于会话的报文序列样本后,通过索引编 码把每个十六进制报文映射为整数,得到的整数属 于类型特征,要通过 embeddding 编码转化成可用于 模型输入的特征向量,再转换为适合 CAE 模型输入 的矩阵形状。

2 基于CAE与自适应阈值调整机制的异常 检测

本节将重点阐述基于 CAE 与自适应阈值调整 机制的总体设计部分,主要包括:流量异常检测整体 设计、无监督深度学习设计、基于分位数的动态阈值 调整机制和异常检测方法实现4部分。

2.1 流量异常检测整体设计

基于 CAE 与自适应阈值调整机制的流量异常 检测整体设计如图 3 所示,分为 3 个核心部分:数据 输入与特征提取、CAE 编码模型和动态阈值调整的 异常检测机制。

1)数据输入与特征提取。数据输入采用滑动窗 口机制对会话报文数据进行提取,将会话报文数据 划分为多个固定大小的窗口,以生成特征向量。这 些向量构成了输入特征集,输入至 CAE 模型进行异 常检测。滑动窗口提取过程中,对每个会话报文逐 包进行协议头部数据的拼接,保留其顺序结构以增 强检测模型对时序信息的捕捉能力。

2)CAE 编码模型。CAE 模型以无监督方式在大量正常流量数据上进行训练,通过交叉验证选择最优超参数,以构建稳健的编码模型。模型训练后,编码器负责对输入数据进行特征压缩,而解码器负责数据重构。重构误差的计算用于后续异常判定。

3) 异常检测机制。在检测阶段,实时流量数据 经过 CAE 模型进行重构,并计算与原始输入的重构 误差。基于预设的自适应阈值调整机制,系统可动 态生成合理的异常判定阈值区间。

a)正常流量:重构误差低于阈值,判定为正常流 量并将相关特征更新至正常流量特征历史序列。

b)多帧关联行为异常流量:若重构误差在中等



图3 基于CAE与动态阈值机制的异常检测

Fig.3 Anomaly detection based on CAE and dynamic threshold mechanism characteristics

异常区间,则判定为报文异常,系统会更新多帧关联 行为对应的异常误差历史序列。

c)单帧字段异常流量:重构误差超出高异常阈 值,则判定为行为异常,更新单帧字段对应的异常误 差历史序列。

当新的流量数据进入时,系统将依据历史误差 序列不断优化阈值设置,确保检测机制具备动态调 节能力,提升检测准确性。

2.2 无监督深度学习模型设计

2.2.1 CAE网络结构优势

CAE 是一种无监督学习模型,专门用于学习高 维数据的低维表示及数据重构,其网络结构由编码 器和解码器两部分组成^[15]。

编码器通过一系列卷积层将输入特征逐步压缩 为低维特征表示。卷积层的作用是提取输入数据中 的局部特征,通过使用多个卷积核扫描输入数据,捕 捉不同尺度的空间模式。池化层进一步减少数据维 度,同时保留关键特征,从而形成更具代表性的低维 编码^[16-17]。编码器的输出通常是一个紧凑的特征向 量,保留了输入数据的核心信息。

解码器的任务是将编码器输出的低维特征映射 回原始数据空间。解码器通过一系列反卷积层(或 转置卷积层)逐步放大特征维度,重建出与输入数据 结构相似的输出。与编码器相反,解码器的每个卷 积层致力于还原输入数据的局部特征和全局结构, 以实现高质量的重构^[18]。

为实现输入模块报文序列的重构能力,使用1D-CAE 结构逐层提取出报文序列中的编码模式。首先, 一维卷积核能够在序列数据中捕捉到局部模式,通过 在输入序列上滑动,卷积核可以高效识别出数据中的 局部模式,如时间序列的短期趋势、峰值、周期性波动 等。其次,通过多个卷积层,1D-CAE 能够逐层提取 更高级别的特征,从低级别的局部特征到高级别的全 局模式或长期依赖性复杂特征。这种层次化的特征 表示使得模型能够更好地捕捉序列数据中的复杂结 构,从而实现对协议流量报文的准确重构。

2.2.2 网络结构设计

本文使用多个 1D CNN 神经网络块来实现流量 会话报文序列样本的压缩表示,卷积核尺寸设定为 3,第1个卷积块使用 64 个卷积核,第2 个卷积块使 用 32 个卷积核,逐步把输入维度从 256 压缩到 32 维。每个卷积层后加入一个最大池化层,用于降低 特征图的数据量,然后经过 Dropout 层,随机把 30% 的参数权重设置为 0,以此来提高模型的泛化能力, 防止过拟合。本文设置会话滑动窗口 N 为 30 个包,每 包固定取 11 Byte,因此模型输入序列长度为 330 Byte。

具体的模型结构如表1所示。

表	1	CAE网络结构汇总
Table 1 Su	mm	ary of CAE network structure

国旗目为	检山始座の	
网络层伏	制出维度/Byte	奓奴个奴
input_layer(输入层)	(256,330,256)	0
conv1d(卷积层1)	(256,330,64)	49 216
max_pooling1d (最大池化层 1)	(256,165,64)	0
dropout (Dropout 层 1)	(256,165,64)	0
conv1d_1(卷积层 2)	(256,165,32)	6 176
max_pooling1d_1(最大池化层 2)	(256,83,32)	0
conv1d_2(卷积层3)	(256,83,32)	3 104
up_sampling1d(上采样层1)	(256,166,32)	0
dropout_1 (Dropout 层 2)	(256,166,32)	0
conv1d_3 (卷积层 4)	(256,166,64)	6 208
up_sampling1d_1(上采样层 2)	(256,330,64)	0
conv1d_4 (卷积层 5)	(256,330,256)	49 408

2.3 基于分位数的动态阈值调整机制

实时动态调整阈值:当新数据到来后,更新过去 N个窗口的正常流量重构误差,当收到误报反馈后 重新计算异常判定阈值。

异常流量重构误差阈值设定为过去 N 个窗口的 异常流量重构误差的上下 5% 分位区间,分为区间 为[$Q_5(E_{abnormal}), Q_{95}(E_{abnormal})$], $E_{abnormal}$ 为异常流量重构 误差序列, $Q_5(E_{abnormal}), Q_{95}(E_{abnormal})$ 分别为 $E_{abnormal}$ 的 5% 分位数和 95% 分位数。

当收到漏报反馈,根据正常流量的重构误差计 算阈值,设定为95%分位数,大于阈值上限即告警。 判定阈值调整如式(1)所示。

$$T_{\text{hreshold}} = Q_{95} \left(E_{\text{normal}} \right) \tag{1}$$

式中: T_{hreshold} 为判定阈值; E_{normal} 为正常流量在过去N个窗口的重构误差队列; $Q_{95}(E_{\text{normal}})$ 为 E_{normal} 的95%分位数。

基于分位数的动态阈值调整机制原理如图 4 所示。

2.4 流量异常检测模型实现

基于 CAE 与自适应阈值调整机制的电力工控 流量应用层异常报文检测模型,具体实现步骤如下。





步骤 1):在现场网络管理设备中,通过交换机的 镜像端口对电力工业控制系统的通信进行监控,抓 取 IEC 60870-5-104 协议正常业务流量数据。

步骤 2):将获取的正常工控环境下的对应协议 流量进行会话重组,通过上述特征预处理方法,按照 滑动步长为1个包,提取模型输入向量。

步骤 3):使用交叉验证方法,获得最优的 CAE 模型超参数,画模型学习曲线跟踪模型训练过程,在 过拟合前停止训练,固化 CAE 模型。

步骤 4):构建基于单帧的报文异常和基于上下 文的多帧序列异常两类流量,生成特征向量分别输 入 CAE 模型重构报文,计算重构误差,获得误差分 布生成默认阈值配置。

步骤 5):在检测阶段,重复步骤 2)进行待检测 流量的特征向量提取,把滑动窗口步长改为窗口大 小,既能使会话所有报文都进入模型检测又能保证 检测效率。

步骤 6):加载自编码器模型,把提取的特征向量 输入模型,计算重构误差,根据误差队列获得异常区 间,判定检测结果,并动态调整误差队列。

3 实验分析

本节将重点阐述模型的实验部分,包括实验环

境、实验数据、评价指标、模型训练及多种测试场景 下的模型相关实验。

3.1 实验环境

实验在 64 位 linux 操作系统上进行, CPU 为 Intel Xeon(R)系列 5318 处理器, 128 G 内存。实验 代码语言使用 Python, 具体版本为 Python 3.12.1, 深 度学习框架使用 TensorFlow, 主要用到的库有 Numpy、Pandas、Sklearn、Seaborn、Matplotlib等。

3.2 实验数据

抓取了某省 220 kV 变电站多天次、多时段的 IEC 60870-5-104 协议流量报文,总计 315 万条,其 中U帧、I帧和S帧的占比大致为 2%、93%、5%,流量 报文保持此比例划分用于模型的训练和验证。

首先按照9:1的比例划分为训练集和测试集, 其中测试集独立保留用于最终性能评估。为了调整 超参数,使用训练集进行了10折交叉验证,选定了 模型的最佳超参数组合。模型的最终训练中,将训 练集再次按照9:1的比例划分为训练子集和验证子 集,训练过程中记录模型在其上的损失值,绘制学习 曲线以监控模型性能,观察是否发生过拟合。

3.3 评价指标

在电力工控流量异常检测模型的性能评估中, 常用评价指标包括准确率(accuracy)、精确率 (precision)、召回率(recall)、F1分数(F1 score)、漏报 率(miss rate)和误报率(false positive rate, FPR)等。 上述指标可以从不同角度评估模型的检测效果,尤 其在安全敏感的电力工控系统中,漏报率和误报率 的作用尤为重要。

漏报率也称为假阴率(false negative rate),表示 实际为异常的样本中被模型错判为正常的比例。对 于电力工控系统来说,由于漏报意味着未能及时发 现潜在的威胁,可能会导致系统遭受攻击或故障却 未被察觉^[19-20],因此漏报率是一个至关重要的指标。 降低漏报率是确保系统安全稳定运行的关键。漏报 率 *F*_{NB} 计算公式为

$$F_{\rm NR} = 1 - \frac{T_{\rm P}}{T_{\rm P} + F_{\rm N}}$$
(2)

式中:T_P为真正类个数;F_N为假负类个数。

误报率表示实际为正常的样本中被模型错误标记 为异常的比例。在电力工控系统中,误报率同样是一 个重要的评价指标。高误报率会导致频繁的错误报 警,使得运维人员的精力被不必要的检查和排查占用, 可能干扰正常的生产调度,甚至导致对真正威胁的忽 视^[21-23]。因此,降低误报率对于保持系统的高效运作 和减少人力成本至关重要。误报率*F*_{PR}计算公式为

$$F_{\rm PR} = \frac{F_{\rm P}}{T_{\rm N} + F_{\rm P}} \tag{3}$$

式中:F_P为假正类个数;T_N为真负类个数。

在电力工控流量异常检测中,漏报率和误报率 通常需要相互权衡。设计和调优检测模型时,必须 根据实际应用场景的需求来平衡这两个指标,以确 保系统既能有效识别异常,又不会因为过多的误报 警报而影响正常运行^[24-25],因此本文结合以上两个 指标综合评价模型性能。

3.4 模型训练

模型训练使用 315 万条正常电力工控业务的协议流量报文,按照 9:1 划分训练集和测试机,通过输入编码模块获得流量报文序列数据,模型参数对训练效果影响较大,其参数设置至关重要。本文模型具体训练参数如表 2 所示。

表2 模型训练参数

Table 2 Model training parameters

参数	取值
批次大小	256
监控参数 monitor	val_loss
优化器	Adam
损失函数	categorical_crossentropy
Conv1D kernel_size	3
Dropout 参数	0.3
输出层激活函数	Softmax

模型的输出为预测报文字节编码的概率,因此, 模型输出层要选择 softmax 层,模型损失函数要选择 对应的多分类交叉熵损失,计算公式为

$$L_{\rm ogLoss} = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{M} y_{ij} \log(p_{ij})$$
(4)

式中: L_{ogLoss} 为多分类交叉熵损失;K为整体样本数; M为类别数; y_{ij} 为样本i属于类别的j真实标签(属 于取1,不属于取0); p_{ij} 为模型预测样本i属于类别 的j的概率。

Adam 优化器是深度学习中最常用的优化器,结

合动量和 RMSProp 的优点,适用于大规模数据集和 高维参数空间,常用于训练神经网络模型。其中,每 个卷积网络层的激活函数需要通过实验获取。本文 使用十折交叉验证,对 RELU 和 Tanh 进行实验对 比,记录两种不同激活函数在验证集上每次训练的 损失值,绘制曲线如图 5 所示。



Fig.5 Loss curves for different activation functions

从图 5 中可以看出,在模型使用 RELU 激活函数时,交叉验证模型的损失,明显低于使用 Tanh 激活函数的模型,Tanh 激活函数在训练时损失函数下降值较快,但容易过拟合,无法深入学习数据模式特征,因此本文选择使用 RELU 作为激活函数。选定模型的激活函数后,需要进行模型的完整训练,再次把训练集按照 9:1 随机抽取重新生成训练集和验证集,设置训练器 Early Stopping 提前终止、防止过拟合,设置 Checkpoint 检查点保持最优的模型参数。

为验证 CAE 模型编码效果,选择适用于本文数 据的时序模型 LSTM-AE 进行对比测试,分别画出两 种编码器模型训练过程中训练集与验证集上的学习 曲线。图 6为 LSTM-AE 模型的学习曲线,呈现阶梯 式下降模式,模型在验证集上的交叉熵损失在整个 训练阶段都比在训练集上高,说明模型有过拟合倾 向。在迭代 32 轮次时,验证集交叉熵损失达到最小 1.753,在迭代 35 轮次时,触发模型过拟合终止条件, 模型训练终止。

图 7 为 CAE 模型的完整训练过程,绘制了在训 练集和验证集上的学习曲线。通过学习曲线可知:



在训练集和验证集上,模型的交叉熵损失可同步降 到 0.04,在迭代 15 次左右的验证损失突变很可能是 早期训练中的随机性波动或验证集小批次样本分布 差异引起的短暂异常,不会影响模型的最终性能。 在之后的迭代训练中验证集和训练集损失曲线都在 平稳下降,表明模型后期成功收敛且具备良好的泛 化性能,效果明显优于 LSTM-AE 模型,在迭代 96 次 后提前终止训练,未出现过拟合。



3.5 正常流量重构误差测试

CAE 模型输出层激活函数为 softmax,输出每个 特征 one-hot 编码的预测概率,需要转换为对应的整 数索引,然后与原始报文对比,计算不同报文个数作 为重构误差。

为验证模型可靠性,使用某省 220 kV 变电站所 采集的 31 万条正常流量报文作为测试样本,测试 集上的模型重构误差分布如图 8 所示,绝大部分 重构误差在 20 Byte 以内,仅有 86 条重构误差超过 20 Byte,可默认正常阈值设定为 20 Byte,误报率为 0.027%。按照动态阈值调整机制,重构误差序列长 度设为 120,有漏报反馈后,取最近 120 个正常流量 重构误差序列的 95% 分位数作为阈值上限。





3.6 多帧关联行为异常流量测试

以遥控业务逻辑异常为例,构建中间人非法遥

控注入攻击场景。遥控指令的正常执行逻辑为遥控 选择、选择确认、遥控执行、执行确认,流程的每一步 都须严格按照协议规范执行,任何篡改或干扰行为 都可能导致设备误操作或系统故障。

本文通过模仿中间人攻击实施非法遥控注入所 构建攻击场景为:攻击者通过拦截并篡改 IEC 60870-5-104 协议的遥控报文,利用协议中的逻辑漏洞向系 统注入恶意遥控指令。具体地,通过在正常的遥控选 择报文之间插入非法遥控选择报文,实现遥控注入攻 击,从而导致设备执行未经授权的控制操作。

正常遥控选择报文为

-Header: 0x68 0x01 0x68

0x00 0x00 0x00

接下来应为选择确认,但此处再回放一遍与正 常遥控选择相同的报文。通过这种方式,可以干扰 正常的遥控选择过程,使得遥控选择命令被多次执 行,从而可能导致错误的操作执行。或者在正常的 遥控执行命令后,再次发送非法的选择命令,产生不 必要的重复操作,目标设备执行的动作将不符合预 期,可能导致系统的异常行为或安全漏洞。

正常遥控执行报文为

-Header: 0x68 0x01 0x68

-ASDU: 0x0A 0x00 0x01 0x00 0x00 0x64 0x0A 0x01 0x02 0x00 0x00 0x00 0x01 0x03 0x00 0x00 0x00 0x00 0x00

通过以上两种方式,按照1:1的比例构造5万 条多帧关联行为异常流量,检测模型按照30包步长 提取出待检测样本,异常重构误差分布如图9所示。 报文重构误差在25 Byte和45 Byte形成两个波峰,整 体重构误差分布在20~90 Byte,和正常流量报文重构 误差分布有明显的差异,将此设定为默认阈值区间, 按照动态阈值调整机制动态更新,漏报率为0.12%。

3.7 单帧字段异常流量测试

对于单帧字段异常流量的构建,模仿隐秘信道 通信的攻击场景为:攻击者利用 Reserved Field 字段 的可篡改性,逐字拼接出隐藏的"Hello World"信息, 由于该字段通常不涉及协议的实际控制,攻击者可 以自由修改其中的内容。详细的构造步骤如下文 所述。





1)初始化报文:构造一个标准的 IEC 60870-5-104 遥控选择报文,报文头部的各字段按照默认设置生成。

2)逐字修改保留字段:将 Reserved Field 字段按顺序替换为"Hello World"对应的 ASCII 码,报文为

-Start Byte: 0x68

-Length: 0x08

-Control:0x20(遥控选择)

-Reserved Field: 0x48(对应字符'H')

-ASDU:0x0A 0x00 0x01 0x00 0x00 0x64 0x0A

依次循环插入字符,构造7930个保留字段异常 流量包,检测模型按照30包步长提取出待检测样本。

单帧字段异常流量的重构误差分布如图 10 所示。有图 10 可知,对于单帧字段异常流量重构误差 区间为 100~180 Byte,将此设定为默认阈值区间,按 照动态阈值调整机制,没有漏报情况。



表 3 为模型在不同测试场景下各评价指标的汇 总,表中 F₁分数为精确率和召回率的调和平均数。 综合表 3 中各指标可以看出,本文所提方法在正常 流量测试时,误报率和漏报率都表现出色,F₁分数为 99.98%;在进行仿真攻击实验中,只在多帧关联异常 流量测试中产生 0.12% 的漏报。综上所述,本文提 出的基于无监督自适应机制的流量异常检测方法在 多种测试场景下性能良好,可有效提升电力工控系 统中流量异常检测能力。

表3 各测试场景实验结果

Table 3 Experimental results for each testing scenario

					₽ሢ:%
测试场景	误报率	漏报率	精确率	召回率	F_1 分数
正常流量测试	0.027	0	99.97	100	99.98
多帧关联异常	0	0.12	100	99.88	99.94
单帧字段异常	0	0	100	100	100

4 结论

本文提出一种基于 CAE 与自适应阈值调整机 制的无监督电力工控流量异常检测方法,通过对电 力工控流量数据的深度特征提取,能够自动学习并 提取隐藏在海量正常流量下的编码模式,具有较强 的泛化能力和抗噪性能,能够在复杂流量交互环境 中实现高效、精准的异常检测。

1)通过构建实际电力工控系统中两种典型的异常流量,验证了该模型有效的异常检测能力。在实时检测场景中模型通过自适应阈值调整机制平衡漏报率和误报率,以确保既能有效识别异常,又不会产生过多的误报。

2)通过使用无监督深度神经网络,避免模型对 人工数据标注的依赖,有效降低了模型的部署成本, 并且由于模型训练只使用对应工控协议的正常流 量,对不符合正常流量编码模型的数据均有检出效 果,有效增强了模型的检测能力。

3)使用多层 1D-CNN 网络来实现 CAE 模型结构,能够逐层提取更高级别的数据模式,且卷积层具有空间不变性,使模型泛化能力和抗噪性能得到有效提高,并且可以输出检测流量的重构误差,能够定位可疑的报文字节,有效增强了模型检出的可解释性。

4)使用自适应阈值调节机制,能够根据历史检 出数据动态调整模型判定阈值,自动调整模型检测 效果,达到自动适应不同的检测场景的能力。

针对目前使用的 IEC 60870-5-104 协议训练数 据绝大部分是 I 桢数据, U 桢和 S 桢数据报文较少, 下一步工作中,要丰富训练数据, 配合调整模型网络 结构, 现场部署进行测试方法效果检测。同时, 增加 对其他常见电力协议报文训练模型, 以支持对应常 见电力协议流量的异常检测能力。

参考文献

[1] 蒲天骄,韩笑.新型电力系统中人工智能应用的关键技术[J].
 电力信息与通信技术,2024,22(1):1-13.
 PU Tianjiao, HAN Xiao. Research on key technologies in the

application of artificial intelligence in new type power systems [J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2024, 22(1):1–13.

- [2] XIA W Z, NEWARE R, KUMAR S D, et al. An optimization technique for intrusion detection of industrial control network vulnerabilities based on BP neural network [J]. International Journal of System Assurance Engineering and Management, 2022, 13(1):576-582.
- [3] TIAN J W, YU Z C, LIU L, et al. An abnormal traffic detection method in smart substations based on coupling field extraction and DBSCAN[J].E3S Web of Conferences, 2021, 260: 2005.
- [4] 王文博,刘绚,张博,等.基于协议特征的电力工控网络流量异常行为检测方法[J].电力系统自动化,2023,47(2):137-145.
 WANG Wenbo, LIU Xuan, ZHANG Bo, et al. Protocol characteristics based detection method for abnormal flow behavior in electric power industrial control network [J]. Automation of Electric Power Systems,2023,47(2):137-145.
- [5] 俞海国,马先,徐有蕊,等.基于协议解析的电网工控安全检测 系统:CN106911529A[P].2017-06-30.
- [6] 王文博,刘绚,林海,等.基于深度学习的电力工控流量应用层 报文异常检测[J].电力系统自动化,2023,47(11):69-76.
 WANG Wenbo, LIU Xuan, LIN Hai, et al. Deep learning based anomaly detection for application - layer message of power industrial control communication traffic[J]. Automation of Electric Power Systems,2023,47(11):69-76.
- [7] 潘羿,李彬.基于 DNSAE 和随机森林的电力信息网络入侵检测模型[J].电力信息与通信技术,2022,20(5):23-29.
 PAN Yi, LI Bin. Intrusion detection model of power information network based on DNSAE and random forest [J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2022, 20 (5): 23-29.
- [8] 纪守领,李进锋,杜天宇,等.机器学习模型可解释性方法、应用 与安全研究综述[J].计算机研究与发展,2019,56(10):2071-2096.

JI Shouling, LI Jinfeng, DU Tianyu, et al.Survey on techniques, applications and security of machine learning interpretability [J]. Journal of Computer Research and Development, 2019, 56(10): 2071–2096.

- [9] 段笑晨,王延.基于机器学习的电力系统网络异常检测与分类 方法[J].自动化与仪器仪表,2023(5):100-105.
 DUAN Xiaochen, WANG Yan. Network anomaly detection and classification method of power system based on machine learning
 [J].Automation & Instrumentation,2023(5):100-105.
- [10] 李天慧,谢云澄,车荣花,等.基于DRSN-BiLSTM的电力信息网络入侵检测模型[J].电力信息与通信技术,2023,21(9):30-37.
 LI Tianhui, XIE Yuncheng, CHE Ronghua, et al. Intrusion detection model of power information network based on DRSN-BiLSTM [J]. Electric Power Information and Communication Technology,2023,21(9):30-37.
- [11] 蒋腾龙.基于IEC60870-5-104协议的电力监控系统设计[J].电 子技术与软件工程,2021(8):13-15.
 JIANG Tenglong. Design of power monitoring system based on IEC60870-5-104 protocol[J].Electronic Technology & Software Engineering,2021(8):13-15.
- [12] FERRAG M A, MAGLARAS L, JANICKE H, et al. Deep learning techniques for cyber security intrusion detection: a detailed analysis[C]//Electronic Workshops in Computing.BCS Learning & Development, 2019:126-136.
- [13] CHANDOLA V, BANERJEE A, KUMAR V.Anomaly detection[J]. ACM Computing Surveys, 2009, 41(3):1–58.
- [14] TANG T A, MHAMDI L, MCLERNON D, et al. Deep learning approach for network intrusion detection in software defined networking [C] // 2016 International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM). IEEE, 2016: 258-263.
- [15] FIORE U, PALMIERI F, CASTIGLIONE A, et al. Network anomaly detection with the restricted Boltzmann machine [J]. Neurocomputing, 2013, 122:13-23.
- [16] SHARMA R K, KALITA H K, BORAH P. Analysis of machine learning techniques based intrusion detection systems [C] // Proceedings of 3rd International Conference on Advanced Computing, Networking and Informatics. New Delhi: Springer India, 2016:485-493.
- [17] 张艳升,李喜旺,李丹,等.基于卷积神经网络的工控网络异常 流量检测[J].计算机应用,2019,39(5):1512-1517.
 ZHANG Yansheng, LI Xiwang, LI Dan, et al. Abnormal flow monitoring of industrial control network based on convolutional neural network [J]. Journal of Computer Applications, 2019, 39 (5):1512-1517.
- [18] 舒斐,陈涛,王斌,等.一种基于DBN-RF的电网工控系统异常 识别方法[J].计算机工程,2020,46(11):35-41.
 SHU Fei, CHEN Tao, WANG Bin, et al. An anomaly identification method for power grid industrial control system based on DBN-RF
 [J].Computer Engineering,2020,46(11):35-41.

(下转第74页)

DOI:10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2025.06.007

基于自注意力混合模型的电力物联网流量分类

王 聪',郑海杰',黄 振',王高洲',曲海鹏2*

(1.国网山东省电力公司信息通信公司,山东 济南 250013;2.中国海洋大学信息科学与工程学部,山东 青岛 266100)

摘要:网络流量分类是网络监控和分析的关键环节,用于恶意流量拦截、服务质量保证、应用瓶颈预防和恶意行为识别等。当前,在电力物联网设备应用场景中,对Modbus和消息队列遥测传输(message queuing telemetry transport, MQTT)等通信协议的网络流量进行分类时,面临着准确率低、收敛慢等挑战。针对上述问题,提出了一种基于自注意力机制的卷积神经网络-循环神经网络(convolutional neural network-recurrent neural network, CNN-RNN)混合网络架构,用于改进电力物联网设备中Modbus和MQTT通信流量的分类性能。通过模拟电力物联网环境并采集真实环境的物联网流量,获取大量Modbus和MQTT通信数据包,将流量数据转化为伪图像格式,并引入自注意力机制来增强网络对不同区域的关注和特征捕获能力。实验结果表明,相较于传统的多层感知机(multilayer perceptron, MLP)、RNN、CNN模型和现有论文中的方案,引入自注意力机制的CNN-RNN混合模型在电力物联网流量分类方面取得了显著的改进。该模型能够实现高达95%的分类准确率,并且具有更快的收敛速度和训练效率。

关键词:深度学习;自注意力机制;网络安全;电力物联网;流量分类 中图分类号:TP393.07 文献标志码:A

文章编号:1007-9904(2025)06-0062-13

Traffic Classification of Power IoT Based on Self-attention Hybrid Model

WANG Cong¹, ZHENG Haijie¹, HUANG Zhen¹, WANG Gaozhou¹, QU Haipeng^{2*}

(1.Information and Communication Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250013, China;
 2.Faculty of Information Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Network traffic classification is an important part of network monitoring and analysis, which is used for malicious traffic interception, quality of service assurance, application bottleneck prevention and malicious behavior identification. Recently, there are great challenges on the low accuracy and slow convergence problems, when classifying network traffic generated by communication protocols like Modbus and message queuing telemetry transport (MQTT) in the context of power IoT devices applications. To address aforementioned issues, a convolutional neural network-recurrent neural network (CNN-RNN) hybrid architecture based on self-attention mechanism is proposed to improve the classification performance of Modbus and MQTT traffic for IoT devices that already in use within the power system. By simulating and collecting the network traffic of power IoT device in the real environment, a large number of Modbus and MQTT communication data packets are obtained. Additionally, the traffic data is converted into pseudo-image format, and a self-attention mechanism is introduced to enhance the network's attention and feature capture capabilities in different regions. The experimental results show that, compared with traditional multilayer perceptron (MLP), RNN, CNN models, the proposed CNN-RNN hybrid model with self-attention mechanism demonstrates achieved significant improvement in IoT traffic classification. The model can achieve up to 95% accuracy, demonstrating better convergence and training efficiency.

Keywords: deep learning; self-attention mechanism; cyber security; power Internet of Things; traffic classification

基金项目:国网山东省电力公司科技项目(520627220005)。 Science and Technology Project of State Grid Shandong Electric Power

Science and Technology Project of State Grid Shandong Electric Power Company(520627220005).

0 引言

网络流量分类是网络管理和安全防护中一项重 要的技术。其通过对网络流量的分类来对协议、服

务和应用进行分析,以提升网络服务质量,并进行网 络安全分析和识别网络恶意行为的工作。近年来, 物联网技术发展迅速,智能城市、智能生活、智能制 造等各类场景下的感知、计算与控制设备组成的智 能环境,使得物联网与社会生产生活密切相关。根 据思科公司的调查报告,到2030年,将有5000亿台 物联网设备,为公司和行业创造100万亿美元的价 值[1]。在电力物联网领域,我国的电力设备系统广 泛部署了智能物联网,实现了更智能、更快的调度、 集成控制和信息分析。电力物联网承载着设备的运 行,其安全性尤为重要,如何对电力物联网的网络流 量进行分类,并进一步进行安全分析,已成为物联网 设备安全的重要问题[2]。本文基于真实的物联网环 境,模拟部署了物联网环境,在8套虚拟化系统中模 拟多种不同类别终端使用 Modbus 协议和消息队列 遥 测 传 输 (message queuing telemetry transport, MOTT)协议进行通信,并考虑不同类型数据包的生 成问题,确保产生不同类别的、足够数量的数据包, 最终构建多样且充足的物联网流量数据集。

目前,基于机器学习的方法在流量识别和流量 分类方面取得了较好的进展。使用卷积神经网络 (convolutional neural network,CNN)和循环神经网络 (recurrent neural network,RNN)相结合的网络结构处 理伪图像形式的流量数据,提高了分类准确率。但 上述方法在电力物联网场景下的流量分类效果尚不 够好,主要问题为:模型收敛慢,没有针对电力物联 网进行算法的改进。

基于真实的物联网环境,模拟部署物联网环境, 在多套虚拟化系统中模拟不同类别终端使用 Modbus协议和 MQTT 协议进行通信,确保产生不同 类别的足够数量的数据包,最终构建多样且充足的 物联网流量数据集。对多层感知机(multilayer perceptron, MLP)、CNN和 RNN 网络进行了比较,经 过充分的实验,在多维度进行验证,证明融合自注意 力(self-attention)机制的 CNN-RNN 混合模型的效 果最佳,可以用最少的训练轮次达到较高的准确率。 该方法中的自注意力机制通过计算特征之间的相似 度函数来动态计算注意力权重 S。依据注意力权重 进一步对特征进行加权平均,以更准确地捕捉特征 之间的相关性。这种设计使得自注意力机制模块具 备了灵活性,可以根据需求适应关注不同区域,并有 效捕捉更多特征^[3]。

1 相关工作

1.1 网络流量分类

近些年来,众多学者提出多种不同的方法应对 网络流量分类问题。主要有三大类方法:基于端口 号、基于有效载荷、基于统计和机器学习。

基于端口的分类使用数据包报文头中的端口号 作为特征。基于有效载荷的流量分类方法是通过分 析数据包的数据信息^[4]进行分类。目前应用效果较 好的是基于统计和机器学习的方法,从大规模流量 数据中得到数据特征蕴含的规律和模式,从而基于 数据驱动进行网络流量分类。因此在实际应用中, 如何根据问题特性选择、评估、调整和改进模型、算 法,是该类方法面临的主要挑战。

Lotfollahi 等人使用图形处理中常用的 CNN 和 RNN 对网络流量进行分类,取得了优于传统基于端 口和有效载荷的效果^[5]。试验表明,由于纠错输出 码具有提高分类器的泛化能力的特点,该方法可以 将骨干路由器上捕获的数据集的多分类精度提高 12% 左右^[6]。Feng 等人提出利用 CNN 进行网络流 量分类[7],并取得了不错的效果。对于虚拟专用网 络(virtual private network, VPN)等加密流量的分类, Izadi 等人通过结合卷积神经网络、蚁狮元启发式算 法 (antlion optimizer, ALO) 和 自 组 织 映 射 (self organizing map, SOM)构建分类模型,识别加密流量 并区分 VPN 和非 VPN 流量^[8]。网络流量分类也常 用于识别恶意流量,即对流量进行正常流量和恶意 流量的二分类。Stryczek 等人提出利用长短期记忆 网络(long short-term memory, LSTM)、支持向量机 (support vector machine, SVM)和随机森林(random forest, RF)来对智能电网中流量进行分析, 从而检测 对电网有威胁的恶意流量^[9]。Andresini 等人将神经 网络模型与注意力机制相结合,利用注意力机制增 强特征图的提取,结合多输出模型进行分类,从而展 现出更好的网络流量分类效果^[10]。Yu等人提出了 基于多尺度卷积神经网络的网络安全通信入侵检测 系统,通过结合深度学习和传统的入侵检测系统,提 升恶意流量监测精度^[11]。Wang等人提出了一种基 于集成特征选择的深度神经网络算法,用于检测网 络中的恶意流量,试验表明该算法有效提高模型性 能,有效检测网络入侵行为^[12]。

1.2 物联网协议

本文主要研究的是 Modbus 和 MQTT 两种物联 网协议。Modbus 是一种主从式通信协议,基于串行 通信或 TCP/IP 通信,目前已成为物联网中普遍的通 信协议。MQTT 是一种利用消息队列技术进行远程 数据传输和监测的方法,专为连接网络带宽有限的 远程设备而设计。MQTT 协议可以提高系统的可靠 性和灵活性,有效管理数据流量并确保数据的安全 传输,适用范围非常广泛,其中包括受限的物联网 环境。MQTT 和 Modbus 是实现传统传感器网络和 物联网网关的相互补充协议。其中,Modbus 被用作 管理工业设备的现场总线,而 MQTT 被用作全局协 议^[13]。二者相辅相成,互相补充,有效地提高了物 联网的性能。两种协议的报文格式具体如图 1 所示。

2	Start	Slave ID	Function code	Data	CRC Error Check		Stop
3.5	Bytes	1~4 Bytes	1 Byte	n Bytes	2 Bytes		3.5 Bytes
(a)Modbus 帧格式							
	Contro	ol Header	Packet Length	Variable Header		Pay	load
	1	Byte	1~4 Bytes	0~Y Bytes		$0 \sim X$	Bytes
(b)MQTT 帧格式图 1 相关协议帧格式							
Fig.1 Related protocol frame format							

1.3 神经网络

神经网络是由一些简单的,互相连接的处理 单元构成的计算系统,这些单元通过动态响应外 部输入来处理信息^[14]。本文主要使用了卷积神经 网络和循环神经网络。一维卷积神经网络是网络 流量分类任务的理想选择之一,大量的试验结论 已经证明一维卷积可以提取网络数据包中相邻字 节之间的关联性,可为每一类协议或应用程序找 到判别特征,进而对流量进行准确分类。本文使 用了 RNN 中的 LSTM,相比经典 RNN,可以在一定 程度上缓解"梯度消失"现象,提高训练收敛速度, 并通过采取自注意力机制,提取出更加丰富的全 局特征表示。

2 物联网流量分类模型

对既往文献和技术比较研究,发现 CNN 与 RNN 结合的模型在流量分类方面表现良好^[15-16]。为了更好地实现特征提取,提出引入自注意力机制的 CNN-RNN 混合模型,并通过实验对其效果进行了验证。最终实验表明,引入自注意力机制后可以实现更快的收敛和更高的准确率。

2.1 卷积神经网络和循环神经网络

CNN 在图像处理领域取得了巨大的成功,通过 使用多个核函数从图像中提取特征。CNN可以自动 完成特征工程,链接多个 CNN 可以自动提取复杂的 特征。为了增强混合模型的收敛速度、鲁棒性和稳 定性,在每个卷积层之后,还添加了以下几个层: ReLU 激活层、最大池化层和批归一化 (batch normalization)层。这些层的作用是引入非线性特 性、降低特征维度、规范化特征分布,从而改善模型 的性能和鲁棒性。之后是全连接层,最后一个全连 接层的输出输入到 Softmax 输出以生成分类结果。 循环神经网络使用 LSTM 这一 RNN 的变体。利用记 忆单位和门控机制,有助于处理长序列依赖关系。 相对于传统的 RNN, LSTM 具有更优越的长期记忆 能力,从而可以提高模型收敛速度[17]。该模型使用 隐藏层维度为256的LSTM层,之后使用展开层和全 连接层将输出映射每个样本的预测结果。

2.2 引入自注意力机制的混合网络

在流量分类方法的研究中,本文分析了单一分 类模型的缺陷,采用引入自注意力机制的混合模型。 如图 2 所示,该模型由两个一维卷积层和两个 LSTM 层组合构成。通过这种结合方式,CNN-RNN 网络可 以更好地处理网络流量数据中时序性和长期依赖性 特征。在 CNN-RNN 模型中,CNN 主要通过卷积层 和池化层提取网络流量数据的局部特征,并将其转 换为一系列的特征向量,这些特征向量会被送入 LSTM 中,并将网络流量数据的整体特征表示输出到 全连接层进行分类。整个过程中,CNN-RNN 模型不 需要人工提取特征和规律,而是从数据中自动学习 特征和规律,从而实现更加准确和泛化的网络流量 分类和协议识别。

在实际应用中,CNN-RNN 模型在特征提取过程

中可能会忽略重要特征,花费过多的时间提取次要特征,导致无法充分学习更为重要的特征。为了解决这个问题,本文提出了一种引入自注意力机制的CNN-RNN混合模型。通过引入注意力模块,可以提高重要时序特征的影响力,降低非重要特征的权重,从而有效地提升模型学习重要特征的效率,弥补现有方法的不足。同时,标准CNN和注意力机制支持不同长度序列输入,能够更好地提取短序列特征。此外,LSTM层能够将细粒度特征转化为粗粒度特征,有效处理不同维度的特征信息,并在一定程度上解决关键信息遗忘和梯度消失的问题。通过引入注意力机制,CNN-RNN模型实现了粗细粒度特征的融合,全面刻画了时序数据^[18]。

使用自注意力机制将序列中的每个元素与其他 元素进行交互,并计算相似度。这些相似度可以被 视为每个元素的权重,用于对输入序列中元素的加 权求和,从而得到对应的特征表示。自注意力机制 的计算规则如式(1)和式(2)所示。

Attention
$$(\boldsymbol{Q}, \boldsymbol{K}, \boldsymbol{V}) = \operatorname{softmax}\left(\frac{\boldsymbol{Q}\boldsymbol{K}^{\mathrm{T}}}{\sqrt{d_k}}\right)\boldsymbol{V}$$
 (1)

式中:Q、K和V分别为查询向量、键向量和值向量; d_k 为第k个键向量的维度;Attention 和 softmax 分别 为计算注意力值函数和计算注意力权重函数。在计 算注意力时,查询向量与键向量的乘积与其维度平 方根 $\sqrt{d_k}$ 的比值得到相似度矩阵,再经过 Softmax 函 数得到权重矩阵,最后将权重向量与值向量相乘得 到最终的注意力向量。

O = LayerNorm(*x* + Dropout(Attention(*Q*,*K*,*V*))) (2)
式中:*O* 为输出向量;*x* 为输入向量;LayerNorm 为批 归一化层函数;Dropout 为随机失活层函数。

图 3 展示了引入自注意力机制的 CNN-RNN 混 合模型结构。从模型结构图中可以看出,卷积层后 每个模型都使用了池化层、Dropout 层和批归一化 层^[19]。最大池化层能够有效减少特征图的维度,从 而减少参数数量和计算量,提高模型计算效率,并且 保留训练数据的主要特征,显著提高模型的鲁棒性 和泛化能力^[20]。批归一化层是常用的正则化技术,



可以对小批量数据输入进行归一化处理,使得输入 具有零均值和单位方差。这能够减少对超参数的敏 感性,提升模型的鲁棒性,并且有助于提升模型的训 练速度,提高模型精度,从而使得模型更加稳定,防 止梯度消失和梯度爆炸现象,提高模型的泛化能 力^[21]。Dropout 层是一种用于减少神经网络过拟合 现象的技术,其通过随机地从神经网络中删除神经 元,在训练过程中引导网络学习更加鲁棒的特征。 这种随机删除神经元的操作迫使网络不依赖于特定 的神经元,从而增加了模型的泛化能力,使其能够适 应更广泛的数据分布^[22]。

引入自注意力机制的混合模型构成如表1所示,通过卷积层提取网络流量数据的局部特征后,由 池化层减少特征图的维度,再由批归一化层对每个 小批量数据的输入进行归一化处理,最终将局部特 征转换为一系列特征向量。然后通过自注意力层提 高重要时序特征向量的权重,再使用LSTM 层学习 数据的时序特征,最后通过全连接层实现分类预测。

表1 引入自注意力机制的混合网络模型的顺序构成 Table 1 Sequential construction of hybrid network models

introducing self attention mechanism

	-			
网络层序号	类型	输入通道数	输出通道数	
1	卷积层	3	32	
2	池化层	32	32	
3	批归一层	32	32	
4	卷积层	32	64	
5	池化层	64	64	
6	批归一层	64	64	
7	自注意力层	64	64	
8	LSTM 层	64	512	
9	LSTM 层	512	256	
10	全连接层	256	128	
11	全连接层	128	n	

其中,卷积核大小为3,池化层窗口大小为3,卷 积层和全连接层选用深度学习中常用的 ReLU 激活 函数,对小于0的值全部抑制为0,对于正数则直接 输出,而在 LSTM 层中,其激活函数采用 Sigmoid 和 Tanh,以实现门控的效果。

3 实验

对引入自注意力机制的 CNN-RNN 混合模型进行了实验,并对实验结果进行了分析和评估。

3.1 数据集

为了构建实验的数据集,在8套虚拟化系统中 模拟多种类别终端并使用 Modbus 和 MQTT 进行通 信模拟物联网环境,并在此过程中使用 Wireshark 抓 取流量包。实验使用6套 Linux 虚拟机和2套 Windows 虚拟机组成的局域网来模拟物联网环境。 在物联网环境中进行模拟通信,同时对数据包进行 捕获。对收集到的大量数据包进行预处理,包括添 加噪声、统一长度、归一化和抽样等操作,以保证数 据集的质量并提高模型的鲁棒性。

为了收集 Modbus 的协议数据,使用了 Python 中 的 Modbus 库 Pymodbus^[22]。Pymodbus 库可以创建客 户端并生成各种类型的 Modbus 数据帧,类型主要由 Modbus 协议中的功能码确定,例如读线圈、写线圈 等。实验采用 ModbusRSSim 作为从机与 Pymodbus 创建的客户端进行通信。Modbus 有 21 种已定义的 功能码,实验选用了 8 种常用的 Modbus 数据类型。 为了收集 MQTT 协议的流量数据,实验使用了 Emqx 服务器作为代理,并在 Windows 上进行部署。之后, 在 Linux 系统上使用 MQTT 库与 Windows 上的 Emqx 服务器进行交互。同时,实验使用 Wireshark 对相应 端口的通信流量进行捕获并去除与实验无关的数 据,接下来对相应的数据进行预处理。

数据预处理对于网络流量分类非常重要。由于 流量包通过Wireshark监听特定端口获取,需要根据 类别从总的流量数据中筛选出选定的类别作为子数 据集。例如,对于Modbus,筛选出功能码为1(读取 线圈状态)的Modbus数据包,将其保存在一个文件 中;对于MQTT,将Header Flags的值作为筛选条件。 最终实验选用了8种不同功能的Modbus类和5种 不同功能的MQTT类,分类后每个类别的流量样本 数如表2所示。分析发现,由于协议特性,某些类型 的样本数远多于不常用的流量类别。因此,在后续 的处理中,需要进行抽样来保证每个类别的训练数 据相对平衡,避免分类失衡。实验中的流量特征提 取方法是将流量数据转换为伪图像形式,以便于使
用 CNN、LSTM 等网络进行特征提取。要将其转换 为伪图像形式,首先读取原始二进制格式的流量数 据,解析每个数据包,将其转换为十六进制字符串, 并写入相应文件以供后续使用[23]。进行流量分类 时,读取十六进制字符串,将相邻的两个字符串转换 为0到255的像素值,最终将伪图像形式的数据提 供给模型。图4展示了本文的伪图像数据处理方 式,从两种不同流量类型的伪图像形式可以看出,每 种类型转为伪图像形式都有其特征,由于每种流量 的格式、有效载荷不同,其长度也不同,无法作为模 型的输入,需要对数据长度进行统一。随后将十六 进制转换为浮点数,并进行归一化,同时为了防止过 拟合,添加高斯噪声[24]。为防止不同类别的数据量 差异过大,在读取流量样本时,如果数量超过8000, 拟随机抽样8000条数据作为此类子数据集。经过 实验验证,每个类别使用8000条训练数据已足够模 型收敛[25]。

表 2 网络流量分类及样本数 Table 2 Classification of network traffic and sample size

	-
流量类别	样本数量
modbus_func_1	8 816
modbus_func_3	54 854
modbus_func_4	38 756
modbus_func_5	9 780
modbus_func_6	9 804
modbus_func_16	9 984
modbus_func_43	34 071
modbus_func_unknow	54 854
MQTT_disconnect	39 769
MQTT_connectcmd	39 769
MQTT_connectack	39 769
MQTT_publish	73 797
MQTT_pingrequest	20 850
MQTT_subscribe	8 014

3.2 实验设置

使用 Pytorch 和 Keras 库^[26]构建所有模型,使用 经过预处理后的数据进行训练和验证。各种情况下 均进行了 10 次实验并取平均值作为最终的实验结 果。实验中所用的硬件配置为 Intel(R)Xeon(R) CPU E5-2690 v4 @ 2.60GHz 和 NVIDIA RTX 3080。



(a)modbus_func_3
 (b)MQTT_subscribe
 图 4 电力物联网流量伪图像形式
 Fig.4 Pseudo image form of power IoT traffic

3.3 评估指标

在实验中,使用准确率(Accuracy)、精确率 (Precision)、召回率(Recall)和F₁分数(F₁-score)4个 定量指标评估模型的性能,并使用了混淆矩阵分析 某一类别分类的效果。上述4个定量指标的定义如 式(3)一式(6)所示。为了降低随机性和误差的影 响,提高评估结果的可靠性和稳定性,设置10次实 验,即对实验评估指标进行10次测量,计算平均值 以获得更准确结果。模型可能更倾向于预测样本数 量较多的类别,因此在样本类别不平衡的情况下,准 确率可能会存在偏差,为了更全面地评估模型的性 能,引入精确率和召回率2个指标。精确率用于衡 量模型在预测为正类别的样本中有多少是真正的正 类别, 召回率用于衡量模型在所有真实正类别样本 中有多少被正确预测为正类别。然而,精确率和召 回率在模型优化的目标上可能相互抵消,忽略了整 体的分类效果。为了对分类器的预测效果进行综合 评估,采用F₁分数作为综合评价指标。F₁分数综合 考虑了精确率和召回率,并通过加权调和平均数来 综合衡量分类器的性能表现。当F,分数较高时,说 明模型的分类效果更好。

$$\delta_{\text{Accuracy}} = \frac{N_{\text{TP}} + N_{\text{TN}}}{N_{\text{TP}} + N_{\text{TN}} + N_{\text{FP}} + N_{\text{FN}}}$$
(3)

$$\delta_{\text{Precision}} = \frac{N_{\text{TP}}}{N_{\text{TP}} + N_{\text{FP}}} \tag{4}$$

$$\delta_{\text{Recall}} = \frac{N_{\text{TP}}}{N_{\text{TP}} + N_{\text{FN}}} \tag{5}$$

$$\delta_{F_{i} - \text{score}} = 2 \frac{\delta_{\text{Precision}} \delta_{\text{Recall}}}{\delta_{\text{Precision}} + \delta_{\text{Recall}}}$$
(6)

式中: $\delta_{Accuracy}$ 为准确率; $\delta_{Precision}$ 为精确率; δ_{Recall} 为召回率; $\delta_{F_1-score}$ 为F₁分数; N_{TP} 为模型正确预测为正类的样本; N_{TN} 为模型正确预测为负类的样本; N_{FP} 为模型

错误预测为正类的样本; N_{FN}为模型错误预测为负类的样本。

3.4 基准网络实验结果

为验证所提出方法的有效性,实验引入自注意 力机制的 CNN-RNN 混合模型与前馈神经网络 MLP、单独 CNN 和单独 RNN,以及带有一层 LSTM 的 CNN-RNN 混合模型、带有两层 LSTM 的 CNN-RNN 混合模型进行比较。网络的分类性能如图 5 和 图 6 所示。模型的训练均使用交叉熵损失函数和 Adam 优化器^[27]。

由图 5(a)可知, MLP 模型在第 20 轮时收敛, 10 次实验的平均准确率、精确率、召回率和 F₁分数分别 为 0.673、0.681、0.635 和 0.616。由图 5(b)可以看 出, CNN 模型需要更多轮次训练, 在 30 多轮后实现 收敛, 经过 10 次实验并取第 40 轮的平均结果,将测 试数据中预测正确的数据除以测试数据中所有参与 预测的作为准确率, 经过计算准确率为 0.733, F₁分 数为 0.697; 虽然需要比 MLP 多训练 50% 的轮次, 但 结果更好,其中准确率提高了 6 个百分点;本次实验 中的 RNN 模型使用了其变体之一的 LSTM。图 5(c) 展示的 RNN 网络分类性能是 LSTM 网络的效果, 由

此可知 RNN 模型的训练速度较快,在第10和第20 轮次时获得比 CNN 更好的结果:就收敛速度而言, RNN 模型与 CNN 模型在第 40 个轮次左右都会收 敛,两者相差不大;经过10次实验,取第40个轮次 的平均结果, RNN 模型准确率为 0.797, F, 分数为 0.771。相比之下, RNN 模型的准确率比 CNN 模型 提高了 6.4 个百分点,比 MLP 模型提高了 12.4 个百 分点。通过对单一结构的网络模型进行对比实验, 发现 RNN 模型表现更佳,在处理 13 种不同物联网 通信协议时,准确率达到80%左右。CNN和LSTM 具有互补性,CNN 可以对流量数据进行卷积和池化 来提取局部特征,而LSTM可以利用记忆单元和门 控机制来学习和捕捉流量数据中的时序信息。结合 CNN 和 LSTM 可以更好地处理流量分类问题。因 此,实验中构建 CNN-RNN 混合模型时,先使用 CNN 进行特征提取,再使用LSTM 对提取的特征进行时 序处理。这样既利用了 CNN 提取局部特征的优势, 也利用了LSTM 捕捉时序信息的优势,从而提高了 流量分类的准确率[28]。

混合网络的分类性能如图 6 所示。由图 6(a)和 图 6(b)可知, CNN 与 LSTM 的混合模型具有较快的



Fig.6 Classification performance of hybrid networks

训练速度,且混合模型的4个指标均优于单一的 CNN或LSTM模型。其中,带有一层LSTM的CNN 混合模型在第20个轮次时可以达到0.869的准确 率,带有两层LSTM的CNN混合模型在第20个轮次 时可以达到0.928的准确率。相比仅使用RNN的模 型,准确率提高了13个百分点,提升较为显著。虽 然CNN-RNN模型每个轮次的训练时间在50s左 右,比独立结构的网络模型更耗时,但是对于性能的 提升来说,增加的时间成本是可以接受的。但在实 验中发现CNN-RNN混合模型会忽略一些重要特征 的学习,针对这一问题,本文提出引入自注意力机制 的CNN-RNN混合模型,实验结果如图6(c)所示。 由图6(c)可知,引入自注意力机制后,在第3轮模型 已经收敛,模型收敛速度更快,但无法进一步观察模 型训练的变化过程。

因此,将该模型的实验记录轮次设置为[1,3,5,8]。 从图 6(c)中可以得出,在第 3 个轮次后,引入自注意 力机制的混合模型已经完成了收敛。经过 10 次重 复实验,取第 3 个轮次的平均值,准确率为 0.953、F₁ 分数为 0.943。与 CNN-RNN 混合模型相比,引入自 注意力机制可以加快收敛速度,大约提前了 8 个轮 次,同时准确率提高了约 3 个百分点。虽然准确率 指标提升不够明显,但收敛速度提升明显。

两种混合模型的损失下降如图7所示。由图7 可知,引入自注意力机制的 CNN-RNN 混合模型在 相同轮次下实现了更快的损失值下降,从而提前收 敛^[29]。根据实验得出的数据,对13种物联网协议进 行分类, CNN-RNN 混合模型与引入自注意力机制的 混合模型都表现良好。所有类别的网络流量分类结 果如表3所示,可知对于大多数类别,两个模型的召 回率、精确率和F,分数无明显差距,但是在某些类别 中,引入自注意力机制的 CNN-RNN 混合模型的性 能要优于 CNN - RNN 混合模型。具体来看, modbus_func_43 类别在两个模型中的性能都表现得 很好,F₁分数均为0.99以上;而对于功能码为3和功 能码为4的 Modbus 流量, CNN-RNN 模型的性能低 于引入自注意力机制的混合模型,F,分数分别为 0.85 和 0.82, 而引入自注意力机制的混合模型的 F₁ 分数分别为 0.86 和 0.92。CNN-RNN 的平均 F1分数 为0.92,在对比分析中可以观察出本文提出的混合

模型在物联网协议分类任务上展现出了卓越的性能,其平均F₁分数达到0.934,与CNN-RNN模型相比并无显著差距。同时在深入分析个别类别的分类表现时,引入自注意力机制的CNN-RNN混合模型在某些特定类别上展现出了更优越的性能。



图 7 两种混合模型的损失下降 Fig.7 The loss of both mixed models decreased

表3 所有类别的网络流量分类结果

Table 3 Classification results of all categories of

network traffic

流量类别	CNN-RNN			引入自注意力机制的 混合模型		
	召回率	精确率	F ₁ 分数	召回率	精确率	F ₁ 分数
modbus_func_1	0.97	0.97	0.98	0.96	0.98	0.97
modbus_func_3	0.92	0.78	0.84	0.95	0.78	0.86
modbus_func_4	0.98	0.98	0.98	0.97	0.97	0.97
modbus_func_5	0.75	0.9	0.82	0.94	0.90	0.92
modbus_func_6	0.99	0.97	0.98	0.98	1.00	0.99
modbus_func_16	0.80	0.87	0.83	0.82	0.85	0.83
modbus_func_43	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
modbus_func_unknow	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00	1.00
MQTT_disconnect	0.88	0.77	0.82	0.86	0.90	0.88
MQTT_connectcmd	0.93	0.95	0.94	0.93	0.90	0.91
MQTT_connectack	0.95	0.97	0.96	0.92	0.99	0.95
MQTT_publish	0.90	0.95	0.92	0.99	0.96	0.97
MQTT_pingrequest	0.93	0.94	0.93	0.96	0.95	0.95

除了分类准确率的提升,引入自注意力机制的 CNN-RNN 混合模型在收敛速度方面也有显著提升。 通过电力物联网流量数据集上的评估结果可知,混 合模型能够有效准确分类流量数据,其行归一化混 淆矩阵如图 8 所示。深色主对角线元素凸显了模型 在分类任务中的高精度表现,同时混淆情况相对 较少。

进一步分析表 3 中数据,可以发现功能码为 3 和功能码为 4 的 Modbus 流量在分类过程中存在一 定程度的混淆。经深入分析,这两种流量的实际功 能相似,仅在功能代码字段等少数比特位上存在差 异,因此模型在分类时存在一定概率的混淆。尽管 如此,引入自注意力机制的混合模型仍能够较好地 捕捉两类流量的特性进行分类,其分类准确率维持 在 0.90 左右。

此外,为了验证模型的泛化能力,引入自注意力

机制的混合模型在两个公开数据集上进行了评估,分 别是澳大利亚新南威尔士大学网络入侵检测数据集 (university of new south wales netbot lab 15, UNSW -NB15)^[30]和网络安全实验室 - 知识发现与数据挖掘数 据集(national science laboratory-knowledge discovery in databases, NSL-KDD)^[31], 被广泛应用于网络入侵 检测领域,能够更好地模拟现实世界中的网络安全 问题。NSL-KDD 数据集是一种多分类数据集,包含 了 23种不同的攻击类别;UNSW-NB15数据集用于 二分类任务,提供了真实网络流量中的入侵行为数 据。进行多次实验并计算平均值后,发现在 NSL-KDD 数据集上,模型的分类准确率约为 0.905,在 UNSW-NB15数据集上准确率约为 0.90,具体的实验 结果如图 9 所示。

上述公开数据集采用了明文数据并具有丰富的 特征,使得模型能够快速有效地学习相关特征。从



图8 引入自注意力机制的混合模型的混淆矩阵

Fig.8 The confusion matrix of a hybrid model with self-attention mechanism is introduced

实验结果中观察到,在第2个轮次时模型已经收敛, 与之前在模拟物联网环境中收集的数据集上的观察 一致。综上所述,引入自注意力机制不仅可以提高 分类准确率,还能显著提高模型的收敛速度,从而在 实际应用中展现出更好的性能。



3.5 对比方案实验结果

Hu^[32]等人利用图神经网络(graph neural network, GNN)将每个网络数据包转换为无向图,依靠GNN强大的图学习能力,可以以极高的准确率识别未知的网络流量。Babaria^[33]等人利用一种基于Transformer 的 Flowformers 模型来实时分类网络流量,有效提高了网络流量分类的准确性。本文使用引入自注意力机制的 CNN-RNN 混合模型与 GNN、Flowformers 等模型,针对 Modbus 和 MQTT 等流量进行了分类对比实验。

经过实验得到每种模型针对每种流量进行分类 的具体指标,然后计算其准确率、精确率、F₁分数和 召回率的平均值作为模型在物联网环境下的流量分 类能力指标。实验的整体指标数据如表4。从表4 中可以看出,所提出的引入自注意力机制的 CNN-RNN 混合模型有效地提高了流量分类性能,4 个指 标均超过了 93%,相比于 GNN、Flowformers 等模型 各项指标均有明显的提升,证明了所提出的混合模 型在物联网环境下的流量分类表现更佳。

表4	多模型流量分类能力指标评估
Table 4 Evalu	ation of multi-model traffic classification

capability							
流量分类方法	准确率	精确率	F_1 分数	召回率			
CNN-RNN 混合模型	0.960	0.937	0.948	0.945			
FLUIDS	0.944	0.931	0.937	0.944			
ByteSGAN	0.922	0.933	0.927	0.943			
AECNN	0.958	0.929	0.943	0.913			
DP-SAE	0.795	0.936	0.860	0.878			
DP-CNN	0.937	0.922	0.929	0.901			
Securitas-C4.5	0.913	0.906	0.909	0.943			
GNN	0.949	0.930	0.928	0.927			
Flowformers	0.958	0.933	0.936	0.940			

多方案训练时间及分类时间如表5所示。由表 5可知,与GNN、Flowformers等模型相比,本文提出 的模型的计算成本相对较低。这主要是因为其模型 结构简单,并且能够在一定程度避免记忆丢失和梯 度弥散问题,尤其是相较于基于Transformer 的 Flowformers模型在分类性能相当的情况下,模型训 练和分类时间更短。

而在现实场景中,因为传输距离以及传输设备 的不稳定性等问题会产生许多噪声数据。为了验证 本文提出的模型是否能够有效地抵抗噪声干扰,向 数据集中加入噪声数据。随机将数据集样本的某一 位设置成0,将有噪声样本的比例设置为10%。然 后再使用引入自注意力机制的CNN-RNN 混合模 型、GNN、Flowformers等模型进行流量分类。

噪声环境流量分类指标如表6所示。在面对未 知流量的情况下,各模型流量分类的准确率显著降 低。同时实验证明,当新的流量类型出现时,本文提 出的模型可以有效地处理未知的流量类,并且整体 分类性能比其他算法更稳定。

	表5	多方案训练时间及分类时间
Table 5 Mul	ti-sch	emes training time and classification time

流量分类方法	训练时间/s	分类时间/ms
CNN-RNN 混合模型	422	2.7
FLUIDS	653	13.1
ByteSGAN	514	42.5
AECNN	610	6.3
DP-SAE	1 868	3.2
DP-CNN	659	41.5
Securitas-C4.5	1 822	10.2
GNN	757	6.5
Flowformers	2 544	22.9

表6 噪声环境下多模型分类能力评估

Table 6 Evaluation of multi-model classification capability in noisy environment

流量分类方法	噪声环境下准确率
CNN-RNN 混合模型	0.948
FLUIDS	0.913
ByteSGAN	0.896
AECNN	0.944
DP-SAE	0.788
DP-CNN	0.897
Securitas-C4.5	0.911
GNN	0.940
Flowformers	0.943

为了验证模型的泛化性,本文复现了 Álvaro Michelena^[34]等人构建了 CoAP 协议的通信环境,并 收集了共 30 319 条数据。受限应用协议(constrained application protocol,CoAP)是一种专为资源受限的物 联网设备设计的紧凑高效的网络传输协议,使用用 户数据报协议(user data protocol,UDP),提供简单而 可靠的数据传输,同时可以尽量减少开销和功耗,因 其紧凑高效的特性,常用于电力物联网。CoAP 定义 了 4 种消息类型:需要确认消息(confirmable,CON)、 不需要确认消息(non-confirmable,NON)、确认应答 消息(acknowledgement, ACK)、复位消息(reset, RST)。根据消息类型,本文构建了如表7所示的应用于流量分类的数据集。

在该数据集上,使用引入自注意力机制的 CNN-RNN 混合模型与 GNN、Flowformers 等模型进行了对 比实验。实验结果如图 10 所示,对于 CoAP 流量,引 入自注意力机制的 CNN-RNN 混合模型的准确率、 精确率、F₁分数、召回率分别为 0.90、0.91、0.91、0.92。

表7 受限应用协议CoAP数据集

Table / Constrained application protocol dataset			
消息类型	消息数量		
CON	12 127		
NON	9 095		
ACK	6 063		
RST	3 034		





Fig.10 CoAP protocol classification experimental results

4 结束语

为解决物联网环境下的网络流量分类问题,采 用基于深度学习的流量分类方法,将流量数据转换 为伪图像形式,使流量分类问题转换为图像分类问 题,提出了引入自注意力机制的 CNN-RNN 混合模 型进行流量分类。与 CNN、RNN 和 CNN-RNN 混合 模型进行了对比实验,结果表明,该模型在准确率、 精确率、召回率和 F₁分数 4 个维度上表现良好,并具 有较高的灵活性和适应性。同时在 UNSW-NB15 和 NSL-KDD 两个公开数据集上评估该模型的性能,获 得了较好的试验结果,体现了模型的泛化性。目前 已将该方法应用于海洋物联网和电力物联网环境 下,取得了良好实际应用效果,为电力物联网系统安 全管理和网络优化提供了有力支持。该模型也为其 他领域的网络流量分类研究提供新的研究思路和 参考。

本文提出的模型适用于物联网设备的低带宽、 低功率和协议相对简单等特点,对加密流量的处理 也符合当前电力物联网环境的隔离性所导致的加 密/非密流量的实际情况。在未来的研究中,如何适 应更复杂场景的协议和大量的加密流量,是该模型 主要的改进方向。

参考文献

- [1] ALI O, ISHAK M K, BHATTI M K L, et al. A comprehensive review of Internet of Things: technology stack, middlewares, and fog / edge computing interface [J]. Sensors: Basel, Switzerland, 2022,22(3):995.
- [2] HOU R, REN G W, ZHOU C L, et al. Analysis and research on network security and privacy security in ubiquitous electricity Internet of Things [J]. Computer Communications, 2020, 158: 64-72.
- [3] 白尚旺,王梦瑶,胡静,等.多区域注意力的细粒度图像分类网络[J].计算机工程,2024,50(1):271-278.
 BAI Shangwang, WANG Mengyao, HU Jing, et al. Multi-region attention network for fine grained image classification [J]. Computer Engineering,2024,50(1):271-278.
- [4] 于治平,刘彩霞,刘树新,等.基于机器学习的网络流量分类综述[J].信息工程大学学报,2023,24(4):447-453.
 YU Zhiping, LIU Caixia, LIU Shuxin, et al. Overview of network traffic classification based on machine learning [J]. Journal of Information Engineering University,2023,24(4):447-453.
- [5] 冷涛.基于深度学习的加密流量分类研究综述[J].计算机与现代化,2021(8):112-120.
 LENG Tao. A survey of encrypted traffic classification based on deep learning [J].Computer and Modernization,2021(8):112-120.
- XIE X, YANG B, CHEN Y H, et al. Network traffic classification based on error-correcting output codes and NN ensemble [C] // 2009 Sixth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery.IEEE, 2009:475-479.
- [7] FENG W B, HONG Z, WU L F, et al.Network protocol recognition based on convolutional neural network [J].China Communications, 2020, 17(4):125–139.
- [8] IZADI S, AHMADI M, NIKBAZM R. Network traffic classification using convolutional neural network and ant-lion optimization [J]. Computers and Electrical Engineering, 2022, 101:108024.
- [9] STRYCZEK S, NATKANIEC M. Internet threat detection in smart grids based on network traffic analysis using LSTM, IF, and SVM [J].Energies, 2022, 16(1): 329.
- [10] ANDRESINI G, APPICE A, CAFORIO F P, et al. ROULETTE: a

neural attention multi-output model for explainable network intrusion detection [J]. Expert Systems with Applications, 2022, 201:117144.

- [11] YU J, YE X J, LI H B.A high precision intrusion detection system for network security communication based on multi-scale convolutional neural network [J]. Future Generation Computer Systems, 2022, 129:399-406.
- [12] 张昊,张小雨,张振友,等.基于深度学习的入侵检测模型综述
 [J].计算机工程与应用,2022,58(6):17-28.
 ZHANG Hao,ZHANG Xiaoyu,ZHANG Zhenyou, et al.Summary of intrusion detection models based on deep learning [J]. Computer Engineering and Applications, 2022,58(6):17-28.
- [13] SILVA C R M, SILVA F A C M. An IoT gateway for modbus and MQTT integration [C] // 2019 SBMO / IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC). IEEE, 2019: 1-3.
- [14] CAUDILL M.Neural networks primer, part I[J].AI Expert, 1987, 2 (12):46-52.
- [15] 季长清,高志勇,秦静,等.基于卷积神经网络的图像分类算法 综述[J].计算机应用,2022,42(4):1044-1049.
 JI Changqing, GAO Zhiyong, QIN Jing, et al. Review of image classification algorithms based on convolutional neural network[J].
 Journal of Computer Applications,2022,42(4):1044-1049.
- [16] LIPTON Z C, BERKOWITZ J, ELKAN C, et al. A critical review of recurrent neural networks for sequence learning [EB/OL]. [2024– 05–30]. https://arxiv.org/abs/1506.00019v4
- [17] 赫磊,邵展鹏,张剑华,等.基于深度学习的行为识别算法综述
 [J].计算机科学,2020,47(增刊1):139-147.
 HE Lei, SHAO Zhanpeng, ZHANG Jianhua, et al. A survey of behavior recognition algorithms based on deep learning [J]. Computer Science,2020,47(S1):139-147.
- [18] FU E, ZHANG Y N, YANG F, et al. Temporal self-attention-based Conv - LSTM network for multivariate time series prediction [J]. Neurocomputing, 2022, 501:162-173.
- [19] LECUN Y, BOSER B, DENKER J S, et al.Backpropagation applied to handwritten zip code recognition [J].Neural Computation, 1989, 1(4):541-551.
- [20] LEE C Y, GALLAGHER P W, TU Z. Generalizing pooling functions in convolutional neural networks: mixed, gated, and tree [C]//Artificial Intelligence and Statistics.PMLR, 2016:464-472.
- [21] IOFFE S, SZEGEDY C. Batch normalization: accelerating deep network training by reducing internal covariate shift [J]. 32nd International Conference on Machine Learning, ICML 2015, 2015, 1:448-456.
- [22] MEHTA K, JOSHI R, KULKARNI S V, et al.Implementation of plc based software prototype for 45.6 mhz, 100 kw, icrh dac using epics control system [J]. International Journal of Scientific and Engineering Research, 2015, 6(5):1134–1137.
- [23] BERKAY CELIK Z, WALLS R J, MCDANIEL P, et al. Malware traffic detection using tamper resistant features [C] // MILCOM 2015 - 2015 IEEE Military Communications Conference. IEEE,

2015:330-335.

- [24] LONGADGE R, DONGRE S. Class imbalance problem in data mining review [EB/OL]. [2024-05-30]. https: // arxiv.org/abs/ 1305.1707v1
- [25] SRIVASTAVA N, HINTON G, KRIZHEVSKY A, et al. Dropout: a simple way to prevent neural networks from overfitting [J]. Journal of Machine Learning Research, 2014, 15:1929–1958.
- [26] CHOLLET F. Keras [R]. (2020) [2023.10]. Available: https:// github.com/fchollet/keras.
- [27] KINGMA D P, BA J, HAMMAD M M. Adam: a method for stochastic optimization [EB/OL].[2024-05-30].https://arxiv.org/ abs/1412.6980v9
- [28] KB T, SURESH M, RAO S.A review on deep learning approaches to real time network Intrusion detection system [C] // Institute of Scholars, August 7,2020.
- [29] SINGH A K. A comparative study on disease classification using machine learning algorithms [C]//Proceedings of 2nd International Conference on Advanced Computing and Software Engineering (ICACSE).SSRN, 2019:197-202.
- [30] MOUSTAFA N, SLAY J.UNSW-NB15: a comprehensive data set for network intrusion detection systems (UNSW-NB15 network data set) [C] // 2015 Military Communications and Information Systems Conference (MilCIS).IEEE, 2015:1-6.
- [31] TAVALLAEE M, BAGHERI E, LU W, et al.A detailed analysis of the KDD CUP 99 data set [C] // 2009 IEEE Symposium on Computational Intelligence for Security and Defense Applications. IEEE, 2009: 1-6.

- [32] 孙水发,李小龙,李伟生,等.图神经网络应用于知识图谱推理的研究综述[J].计算机科学与探索,2023,17(1):27-52.
 SUN Shuifa, LI Xiaolong, LI Weisheng, et al. Review of graph neural networks applied to knowledge graph reasoning[J].Journal of Frontiers of Computer Science and Technology, 2023, 17(1): 27-52.
- [33] BABARIA R, MADANAPALLI S C, KUMAR H, et al. FlowFormers: transformer-based models for real-time network flow classification [C] // 2021 17th International Conference on Mobility, Sensing and Networking (MSN).IEEE, 2021:231-238.
- [34] MICHELENA Á, DÍAZ-LONGUEIRA A, TIMIRAOS M, et al. Hybrid classification model based on supervised techniques for denial of service attacks detection over CoAP protocol[C]//Lecture Notes in Networks and Systems. Cham: Springer Nature Switzerland, 2023:1-10.

收稿日期:2024-06-02

修回日期:2024-10-24

作者简介:

王 聪(1989),男,工程师,从事数据安全、网络安全研究工作; 郑海杰(1992),男,硕士,工程师,从事数据安全、数据治理工作; 黄 振(1990),男,硕士,工程师,从事数据接入、治理、模型、应 用、运营等全周期管理工作;

王高洲(1992),男,硕士,工程师,主要研究方向为数据治理、信 息安全;

曲海鹏(1972),通信作者(quhaipeng@ouc.edu.cn),男,博士,副教授,主要研究方向为信息安全、电力系统安全。

(责任编辑 郑天茹)

(上接第61页)

- [19] SHONE N, NGOC T N, PHAI V D, et al.A deep learning approach to network intrusion detection [J].IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence, 2018, 2(1):41-50.
- [20] 钟志琛.基于网络流量异常检测的电网工控系统安全监测技术
 [J].电力信息与通信技术,2017,15(1):98-102.
 ZHONG Zhichen. Security monitoring technology of power grid industrial control system based on network traffic anomaly detection [J]. Electric Power Information and Communication Technology,2017,15(1):98-102.
- [21] HAN J Y. Network traffic anomaly detection using EMD and Hilbert-Huang transform [J]. Western Carolina University, 2013, 25(9):2839-2838.
- [22] 姜力杨, 盖晨昊,齐航,等.数据驱动的电力系统动态安全评估研 究综述[J]. 山东电力技术,2024,51(4):7-35. JIANG Liyang, GAI Chenhao, QI Hang, et al. Review on datadriven dynamic security assessment of power systems[J]. Shandong Electric Power,2024,51(4):7-35.
- [23] 唐灿.基于无监督学习的网络流量异常检测研究[D].绵阳:西 南科技大学,2021.

- [24] 尹钟萱,方国鑫,罗家辉,等.基于无监督学习的区块链性能异 常检测系统:CN202211243283.3[P].2023-01-17.
- [25] OLSON C C, JUDD K P, NICHOLS J M. Manifold learning techniques for unsupervised anomaly detection [J]. Expert Systems With Applications, 2018, 91:374-385.

收稿日期:2024-11-18

修回日期:2025-02-18

作者简介:

马 力(1986),男,高级工程师,主要研究方向为电网信息安全、 电力工控网络安全;

王 丹(1986),女,工程师,主要研究方向为异常流量检测、电力 工控网络安全;

计士禹(1987),男,工程师,主要研究方向为信息安全、电力工控系统;

刘锦利(1987),男,硕士,工程师,主要研究方向为电力通信技术、网络安全;

石 贺(1993),通信作者(15140218035@126.com),男,硕士,工 程师,主要研究方向为AI网络安全应用、电力工控网络安全。

(责任编辑 张丹丹)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2025.06.008

面向智能变电站的时间敏感网络动态时间窗口划分方法

伟1.白 杨1.祁步仁1.徐 建2* 李

(1.国网江苏省电力有限公司信息通信分公司,南京 210024; 2.南京理工大学计算机科学与工程学院,南京 210094)

摘要:随着智能电网业务数据量的快速增长,对控制信息传输的低时延和高可靠性的要求不断提高。时间感知整形器 (time-aware shaper, TAS)机制是时间敏感网络(time-sensitive networking, TSN)标准中的关键技术之一。传统 TAS机制不 能充分利用带宽资源,难以满足变电站内多种流量的不同时延需求。为此,提出一种对保护窗口进行动态细粒度划分的 方法。首先,提出一种基于国际电工委员会(International Electrotechnical Commission, IEC)61850通信与TSN技术融合的 流量映射方案:然后,设计了时间窗口划分的效用分析模型;最后,提出一种基于效用的动态时间窗口划分算法,求解划 分效用最大的划分方案。仿真结果表明,该算法通过优化TAS机制的时间窗口划分策略,在多种场景下显著降低了网络 的整体传输时延,尤其将关键性面向对象变电站事件(generic object-oriented substation event, GOOSE)1A 流量的传输时延 控制在3ms以内,同时保持采样测量值(sampled measured value,SMV)流量的丢包率不超过3%。

关键词:时间敏感网络;IEC 61850;时间感知整形器;流量映射 文献标志码:A

中图分类号:TM63

文章编号:1007-9904(2025)06-0075-11

Dynamic Time Window Division of Time-sensitive Networking in **Intelligent Substation**

LI Wei¹, BAI Yang¹, QI Buren¹, XU Jian^{2*}

(1.Information and Telecommunication Branch, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China;

2.School of Computer Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: With the rapid growth of the business data volume of smart grids, the requirements for low-latency and highreliability in control information transmission keep continuously increasing. The time-aware shaper (TAS) mechanism is one of the key technologies in time-sensitive networking (TSN) standard. However, the traditional TAS mechanisms can not fully utilize the communication bandwidth resources, which makes it difficult to simultaneously meet the diverse latency requirements of various traffic flows within substations. To address this issue, this paper proposes the idea of dynamic and finegrained protection time window division. We first propose a traffic mapping scheme based on the integration of International Electrotechnical Commission (IEC) 61850 communication and TSN technology. Then, a utility analysis model for time window division is designed. Finally, a utility-based dynamic time window division algorithm is proposed to obtain the maximum benefits overall. The simulation results show that, by optimizing the time window division strategy of the TAS mechanism, the proposed algorithm significantly reduces overall network transmission latency under various scenarios. In particular, the transmission delay of critical generic object-oriented substation event (GOOSE) 1A traffic is kept within 3 ms, while ensuring that the packet loss rate of sampled measured value (SMV) traffic does not exceed 3%.

Keywords: time-sensitive networking; IEC 61850; time-aware shaper ; traffic mapping

引言 0

智能变电站作为智能电网的重要节点,有时延 保证的高性能内部通信网络是智能变电站发展的基 础^[1]。为保证变电站的标准化通信,目前变电站使 用 IEC 61850 统一通信标准。IEC 61850 是变电站自 动化领域的全球通用标准,其规范了数据的命名、数 据定义、设备的自描述特征、设备行为和通用配置语 言。IEC 61850 变电站基于以太网架构进行数据通 信,并将流量分为采样测量值(sampled measured value,SMV)流量、通用面向对象变电站事件(generic

基金项目:国网江苏省电力有限公司科技项目(J2023107)。

Science and Technology Project of State Grid Jiangsu Electric Power Company(J2023107).

object-oriented substation event, GOOSE)流量和制造 消息规范(manufacture message specification, MMS)流 量三大类,其中SMV报文是时间触发的周期性报 文,而GOOSE和MMS报文是时间触发与事件触发 结合的非周期性报文。

目前变电站基于 IEC 61850 协议通过以太网进 行交换传输。在标准以太网基础上发展起来的时间 敏感网络(time-sensitive networking, TSN)能够为系 统中的时间敏感流提供低延迟、低抖动的确定性传 输服务。TSN 是 IEEE 的一组标准协议^[2-3],包括时 钟同步机制^[4](IEEE 802.1AS-Rev)、流量调度机制^[5] (IEEE 802.1Qbv)、帧抢占机制^[6](IEEE 802.1Qbu)、 流过滤和流监控机制^[7](IEEE 802.1Qci),此外 TSN 还包括其他多种协议^[8-9]共同保障智能变电站网络 中 IEC 61850 报文传输的确定性。

针对时间感知整形器(time-aware shaper,TAS)的TSN流量调度技术研究,文献[10]针对TAS机制中非保护类的最大努力(best-effort,BE)流量,提出一种在最大努力队列门打开期间,基于队列的动态权值调度多个BE队列的调度算法,增加每个BE队列在单位时间内的最小调度次数。文献[11]提出一种将TAS与加权轮询调度(weighted round-robin,WRR)相结合的流量调度算法。利用TAS隔离预定流量(scheduled traffic,ST)和BE流,然后利用WRR在BE队列门打开期间调度BE流,该项研究中,关键性流量不受队列的门状态约束,除在ST流的发送间隔内传输外,还可抢占BE流的传输时隙。上述研究虽然减少了BE流间相互阻塞对消息端到端时延的影响,但未能降低高优先级数据帧传输对BE类数据帧传输的阻塞。

智能变电站内部存在电压采样、电流采样、温度 采样等多种周期性采样数据,在多种数据周期存在 差异且到达时间分布较为均匀的情况下,固定的时 间窗口划分将导致带宽浪费,从而严重影响非周期 性关键报文的传输时延性能。目前,关于 TAS 调度 机制的研究集中在非保护窗口内部的流量调度,致 力于解决非保护流量间的传输竞争问题,尚没有通 过划分保护窗口以节省带宽的流量调度方案研究。 然而,过度划分会导致用于 TAS 流量调度的门控列 表(gate control list,GCL)过长。由于变电站 SMV 流 量存在抖动现象,过长的门控列表会影响 SMV 流量 调度的确定性。此外,缺乏面向时间窗口划分的效 用(衡量时间窗口划分或调度策略性能的综合指标) 分析模型,时间窗口划分的理论依据不足。

针对上述问题,提出一种基于 TSN 技术的 IEC 61850 流量映射方案和优先级分配方法,用于实现 IEC 61850 流量与 TSN 机制内部流量的映射,解决协议间的兼容问题。通过分析每种流量可能面临的全部时延,提出时间窗口划分的效用分析模型,为动态且细粒度时间窗口划分提供理论依据。并在此基础上,提出基于效用的动态时间窗口划分算法,通过对周期性 SMV 报文占用时间的窗口进行动态划分,解决关键性 GOOSE 流量过期问题。

1 设计原理

1.1 背景知识

变电站标准通信协议 IEC 61850 包含 SMV 流量、 GOOSE 流量和 MMS 流量三大流量类型,其中 GOOSE 流量可根据对时延的敏感程度分为 GOOSE 1A 和 GOOSE 1B。GOOSE 1A 具有最高延迟要求,属于关键 流量,但其属于时间触发与事件触发混合的流量类型 (即 GOOSE 1A 包含周期性流量与突发性流量)。IEC 61850 流量对应业务类型与时延需求如表1所示。

表1 IEC 61850 流量分类

Table 1 Classification of IEC 61850 traffic 单位:ms

流量类型	业务类型	时延需求
SMV	采样值	3
GOOSE 1A	跳闸命令	3
GOOSE 1B	开关位置变化	10~20
MMS	设备状态、时钟同步、日志文件等	100~1 000

TSN 技术保留了以太网 VLAN 优先级机制,支持 8 个优先级队列。TAS 调度机制如图 1 所示。由图 1 可知,TAS 调度机制包含保护带 S0、保护流量窗口 S1 和非保护流量窗口 S2。调度机制中,保护流量窗口 前须设置保护带(长度等于最大帧长度)以避免干扰。 若多个门控队列开启,传输端口优先处理高优先级 帧。TAS 通过门控列表控制流量传输,具体如表 2 所 示。表 2 中,1 表示传输开启,0表示传输关闭。

表2 TAS流量调度机制门控列表

Table 2 TAS traffic scheduling mechanism gate control list

时间槽	保护流量	非保护流量	非保护流量	非保护流量
S0	0	0	0	0
S1	1	0	0	0
S2	0	1	1	1





1.2 传统TAS时间窗口划分

如图 2 所示,假设有两个 SMV 周期性数据帧 (两个以上数据帧类似),用黄色方块表示。传统的 划分方案将整个门控列表周期分为 3 个时间窗口: 1)保护带 S0;2)只能用于传输周期性数据帧的保护 流量时间窗口 S1;3)只能用于传输非保护类型数据 帧的非保护流量时间窗口 S2。由于所有的周期性关 键帧都被分组到一个时间窗口中,因此这种划分方 案的优点是容易实现。假设系统中存在 GOOSE 1A、GOOSE 1B、MMS 和 BE 四种非保护流量,则门控 列表如表 3 所示。





表3 传统 TAS 时间窗口划分方案门控列表 Table 3 Gate control list for traditional TAS time

window div	sion scheme
------------	-------------

时间槽	保护流量	非保护流量	非保护流量	非保护流量	非保护流量
S0	0	0	0	0	0
S1	1	0	0	0	0
S2	0	1	1	1	1

目前大部分研究基于 TAS 模型中目前使用的固 定时间窗口划分,提出调度方案。然而,智能变电站通 信场景具备多样性,其通信网络对传输性能需求 高^[12-21]。变电站场景下多种采样值数据具有不同的采 样周期,在实际应用中如果使用传统的TAS固定时间 窗口划分,即在每个调度周期内为特定类型的流量(如 周期性流量)预留固定的带宽资源将存在以下问题。

1)传统的TAS时间窗口划分方法直接将保护窗 口设置为周期性流量第一帧到最后一帧的长度。当 时间窗口较大时,由于智能变电站内部存在多种周 期性采样数据,在多种数据到达周期存在差异且到 达时间分布较为均匀的情况下,保护窗口内部大量 的带宽将被浪费,影响其他类型流量的传输性能。 如图2所示,图中GCL周期表示门控列表的调度周 期,通过计算周期性SMV流量的最小公倍数得到。 这样的划分方案将导致两帧之间的时间窗口被浪 费,影响在非保护窗口(图2中S2)内传输的GOOSE 1A关键流量和MMS流量的时延性能。

2)当时间窗口较小时,若遇到突发性紧急事件 (如电力故障),GOOSE流量会迅速增加,但由于带宽 已经固定分配给周期性流量,导致 GOOSE流量无法 全部传输从而造成丢包,影响关键流量的传输时延。

因此,固定时间窗口划分在带宽利用和传输性 能方面均存在不足,无法满足智能变电站中多样化 流量需求的实际应用场景。

1.3 TAS动态时间窗口划分

针对传统 TAS 固定时间窗口划分方案的不足, 本文首先提出基于 TSN 技术的 IEC 61850 流量映射 方案和优先级分配方法,实现 IEC 61850 流量与 TSN 机制内部流量的映射,解决协议间的兼容问题。然 后建立效用分析模型,将 TAS 机制中的时间窗口划 分问题抽象为划分效用最大化问题,提出一种基于 效用的动态时间窗口划分算法。算法结合了时间效 用、内存消耗和时延抖动损失等多种因素,以最大化 不同调度方案的效用。评估当前时间窗口内所有流 量的时延需求,选择时延需求未被满足的流量进行 优化。通过逐次划分时间窗口并计算效用。最终确 定出在当前流量需求下的最佳时间窗口划分方案。

如图 3 所示,通过进一步划分图 2 中的 S1 窗口 并增加保护带,将 GCL 周期分为 6 个时间窗口,包括: 2 个保护带(S0'和 S3')、2 个保护流量时间窗口(S1' 和 S4')和 2 个非保护流量时间窗口(S2'和 S5')。经 过划分后的门控列表如表 4 所示。当链路中存在多 个周期性数据帧时,时间窗口可继续进行划分,随着 周期性数据帧的增加,时间窗口的数量也将增加。



Fig.3 TAS time window division scheme proposed

表 4 TAS 时间窗口划分方案的门控列表 Table 4 Gate control list for the TAS time window

division scheme proposed

时间槽	保护流量	非保护流量	非保护流量	非保护流量	非保护流量
S0′	0	0	0	0	0
S1 ′	1	0	0	0	0
S2′	0	1	1	1	1
S3 ′	0	0	0	0	0
S4′	1	0	0	0	0
S5′	0	1	1	1	1

综上可知,动态时间窗口划分方案相较于固定 时间窗口划分,能根据实际流量需求调整时间窗口 的长度和数量。在满足周期性流量正常传输的同 时,节省出更多带宽满足关键流量的需求,从而提高 带宽利用率,降低丢包率,该方案尤其适用于智能变 电站这类对低时延、高可靠性有严格要求的场景中。

2 时间窗口划分算法设计

2.1 IEC 61850 到 TSN 流量映射方案

IEC 61850 到 TSN 的流量映射方案考虑 GOOSE 报文流量、SMV 报文流量、MMS 报文流量以及 BE 流 量。GOOSE 报文:跳闸命令(GOOSE 1A)优先级最 高(优先级设为 7),时延要求极高;开关位置变化 (GOOSE 1B)优先级次之(优先级设为 6)。GOOSE 报文均为非周期流量,与故障处理直接相关。SMV 报文:传输采样值信息,周期性流量,时延要求与跳 闸命令相同,但为常规业务,优先级设为 5。MMS 报 文:传输设备状态、日志文件等非周期流量,时延要 求低,优先级设为 4。BE 流:用于网络管理与监测, 无具体时延需求,优先级设为 0~3。IEC 61850 到 TSN 的流量映射方案如表 5 所示。

表5 IEC 61850 流量映射方案

Table 5	IEC	61850	traffic	mapping	scheme
		0.000			000

据立米刑	山久米刊	时延需求/	TSN 流量	以太网
拟义关室	业方关室	ms	类型	优先级
SMV	采样值	3	保护流量	5
GOOSE 1A	跳闸命令	3	非保护流量	7
GOOSE 1B	开关位置变化	10~20	非保护流量	6
MMS	设备状态、时钟同 步、日志文件等	100~1 000	非保护流量	4
BE	FTP、SNMP 等	>1 000	非保护流量	3~0

2.2 时间窗口划分的效用分析模型

设网络中每一帧*f* ∈ *F* 的结构定义为*f*= <*T*,*d*,*t*,*p*,*s*,*j*>,*F*表示一个周期内所有帧的集合。其 中*T*为数据帧周期,*d*为数据帧过期时间,*t*为帧类型 (包括 SMV、GOOSE 1A、GOOSE 1B、MMS 和 BE),*p* 为通信系统内帧优先级,由 2.1 节的流量映射机制给 出,*s* 为数据帧长度,*j* 为数据帧抖动概率。

时间窗口划分的效用由时延效用、内存损失和 SMV 报文时延抖动损失 3 部分组成,下面分别阐述。 2.2.1 时延效用

GOOSE 1A 数据帧在网络中传输的总时延包括 TSN 机制时延、排队时延、低优先级时延、线路传输 时延以及信用值(基于信用的整形机制中的关键概 念,表示流量传输的动态优先级控制值)时延。

1) TSN 机制时延 T_{TSN} :由于 TSN 机制造成的时延,包括保护带长度 T_{GB} 与保护窗口长度 T_{PW} 。在保护窗口结束后,才可进行非保护流量的传输。TSN 机制时延可表示为

$$T_{\rm TSN} = T_{\rm GB} + T_{\rm PW} \tag{1}$$

2)排队时延 T_{QUE}:相同优先级帧造成的时延。 当有相同优先级的帧在门控队列中排队传输时,需 要等待之前到达端口的所有同等优先级帧传输完毕 后,当前帧才能进行传输。

$$T_{Q_{\rm UE}} = \sum_{f, \, \epsilon \, Q_{\rm UE}} \frac{L_{\rm s}}{P} \tag{2}$$

式中: Q_{UE} 为当前帧同优先级门控队列中所有其他帧的集合; f_s 为同优先级帧; L_s 为 f_s 的帧长度;P为交换机端口速率。

3)低优先级时延 T_{LP}:低优先级帧造成的时延。 当低优先级的帧比当前帧提前到达并正进行传输, 当前帧需要等待低优先级帧传输完成后才能传输, 低优先级时延可表示为

$$T_{\rm LP} = \frac{L_{\rm max}}{P} \tag{3}$$

式中:L_{max}为最大帧长度。

4)线路传输时延 T_{TRANS}:数据帧在网络中固定线路的传输时延,由线路传输时延和数据转发时延组成。线路传输时延可表示为

$$T_{\rm TRANS} = T_{\rm path} + \frac{L_0}{P} \tag{4}$$

式中:T_{path}为线路传输时延;L₀为当前帧长度。

5)信用值时延 T_c:由于 TSN 基于信用的流量整 形机制造成的时延。传输多个相同类型帧后,该类 流量的信用值将降低至负数,被禁止传输,当信用再 次回正时才能继续传输。信用值时延可表示为

$$T_{\rm c} = C_{\rm max} \times \frac{\alpha^{-}}{\alpha^{+}} \tag{5}$$

式中: C_{max} 为发送最大长度 GOOSE 1A 数据帧所需要的时间; α^+ 与 α^- 分别为 TSN 基于信用的流量整形机制中空闲时信用变化率和发送时信用变化率。

$$T_{\rm G1A} = T_{\rm TSN} + T_{Q_{\rm UE}} + T_{\rm LP} + T_{\rm TRANS} + T_{\rm C} \qquad (6)$$

除最高优先级的 GOOSE 1A 外, GOOSE 1B、 MMS 以及 BE 流量还需要考虑高优先级时延 T_{HP}。 由于 TSN 机制内部遵循严格优先级策略,高优先级 帧优先传输会对低优先级帧造成时延影响。当高优 先级队列中有帧未传输完成时,需要等待高优先级 帧传输完成后,低优先级帧才能进行传输,高优先级 时延 T_{HP} 可表示为

$$T_{\rm HP} = \sum_{f_{\rm hp} \in H} \frac{L_{\rm hp}}{P} \tag{7}$$

式中:H为比当前帧优先级高的门控队列中所有其他帧的集合;f_{hp}为高优先级帧;L_{hp}为f_{hp}的帧长度。

GOOSE 1B 数据帧总体时延 T_{GIB} 可表示为

 $T_{\rm G1B} = T_{\rm TSN} + T_{Q_{\rm LR}} + T_{\rm LP} + T_{\rm TRANS} + T_{\rm C} + T_{\rm HP} \qquad (8)$

另外,TSN 技术中 TAS 与 CBS 机制结合一般用 于控制时间敏感型 GOOSE 1A 流量与 GOOSE 1B 流 量,而其他流量的传输不受 CBS 机制的限制,故 MMS 流量的时延中不包含信用值时延。MMS 与 BE 数据帧时延 T_{MMS/BE} 可表示为

$$T_{\text{MMS/BE}} = T_{\text{TSN}} + T_{Q_{\text{UE}}} + T_{\text{LP}} + T_{\text{TRANS}} + T_{\text{HP}} \qquad (9)$$

经过窗口的再次划分,一个帧若从过期帧转变

为非过期帧,则称该帧为优化帧。一个划分方案的 时延收益为一个 GCL 周期内优化帧的优先级之和。 则时间窗口划分带来的时延效用 W_T可表示为

$$W_{\rm T} = \sum_{f \in Q} f_{\rm p} \tag{10}$$

式中: f_p为满足时延需求帧的优先级; Q为一个 GCL 周期内优化帧集合。

2.2.2 内存损失

内存损失由门控列表增加的长度决定。由表 2 和表 3 可知,每增加一次时间窗口的划分,门控列表的长度会增加 3,由门控列表长度造成的内存损失 W_{GCL}可表示为

$$W_{\rm GCL} = 3\varphi n \tag{11}$$

式中: φ为内存损失系数,是内存损失到时延损失的转化常数; n为窗口划分次数。

2.2.3 SMV流量时延抖动损失

划分时间窗口可能会导致某些用于传输 SMV 流量的时间窗口大小刚好等于报文所需的传输时 间,而 SMV 流量的传输存在抖动现象,到达传输端 口的时间可能会与预期存在偏差,划分时间窗口的 次数越多,为 SMV 流量预留的窗口长度越短,则抖 动现象导致的时延抖动损失越大。SMV 报文时延抖 动损失 W_m可表示为

$$W_{\rm JIT} = f_{\rm SMVj} f_{\rm SMVp} n \tag{12}$$

式中: f_{SMV_j} 为 SMV 帧的抖动概率; f_{SMV_p} 为 SMV 帧的 优先级。

2.2.4 时间窗口划分方案的效用

综上,时间窗口划分方案的效用可表示为

 $W_{\text{TOTAL}} = \omega_1 \times W_{\text{T}} - \omega_2 \times W_{\text{GCL}} - \omega_3 \times W_{\text{JIT}} \quad (13)$ 式中: ω_1, ω_2 和 ω_3 分别为 $W_{\text{T}}, W_{\text{GCL}}, W_{\text{JIT}}$ 的权重参数, 且 $\omega_1 \gg \omega_3 > \omega_{2^{\circ}}$

由于本文优先考虑不能满足时延需求的过期帧, 故时延收益的权重 ω_1 要远大于另外两项效用权重。 且考虑到 SMV 流量在智能变电站通信中的重要性, 其帧抖动现象带来的效用损失权重 ω_3 要大于门控列 表长度造成的内存损失权重 ω_2 ,故权重设置满足 $\omega_1 \gg \omega_3 > \omega_2$ 。本文将依照此效用模型评估每一种划 分方案的优劣,最终输出效用值最大的划分方案。

2.3 基于效用的TAS动态时间窗口划分算法

图 4 为基于效用的 TAS 动态时间窗口划分算法 流程图。基于效用的 TAS 动态时间窗口划分算法依 次增加划分次数,寻找当前划分次数下取得划分效 用最佳的划分方案对应的门控列表,直到不存在过 期帧或划分次数达到最大划分次数。





由图 4 可知:该算法以固定划分方法作为初始 门控列表,算法输出的门控列表理论上优于固定划 分方法;该算法将优先选择划分次数少的门控列表, 减少了内存损失和 SMV 流量时延抖动损失;算法在 没有过期帧时终止,在过期帧较少的情况下能极大 减少搜索空间,提高算法运行效率。

3 仿真实验

3.1 仿真环境及参数

利用 OMNET++模拟器与基于 INET 结合的 TSN 实验模型^[22-23],形成仿真实验模型。为进行评估,搭 建一个由 8 个终端节点组成的多跳网络拓扑结构, 如图 5 所示,其中工作站 1、工作站 2、工作站 3 分别 发送 GOOSE 1A、GOOSE 1B 以及 MMS 报文,目标终端均为备份服务器。机器人控制单元 1、机器人控制单元 2 和机器人控制单元 3 分别发送起始时间不同的 SMV 周期性报文,目标终端均为采样测量接收端。间隔层网络由两台变电站可编程式交换机组成,分别在输出端口实现 TAS 机制。网络中所有的链路都是全双工的,带宽为 100 Mbps。TSN 超周期 $T_{cycle} = 417 \,\mu s$,仿真总时间为 1 s。根据 IEC 61850 协议,各流量参数如表 6 所示。

假设 GOOSE 1A、GOOSE 1B 和 MMS 消息的大 小是恒定的。为模拟最坏情况下链路工作负载, GOOSE 1A、GOOSE 1B 和 SMV 消息都是同步的,即 所有消息同时发出。每种流量的发送周期与帧长度 严格遵循 IEC 61850 协议并根据变电站实际场景设 定,优先级根据2.1节流量映射方案设置,内存损失 系数设置为 $\varphi = 0.1$ 。本实验中对3个权重设置如 下:由于在智能变电站中,GOOSE 1A 流量时延需求 极高,直接影响继电保护的动作时间,故权重 ω = 0.7:门控列表长度的增加仅对系统内存产生影响。 现代智能变电站的设备通常配备较大内存,能够承 受少量的门控列表扩展,故权重 $\omega_{2}=0.1$;抖动损失是 次要目标,需要保持一定值,以在保证 GOOSE 1A 性 能的同时,尽可能减少 SMV 流量的抖动损失,故权 重 $\omega_3=0.2$ 。由于除 SMV 外的其他流量的帧抖动对 总体时延影响较小,故本实验忽略除 SMV 外流量的 帧抖动现象,仅引入 SMV 的抖动概率 $f_{SMVi} = 0.1$ 。

为验证本文算法的有效性,选择在 TSN 领域具 有代表性的 Tabu-RG^[24]和 HERMES^[25]作为对比算 法。两种算法上述两种算法在调度实时流量和提升 网络性能方面的优化目标与本文研究类似。

实验考虑多种场景,每个场景中生成起始时间不同的 SMV 流量,且由机器人控制单元 2 和机器人控制单元 3 发送的 SMV 流量周期为机器人控制单元 1 发送的 SMV 流量周期的 2 倍。本实验考虑了如表 7 所示的 3 种不同的场景,具体场景描述如下文所述。

场景 1(理想情况):SMV 流量的起始时间较为 集中,SMV1 和 SMV2 的起始时间为 0 和 200 μs, SMV3 和 SMV4 的起始时间均为 100 μs。所有流量 的到达时间分布较为均匀,保护窗口占用的时间 较短。 场景 2(中等情况):SMV 流量的起始时间相比 理想情况略有分散,SMV4的起始时间延后至 300 μs,保护窗口长度较大。 场景 3(极端情况):SMV 流量的起始时间更加分散,SMV4 的起始时间进一步延后至 400 μs,保护窗口 几乎占据整个调度周期,非保护流量受到严重限制。



图5 仿真实验系统结构

Fig.5 Simulation experiment system architecture

	Table 5 Parameter settings for each traffic flow						
报文类型	帧长度/B	802.1Q 优先级	发送周期/μs	起始发送时间/μs	源/目的节点	TSN 流量类型	帧抖动概率
SMV	283	5	417	0/100/200/300/400	机器人控制单元/采样测量接收端	保护流量	0.1
GOOSE 1A	273	7	50	0	工作站 1/备份服务器	非保护流量	0
GOOSE 1B	273	6	200	0	工作站 2/备份服务器	非保护流量	0
MMS	288~1 500	4	指数分布λ=0.1	0	工作站 3/备份服务器	非保护流量	0

表6 各流量参数设置

表7	3种场景下SMV流量起始时间设置
12 1	3件物泉下3000加里吃知时回议直

_	Table 7 SMV traffic start time settings in three scenarios 单位						
	场景	SMV1(机器人控制单元1) 起始时间	SMV2(机器人控制单元1) 起始时间	SMV3(机器人控制单元2) 起始时间	SMV4(机器人控制单元3) 起始时间		
	1(理想情况)	0	200	100	100		
	2(中等情况)	0	200	100	300		
	3(极端情况)	0	200	100	400		

第52卷(总第331期)

3.2 仿真结果分析

首先分析 3 个场景下 SMV、GOOSE 1A、GOOSE 1B 和 MMS 四种流量的时延。

场景1的各流量时延分布如表8一表11所示。 由表8一表11可知,在所有类型流量都能满足时延 需求的情况下,本文提出的算法并没有增加对TAS 时间窗口划分,划分前后的时延呈现一致性。这是 由于初始划分方案已经能够使得全部帧在过期前得 到传输,窗口划分并不能优化时延效用。本文所提 算法、Tabu-RG算法和HERMES算法在该场景下的 表现较为接近,各项指标均满足时延需求且无丢包 现象。然而,Tabu-RG和HERMES算法的部分指标 略逊于本文算法:Tabu-RG 由于其全局优化策略,在 简单场景中引入了不必要的迭代调整,导致标准偏 差和最大时延略高;HERMES的多队列机制和启发 式调度方法在处理集中到达的流量时增加了少量调 度开销,也导致了类似的性能劣化。场景1下的所 有类型流量在接收端均无丢包现象。

表 8 场景 1 下 SMV 时延与丢包率 Table 7 SMV latency and packet loss rate in scenario 1

指标	固定时间窗 口 SMV	本文方法 SMV	Tabu-RG SMV	HERMS SMV
最小时延/ms	0.407	0.407	0.441	0.434
最大时延/ms	0.461	0.461	0.538	0.591
时延中位数/ms	0.436	0.436	0.458	0.457
时延平均数/ms	0.433	0.433	0.482	0.495
标准偏差	0.038	0.038	0.051	0.046
丢包率/%	0	0	0	0

表 9 场景 1 下 GOOSE 1A 时延与丢包率 Table 9 GOOSE 1A Latency and packet loss rate in

scenario 1

指标	固定时间窗口 GOOSE 1A	本文方法 GOOSE 1A	Tabu-RG GOOSE 1A	HERMES GOOSE 1A
最小时延/ms	0.512	0.512	0.563	0.622
最大时延/ms	0.810	0.810	0.933	1.132
时延中位数/ms	0.581	0.581	0.692	0.723
时延平均数/ms	0.616	0.616	0.721	0.814
标准偏差	0.210	0.210	0.322	0.290
丢包率/%	0	0	0	0

表 10 场景 1 下 GOOSE 1B 时延与丢包率

Table 10 GOOSE 1B latency and packet loss rate in

scenario 1

指标	固定时间窗口 GOOSE 1B	本文方法 GOOSE 1B	Tabu-RG GOOSE 1B	HERMES GOOSE 1B
最小时延/ms	10.720	10.720	11.210	11.329
最大时延/ms	11.132	11.132	13.411	12.702
时延中位数/ms	10.892	10.892	12.043	12.112
时延平均数/ms	10.874	10.874	12.115	12.089
标准偏差	0.214	0.214	0.346	0.331
丢包率/%	0	0	0	0

表 11 场景 1 下 MMS 时延与丢包率 Table 11 MMS latency and packet loss rate in scenario 1

指标	固定时间窗 口 MMS	本文方法 MMS	Tabu-RG MMS	HERME MMS
最小时延/ms	232	232	238	241
最大时延/ms	265	265	266	270
时延中位数/ms	238	238	247	255
时延平均数/ms	243	243	251	256
标准偏差	8.113	8.113	9.152	9.137
丢包率/%	0	0	0	0

场景 2下,各流量时延分布分别如表 12—表 15 所示。在场景 2下,划分前的 GOOSE 1A 出现了一 定程度的时延过期现象,有少量异常点超出了 3 ms 的时延需求,这是由于帧长度较大的低优先级 MMS 帧提前到达并得以传输,占据了传输端口,使得 GOOSE 1A 不能及时传输从而造成了时延过期现 象。少量的 GOOSE 1B 受 GOOSE 1A 延期的影响, 导致时延增加。

表12 场景2下SMV时延与丢包率

Table 12 SMV latency and packet loss rate in scenario 2

指标	固定时间窗 口 SMV	本文方法 SMV	Tabu-RG SMV	HERMS SMV
最小时延/ms	0.407	0.480	0.557	0.539
最大时延/ms	0.421	0.830	0.943	0.988
时延中位数/ms	0.414	0.644	0.750	0.764
时延平均数/ms	0.416	0.657	0.761	0.769
标准偏差	0.009	0.247	0.021	0.013
丢包率/%	0	2.5	3.1	2.8

表 13 场景 2 下 GOOSE 1A 时延与丢包率 Table 13 GOOSE 1A latency and packet loss rate in

scenario 2					
指标	固定时间窗口 GOOSE 1A	本文方法 GOOSE 1A	Tabu-RG GOOSE 1A	HERMES GOOSE 1A	
最小时延/ms	0.869	0.500	0.571	0.634	
最大时延/ms	7.390	2.312	2.586	2.637	
时延中位数/ms	1.403	1.385	1.412	1.458	
时延平均数/ms	1.412	1.374	1.447	1.501	
标准偏差	4.611	1.281	1.832	1.736	
丢包率/%	20	0	0	0	

场景 3 下,各流量时延分布分别如表 16一表 19 所示。在场景 3 的极端情况下,保护时间窗口几乎 占据了整个超周期,导致大量 GOOSE 1A 流量超过 3 ms 的时延需求。同时,由于 GOOSE 1A 流量需要 延后多个超周期才能传输,进一步导致 GOOSE 1B 的时延不满足需求。

从表 12-表 19 可以看出,在场景 2 和场景 3 下,本文所提算法通过时间窗口划分,有效提升了关 键流量 GOOSE 1A 的时延性能,将最大时延优化至 3 ms 以内,而 Tabu-RG 和 HERMES 算法在两个场景 下虽然也能保证 GOOSE 1A 的传输时延要求,但传 输性能逊于本文算法:Tabu-RG 在全局搜索中对动 态帧长度的处理较为缓慢,未能快速响应高优先级 流量的突发需求,导致 GOOSE 1A 的最大时延要逊 色于本文算法下的 GOOSE 1A 的最大时延,同时在 低优先级帧的影响下增加了时延波动;而 HERMES 算法依赖启发式方法进行调度,难以保证全局最优 调度,同时面对紧急流量及较高负载的情况时,启发 式算法存在部分队列未能及时清空的可能,从而造 成队列溢出和丢包。相比之下,本文算法通过时间 窗口划分,在应对极端情况下,高优先级流量的突发 需求和低优先级流量的干扰方面具有明显优势。

表14	场景2下GOOSE 1B时延与丢包率
Table 14 G	DOSE 1B latency and packet loss rate in

scenario 2

+2.+-	固定时间窗口	本文方法	Tabu-RG	HERMES
1日 7小	GOOSE 1B	GOOSE 1B	GOOSE 1B	GOOSE 1B
最小时延/ms	11.283	10.744	10.624	11.014
最大时延/ms	16.218	11.430	12.709	13.526
时延中位数/ms	13.282	10.943	11.261	11.834
时延平均数/ms	13.335	10.997	11.302	12.011
标准偏差	4.944	1.332	2.310	1.960
丢包率/%	25	0	0	0

表15 场景2下MMS时延与丢包率

Table 15 MMS latency and packet loss rate in scenario 2

指标	固定时间窗口 MMS	本文方法 MMS	Tabu-RG MMS	HERMS MMS
最小时延/ms	428.131	284.412	299.634	301.973
最大时延/ms	722.356	508.523	526.012	530.028
时延中位数/ms	512.458	337.983	345.041	347.752
时延平均数/ms	533.172	342.265	350.103	352.890
标准偏差	42.301	27.242	32.117	33.202
丢包率/%	27	0	0	0

表16 场景3下SMV时延与丢包率

指标	固定时间窗口 SMV	本文方法 SMV	Tabu-RG SMV	HERMES SMV
最小时延/ms	0.407	0.489	0.563	0.552
最大时延/ms	0.421	0.565	0.942	1.103
时延中位数/ms	0.411	0.524	0.638	0.642
时延平均数/ms	0.410	0.518	0.621	0.623
标准偏差	0.009	0.053	0.021	0.015
丢包率/%	0	3	3.2	2.9

表 17 场景 3 下 GOOSE 1A 时延与丢包率 Table 17 GOOSE 1A latency and packet loss rate in scenario 3

指标	固定时间窗口 GOOSE 1A	本文方法 GOOSE 1A	Tabu-RG GOOSE 1A	HERMES GOOSE 1A
最小时延/ms	2.774	0.512	0.591	0.621
最大时延/ms	15.997	2.131	2.630	2.731
时延中位数/ms	11.314	1.694	1.718	1.726
时延平均数/ms	9.652	1.424	1.512	1.538
标准偏差	9.350	1.144	1.871	1.743
丢包率/%	80	0	0	0

表 18 场景3下GOOSE 1B时延与丢包率 Table 18 GOOSE 1B latency and packet loss rate in scenario 3

指标	固定时间窗口 GOOSE 1B	本文方法 GOOSE 1B	Tabu-RG GOOSE 1B	HERMES GOOSE 1B
最小时延/ms	13.010	11.540	11.977	11.982
最大时延/ms	23.327	16.375	17.113	17.262
时延中位数/ms	19.314	13.327	13.526	13.551
时延平均数/ms	15.425	13.884	14.023	14.102
标准偏差	11.579	1.178	1.216	1.301
丢包率/%	0	2.5	0	0

表 19 场景 3 下 MMS 时延与丢包率 Table 19 MMS latency and packet loss rate in scenario 3

指标	固定时间窗 口 MMS	本文方法 MMS	Tabu-RG MMS	HERMS MMS
最小时延/ms	741.107	315.939	345.120	337.346
最大时延/ms	1 433.107	637.131	688.132	693.229
时延中位数/ms	1 123.467	507.669	523.968	527.586
时延平均数/ms	1 026.621	486.414	496.634	497.527
标准偏差	54.332	28.984	34.213	33.785
丢包率/%	32	0	0	0

由于 SMV 帧存在抖动概率,划分时间窗口后 SMV 帧出现了极少量的丢包现象,抖动概率对时间 窗口划分后的流量传输性能有一定影响。随着抖动 概率的增加,SMV 帧到达时间可能偏离预期,尤其在 保护时间窗口较短时,部分帧可能未能完成传输,从 而导致极少量的丢包现象。划分时间窗口后,窗口 长度进一步缩短,使抖动影响略有放大,这在实验中 表现为 SMV 流量的丢包率上升至 2.5% 或 3%,但仍 在可接受范围内。同时,随着抖动概率的增加,流量 排队等待时间呈现一定程度的增长,影响传输时延 性能,如图 6 所示。





同类型流量的最小时延、最大时延以及标准偏差 受多种因素影响,场景2和场景3在划分窗口前 GOOSE 1A的最小和最大时延相差较大,主要受排队 时延的影响,相同优先级帧间先到达先传输。此外,低 优先级的 MMS 流量帧长度从288 B 到1500 B 不等, GOOSE 1A 的最坏时延随 MMS 帧长度的增加而增加。

3种场景下性能指标如表20所示。

表20 性能指标

Table 20 Performance metrics					
场景	划分次数	内存损失	周期内被优化帧的数量		
1	0	0	0		
2	2	0.6	4		
3	2	0.6	0		

由表 20 可知,场景 3 在极端情况下的划分次数 并未到达最大次数 3。这是因为本文结合变电站通 信的实际场景,引入了帧抖动概率,2 次划分已能够 满足除 MMS 流量外大部分流量的时延需求。

4 结束语

本文首次提出通过动态调整 TAS 的时间窗口划 分粒度来提升变电站通信网络的 GOOSE 1A 时延性 能。首先提出了变电站 IEC 61850 通信与 TSN 技术 融合的流量映射方案。在此基础上提出时间窗口划 分的效用分析模型,基于帧时延、划分窗口的内存损 失和 SMV 帧抖动特性计算划分方案的效用值。进 一步提出了基于效用的动态时间窗口划分算法。通 过对传统 TAS 机制的时间窗口进一步划分,降低网 络中非周期性流量的传输时延,减少流量过期现象。 实验结果表明,所提算法能在多场景下将 GOOSE 1A 流量的传输时延控制在 3 ms 内,解决了 GOOSE 1A 流量的过期现象。同时,提出的算法对周期流量 的干扰较小,SMV 流量的丢包率可控制在 3% 内。

未来,随着智能变电站业务的扩展,将出现其他 非保护流量类型的时间敏感流。通过将效用分析模 型扩展到其他非保护流量类型的时间敏感流,本文 所提的动态时间窗口划分方法同样可用于提升这些 时间敏感流的时延性能。另外,在时间窗口进一步 划分后,如何放宽 SMV 时间窗口长度以降低丢包率 的问题也值得后续进一步研究。

参考文献

- [1] 刘哲,唐成鹏,周青,等.新型电力系统建设环境下的"西电东送"发展研究[J].广东电力,2023,36(9):26-33.
 LIU Zhe, TANG Chengpeng, ZHOU Qing, et al. Research on development of west to east power transmission under the environment of new power system construction [J]. Guangdong Electric Power,2023,36(9):26-33.
- [2] IEEE standard for local and metropolitan area networks-timing

and synchronization for time-sensitive applications in bridged local area networks: 802.1AS-2011 [S]. New York, USA: IEEE, 2011.

[3] 李响,李彦,张晓宇,等.基于时间敏感网络技术的组网采样同步方案[J].浙江电力,2022,41(6):15-21.
 LI Xiang, LI Yan, ZHANG Xiaoyu, et al. A networking sampling

synchronization solution based on time-sensitive networking [J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(6):15–21.

- [4] VAL I, SEIJO Ó, TORREGO R, et al. IEEE 802.1AS clock synchronization performance evaluation of an integrated wiredwireless TSN architecture [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(5):2986-2999.
- [5] 杨明亮,吴春明,沈丛麒,等.基于IEEE802.1的TSN交换机队列 调度技术研究[J].电子学报,2022,50(9):2090-2095. YANG Mingliang, WU Chunming, SHEN Congqi, et al. Research on queue scheduling strategy on IEEE 802.1 based TSN switch[J]. Acta Electronica Sinica,2022,50(9):2090-2095.
- [6] 尹立夫,程紫运,高会生,等.时间敏感网络帧抢占机制的时延 特性分析[J].电力信息与通信技术,2023,21(10):72-79.
 YIN Lifu, CHENG Ziyun, GAO Huisheng, et al. Delay characteristics analysis of frame preemption mechanism in time sensitive networks [J]. Electric Power Information and Communication Technology,2023,21(10):72-79.
- [7] 邓淇夫.高可靠性——时间敏感网络802.1Qci协议介绍[J].汽车电器,2023(1):40-42.
 DENG Qifu.Ultra reliability—the introduce of 802.1Qci in time-sensitive networking[J].Auto Electric Parts,2023(1):40-42.
- [8] 彭紫梅,寿国础,郭梦杰,等.时间敏感网络中的冗余机制研究 综述[J].电信科学,2023,39(8):29-42.
 PENG Zimei, SHOU Guochu, GUO Mengjie, et al. A survey on redundancy mechanisms in time - sensitive networking [J].
 Telecommunications Science,2023,39(8):29-42.
- [9] 贾惠彬,吴堃,武文瑞,等.基于信用值的变电站时间敏感网络 异常流量过滤方法[J].华北电力大学学报(自然科学版):1-10. JIA Huibin, WU Kun, WU Wenrui, et al.A credit based abnormal traffic filtering method for time sensitive network in substations[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition):1-10.
- [10] CAO Z P, LIU Q R, LIU D P, et al. Enhanced system design and scheduling strategy for switches in time-sensitive networking [J]. IEEE Access, 2021, 9:42621-42634.
- [11] 尹震宇,刘浩林,张飞青,等.一种基于时间感知整形器的TAS-WRR 调度算法研究与实现[J].小型微型计算机系统,2021,42
 (5):1077-1081.

YIN Zhenyu, LIU Haolin, ZHANG Feiqing, et al. Research and implementation of TAS-WRR scheduling algorithm based on time awareness shaper[J].Journal of Chinese Computer Systems, 2021, 42(5):1077-1081.

- [12] 王丽莉,姚军.5G传输网络承载方案分析[J].电信科学,2019, 35(7):145-151.
 WANG Lili, YAO Jun.Scheme analysis of transmission network for 5G mobile communication system[J].Telecommunications Science, 2019,35(7):145-151.
- [13] 严鹏飞,李俊娥,周斌,等.基于电力图形描述规范的智能变电站网络通信可视化方法研究[J].智慧电力,2020,48(8):91-97.
 YAN Pengfei, LI June, ZHOU Bin, et al. Network communication visualization of smart substation based on graphic description specification for electric power system [J]. Smart Power, 2020, 48 (8):91-97.
- [14] CHEN H Y, WANG X J, LI Z H, et al. Distributed sensing and cooperative estimation/detection of ubiquitous power internet of things[J].Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4 (2):1-8.
- [15] WANG Z N, ZHANG J, HUANG T.Determining delay bounds for a chain of virtual network functions using network calculus[J].IEEE Communications Letters, 2021, 25(8): 2550-2553.
- [16] 张冰玉.智能变电站继电保护在线监测系统研究[J].光源与照明,2023(12):162-164.
 ZHANG Bingyu. Research on online monitoring system of relay protection in smart substation [J]. Lamps & Lighting, 2023(12): 162-164.
- [17] 孙帆,刘锦文.智能变电站的继电保护系统可靠性分析[J].集成电路应用,2023,40(12):284-285.
 SUN Fan, LIU Jinwen. Analysis of reliability of relay protection system in intelligent substation [I] Application of IC, 2023, 40

system in intelligent substation [J]. Application of IC, 2023, 40 (12):284-285.
[18] 周飞飞,何迎利,程程,等.一种基于TSN特性的以太网组网在

18] 周代代, 阿延利, 程程, 寻. 一种盔丁150(将住的以太网组网往智能变电站中的设计方案[J]. 电力信息与通信技术, 2021, 19 (10):100-106.

ZHOU Feifei, HE Yingli, CHENG Cheng, et al.A design scheme of Ethernet networking with TSN characteristics in smart substation [J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2021,19(10):100-106.

- [19] CUI B X, ZHANG H, HE Y L, et al. Simulation of time delay characteristics of TSN-based intelligent substation timing overcurrent protection service [C] //2023 4th International Symposium on Computer Engineering and Intelligent Communications (ISCEIC).IEEE, 2023;483-487.
- [20] 刘见,赵震宇,裴茂林,等.智能变电站过程层网络异常流量检测[J].计算技术与自动化,2021,40(3):184-188.
 LIU Jian, ZHAO Zhenyu, PEI Maolin, et al. Abnormal flow detection of process layer network in intelligent substation [J]. Computing Technology and Automation,2021,40(3):184-188.
- [21] 张浩,王-蒙,桑玮婧,等.基于时空流量预测的时延敏感无源 光网络动态带宽调度技术[J].山东电力技术,2024,51(9):
 37-45. (下转第94页)

第52卷(总第331期)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2025.06.009

·设备检测与故障诊断

碰摩诱发大型同步调相机转子低频振动故障机理研究

汪海洋1*,刘晓锋2,刘一丹1,何小锋2,蔡 丹3

(1.国网江苏省电力有限公司超高压分公司,江苏 南京 211102;

2. 江苏方天电力技术有限公司, 江苏 南京 211102:3. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102)

摘要:次同步低频振动造成转子动力失稳是旋转机械的一种主要振动故障。一般的经验认为,次同步失稳转子的低频振动 主要由轴承失稳(油膜涡动、油膜振荡)、汽流激振导致。对大型同步调相机组发生的次同步低频振动失稳故障进行建模分 析,应用Riccati传递矩阵法核算调相机转子固有频率和稳定性,然后根据Hertz接触定律数值模拟碰摩状态下调相机转子的 振动响应波形、频谱,研究动静碰摩诱发转子次同步低频振动故障的机理和故障特征,排除了普遍认为的调相机轴承失稳的 原因,同时纠正了碰摩主要导致转子工频振动的传统认知,确定动静碰摩是调相机低频振动的主要诱因,指导现场检修消除 碰摩故障,调相机运行恢复正常。深化了对调相机次同步低频振动故障的认知,可为同类机组振动治理提供有益参考。 关键词:调相机;低频振动;转子失稳;动静碰摩 文献标志码:A

中图分类号:TM621

文章编号:1007-9904(2025)06-0086-09

Study on Mechanism of Low Frequency Vibration Fault of Large Synchronous Condenser Rotor Induced by Rubbing

WANG Haiyang^{1*}, LIU Xiaofeng², LIU Yidan¹, HE Xiaofeng², CAI Dan³ (1.State Grid Jiangsu EHV Company, Nanjing 211102, China; 2. Jiangsu Frontier Power Technology Co., Ltd., Nanjing 211102, China; 3. Nanjing NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China)

Abstract: Sub-synchronous low-frequency vibration causing rotor dynamic instability is a major vibration fault in rotating machinery. General experience suggests that the low-frequency vibrations of sub-synchronously unstable rotors are mainly caused by bearing instability (film whirl and oil film oscillation) and airflow excitation. This paper conducts a modeling analysis of the low-frequency vibration fault occurring in large synchronous condensers due to sub-synchronous instability. The Riccati transfer matrix method is applied to calculate the natural frequencies and stability of the condenser rotor. Subsequently, numerical simulations based on Hertz's contact theory are performed to analyze the vibration response waveforms and spectra of the condenser rotor under contact conditions. This study investigates the mechanism and fault characteristics of rotor subsynchronous low-frequency vibration faults induced by contact and non-contact interactions, eliminating the commonly held belief regarding the instability fault of the condenser bearings. Additionally, it corrects the traditional understanding that contact mainly leads to rotor operating frequency vibrations, confirming that contact interactions are the primary cause of lowfrequency vibrations in condensers. The findings guide on-site repairs to eliminate contact faults, allowing the condenser to return to normal operation. This deepens the understanding of sub-synchronous low-frequency vibration faults in condensers and provides useful references for vibration management in equipment.

Keywords: condenser; low frequency vibration; rotor instability; dynamic and static rubbing

引言 0

旋转机械的次同步动力失稳是一种主要的振

基金项目:国家电网有限公司科技项目"调相机组高可靠性非电量保 护关键技术研究及应用"(5500-202316163A-1-1-ZN)。

动故障。转子次同步振动的主要特征表现为低频 振动,在低频振动下转子承受交变应力,对机组运 行安全性及可靠性造成极大威胁,因此必须重视机 组低频振动故障问题[1]。一般的经验认为低频振 动故障包括汽流激振、轴承失稳。蒸汽激振力变化 引起汽流激振^[2]:轴承失稳产生半速涡动、油膜振 荡^[3]。但理论和实践研究表明,动静碰摩^[4]、大不平

Science and Technology Project of State Grid Corporation of China "Research and Application of Key Technologies for High-Reliability Non-Electrical Quantity Protection in Phase-Shifting Units" (5500 -202316163A-1-1-ZN).

衡、随机振动和分数倍谐波振动也会诱发低频振动,例如安装或运行原因造成的动静碰摩产生分数 倍谐波振动;非稳态冲击引起振动频率为0.5~27 Hz 的随机振动^[5];部件飞脱引起的动静碰摩及大不 平衡^[6]。

本文基于大型同步调相机组发生的低频振动故障,从多维角度分析了各种低频振动故障发生的可能性,并着重分析了动静碰摩诱发低频故障的机理、故障特征以及处理措施,为提高调相机低频振动故障的认知及振动治理提供参考。

1 调相机低频振动

2020年12月9日,某特高压换流站1号调相机 进行静态变频器(static frequency convertor, SFC)拖 动验证,第1次拖动至3150 r/min,振动正常。在第 2次拖动过程中,调相机升速至3125 r/min后,盘车 端和励端相对轴振开始爬升,升速至3153 r/min,盘 车端轴振243 µm,励端轴振219 µm,振动保护跳机。 降速至3126 r/min时,盘车端轴振最大424.28 µm, 励端轴振最大286.44 µm。此后随着转速下降,振动 迅速恢复正常,如图1所示。



Fig.1 Relative shaft vibration trend of condenser

振动增大时,频谱以 13 Hz 低频分量振动为主, 典型频谱如图 2 所示。

调相机第 2 次升速至 3 125 r/min 后,盘车端 相对轴振陡升,轴振增加的主要频率成分是次同步 低频,说明转子发生了低频自激振动失稳。低频振 动以 0.25 分数倍频 13 Hz 为主,对应转速 780 r/min, 这个转速与调相机转子一阶固有频率(实测值 764 r/min,计算值 750 r/min)接近。





2 振动原因分析

2.1 轴系出现低频振动的原因

转子在运行时,由于一些原因,会突然发生大规模 的低频振动,振动发散,即转子失去了稳定性。失稳通 常是突然发生的,一般无明显的征兆,本质是转子系统 发生自激低频振动。自激振动与强迫振动有很大不 同。自激振动的形态为系统的一个模态,一般是最低 阶模态,即自激振动的频率常为系统的低阶模态频率。

根据目前的研究结果和工程实践经验,转子失 稳的主要原因和特征^[7]如图3所示。汽流激振诱发 的低频振动主要由密封间隙、叶顶间隙中的高温、高 压、高速流体的可变动压引起的交叉耦合力作用于 转子上,或者配汽不均匀产生附加力,导致轴承载荷 变轻,转子出现失稳。调相机转子不存在这种运行 环境和配汽结构,可以排除这个原因。调相机发生 大不平衡诱发的失稳也能排除,转速从3150 r/min 降低至3000 r/min后,振动的恢复情况较好,转子不 可能出现旋转部件断裂、脱落引起的大不平衡。调 相机转子为实心整锻转子,可以排除内腔积液诱发 转子失稳的可能。转轴的材料内阻是由于转轴变形 时材料内部分子间的摩擦造成的,是转子固有特性, 由于调相机已经启动过多次,转子材质内阻问题在 之前的启动中会暴露,不会突然出现。转子的结构 内阻是由于各零件配合面之间的摩擦造成的,结构 内阻的作用较复杂,调相机转子结构槽楔和绕组的 作用效果会大于材料内阻。当配合面的部件出现 松动、产生摩擦时,可能导致转子失稳,但由于槽楔 和绕组的松动或不均匀膨胀首先会造成转子的不 平衡响应,即1倍频振动变化且不稳定,从目前的 3000 r/min 振动良好的状态看,振动特征还不完全 吻合。外部管路的冲击,振动增大时现场瓦振有所 增加,但轴振增加的幅度和波动频次更高,分析主要 是由于转子激振力增加所致,且现场油管路振动正 常,可以排除管路冲击。由于轴振增加时瓦振同步 增加,可以排除轴振测量系统信号干扰的影响。

通过上述排查,认为可能的振动原因是:轴承失 稳、动静碰摩,需要逐一分析、排除和确认。

2.2 轴承失稳

2.2.1 调相机轴系稳定性核算

采用调相机转子统一的模化参数,应用 Riccati 传 递矩阵法计算轴系固有频率和稳定性,求得系统的复 特征值 *s* = *l* + jω,该特征值实部为系统阻尼衰减指数, 虚部为涡动频率(临界转速),对数衰减率^[8]定义为

$$\delta = -\frac{2\pi\lambda}{\omega} \tag{1}$$

式中: λ 为系统阻尼衰减指数; ω 为涡动频率。当 $\delta > 0$ 时系统稳定,当 $\delta \leq 0$ 时系统失稳。

转子失衡的原因

计算轴系稳定性时,300 Mvar 调相机轴系模型 中3个导轴承(盘车端主轴承、励端主轴承和稳定轴 承)分别用3个轴承单元模拟。

在计算 300 Mvar 调相机轴系稳定性时,运用 XL-ROTOR 程序中的轴单元、轴承单元和质量单元,将整 个轴系分成 50 个节点,按节点分成 49 个轴单元,线圈 及其他附加质量以质量单元分别加于相应节点的中心 位置。计算模型如图 4 所示,300 Mvar 调相机主轴材 料特性如表 1 所示,调相机轴系主要参数如表 2 所示。





图3 次同步低频振动原因



表1 主轴材料特性

Table 1 Spindle material characteristics

项目	参数
材料	25Cr2Ni4MoV
弹性模量/(N/m ²)	0.21
剪切模量/(kN/mm ²)	80.77
质量密度/(mg/mm ³)	7.85
泊松比	0.3

表2 轴系主要参数

Table 2 Main parameters of shafting

参数	数值
发电机转子质量/t	73.6
转动惯量/(kg·m ²)	46 338.18
额定功率/Mvar	300
额定转速/(r/min)	3 000
飞逸转速/(r/min)	3 600

模型中的轴承位置设定:节点6为盘车端主轴 承,节点51、52、53为对应边界条件;节点32为励端 主轴承,节点54、55、56为对应边界条件。两个主轴 承几何尺寸及结构完全相同,轴承动力特性系数如 图5所示。节点48为稳定轴承,动力特性系数根据 轴承手册插值计算得到。





调相机对数衰减率计算结果如图6所示。



稳定性计算分析表明,在工作转速n(3000~ 3150 r/min),轴系的对数衰减率大于2。轴系失稳 的阈速大于3938 r/min,对数衰减率大于0.5,符合 API684 失稳转速大于1.25n 的规定,也符合制造行 业,如东方汽轮机厂、哈尔滨汽轮机厂、通用电气,关 于对数衰减率的规定^[7],即在工作转速±10%范围内 的临界转速的对数衰减率都应大于0.1,不在此范围 内的临界转速的对数衰减率不做规定。

2.2.2 调相机轴承稳定性分析

调相机转子稳定性核算结果显示,转子轴承系 统的设计不存在失稳现象,还要进一步分析安装、运 行的因素是否会导致转子轴承系统发生轴承失稳。 轴系稳定性是由转子和滑动轴承共同决定的,而滑 动轴承确定了系统的边界条件。因此轴承的性能对 于稳定性至关重要,引入 Sommerfeld 数即轴承无量 纲承载能力系数(*S* 系数)^[9],表示为

$$S = \frac{\mu NLD}{W\psi^2} \tag{2}$$

式中: μ 为润滑油动力粘度;N为轴颈转动频率;L为 轴承宽度;D为轴承直径;W为外载荷; ψ 为间隙比, $\psi = C_p/R$,其中 C_p 为半径间隙,R为轴颈半径。

滑动轴承动力特性是调相机转子动力稳定性最 重要的边界条件,S系数对轴承的动力特性具有决定 性影响。针对设计定型的转子和滑动轴承,S系数能 够定性分析实际运行的油温、油膜压力、间隙、载荷 等参数变化时是否可能对轴承的动力特性和转子的 稳定性产生不利影响而导致轴承失稳。

润滑油标号为 32 号汽轮机油,冲转润滑油温 39 ℃,油膜建立条件良好;顶轴油压稳定,不存在波 第52卷(总第331期)

动和下降现象,能排除润滑油泄漏问题;现场检查轴 承顶隙和侧隙均在标准值范围内,且轴承两侧间隙 之和大于顶间隙,呈标准椭圆,瓦型正常,稳定性好; 轴系载荷没有进行调整,轴瓦载荷短时间内不会突 然下降。通过排查,现场不存在轴承边界条件恶化 导致转子失稳的因素。

理论计算轴系稳定性合格,能够影响其稳定性 的运行参数和轴承数据都正常,因此判断调相机发 生轴承失稳的证据不充分。

3 检修处理

调相机出现低频振动的原因可能是轴承失稳、 动静碰摩,而转子和轴承稳定性分析排除了调相机 发生轴承失稳的可能性,因此怀疑转子发生低频振 动的原因主要是动静碰摩。决定重点检查调相机气 封圈、轴承挡油盖、盘车箱等容易发生碰摩的部位。

3.1 碰摩检查

检查盘车端和励端气封圈与转子无摩擦,塞尺 检查气封圈与转轴间隙合格。

检查轴承挡油盖,发现内侧挡油盖梳齿有轻微 摩擦痕迹,外侧挡油盖无摩擦痕迹。对有摩擦的内 侧挡油盖梳齿进行清理和适当修磨后回装。

检查刷握与集电环无摩擦;接地电刷刷握与转 轴无摩擦;检查隔音罩与转轴无摩擦;检查集电环风 扇无摩擦,间隙合格。

检查盘车箱挡油板,如图7所示,发现盘车箱挡 油板与转轴有明显摩擦痕迹。盘车箱挡油板共5道 梳齿,由箱外向箱内依次编号1—5,第5道梳齿下半 部分有变形,第2道和第4道梳齿摩擦痕迹明显,齿 顶较其他齿顶更厚,有摩擦、起毛刺,转轴上有相应 的摩擦后的痕迹。对第5道梳齿进行校形。用半圆 挫对挡油板梳齿进行适当修磨,去除毛刺清理干净 后回装,用塞尺检查间隙。盘车箱挡油板双边间隙 盘车厂家原要求值为0.5~1 mm,实测上下方向偏小 (接近0.5 mm)。与盘车厂家反馈沟通后,此次回装 挡油板双边间隙按1~2 mm 控制。间隙标准根据轴 瓦与轴颈的名义间隙、转子晃度、安装偏差、轴心轨 迹、油膜厚度等数据计算确定。

3.2 轴振陡升现象分析

此机在此前各次启机过程中,转轴与盘车箱挡 油板之间应已存在轻微摩擦,因摩擦较轻微,对轴振 影响表现不明显。



图 7 盘车箱挡油板与转子碰摩 Fig.7 The oil baffle of turning gear box rub with the rotor

机组通过多次启机运转,盘车箱挡油板与转轴 的摩擦情况达到一个临界状态,在2020年12月9日 启机过程中,第2次升速至3140 r/min时产生碰摩 (使挡油板变形),碰摩的作用力对高速旋转的转子 产生冲击,使轴振增大,轴振增大后又使高速旋转的 转子与轴承挡油盖梳齿(高分子复合材料)进行摩 擦,摩擦使轴振进一步快速上升。

调相机振动监测系统轴心位置图 8 显示,机组启 动时,转子从 3 000 r/min 定速向 3 150 r/min 升速过程 中,当转速升至 3 125 r/min 时盘车端轴振开始爬升, 继续上升至 3 150 r/min,振动持续爬升至 250 μm,保 护动作,转速下降,下降至 3 126 r/min 时振动达到最 大值 423 μm,继续降速至 3 000 r/min 以下,振动快速 恢复正常。图 9 轴心位置局部放大图显示,转速上升 到 3 153 r/min 时,轴心向右下方位移 52.4 μm,转速下 降过程中轴心继续下移,降至 3 126 r/min 时,相对于 3 000 r/min 起始位置向右下方偏移了 85.4 μm,已经 超过实际安装间隙,随后逐渐回归起始位置。



Fig.8 Shaft centerline of turning end bearing



图 9 轴心位置变化局部放大图 Fig.9 Detail enlarged view of shaft centerline

在转子升速过程中,当动静局部间隙小于轴心 偏移量和振幅叠加的数值时就会发生碰摩,根据振 动快速恢复的特性,表明碰摩以冲击振动为主,不是 传统经典的热效应碰摩。

3.3 处理结果

经过对盘车箱挡油板和励端轴承内侧挡油盖进行 清理后,引起轴振突增的因素已消除,1号调相机进行 后续 SFC 拖动及调试试验。图 10 盘车端轴承相对轴 振频谱级联图显示,调相机升速过程 0~3 150 r/min,振 动良好,未出现低频振动为主的自激振动,以1 倍频和 2 倍频强迫振动为主,低频振动分量消失。



3.4 动静碰摩失稳理论验证

对于实际工程应用中的旋转机械,碰摩诱发的 热冲击是主要的故障现象。众多的研究者已经开展 了试验和理论研究,研究碰摩转子的热效应,分析转 子轴承的动力特性响应。这种碰摩转子的显著振动 特征是同步不稳定振动^[10],即1倍频幅值相位随时 间变化的振动特征。

但众多的研究和实践经验还表明,动静碰摩也 会表现出很强的非线性振动现象。根据转子振动响 应,存在相对较短时间稳态区域,碰摩会产生宽频率 范围的振动响应,出现一些次同步频率分量,像分数 倍工频振动^[11],或者振动的频率就等于碰摩转子修 正的固有频率^[12]。

由于直接从转子、定子碰摩过程的微观细节角 度进行研究十分困难,以下采用线性数值模拟的方 法分析碰摩转子的动力响应。

为简化研究,进行如下假设:1)转子、定子碰摩 过程中,定子整体保持刚性,转子保持刚性,两者接 触时的几何关系按内切圆处理,因此相互碰撞二者 的公法线上的径向碰撞力记为 F_{r} ;2)在转子、定子碰 摩过程中,仅在挤压接触区域有局部弹性变形,忽略 挤压过程中的阻尼效应;3)转子、定子接触过程符合 库仑摩擦定律条件, μ 为接触点处摩擦系数,则切向 摩擦力 $F_{\tau} = \mu F_{r}$,将转子和定子分别看成有一定厚 度、宽度的圆盘和圆孔,在这样几何条件下转子、定 子碰撞问题简化为2个圆的内接触问题,根据 Hertz 接触定律^[13],两个弹性体碰撞所引起的径向碰撞力 如图 11 所示,o为转子几何中心,o'为质心,e 为转子 偏心, ω 为转子角速度(涡动频率),M 为转子质量。

$$F_r = \left(\frac{\delta_r}{\alpha}\right)^{\frac{3}{2}} \tag{3}$$

式中:δ,为径向嵌入深度;α为结构常量[14]。

$$\alpha = 0.8 \sqrt{\frac{9}{16} \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}\right)^2 \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right)}$$
(4)

式中:v₁,v₂,E₁,E₂,R₁,R₂分别为转子和定子的泊松 比、杨氏模量和撞击局部表面曲率半径。



图 11 转子碰摩力示意图 Fig.11 Schematic diagram of rotor rubbing force

实际工程中的转子动力学,转子与定子之间的半 径间隙 h 一般仅为 R₁的千分之一量级,所以α可记为

$$\alpha = 0.8 \sqrt{\frac{9}{16} \left(\frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}\right)^2 \frac{h}{R_1^2}}$$
(5)

(11)

在转子、定子的整个碰摩过程中,两者间的径向 碰撞力 F_r可简要表示为非线性形式^[15]。

$$F_{\rm r} = S(\delta_{\rm r}) \left(\frac{\delta_{\rm r}}{\alpha}\right)^{\frac{3}{2}} \tag{6}$$

式中: $\delta_r = r - h, r$ 为转子径向位移; $S(\delta_r)$ 为阶跃函数。

$$S(\delta_{\rm r}) = \begin{cases} 1, \delta_{\rm r} \ge 0\\ 0, \delta_{\rm r} < 0 \end{cases}$$
(7)

在图 11 所示的坐标系中, F_x和 F_y分别为定子 对转子的作用力在两个坐标轴方向的分量。

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = \frac{F_r}{r} \begin{bmatrix} 1 & -\mu \\ \mu & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$
(8)

从碰撞径向接触力式(3)和式(6)可以发现,刻画 弹性体径向碰撞过程本质特征的关键性参数是结构常 量 α,一个仅与碰撞点几何形状和材料属性相关的物 理量^[16]。任何确定物理系统的本质属性在该系统建立 后就不会改变了,Hertz接触模型体现了这一特点^[17]。

对于一个转子,通常包含轴和盘两个基础部分。 要建立考虑弯扭耦合转子的梁单元有限元模型,首 先需要建立具有扭转自由度的梁单元以及盘在扭转 振动下的运动微分方程,最后将梁单元与盘组合成 整体的运动微分方程,完成模型的建立。

建立存在碰摩故障的梁(盘)单元的转子动力学 方程,描述整个转子碰摩与弯扭耦合振动^[18]。

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{X}} + [\boldsymbol{C} + \boldsymbol{G}(\boldsymbol{\omega}\boldsymbol{E} + \begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{T}}_{1} & 0 & 0 & 0 & 0\\ 0 & \dot{\boldsymbol{T}}_{2} & 0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & \dot{\boldsymbol{T}}_{3} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & \dot{\boldsymbol{T}}_{4} & 0\\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dot{\boldsymbol{T}}_{5} \end{bmatrix})] \qquad (9)$$

 $\dot{X} + KX = F$

式中:M、C、K分别为转子的质量矩阵、阻尼矩阵和 刚度系数矩阵;E为单位矩阵; \dot{T}_1 — \dot{T}_5 为该节点前五 阶扭转振动角速度;F为由于不平衡质量引起的耦 合激励力的列向量;G为盘的陀螺力矩矩阵;X为描 述盘在各个方向上位移、偏摆或扭转角度的列向量, 如式(10)所示; \dot{X} 为向量速度; \ddot{X} 为向量加速度。

$$\boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{x} \\ \boldsymbol{y} \\ \boldsymbol{\theta}_{\boldsymbol{x}} \\ \boldsymbol{\theta}_{\boldsymbol{y}} \\ \boldsymbol{\theta} \end{bmatrix}$$
(10)

式中:x,y为节点横向振动位移; θ_x, θ_y 为节点的偏摆 角度; θ 为节点扭转振动的角度。 由式(9)所描述的转子模型,当转子不发生碰摩时,方程右侧的F只包含耦合振动引起的耦合激振力;当转子与静子之间发生碰摩时,方程右侧的F将 包含碰摩引起的外激振力,即碰力和摩擦力,如图11 所示。忽略扭振和陀螺力效应,式(9)转化为

 $\left(M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = F_x + me\omega^2\cos(\omega t)\right)$

$$M\ddot{y} + C\dot{y} + Ky = F_y + me\omega^2 \sin(\omega t) - mg$$

式中:t为时间;g为重力加速度;m为转子质量、 \dot{x} 、 \ddot{x} 为X向振动位移的速度、加速度; \dot{y} 、 \ddot{y} 为Y向振动位移的速度、加速度; \dot{y}

由于式(11)是一个非线性、时变的耦合微分方 程组,无解析解,采用数值积分研究转子的动力学行 为(瞬态分析)^[19-21]。采用 Runge-Kutta 法数值模拟, 得到碰摩转子的动力响应。

对于调相机转子,经常发生碰摩的位置为油挡、 风挡等。模拟时假设在盘车端油挡处,发生弹性体 径向碰摩,当转子 3 150 r/min 时,在二阶不平衡力的 状态下突然发生碰摩。加载条件下的系统振动响应 如图 12—图 13 所示。经历多次连续碰撞,转子将被 反弹,系统运动将转化为瞬态自由横向振动。振动 频谱分析可以清楚地看出,旋转频率即 1 倍频 $(\frac{3150 \text{ r/min}}{60} = 52.33 \text{ Hz})$ 和低频分量 $(\frac{785 \text{ r/min}}{60} =$ 13.08 Hz)出现。低频分量与转子和定子耦合系统的 固有频率有关。



图 12 碰摩时盘车端轴承相对轴振波形图 Fig.12 Waveform diagram of relative shaft vibration of turning end bearing during rub impact

转子、定子发生碰摩接触时低频振动响应机理 的类似解释在相关文献中均有阐述^[12,22-23]。线性动 静碰摩模拟得到的振动响应频谱中包含 13.08 Hz, 与转子轴承系统的一阶横向固有频率接近(实测值 12.73 Hz、制造厂计算值12.5 Hz)。模拟值较高的原 因是碰摩的耦合与刚度增加效应,系统的固有频率 会有所增加(13.08 Hz)。因此,当碰摩冲击是轴系的 一个主要振源时,可能会激发转子轴承系统一阶横 向固有频率振动响应,造成转子失稳。





4 结束语

对于低频自激振动,当排除了汽流激振、转子内 腔部分积液、转子材料内阻和结构内阻等诱发原因 后,主要考虑轴承失稳和动静碰摩故障。文中首先 通过调相机转子动力稳定性核算,确认轴系的失稳 转速和工作转速对数衰减率均合格,而影响轴系稳 定性的轴系安装数据和运行参数核查也未发现问 题,排除了轴承失稳的可能性。然后重点排查动静 碰摩,为保证工期,轴承不进行解体处理。

在检查中发现盘车箱挡油板和励端轴承内侧挡 油盖处有较严重碰摩。进一步模拟了调相机转子发 生动静碰摩的动力响应,发现转子可能出现自激低 频振动。碰摩故障消除后机组启动,自激低频振动 消失。

轴系动力失稳对高速涡轮机械的运行危害性极 大。大多数"失稳"是由于转子密封、轴承等部件中 可变流体动压产生的交叉耦合力诱发的,作用于转 子正向进度的方向,使转子发生次同步低频振动。 轴承失稳和动静碰摩在振动故障中是两类常见的振 动,但一般的经验总会将低频振动等同于轴承失稳, 转子热弯曲工频振动等同于动静碰摩。本例是一起 典型的动静碰摩诱发转子低频自激振动的案例,故 障的分析治理拓展了对低频振动机理的认知,对于 动静碰摩故障的诊断分析具有借鉴和指导意义。

参考文献

- [1] 宋光雄,张亚飞,宋君辉,等.大型汽轮发电机组碰摩故障案例 研究及分析[J].汽轮机技术,2013,55(4):241-246.
 SONG Guangxiong, ZHANG Yafei, SONG Junhui, et al. Case research on rub-impact fault of large turbine generator unit [J]. Turbine Technology,2013,55(4):241-246.
- [2] 刘晓锋,陆领元.迷宫密封转子动特性三维 CFD 数值的研究
 [J].热能动力工程,2006,21(6):635-639,659.
 LIU Xiaofeng, LU Songyuan. A study of methods used for three-dimensional CFD (computational fluid dynamics) numerical analysis of dynamic characteristics of rotors with labyrinth seals
 [J].Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2006, 21(6):635-639,659.
- [3] 虞烈,刘恒.轴承-转子系统动力学[M].西安:西安交通大学出版社,2001.
- [4] 马运翔,薛江涛,刘晓锋,等.1000 MW二次再热超超临界汽轮机 组摩擦故障分析与处理[J].电力工程技术,2017,36(1):113-116.
 MA Yunxiang, XUE Jiangtao, LIU Xiaofeng, et al. Fault diagnosis for a rub vibration problem occurred in a 1000MW ultra – supercritical steam turbine unit with double reheat cycles [J].
 Electric Power Engineering Technology,2017,36(1):113-116.
- [5] 冯岩,王绩德,韩东江.高速涡轮发电机转子振动特性试验[J]. 噪声与振动控制,2019,39(4):95-100.
 FENG Yan, WANG Jide, HAN Dongjiang. Experimental study on rotor vibration characteristics of high speed turbine generators[J]. Noise and Vibration Control,2019,39(4):95-100.
- [6] 陆颈元.汽轮发电机组大不平衡状态下非线性振动特性研究
 [J].中国电机工程学报,1995,15(6):391-397.
 LU Songyuan. Nonlinear vibration characteristics with large unbalance of turbogenerators rotor systems [J]. Proceedings of the CSEE, 1995, 15(6): 391-397.
- [7] 王正.转动机械的转子动力学设计[M].北京:清华大学出版社, 2015.
- [8] API Rotating Equipment Subcommittee. Tutorial on the API standard paragraphs covering rotor dynamics and balancing: an introduction to lateral critical and train torsional analysis and rotor balancing: API PUBLICATION 684[S], 2nd Ed. Washington, API Standards Department, 2005.
- [9] 陆颂元.汽轮发电机组振动[M].北京:中国电力出版社,2000.
- [10] 闻邦椿.高等转子动力学:理论、技术与应用[M].北京:机械工 业出版社,2000.
- [11] JACQUET-RICHARDET G, TORKHANI M, CARTRAUD P, et al. Rotor to stator contacts in turbomachines. Review and application
 [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2013, 40 (2): 401-420.
- [12] MUSZYNSKA A, BENTLY D E. Frequency-swept rotating input perturbation techniques and identification of the fluid force models in rotor/bearing/seal systems and fluid handling machines [J]. Journal of Sound and Vibration, 1990, 143(1):103-124.

- [13] LIU Y, LI Q L, CHEN Y Z, et al. Dynamic analysis of rubbing rotor system based on hertz contact theory [J]. Advanced Materials Research, 2012, 479/480/481:743-747.
- [14] 王涛,傅行军.基于Hertz接触模型的碰摩转子动力学响应研究
 [J].汽轮机技术,2009,51(1):39-41.
 WANG Tao, FU Xingjun.Dynamic response of rub-impact rotor based on hertz contact model [J]. Turbine Technology, 2009, 51 (1):39-41.
- [15] 杨树华,杨积东,郑铁生,等.基于Hertz接触理论的转子碰摩模型[J].应用力学学报,2003,20(4):61-64. YANG Shuhua, YANG Jidong, ZHENG Tiesheng, et al. A new rotor-stator rubbing modal using hertzian impact-contact theory [J].Chinese Journal of Applied Mechanics,2003,20(4):61-64.
- [16] 凡云峰.基于接触力模型的碰摩故障转子建模与实验研究[D]. 北京:北京化工大学,2024.
- [17] 凡云峰,俞铭宏,王浩,等.面向全恢复系数的碰摩故障接触力分析与试验研究[J/OL].机械工程学报,1-12[2024-05-20].http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20240509.0914.020.html. FAN Yunfeng, Yu Minghong, Wang Hao, et al. Analysis and experimental study on contact force of rub-impact fault oriented to full coefficient of restitution [J / OL]. Journal of Mechanical Engineering, 1-12 [2024-05-20].http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2187.TH.20240509.0914.020.html.
- [18] 顾家翊.碰摩故障下转子弯扭耦合振动特性分析[D].南京:南 京航空航天大学,2019.
- [19] LIU Y, ZHAO Y L, LI J T, et al. Application of weighted contribution rate of nonlinear output frequency response functions to rotor rub-impact[J].Mechanical Systems and Signal Processing, 2020,136:106518.
- [20] 张娅,陈康,王维民,等.考虑气流激振下汽轮机转子系统碰摩 动力学特性研究[J].北京化工大学学报:自然科学版,2019,46 (1):76-83.

ZHANG Ya, CHEN Kang, WANG Weimin, et al. The dynamic

(上接第85页)

ZHANG Hao, WANG Yimeng, SANG Weijing, et al. Dynamic bandwidth scheduling technology for delay – sensitive passive optical network based on spatio – temporal traffic prediction [J]. Shandong Electric Power, 2024, 51(9):37-45.

- [22] FALK J, HELLMANNS D, CARABELLI B, et al. NeSTiNg: simulating IEEE time-sensitive networking (TSN) in OMNeT[C]// 2019 International Conference on Networked Systems (NetSys). IEEE,2019;1-8.
- [23] BAUTISTA P A B, URQUIZA-AGUIAR L F, CÁRDENAS L L, et al.Large-scale simulations manager tool for OMNeT++: expediting simulations and post-processing analysis [J].IEEE Access, 2020, 8:159291-159306.
- [24] WANG Y, CHENG Y F, ZHUANG Z H, et al. Joint routing and GCL scheduling algorithm based on tabu search in TSN[C]//2023
 19th International Conference on Network and Service

behavior of the rotor system of a steam turbine subjected to rubimpact and fluid excitation at different locations [J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology: Natural Science Edition, 2019, 46(1):76-83.

- [21] MA H, ZHAO Q B, ZHAO X Y, et al. Dynamic characteristics analysis of a rotor-stator system under different rubbing forms [J]. Applied Mathematical Modelling, 2015, 39(8):2392-2408.
- [22] 陈巍,杜发荣,丁水汀,等.超高速转子系统动力学特性(Ⅱ):碰 摩转子[J].推进技术,2012,33(6):866-874.
 CHEN Wei, DU Farong, DING Shuiting, et al. Research on dynamic characteristics for a super-high speed rotor system Ⅲ: rotor system with rubs[J].Journal of Propulsion Technology,2012, 33(6):866-874.
- [23] 陈予恕,丁千,孟泉.非线性转子的低频振动失稳机理分析[J].
 应用力学学报,1998,15(1):115-119.
 CHEN Yushu, DING Qian, MENG Quan. Analysis of instability mechanism of nonlinear rotor under low frequency vibration [J].
 Chinese Journal of Applied Mechanics, 1998, 15(1):115-119.

收稿日期:2024-05-24

修回日期:2024-10-16

作者简介:

汪海洋(1990),通信作者(hhuwanghaiyang@163.com),男,硕士, 工程师,主要研究方向为特高压交直流运检、大型同步调相机运检 技术;

刘晓锋(1976),男,博士,正高级工程师,主要研究方向为转子动 力学、振动监测和故障诊断;

刘一丹(1972),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为特高压交 直流运检、大型同步调相机运检技术;

何小锋(1983),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为流体机械 振动监测和故障诊断;

蔡 丹(1981),男,硕士,正高级工程师,主要研究方向为过程 控制。

(责任编辑 车永强)

Management (CNSM).IEEE, 2023:1-5.

[25] BUJOSA D, ASHJAEI M, PAPADOPOULOS A V, et al. HERMES: heuristic multi-queue scheduler for TSN time-triggered traffic with zero reception jitter capabilities [C]//Proceedings of the 30th International Conference on Real-Time Networks and Systems. ACM, 2022:70-80.

收稿日期:2024-11-28

修回日期:2025-01-24

作者简介:

李 伟(1975),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为电力通信;

白 杨(1995),男,硕士,工程师,主要研究方向为数据网络;

祁步仁(1994),男,硕士,工程师,主要研究方向为电力通信;

徐 建(1979),通信作者(dolphin.xu@njust.edu.cn),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为网络优化、智能运维。

(责任编辑 张丹丹)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2025.06.010

调相机空冷岛风机故障仿真分析及措施建议

郝亚楠^{1,2*},王 俊¹,颜 庆¹,李贵海³,郭 语¹

(1.国网山东省电力公司电力科学研究院,山东 济南 250003;2.山东省智能电网技术创新中心,山东 济南 250003;3.山东中实易通集团有限公司,山东 济南250003)

摘要:西北缺水地区调相机多采用闭式外冷水系统(干湿联合),该系统主要由空冷岛和蒸发冷却塔组成。部分站调相机 空冷岛风机自投运以来电机烧毁严重,导致换热效果大幅下降,严重影响机组安全稳定运行。通过对空冷岛运行状况现 场勘查测试,发现变频风机和工频电机烧毁数量有所差异。仿真分析发现以下问题:设计时变频风机使用的是变频器+ 常规电机的方式,因变频器为一拖多方式导致脉冲电压过大、破坏绕组绝缘;站址位于西北地区,风沙大,空冷岛缺少防 护措施,换热器翅片堵塞严重;侧风影响严重,气流组织倒灌导致换热效果不佳;电机选型不满足要求,电机防护等级低, 导致电机进水生锈。针对以上情况,提出更换轴承使用寿命长、防护等级更高的专用变频电机,风机拆除风筒和风阀改 为加装防冻棚等措施。

关键词:调相机;空冷岛;风机;变频器 中图分类号:TO085+.4 文献;

文献标志码:A

文章编号:1007-9904(2025)06-0095-10

Fault Simulation Analysis and Measures for the Synchronous Condenser Air Cooling Island Fan

HAO Yanan^{1,2*}, WANG Jun¹, YAN Qing¹, LI Guihai³, GUO Yu¹

(1.State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250003, China;

2. Shandong Smart Grid Technology Innovation Center, Jinan 250003, China;

3.Shandong Zhongshi Yitong Group Co., Ltd., Jinan 250003, China)

Abstract: The closed external cold water system (dry and wet combination) is mainly used in the water shortage area in northwest China, which is mainly composed of air cooling island and evaporative cooling tower. Since the air cooling island fan of some stations has been put into operation, the motor has been burned seriously, resulting in a significant decrease in heat transfer effect, which seriously affects the safe and stable operation of the unit. Through the field investigation and test of the operation condition of the air cooling island, it is found that there is a difference in the number of burnout between the frequency conversion fan and the power frequency motor. The following problems are found in the study and analysis: the frequency converter + conventional motor is used in the design of the inverter, because the frequency converter is a multimode, the pulse voltage is too large to destroy the winding insulation; The site is located in the northwest of China, the air cooling island lacks protective measures, and the heat exchanger fins are clogged seriously. Crosswind has a serious effect, and the airflow structure backfilling leads to poor heat transfer effect. Motor selection does not meet the requirements, the motor protection level is low, resulting in motor water rust. In view of the above situation, it is proposed to replace the special frequency conversion motor with long bearing life and higher protection grade, and remove the air duct and air valve of the air cooling island fan to install an anti-freezing shed.

Keywords:synchronous condenser; air cooling island; fan; converter

0 引言

随着我国特高压电网的快速建设投产,电网特性已经发生较大变化^[1-2]。直流换流站送、受端电网

基金项目:基金项目:国网山东省电力公司电力科学研究院自主研发 项目(ZY-2023-10)。

Independent Research and Development Project of State Grid Shandong Electric Power Research Institute(ZY-2023-10).

无功支撑能力不足,电压波动明显。新能源尤其是 风电和光伏容量的不断增大,因其发电的不连续性, 在并网后会对电网造成较大的冲击。大型调相机具 备暂动态特性优、运行维护方便和安全可靠性高的 特点,可根据电网需求自动快速调整无功输出,增强 受端电网的电压稳定性和抵御故障事件能力,提升 跨区输电能力和新能源消纳能力^[3-6]。调相机运行 时其定子和转子会产生较多的热量,首先热量通过 自身的冷却器传递出去,经过外冷却系统最终将热 量传至室外^[7]。

西北地区送端换流站配置空冷型调相机,通常 300 Mvar调相机正常运行时产热功率约为4200 kW, 其热量主要靠外冷系统带走^[6]。考虑地域缺水的特 性,送端站多采用空冷岛+蒸发冷却塔的干湿联合冷却 方案。多站自投运以来空冷岛风机频繁出现电机烧毁 故障,严重影响机组的换热效果,存在较大的运行 隐患。

1 调相机空冷岛概况

某西北受端换流站共配置两台调相机,采用空 冷岛+蒸发冷却塔的闭式外冷水系统,如图1所示。 空冷岛风机配置在换热器上部,为引风式。

M11	M12	M13	M14	M15	M16
M21	M22	M23	M24	M25	M26
M31	M32	M33	M34	M35	M36
M41	M42	M43	M44	M45	M46
M51	M52	M53	M54	M55	M56
M61	M62	M63	M64	M65	M66
M71	M72	M73	M74	M75	M76
M81	M82	M83	M84	M85	M86
M91	M92	M93	M94	M95	M96
M101	M102	M103	M104	M105	M106

注:风机编号M11为1行1列风机,前3列为变频风机,后3 列为工频风机。

图1 调相机闭式外冷水系统

Fig.1 Condenser closed external cold water system

调相机外冷系统空冷岛为避免冬季检修施工时 管道冻裂漏水,风机加装了风筒和风阀。

每台调相机空冷岛配 60 台风机,电机拖动方 式分变频和工频两种,共分为 10 组,每组工频和 变频各 3 台,每组变频风机电机由 1 台变频器控 制。空冷岛风机为施乐百双速电机,采用三角形 接线方式,拖动电机额定功率 2.79 kW,风机额定风 量 27 000 m³/h,静压 170 Pa。

该站调相机自投运以来风机共烧毁 51 台,其 中工频 17 台,变频 34 台。对更换下的烧毁电机 拆解,发现主要存在以下现象:一是电机内部轴 承损坏导致定、转子扫膛;二是电机内部进水 生锈。

现场勘测发现空冷岛设计、电机选型、电气设 计不合理,风机运行在不稳定区,风机运行时振 动大等问题,是导致风机电机烧毁的主要原因。 通过开展现场测试进一步研究分析电机烧毁 原因。

2 风机测试

2.1 测试对象

现场查阅分散控制系统(distributed control system, DCS)后台发现,风机种类有变频非满频、变频满频和工频三种;风阀约束情况分为强制立起和自由状态两种。选取1号调相机空冷岛风机进行测试。

2.2 测试方案

测量环境风速、电机电气参数、风机风压及流量等,查找空冷岛设计缺陷,分析环境风速、风阀、换热器堵塞等因素对空冷岛运行的实际影响。

1)用尺寸测量工具复核与风机相关的关键基础 尺寸数据。

2)测量风机风量、振动、电压值。

风量通过风速仪实测风速,结合迎风面积进行 换算。风速通过在每台风机的迎风面上划设9×5的 九宫格,均匀选出45个点分别测量风速并求平均 值,如图2所示。

通过手持式振动测试仪测量风机纵向、横向和 竖直三个方向振动值,如图3所示。

3)采用示波器对变频风机的尖峰电压进行测量,以确定扰动电压的具体情况。



图2 风速测量点位示意图 Fig.2 Wind speed measuring points diagram





3 测试结果

3.1 基础尺寸复核

测量风筒出风口直径为1030mm,风阀阀座宽 度为135mm,据此可知,即使风阀完全强制立起,出 风口仍然有16.5%的面积被遮挡。

实测单台风机迎风面的尺寸为2000 mm× 1150 mm,面积为2.31 m²。

3.2 测试结果

对风机入口风量进行全面测量,最大风量为

23 753 m³/h,最小风量为9 501 m³/h,平均风量(工频运行)为16 141 m³/h,远低于设计风量(27 000 m³/h),如图4所示。



3.3 测试电机处电压尖脉冲

为研究变频风机烧毁的情况,对采用相同型号 电机的两个调相机站的空冷岛进行测试,其中A站 电气回路中未配置正弦波滤波器,B站电气回路中 加装了正弦波滤波器。测试变频风机处的电压尖脉 冲值,A站电机处尖峰电压最高 810 V,B站电机处 尖峰电压最高 340 V。

3.4 测试运行风机的振动值

对 60 台风机的振动情况进行测量,其中有 3 台风 机已经损坏,风机纵向、横向和竖直振动值如表 1 所示。

4 原因分析

4.1 空冷岛设计问题

空冷岛选用风机原设计运行风量约为 27 000 m³/h, 静压为 170 Pa。

空冷岛未设计防冻棚,为避免冬季施工时管道 冻裂,在风机上部加装了风筒和风阀,空冷岛下部敞 开区域设有卷帘门。由于增设风筒和风阀改变了空 冷岛的最初设计结构,其出口风阻增加,改变了风机 运行工况。

风机阻力由风阀阻力、换热器阻力、结构附加阻 力三部分组成。根据现场实测,风阀阀板材质为钢 板,厚度约为1.5 mm。参考实测风阀开启高度,开启 角度取35°,理论阻力计算如表2所示。

山东电力技术

	表1 空冷岛风机振动阻								
	Table	1 Vibra	ation va	alue of a	ir cooli	ing isla	and fan		
方向	振动值	风机	方向	振动值	风机	方向	振动值	风机	方向
\perp	2.5		\perp	2.9		\perp	2.8		\bot

丰1 穴公包図初振动仿

单位:mm/s

风机	方向	振动值															
	\perp	3.7		\perp	2.5		\perp	2.9		\perp	2.8		\perp	3.1		\bot	4.5
M11	_	5.3	M12	_	2.7	M13	_	2.7	M14	_	2.6	M15	_	4	M16	_	4.8
	\odot	6.3		\odot	3.1		\odot	2.6		\odot	2.3		\odot	3.7		\odot	5.1
	\perp	3.5		\perp	3.1		\perp	2.5		\perp	2.6		\perp	5.4		\bot	5
M21	_	3.6	M22	—	2.4	M23	_	2.6	M24	_	2.2	M25	_	4.5	M26	_	4
	\odot	3.9		\odot	3.4		\odot	2.2		\odot	3.7		\odot	4.1		\odot	5.2
	\perp	3.3		\bot	4		\bot	5.4		\perp	5.5		\perp	5.5		\bot	5.3
M31	_	3.6	M32	—	4.1	M33	—	5	M34	—	5.6	M35	—	6.1	M36	—	5.1
	\odot	3.9		\odot	3.5		\odot	4.3		\odot	4.5		\odot	4.2		\odot	3.7
	\perp	3.3		\perp	3.3		\perp	3.6		\perp			\perp	3.9		\perp	6.8
M41	—	3.1	M42	—	2.3	M43	—	2.5	M44	—	坏	M45	—	4.5	M46	—	7.4
	\odot	3.4		\odot	3.8		\odot	2.6		\odot			\odot	4.5		\odot	3.3
	\perp	5.9		\perp			\perp	4.2		\perp	4.1		\perp	9.5		\bot	4.5
M51	—	5.1	M52	—	坏	M53	—	4.8	M54	—	3	M55	—	9.5	M56	—	6.5
	\odot	2.4		\odot			\odot	2.9		\odot	3.1		\odot	4.6		\odot	3.4
	\perp	3.2		\perp	2.9		\perp	4.2		\perp	3.8		\perp	6.3		\perp	5.9
M61	—	2.7	M62	—	2.8	M63	—	4.6	M64	—	4.2	M65	—	5.4	M66	—	5.7
	\odot	2.4		\odot	3.5		\odot	3.4		\odot	4.1		\odot	3.6		\odot	4.4
	\perp	2		\perp	7.7		\bot	12		\perp	2.5		\perp	3.3		\bot	3.8
M71	—	1.7	M72	—	4.5	M73	_	11	M74	_	3	M75	_	2.5	M76	_	2.9
	\odot	1.8		\odot	2.4		\odot	6.9		\odot	3.7		\odot	3.3		\odot	3.7
	\perp	2		\perp	1.1		\perp	2.3		\perp	7.4		\perp	2.7		\perp	5
M81	_	1	M82	_	1	M83	—	2.2	M84	—	9.8	M85	—	2.5	M86	_	3.5
	\odot	1.7		\odot	1.2		\odot	2.3		\odot	4.2		\odot	3.2		\odot	4.9
	\perp	4.6		\perp	4.4		\perp	2.8		\perp	2.7		\perp	2.9		\bot	3.1
M91	_	4.3	M92	_	3.9	M93	_	2.8	M94	_	2.4	M95	_	2.3	M96	_	2.7
	\odot	4.6		\odot	4		\odot	2.6		\odot	3.5		\odot	2.5		\odot	3.2
	\perp			\perp	3.1		\perp	2.5		\perp	3		\perp	3		\bot	3.5
M101	_	坏	M102		2.9	M103	—	2.6	M104	_	3.6	M105	—	4.2	M106	—	3.4
	\odot			\odot	3.3		\odot	3.5		\odot	3.7		\odot	3.1		\odot	3.8

注: 上为纵向, 一为横向, ①为竖直方向。

表2 风阀阻力计算 Table 2 Air valve resistance calculation

参数	数值				
风阀半径/m	0.54				
面积/m²	0.46				
厚度/mm	1.5				
密度/(kg/m³)	7.85				
重量/kg	5.39				
重力/ N	52.86				
压强(垂直阀板)/Pa	115.40				
角度/(°)	35				
弧度/rad	0.61				
余弦	0.82				
压降/ Pa	140.87				

根据表2计算结果可知,风阀阻力约为141 Pa。 查询供应商提供的空冷岛选型界面可知,换热 器阻力为149 Pa。结构附加阻力根据经验取20 Pa, 设计风阻为149+20=169(Pa)。

加装风阀和风筒后在设计风量下计算总阻力为 141+149+20=310(Pa),偏离设计运行工作点静压。

根据风机阻力与风机性能得出实际运行工作点 风量约为 20 800 m³/h,静压为 230 Pa。现有空冷岛 按换热裕量 30% 设计,因加装风阀风机风量降为原 设计值的 77% 左右。由于换热器效率整体下降,导 致在夏季高温时段工频风机与变频风机均须满负荷 运行,加速了电机的损坏。

4.2 风机运行问题

根据计算风机实际运行时的静压为 230 Pa,由 图 5 可知,工作点处于风机性能曲线的不稳定区域 (驼峰区),即在同一个静压值上会对应 3 个不同的 风量点,将引起间断性风量、风压的急剧波动以及机 体的振动(喘振)。风机喘振是风机的固有现象,风 机启动时入口导叶速度逐渐增大,风机出口空气压 力逐渐增大,出口空气压力如果大于外界空气压力 则向外界出风,反之空气会倒回至风机,如此反复则 会出现风机的喘振^[8]。长期运行造成轴承的磨损、 升温乃至烧坏,同时电机负载的长期频繁波动,造成 电流波动,易加剧线圈老化。



Fig.5 The actual operating point of the fan

4.3 电机选型问题

电机的选用须考虑有功功率、尺寸、转速、能效 等参数,还须根据应用场景选择电机防护能力^[9-10]。 目前针对旋转电机整体结构防护等级采用标准 GB/T 4942—2021《旋转电机整体结构的防护等级 (IP代码)分级》^[11]。

电机为德国施乐百双速电机,防护等级为IP54,防尘防溅水,且具备泄水孔(定期开启),不适用于露天环境。产品说明书中轴承设计寿命为30000~40000h。查阅设计说明发现,变频电机应使用专用变频电机,并选用不低于IP55防护等级,其轴承使用寿命为100000h。

该站地处西北地区,昼夜温差较大,电机选型与 设计不符,同时空冷岛未安装防冻棚,后期运行将风 阀长期立起,且未有防雨措施,电机内部进水后生锈 导致电机损坏。

4.4 换热器翅片堵塞

换热器翅片常用横向翅片,主要分为绕片式和 穿片式。该站换热翅片选用穿片式,翅片较绕片式 排列更为紧密,间隙仅为2.3 mm,易造成污堵且不易 清洗。

有学者研究表明,换热器翅片表面积灰和其他 杂质沉积,将会导致传热系数降低以及翅片间的流 通面积减少、通风量降低。翅片表面积灰厚度每增 加0.1 mm,翅片间隙的通风面积降低4%左右,空冷 单元通风量也会相应减少^[12]。

该站调相机空冷岛位于换流站边缘,无围挡,且 距离地面高度较低,受到现场风沙直接冲击,空冷器 管束翅片存在严重污堵,部分位置已被堵死,该位置 测点风速为0m/s,如表3所示。换热器整体换热效 率下降,导致风机长时间运行。加之昼夜温差大,工 频风机频繁启停,风机使用寿命降低。

表3 风机M71换热器入口风速

Table 3 Inlet wind speed of M71 fan heat exchanger

					单位:m/s
测点	横向1	横向 2	横向3	横向4	横向5
纵向1	0.7	0.4	0.6	0	0.7
纵向 2	1.4	1.0	0.9	1.5	1.3
纵向 3	1.6	1.1	1.1	1.3	1.3
纵向4	1.9	1.0	1.0	1.2	1.3
纵向 5	1.6	1.1	1.0	1.1	1.0
纵向6	1.6	1.2	1.0	1.1	0.5
纵向7	1.3	1.0	0.8	0.9	0.6
纵向8	0.8	0.5	0	0.4	0.6
纵向9	0.5	0.4	0	0.7	0.6

4.5 电气设计问题

空冷岛采用变频风机和工频风机组合的方式, 变频风机可以起到节能降效的作用。变频风机可以 采用工频风机+变频器的方式或者专用变频风机。 由于变频器的开关频率较高,一般在 2.5~4 kHz,且 变频器输出的脉冲边沿陡,脉冲经过长电缆传输至 电机,由于电缆存在的漏电感和耦合电容,在电机端 产生电压反射和高频阻尼振荡现象,从而产生过电 压,加快电机绕组绝缘老化,甚至会击穿绝缘^[13-16]。

变频器出口电压变化率较高且沿电缆传播时会 逐渐放大,当大于500 V/µs时,将破坏电机绝缘及轴 承,应在变频器出口加装正弦波滤波器,或选用变频 专用电机。根据设计经验,当电缆长度超过50m时 应在变频器出口加装正弦波滤波器。

A站变频风机采用变频器+常规电机模式,且为 一拖三,现场测试及查阅图纸发现从变频器至电机 处的电缆长度超过150m。通过功率分析仪采集到 电压尖脉冲最大达 810 V。

B站变频风机采用变频器+常规电机模式,且为 一拖四,其变频器出口加装了正弦波滤波器,现场测 试及查阅图纸发现从变频器至电机处的电缆长度超 过180m。通过功率分析仪采集到电压尖脉冲最大 达340 V。

变频风机运行时存在超出额定电压1倍多的尖 峰电压,尖峰电压在击穿绕组的同时也会向轴承放 电,破坏轴承润滑。轴承损坏后导致电机振动大,直 至转子扫膛电机烧毁。

4.6 风机振动问题

对表1中风机振动普测数据分析发现,仅有6 台风机振动超过厂家振动标准(大于 6.5 mm/s);而 根据行业标准 JB/T 8689—2014《通风机振动检测及其 限值》,则有19台风机振动超标(大于4.6 mm/s)^[17];由于 没有详细分级,查阅相关国际标准 ISO 10816-1-1995 «Mechanical vibration—Evalution of machine vibration by measurements on non-roating parts》中振动分级^[18], 如表4所示,空冷岛风机适用于 I 类设备振动级别, 仅有1台风机(M82)振动较小,其他风机振动水平普 遍较高(C级及以上),如图6所示,表明空冷岛支撑 系统刚度偏低。

表4 设备振动级别分类

Table 4 Classification of the equipment vibration levels

单位:mm/s 设备类别 振动范围 I类 Ⅱ类 Ⅲ类 Ⅳ类 [0, 0.28](0.28, 0.45]A (0.45, 0.71](0.71, 1.12]В (1.12, 1.8]В (1.8, 2.8]С В (2.8, 4.5]С В (4.5, 7.1]С (7.1, 11.2]D С (11.2, 18](18, 28]

注: [类为≤15 kW的小型设备;]] 类为>15 kW 且≤75 kW的 中型设备:Ⅲ类为重型基础上的大型设备:Ⅳ类为专用基础 上的大型设备,如汽轮机。A(蓝色)代表良好;B(黄色)代表 尚可;C(橙色)代表不许;D(红色)代表危险。

100

M11	M12	M13	M14	M15	M16	
M21	M22	M23	M24	M25	M26	
M31	M31 M32 M M41 M42 M		M34 M35		M36	
M41			M44(坏)	M45	M46	
M51	M52(坏)	M53	M54	M55	M56	
M61	M62	M63	M64	M65	M66	
M71	M72	M73	M74	M75	M76	
M81	M82	M83	M84	M85	M86	
M91	M92	M93	M94	M95	M96	
M101(坏)	M102	M103	M104	M105	M106	

注:黄色代表尚可;橙色代表不许;红色代表危险。

图 6 空冷岛风机振动水平 Fig.6 Vibration level of air cooling island fan

电机为外转子结构,叶片固定在电机外壳上,电 机整体安装在风筒上,风筒为铁皮材质,厚度较薄, 固定刚度较差,风机运行过程中的侧风作用及风机 不平衡力是造成风机单体和整体桥架产生振动的主 要激振力,导致风机运行时振动较大^[19]。

自立式风阀不能保持稳定的开启角度,成为高 速出风气流的干扰因素,加剧了风量风压的波动以 及机体振动,长期运行造成轴承磨损和电机损坏。

4.7 侧风影响仿真计算

现场测试横向侧风风速达 10 m/s 以上,风机上 部加装了风阀,会产生风回流倒灌的现象。环境风 速较大时,换热器内部热空气逆向流动与入口冷却 空气混合,使风机出口冷却空气温度升高。当存在 横向侧风时,换热器出口的热空气被横向自然风压 住,热风不能及时排至环境中,使得换热器处于温 度较高的区域,换热温差变小,换热效率下降。有 学者研究表明,空冷岛风机的抽吸作用会在翅片下 方形成负压区,当受到侧风影响时,空气将不再以 垂直方向进入换热器,导致进气量减少、换热效率 变差^[20-21]。

为采取有效措施降低侧风对空冷岛换热效果 的影响,通过数学仿真建模进行研究。首先现场 测量整个空冷岛的参数,构建几何模型,如图 7 所示。





根据空气动力学方程搭建数学模型。 质量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \nabla(\rho u) = 0 \tag{1}$$

式中: ρ 为密度;u为流体速度; $\nabla(*)$ 为变量*的梯度运算。

动量守恒方程为

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \nabla(\rho u^2) = -\nabla p + \nabla [\mu (\nabla u + \nabla u^T)] + \rho g + F (2)$$

式中:g 为重力加速;F 为物体动量;p 为压力; μ 为速
度散度; μ 为流体的黏度。

湍流方程(标准k-ε方程)为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \nabla(\rho u k) = \nabla(\mu_{\text{eff}} \nabla k) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k(3)$$
$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \nabla(\rho u \varepsilon) = \nabla(\mu_{\text{eff}} \nabla \varepsilon) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3\varepsilon} + G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_{\varepsilon}$$
(4)

式中: ε 为 ε 方程湍流普朗特数;k为k方程湍流普朗 特数; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 为经验常数; μ_{eff} 为流体黏性; G_k 为层 流速度梯度产生的湍流动能;G_b为浮力产生的湍流 动能;S_k、S_c为自定义参数;Y_M为在可压缩湍流中波动 膨胀对总耗散率的贡献。

基于数学模型式(1)一式(4),应用 ANSYS fluent软件,仿真侧风对风机出口风量的影响。

采用风机特性曲线作为风机进口边界条件,改

变水平侧风风速,仿真风机出口风量的变化,研究 水平侧风对风机出口流场的影响规律。分别选取 侧风速度为1m/s、5m/s、10m/s、15m/s进行仿真, 如图8所示,发现侧风速度与风机出口流场紊流程 度正相关,将导致风机出口风压增大,从而影响风 机功率。





仿真计算侧风速度与风机功率关系,如图9所示,发现水平侧风对风机出口流场和风机功率有较大影响,当水平侧风风速超过13 m/s时,风机处于不稳定工作区,极端不稳定下,会发生喘振现象,严重的时候会导致风机失速、叶片等机械部件损坏,亟须进行侧风导流。





对侧风导流进行仿真,分别选择5m/s、10m/s、

15 m/s风速下,研究侧风导流角度变化对风机出口流场的影响规律,如图 10一图 13 所示,发现同一导流角度下侧风速度与风机出口流场紊流正相关,导致风机出口风压增大,而同一风速下随着导流角度的增大,风机出口流场紊流程度先增加后减小,导致风机出口风压先增大后减小,其风机出口风压越大则风机功率越大、风机风量越小。








综上可知,侧风对风机风量和风机功率有较大 影响,而导流板可有效改善侧风影响,但不同导流角 度对侧风影响的抑制效果也有所不同。选取侧风速 度 10 m/s时仿真侧风导流角度与风机风量和风机功 率关系,如图 14 所示,发现导流角度在-40°~10°时,风 机风量低且耗功大,不利于风机稳定运行,而导流角度 大于 50°时,风机风量高且耗功小,风机运行状况好。



Fig.14 Relationship between crosswind diversion angle, fan air volume and power when crosswind speed is 10 m/s

5 结束语

空冷岛风机加装的风筒、风阀及现场的侧风影 响改变了风机运行工况,大幅降低了风机风量,使风 机运行在不稳定区域,导致风机振动偏大。换热器 翅片堵塞加重了冷却风量不足问题,导致风机长期 满负荷运行,加速风机损坏。电气设计不合理,变频 电机处电压尖脉冲过大击穿绝缘、破坏轴承润滑是 导致变频风机损坏的主要原因。对此提出以下措施 建议:

1)对于空冷岛设计问题,应拆除风机风阀和风筒,降低其出口风阻,加装防冻棚或者安装导流角度 大于 50°的导流板,可有效降低水平侧风影响。

2)对于风机运行问题,应选择高压头、大风量风 机,确保空冷岛的换热能力满足设计要求。同时换 型风机性能曲线应是平滑的曲线,无驼峰区,保证风 机始终处于稳定运行状态。

3)对于翅片堵塞问题,应在换热器底部增加可 拆卸滤网,同时加装自动清洗装置,防止风沙过大导 致翅片堵塞。

4)对于电气设计问题,应在电气回路中加装合 适的正弦波滤波器,或将工频电机+变频器的组合方 式改为专用变频电机。

5)对于风机振动问题,拆除风阀和风筒后应对风 机桥架进行加固,并对桥架安装位置的铁皮进行加厚。

参考文献

 [1] 郑超,马世英,申旭辉,等.强直弱交的定义、内涵与形式及其应 对措施[J].电网技术,2017,41(8):2491-2498.
 ZHENG Chao, MA Shiying, SHEN Xuhui, et al. Definition,

郝亚楠,等:调相机空冷岛风机故障仿真分析及措施建议

connotation and form of strong HVDC and weak AC and countermeasures for stable operation of hybrid power grid [J]. Power System Technology, 2017, 41(8): 2491-2498.

[2] 李勇.强直弱交区域互联大电网运行控制技术与分析[J].电网 技术,2016,40(12):3756-3760.

LI Yong. Technology and practice of the operation control of large power grid connected with weak AC area [J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3756–3760.

- [3] 阮羚,王庆,凌在汛,等.新型大容量调相机性能特点及工程应用[J].中国电力,2017,50(12):57-61.
 RUAN Ling, WANG Qing, LING Zaixun, et al. Study on the performance feature and key engineering application of new large capacity condenser[J].Electric Power,2017,50(12):57-61.
- [4] 李大虎,李佳,周悦,等.常规直流送端近区电网中调相机和柔性直流的无功协调控制[J].电力建设,2023,44(12):148-160.
 LI Dahu, LI Jia, ZHOU Yue, et al. Reactive power-coordinated control of a synchronous condenser and VSC-HVDC in the sending-side near region power grid of an LCC-HVDC[J].Electric Power Construction, 2023, 44(12):148-160.
- [5] 刘振亚,张启平,王雅婷,等.提高西北新甘青750kV送端电网 安全稳定水平的无功补偿措施研究[J].中国电机工程学报, 2015,35(5):1015-1022.

LIU Zhenya, ZHANG Qiping, WANG Yating, et al. Research on reactive compensation strategies for improving stability level of sending-end of 750 kV grid in Northwest China[J].Proceedings of the CSEE, 2015, 35(5): 1015-1022.

- [6] 张兴,李旭,田杰,等.构网型储能与调相机的暂态过电压抑制能力对比研究[J].浙江电力,2024,43(2):88-95.
 ZHANG Xing, LI Xu, TIAN Jie, et al. Comparison of transient overvoltage suppression capability of grid-forming converter and synchronous condenser[J].Zhejiang Electric Power, 2024, 43(2): 88-95.
- [7] 李贵海,郝亚楠,高坚,等.大型调相机组循环水阻垢缓蚀剂性能分析及应用[J].山东电力技术,2021,48(9):40-43.
 LI Guihai, HAO Yanan, GAO Jian, et al. Performance analysis and application of circulating water scale and corrosion inhibitor for large condenser[J].Shandong Electric Power,2021,48(9):40-43.
- [8] 李雁,丁理格,黄愿,等.风机的防喘振控制及优化浅析[J].仪器仪表用户,2021,28(3):99-102.
 LI Yan, DING Lige, HUANG Yuan, et al. Analysis on blower anti surge control and optimization [J]. Instrumentation, 2021, 28(3): 99-102.
- [9] 庄少红,谭耀堂,黄嘉彬,等.电机整体结构的防护等级标准解 读及案例分析[J].环境技术,2023,41(6):170-175. ZHUANG Shaohong, TAN Yaotang, HUANG Jiabin, et al. Standards interpretation and case analysis of degrees of protection provided by the integral design of electrical machines [J]. Environmental Technology,2023,41(6):170-175.
- [10] 黄永,高方明.国内电机防护类型与国际标准大气腐蚀性类别的对应关系浅谈[J].电气防爆,2018(3):26-28.

HUANG Yong, GAO Fangming. A brief talk on relationship between domestic motor protection types and international atmospheric corrosion standards[J].Electric Explosion Protection, 2018(3):26–28.

- [11] 全国旋转电机标准化技术委员会.旋转电机整体结构的防护等级(IP代码)分级:GB/T 4942-2021[S].北京:中国标准出版 社,2021.
- [12] 丁振宇.防风网对直接空冷岛外部流场影响的数值研究[D].保 定:华北电力大学(河北),2011.
- [13] 马文忠,李耀华,孔力.潜油电泵变频驱动负面问题研究[J].石 油学报,2006,27(2):133-136.
 MA Wenzhong, LI Yaohua, KONG Li. Negative problems of electrical submersible pump driven by converter [J]. Acta Petrolei Sinica,2006,27(2):133-136.
- [14] 马洪飞,徐殿国,陈希有,等.PWM逆变器驱动异步电动机采用 长线电缆时电压反射现象的研究[J].中国电机工程学报, 2001,21(11):109-113.
 MA Hongfei, XU Dianguo, CHEN Xiyou, et al. Research of voltage

reflection of PWM inverter - fed induction motor with long motor leads[J].Proceedings of the CSEE, 2001, 21(11):109-113.

- [15] 行震.变频器负面效应分析与滤波器设计[D].大连:大连理工 大学,2008.
- [16] 张嵘.ESP变频驱动输出谐波影响分析及正弦波滤波器设计
 [J].电气应用,2017,36(5):62-65.
 ZHANG Rong. Analysis of output harmonic influence of ESP variable frequency drive and design of sine wave filter [J].
 Electrotechnical Application,2017,36(5):62-65.
- [17] 全国风机标准化技术委员会.通风机振动检测及其限值:JB/T 8689-2014[S].北京:机械工业出版社,2014.
- [18] Technical Committee ISO / TC 108. Mechanical vibration— Evalution of machine vibration by measurements on non-roating parts:ISO 10816-1-1995[S].ISO,1995.
- [19] 张文慎,周雷,王明生,等.百万机组空冷岛振动问题研究和治理[J].电力设备管理,2018(5):71-75.
 ZHANG Wenshen, ZHOU Lei, WANG Mingsheng, et al. Research and management of the vibration problem on megawatts unit air cooling islands [J]. Electric Power Equipment Management, 2018 (5):71-75.
- [20] 周书昌.风速变化对空冷机组风机运行的影响[J].电站辅机, 2010,31(4):26-30.
 ZHOU Shuchang.Effect of variant natural wind velocity on the fan operation in the direct air cooling power unit [J]. Power Station Auxiliary Equipment, 2010,31(4):26-30.
- [21]高沛.环境风对空冷岛换热性能的影响及其改善措施[D].北 京:华北电力大学,2015.

作者简介:

郝亚楠(1988),通信作者(haoyanan2000@126.com),男,硕士,工 程师,主要研究方向为电力水处理技术及电力用油(气)技术;

王 俊(1997),男,硕士,主要从事调相机辅机系统技术研究 工作;

颜 庆(1990),男,硕士,高级工程师,主要从事调相机热工保护 工作;

李贵海(1990),男,工程师,主要从事电力水处理技术工作;

郭 语(1995),男,硕士,主要从事调相机控制技术工作。

(责任编辑 车永强)

收稿日期:2024-04-20

修回日期:2024-08-08

2025年6月第24个全国安全生产月



反违章 除隐患 保安全 促生产



关注《山东电力技术》