

# 山东电力技术

## SHANDONG ELECTRIC POWER

山东电力技术



双高有源配电网态势感知与运行控制技术实验室

国网山东省电力公司主办

ISSN 1007-9904



# 2025.9

第52卷  
2025年9月

2025年 第52卷 第9期 (总第324期)

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  
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9期  
第52卷（总第334期）  
2025年9月25日出版

主管单位：国网山东省电力公司  
主办单位：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：陈维江 郑建华 侯保荣 雷清泉 王成山  
主任：孙岗  
副主任：王伟胜 吴文传 刘玉田 陈志勇 梁作宾  
田健

委员：（按姓氏笔画为序）

丁磊 丁勇 王波 王建东 孙波  
孙树敏 严志国 苏洲 吴秋伟 赵艳雷  
姜雨泽 郭锐 彭道刚 董泽 程新功

青年编委主任委员：姚伟 李正烁

青年委员：（按姓氏笔画为序）

丁涛 王士柏 王中冠 王彬 巨云涛  
牛涛 刘晓明 许寅 李志刚 李知艺  
杨越 沈欣炜 陈思捷 郑伟业 钟海旺  
高嵩 常馨月 薛屹洵

主编：吴文传 孟瑜

执行主编：马艳

责任编辑：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\*112\*zh\*P\* ¥18.00\*8000\*11\*2025-9\*n

# 《山东电力技术》入选 中国科技核心期刊



# “博弈论优化决策与人工智能强化学习 在电力系统与电力市场中的应用研究”专栏

《山东电力技术》

## 征稿 启事



随着新能源高比例接入和智能化技术的迅猛发展，电力系统运行与电力市场组织形式发生深刻变革。大规模分布式发电、储能设备及电动汽车等新型负荷的普及，使得传统电力系统面临更复杂的调度问题与市场机制设计挑战。博弈论与人工智能技术的融合，特别是强化学习的突破，为电力系统与电力市场优化提供了新的理论框架与实践方案。博弈论作为重要的决策分析工具，在电力市场机制设计、电动汽车调度、储能系统管理等方面已得到广泛应用。人工智能中的强化学习技术凭借其自适应性和强大的学习能力，能够有效应对高维复杂问题，优化电力系统运行与电力市场调度。

为展示博弈论优化决策与人工智能强化学习在电力系统与电力市场中的最新研究进展和发展趋势，解决技术研究和应用中的难题和热点问题，推动技术创新和交流，诚邀请**广州大学副教授程乐峰、天津大学教授张沛、东北大学副教授张孝顺和深圳大学副教授王怀智担任特约主编**，拟针对“博弈论优化决策与人工智能强化学习在电力系统与电力市场中的应用研究”设专栏，欢迎国内外相关领域的专家学者踊跃投稿！

### 一、征稿方向（包括但不限于）

1. 博弈论在电力市场机制与定价策略中的建模与优化；
2. 基于强化学习的智能调度策略在配电网中的应用研究；
3. 纳什均衡理论在多能互补系统中的博弈建模与求解；
4. 电动汽车与储能系统的博弈控制与行为建模；
5. 演化博弈在电力用户侧需求响应与互动博弈中的机制设计；
6. 多智能体博弈与深度学习融合在能源互联网控制中的研究；
7. 基于联邦博弈学习的数据隐私保护下的跨区域电网调度优化；
8. 复杂电力系统中融合博弈推理的图神经网络建模方法；
9. 智能代理系统在数字孪生电网控制与监测中的策略博弈优化研究；
10. 绿色低碳目标下的电力系统碳交易机制中的博弈建模与 AI 定价算法；
11. 基于博弈论的虚拟电厂多主体协同优化技术；
12. 其他与博弈论优化决策和人工智能强化学习在电力系统与电力市场中的应用相关技术。

### 二、投稿要求

1、请从山东电力技术网站投稿，请在题名后标注“博弈论优化决策与人工智能强化学习在电力系统与电力市场中的应用研究”，网址：<http://sddljs.cbpt.cnki.net>

2、稿件详细要求请参照《山东电力技术》投稿须知及论文写作模板，投稿须知及论文写作模板请在山东电力技术网站下载。

3、稿件一经采用，本刊将按照《山东电力技术》期刊稿费发放标准向作者发放稿费，稿酬优厚。

4、征文截止时间 2025 年 11 月 30 日，其他不明事宜，请联系《山东电力技术》编辑部。电话：0531-67982997。

广告

## 目次

## 配电网

- 基于零序电压投影量的小电阻系统单相接地故障测距方法 ..... 朱文贺,李守钦,李 广,齐兰涛,仇志华(1)
- 计及网损的碳排放流配电优化运行 ..... 徐建军,王 贝,彭 程,赵书琪(10)
- 基于相电压模变换和混沌振子的配电网故障选线方法研究 ... 吕东飞,马 涛,郭 艳,刘 广,孔雪城(23)

## 源网荷储协调互动

- 考虑新能源不确定性的电力系统灵活性评价方法与提升措施 ..... 冯树海,史新红,郑亚先,石 飞(32)
- 考虑时序特性的高比例新能源电力系统运行方式聚类分析方法  
..... 高 嵩,庞向坤,陈思颖,曹 齐,谢海鹏(44)
- 考虑集群电动汽车可行域聚合的电氢能源微网功率波动平抑优化策略 ..... 童宇轩,李 灿(58)

## 数字新基建

- 面向海缆作业应用的空天地海一体化通信组网关键技术研究  
..... 隋 灿,韩志骏,朱坤双,侯 炜,宫梓超(68)
- 基于CBR指数与EoFgu的电力系统高隔离性以太网技术研究  
..... 江 崧,贾 平,李 沛,汪大洋,赵金城(79)

## 输变电

- 基于ERGAN和BO-BiGRU的变电站高压开关柜凝露临界温度预测  
..... 王鹏飞,陈 雪,李继宇,陈大才,蔡旺昕,赖举添(87)
- 基于回波损耗的GIS特高频内置传感器现场校验方法研究 ..... 张丕沛,朱振龙,于 吉,成鲁钰,宋 磊(96)
- GIS盆式绝缘子温升特性及其影响规律研究 ..... 李 杰,王 丹,孙承海,孙艳迪,徐 冉(104)

# CONTENTS

## •Distribution Network•

- Single-phase Ground Fault Location Method for Low Resistance System Based on Zero Sequence Voltage Projection  
..... ZHU Wenhe, LI Shouqin, LI Guang, QI Lantao, ZHANG Zhihua(1)
- Optimal Operation of Distribution Networks With Carbon Emission Flow Considering Network Losses  
..... XU Jianjun, WANG Bei, PENG Cheng, ZHAO Shuqi(10)
- Research on Fault Line Selection Method for Distribution Networks Based on Phase Voltage Modal Transformation  
and Chaotic Oscillator..... LYU Dongfei, MA Tao, GUO Yan, LIU Guang, KONG Xuecheng(23)

## •Source-Grid-Load-Storage Coordinated Interaction•

- Power System Flexibility Evaluation Method and Improvement Measures Considering New Energy Uncertainty  
..... FENG Shuhai, SHI Xinhong, ZHENG Yaxian, SHI Fei(32)
- Clustering Analysis Method for Operational Modes of High-proportion Renewable Energy Power Systems  
Considering Temporal Characteristics..... GAO Song, PANG Xiangkun, CHEN Siying, CAO Qi, XIE Haipeng(44)
- The Power Fluctuation Suppression Optimization Strategy of Electric Hydrogen Energy Microgrid Considering the  
Feasible Domain Aggregation of Cluster Electric Vehicles ..... TONG Yuxuan, LI Can(58)

## •Digital New Infrastructure•

- Research on Key Technologies of Space-air-ground-ocean Integrated Communication Network for Submarine  
Cable Operation ..... SUI Can, HAN Zhijun, ZHU Kunshuang, HOU Wei, GONG Zichao(68)
- Research on High Isolation Ethernet Technology in Power Systems Based on CBR Index and EoFgu  
..... JIANG Song, JIA Ping, LI Pei, WANG Dayang, ZHAO Jinchen(79)

## •Power Transmission and Transformation•

- Predicting Condensation Critical Temperature of High-voltage Switchgear in Substation Based on ERGAN and  
BO-BiGRU..... WANG Pengfei, CHEN Xue, LI Jiyu, CHEN Dacai, CAI Wangxin, LAI Jutian(87)
- Research on On-site Calibration Method of GIS UHF Built-in Sensors Based on Return Loss  
..... ZHANG Pipei, ZHU Zhenlong, YU Ji, CHENG Luyu, SONG Lei(96)
- Research on Temperature Rise Characteristics and Influencing Patterns of GIS Basin-type Insulators  
..... LI Jie, WANG Dan, SUN Chenghai, SUN Yandi, XU Ran(104)

## 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.issn1007-9904.2025.09.001

·配电网·

# 基于零序电压投影量的小电阻系统单相接地故障测距方法

朱文贺<sup>1</sup>,李守钦<sup>2</sup>,李广<sup>1</sup>,齐兰涛<sup>3</sup>,仇志华<sup>1\*</sup>

(1. 中国石油大学(华东)新能源学院, 山东 青岛 266580; 2. 中石化胜利油田分公司东辛采油厂, 山东 东营 257094;  
3. 中国石油化工股份有限公司中原油田分公司, 河南 濮阳 457001)

**摘要:**针对小电阻系统单相接地故障后人工巡线耗时长导致供电可靠性低的问题,提出一种基于零序电压投影量梯度的测距方法来确定精确故障位置。首先,利用零序等效电路图重点分析了小电阻接地系统单相接地后零序电流和零序电压的分布特征。其次,通过故障线路零序电压变化的相量图分析了单一类型线路和混合线路零序电压投影量的分布特征,发现将混合线路进行等效之后,二者的投影量均为关于到母线距离的一次函数。最后,在准确获取区段定位结果的基础上,提出了基于零序电压投影量梯度的测距方法。利用MATLAB/Simulink搭建了10 kV小电阻系统,在不同线路类型上进行了仿真实验,结果验证了该方法具备较高的测距精度,且可有效克服单一类型线路参数不准确对测距结果的影响。

**关键词:**单相接地故障;小电阻系统;零序电压投影量;分布特征;梯度测距

中图分类号:TM773

文献标志码:A

文章编号:1007-9904(2025)09-0001-09

## Single-phase Ground Fault Location Method for Low Resistance System Based on Zero Sequence Voltage Projection

ZHU Wenhe<sup>1</sup>, LI Shouqin<sup>2</sup>, LI Guang<sup>1</sup>, QI Lantao<sup>3</sup>, ZHANG Zhihua<sup>1\*</sup>

(1. School of New Energy, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;

2. Dongxin Oil Production Plant, Shengli Oilfield, SINOPEC, Dongying 257094, China;

3. Zhongyuan Oilfield Company, SINOPEC, Puyang 457001, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of low power supply reliability caused by long time-consuming manual line inspection after single-phase grounding faults of low-resistance grounding systems, a fault location method based on zero-sequence voltage projection gradient is proposed to determine the accurate fault location. Firstly, the distribution characteristics of zero-sequence current and zero-sequence voltage after single-phase grounding of low resistance grounding system are analyzed by using a zero-sequence equivalent circuit diagram. Secondly, the distribution characteristics of zero-sequence voltage projections of single-type lines and hybrid lines are analyzed by the phasor diagram of zero-sequence voltage changes of fault lines. It is found that after the hybrid lines are equivalent, the projections of both are linear functions of the distance to the bus. Finally, on the basis of accurately obtaining the location results of the section, a ranging method based on the gradient of zero-sequence voltage projection is proposed. A 10 kV small resistance grounding distribution network is built by MATLAB/Simulink, and simulation experiments are carried out on different line types. The results show that the method has high ranging accuracy and can effectively overcome the influence of inaccurate parameters of a single type of line on ranging results.

**Keywords:** single-phase ground fault; low-resistance systems; zero-sequence voltage projection; distribution characteristics; gradient ranging

## 0 引言

随着配电网规模的扩大以及电缆率的提高,中性点经小电阻接地在我国以电缆为主的城市配电网

中得到了广泛应用。据统计,单相接地故障在干扰配电网稳定运行的各类故障中占80%左右<sup>[1-4]</sup>,若在小电阻系统中发生单相短路故障保护会立即跳闸,严重影响供电可靠性,而精准、快速的故障定位将大大减少人工巡线的时间,实现故障点快速处理。因此,发生单相接地故障后精准的测距对降低停电损

基金项目:国家自然科学基金项目(52077221)。

National Natural Science Foundation of China (52077221).

失、提高供电可靠性具有重要意义<sup>[5]</sup>。

现有的配电线路故障测距方法主要有阻抗法<sup>[6-8]</sup>、行波法<sup>[9]</sup>以及智能算法<sup>[10]</sup>。阻抗法是利用所获取的电压和电流数值计算出故障点对应的阻抗,通过阻抗与距离呈现正比例的关系来判定故障点的位置,按获取电气量来源的不同,可分为单端法和双端法。文献[11]利用故障点电阻仅消耗有功的特性,构建了适用于不同故障类型的测距方程,但中性点接地方式会影响这种功率特性,从而影响测距的精准度。文献[12]利用线路两侧零序电压、首端零序电流以及线路参数建立单相接地故障时的测距方程,利用区段长度排除伪根,通过遍历配电网各区段可实现区段定位及故障测距。以上方法均假设线路参数已知且均匀,因此不可避免地会出现误差。行波法利用故障行波的传播时间进行测距,不受系统参数、过渡电阻等因素影响,定位精度较高。为精确标定故障行波波头到达时刻并实现多分支线路的故障定位,文献[13]提出了一种基于极点对称分解的创新故障定位方法。文献[14]利用前、后向行波分量建立沿线的行波特征分布和行波的二维空间,迅速准确地确定故障点。但配电网结构复杂、分支较多、长度较短,波头识别及混合线路波速问题难以解决,另外其应用于T型支路效果欠佳。目前使用的智能算法主要有矩阵算法<sup>[15-17]</sup>、遗传算法<sup>[18]</sup>和神经网络算法<sup>[19-20]</sup>。在神经网络算法研究方面,其使用条件比较苛刻,需要大量的故障样本支撑,实际工程中往往不能预先提供大量的故障信息数据,所以还有待继续研究,尚未达到现场应用的要求<sup>[21-22]</sup>。

综上,本文根据零序电流、零序电压在故障线路的分布推导出零序电压投影量的梯度分布特征,设计了基于零序电压投影量梯度的测距算法,算法同时考虑了混合线路的测距,测距精度基本不受故障距离与过渡电阻的影响。最后,通过仿真验证了所提算法在不同故障情况下的有效性和准确性。

## 1 小电阻系统单相接地故障零序电气量特征分析

### 1.1 零序电流分布特征

小电阻系统发生单相接地故障后的零序等效网络如图1所示,其中 $L_1$ — $L_{n-1}$ 为健全线路, $L_n$ 为故障线路, $n$ 为馈线总数。

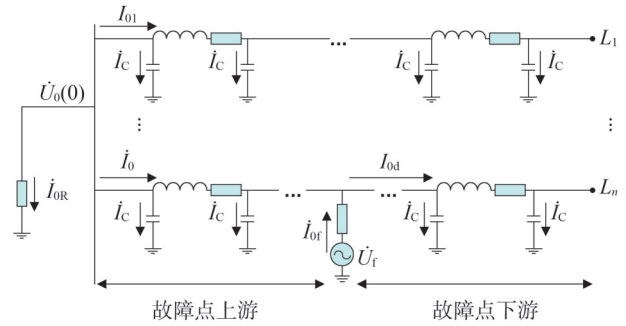


图1 零序等效网络

Fig.1 Zero-sequence equivalent network

图1中, $\dot{U}_0(0)$ 为母线处零序电压, $\dot{I}_{0r}$ 为流过中性点电阻的电流, $\dot{I}_0$ 为故障线路首端零序电流, $\dot{I}_c$ 为对地电容电流, $\dot{I}_{0d}$ 为下游的零序电流, $\dot{U}_f$ 为故障点虚拟电源, $\dot{I}_{0f}$ 为故障点电流。

图1中,根据基尔霍夫电流定律,故障线路首端电流 $\dot{I}_0 = -(\dot{I}_{0r} + \sum_{i=1}^{n-1} \dot{I}_{0i})$ , $\dot{I}_{0i}$ 为第*i*条健全线路首端零序电流。由于故障线路首端的零序电流较大<sup>[23]</sup>,因此忽略故障线路零序电容电流的影响,将故障点上游电流近似为 $-(\dot{I}_{0r} + \sum_{i=1}^{n-1} \dot{I}_{0i})$ ,故障点下游电流近似为0。

### 1.2 零序电压分布特征

根据零序电流分布特征,可以推导故障线路*x*点处的零序电压 $\dot{U}_0(x)$ 。

$$\begin{cases} \dot{U}_0(x) = \dot{U}_0(0) + Z(\dot{I}_{0r} + \sum_{i=1}^{n-1} \dot{I}_{0i})x, x \leq x_f \\ \dot{U}_0(x) = \dot{U}_0(x_f) = \dot{U}_0(l_f), x > x_f \end{cases} \quad (1)$$

式中: $Z$ 为单位长度线路的零序阻抗; $x_f$ 为故障点到母线距离; $l_f$ 为故障线路长度。

由式(1)可知,故障点下游不存在压降。另外,对于故障点上游存在分支线路的故障线路,由于分支线路上的电流分布和故障点下游一致,所以分支线上任一点处的零序电压均与接入点相同。

鉴于故障线路零序电压的幅值分布比较复杂,本文首先分析了零序电压在 $-\dot{I}_0 Z$ 方向的投影量的分布特征,然后设计了基于零序电压投影量的测距算法。

## 2 零序电压投影量分布特征

### 2.1 单一类型的故障线路

故障点上游零序电压在 $-\dot{I}_0 Z$ 方向上的投影如图

2所示,  $U(x)$  为  $x$  点处的零序电压投影量,  $\Delta \dot{U}_0$  为单位长度线路的零序电压变化量,  $\theta$  为母线零序电压与零序电压变化量夹角的补角,  $\varphi$  为线路阻抗角。

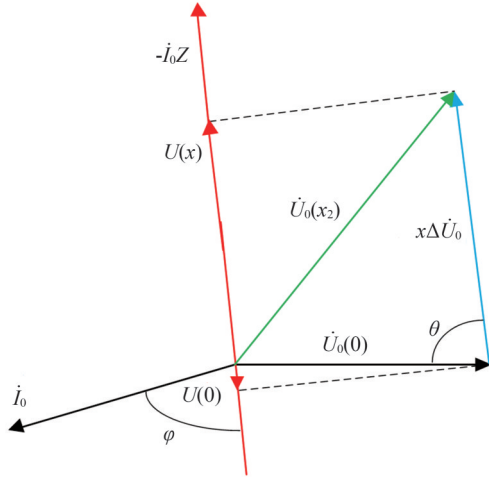


图2 单一类型线路的零序电压投影

Fig.2 Zero-sequence voltage projection of a single type of line

根据图2,故障点上游  $x$  点处的零序电压投影量为

$$U(x) = |\dot{U}_0(0)| \times \cos(\pi - \theta) + |Z| |\dot{I}_0| x \quad (2)$$

故障点下游及分支线上零序电压投影量均为恒定值。因此,单一类型故障线路上的零序电压在  $-j_0Z$  方向上的投影分布特征如图3所示。零序电压投影量在故障点上游随到母线距离增加而均匀增加,呈一次函数分布,在下游为一条斜率为零的水平直线。

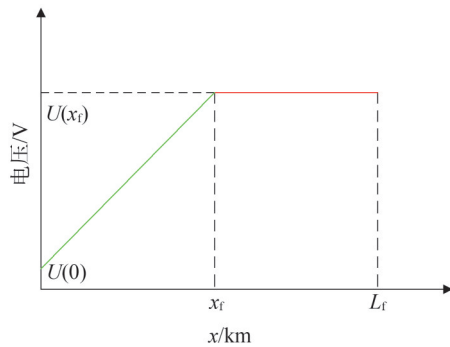


图3 单一类型线路的零序电压投影量分布特征

Fig.3 Distribution characteristics of zero sequence voltage projection of single type line

## 2.2 混合类型的故障线路

假设某故障线路由架空线-电缆构成,图4为混合线路在  $-j_0Z_1$  方向的投影。需要说明的是,对于混合线路,本文规定的投影方向为  $-j_0Z_1$ ,  $Z_1$  为架空线的单位阻抗参数。

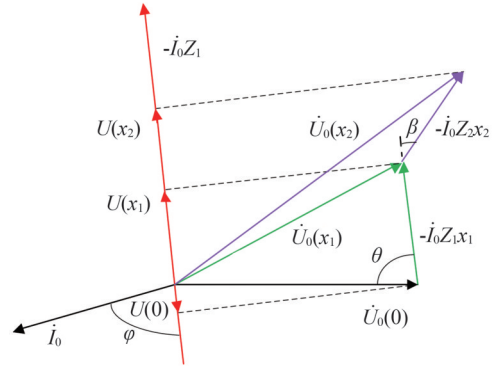


图4 混合线路的零序电压投影

Fig.4 Zero-sequence voltage projection of hybrid lines

图4中,  $Z_2$  为电缆的单位阻抗参数,  $\beta$  为  $Z_1$  和  $Z_2$  的夹角, 即  $-j_0Z_1$  和  $-j_0Z_2$  之间的夹角,  $x_1$ 、 $x_2$  分别为故障点上游架空线和电缆的长度。

混合线路故障点上游任一点的投影量如式(3)所示。

$$U(x) = \begin{cases} |\dot{U}_0(0)| \times \cos(\pi - \theta) + |Z_1| |\dot{I}_0| x, & x \leq x_1 \\ |\dot{U}_0(0)| \times \cos(\pi - \theta) + |Z_1| |\dot{I}_0| x_1 + |Z_2| |\dot{I}_0| \cos \beta (x - x_1), & x > x_1 \end{cases} \quad (3)$$

故障点下游零序电压投影量为常数,此处不再赘述。混合线路故障点上游的零序电压投影量分布如图5所示。由图5可以看出分布曲线存在多种斜率,此特征难以有效利用各检测点的信息,因此须将斜率不同的多段直线等效为一段直线。

首先对故障线路进行等效处理。以架空线为基准类型,将电缆的实际长度折算为等效长度(对于多种参数不同的线路类型,可任选一种作为基准类型)。折算方法如式(4)、式(5)所示。

$$x_2' = \frac{|Z_2| \cos \beta}{|Z_1|} x_2 = \lambda x_2 \quad (4)$$

$$l' = x_1 + x_2' \quad (5)$$

式中:  $x_2'$  为电缆的等效长度;  $\lambda$  为折算系数;  $l'$  为等效

后的线路长度。

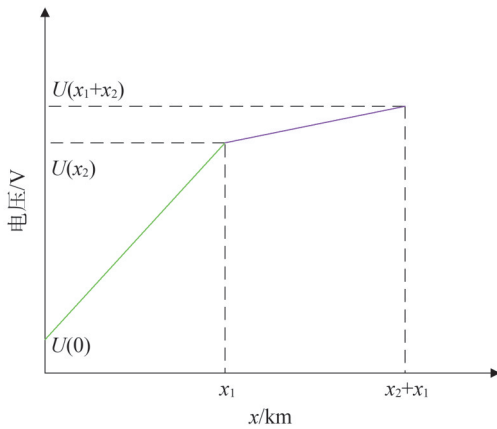


图5 混合线路的零序电压投影量分布特征

Fig.5 Distribution characteristics of zero-sequence voltage projection of hybrid lines

因此,等效后混合线路故障点上游 $x'$ 点处的投影量为

$$U(x') = |\dot{U}_0(0)| \times \cos(\pi - \theta) + |Z_1| |I_0| x' \quad (6)$$

等效后混合线路的零序电压分布特征与单一类型线路相同,也呈现一次函数分布。

综上所述,零序电压投影量在故障线路上的分布如式(7)所示。

$$\begin{cases} U(x) = ax + b, & x \leq x_f \\ U(x) = c, & x > x_f \end{cases} \quad (7)$$

式中: $a$ 、 $b$ 为故障点上游零序电压投影量关于到母线距离的斜率和常数项; $c$ 为故障点下游的零序电压投影量。

过渡电阻的大小仅影响故障点上游零序电压投影量的梯度,当过渡电阻较大时梯度较小,此时测距精度主要受制于测量精度。当线路阻抗参数的理论值与实际值存在误差时,单一类型线路的零序电压投影量仅梯度大小改变,测距精度只受测量精度的影响,而混合线路要计算等效长度,会影响测距精度。此外,本文对故障特征的分析均基于零序网络,而分布式电源(distributed generator, DG)并网变压器一次侧一般采用不接地方式,因此DG的接入不影响零序网络的结构,即不会影响零序电压投影量的分布。需要注意的是,逆变型分布式电源(inverter-interfaced distributed generator, IIDG)的接入会增大

故障线路的零序电流<sup>[24-25]</sup>,即IIDG接入后会增大母线到故障点的零序电压变化量,加强了零序电压投影量梯度,有利于提高测距精度。

### 3 基于零序电压投影量的故障测距

由式(7)可知,求解故障点位置的关键是求出故障点上、下游的函数表达式,进而联立得到故障点位置。需要注意的是,由于故障点下游无法直接得到零序电压与故障点上游电流的相位关系,因此线路首端和线路末端的检测点须具备高精度对时功能。

#### 3.1 单一类型线路的故障测距

基于零序电压投影量在单一类型故障线路上测距的主要步骤如下。

步骤1:根据区段定位的结果将故障线路分为故障点上游和故障点下游。

步骤2:根据故障点上游检测点的数量选择不同的方法拟合函数表达式。

i)当上游只有一个检测点时,根据式(2)确定上游的函数表达式。若故障点上游存在分支线路,则可利用分支线上的零序电压投影量作为接入点处的投影量,此时相当于存在两个检测点,按照ii)求解。

ii)当故障点上游的检测点数量为2时,将各检测点到母线的距离 $x_{u1}$ 、 $x_{u2}$ ,各检测点处的零序电压投影量 $U(x_{u1})$ 、 $U(x_{u2})$ 代入式(8)即可求得 $a$ 、 $b$ 的数值。

$$\begin{cases} a = \frac{U(x_{u1}) - U(x_{u2})}{x_{u1} - x_{u2}} \\ b = \frac{x_{u1}U(x_{u2}) - x_{u2}U(x_{u1})}{x_{u1} - x_{u2}} \end{cases} \quad (8)$$

iii)当故障点上游的检测点数量大于2时,此时存在冗余数据,利用最小二乘法拟合曲线,将各检测点的零序电压投影量和到母线距离代入式(9)即可求得 $a$ 、 $b$ 的数值。

$$\begin{cases} a = \frac{m(\sum x_{uj}U(x_{uj})) - (\sum x_{uj})(\sum U(x_{uj}))}{m(\sum x_{uj}^2) - (\sum x_{uj})^2} \\ b = \frac{(\sum x_{uj}^2)(\sum U(x_{uj})) - (\sum x_{uj})(\sum x_{uj}U(x_{uj}))}{m(\sum x_{uj}^2) - (\sum x_{uj})^2} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $x_{uj}$ 、 $U(x_{uj})$ 分别为第 $j$ 个检测点到母线距离和该

检测点测量的零序电压投影量; $m$ 为上游检测点数量。

步骤3:拟合下游函数表达式并求解故障距离。故障点下游投影量为常数,因此拟合下游表达式仅需要一个检测点。

将步骤2、步骤3得到的上、下游函数表达式联立即可求得故障距离。

### 3.2 混合线路测距

相对于单一类型线路测距,混合线路测距还须执行折算和还原步骤。图6为混合线路测距示意图, $d_1$ 、 $d_2$ 分别为架空线与电缆的长度; $A$ 为线路首端; $B$ 为架空线与电缆的分界点; $C$ 为线路末端; $f$ 为发生单相接地故障位置。

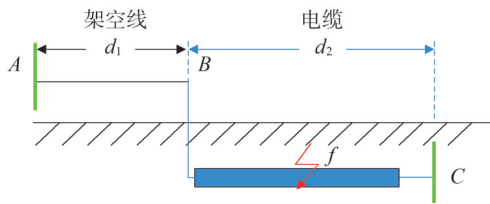


图6 混合线路测距示例

Fig.6 Example of hybrid line ranging

以图6中的故障线路为例,混合线路具体的测距流程如下。

步骤1:根据式(4)、式(5),将故障线路长度折算为等效长度。

步骤2:根据区段定位的结果将故障线路分为故障点上游和故障点下游。

步骤3:根据故障点上游检测点的数量选择不同的方法拟合函数表达式,具体方法见3.1节。

步骤4:拟合下游函数表达式并求解等效故障距离 $x'_f$ 。

步骤5:根据式(10),将步骤4所得等效故障距离还原为实际故障距离。

$$x_f = \begin{cases} x'_f, & x'_f \leq d_1 \\ d_1 + \frac{1}{\lambda} (x'_f - d_1), & x'_f > d_1 \end{cases} \quad (10)$$

### 3.3 基于零序电压投影量梯度的测距算法流程

故障测距算法流程如图7所示。

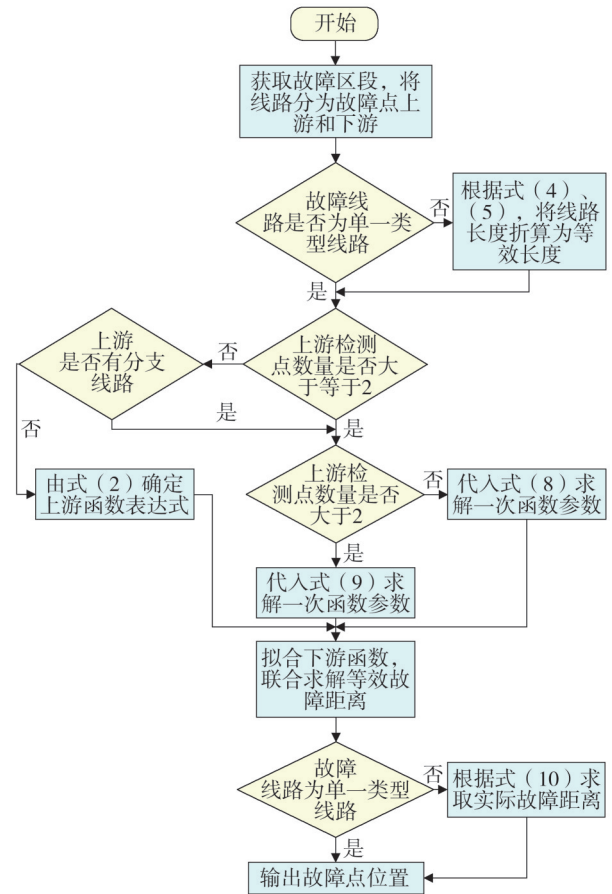


图7 故障测距流程示意图

Fig.7 Schematic diagram of fault location process

## 4 仿真实验

为验证所提出的基于零序电压投影量梯度的测距方法的正确性,在MATLAB/Simulink中搭建图8所示10 kV小电阻系统仿真模型, $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$ 分别为4.1、4.2、4.3节中仿真实验的故障位置。

### 4.1 单一类型线路故障

为说明算法的优势,设置仿真实验对比了本文算法与文献[12]双端零序分量阻抗法的测距精度。线路4距母线8 km处设置A相接地故障,假设此时线路理论参数不准确。由图8可知故障点上游存在3个检测点,所以本文算法利用最小二乘法拟合故障点上游零序电压投影量的函数表达式。不同线路参数误差下两种测距方法的不同过渡电阻的测距误差如图9所示。 $X_e$ 、 $R_e$ 表示线路实际电抗、电阻参数和理论参数的相对误差,图9中, $e_1$ 、 $e_2$ 、 $e_3$ 为线路实际阻抗参数与理论阻抗参数存在误差时的三种情况,

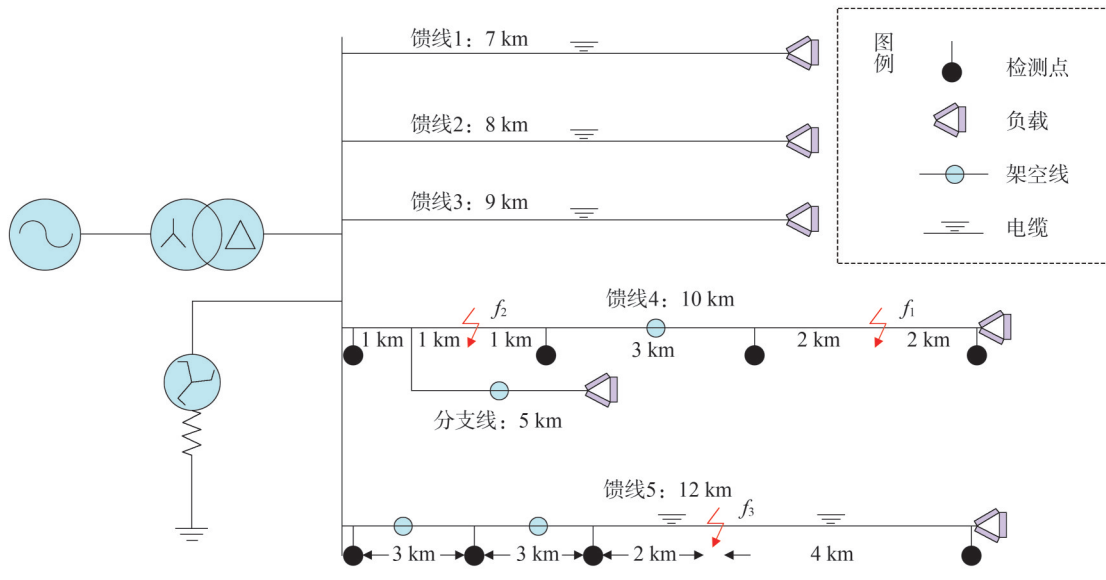
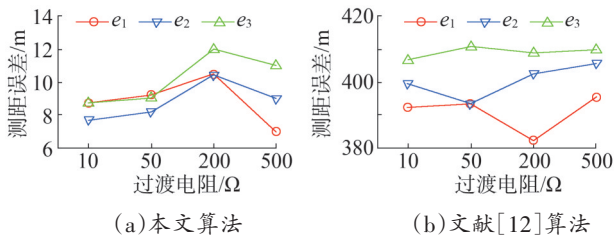


图8 仿真电路图

Fig.8 Simulation circuit diagram

$e_1: X_e = +0.05, R_e = 0; e_2: X_e = +0.05, R_e = +0.05;$   
 $e_3: X_e = +0.05, R_e = +0.1。$



(a) 本文算法

(b) 文献[12]算法

图9 测距精度对比

Fig.9 Comparison of ranging accuracy

测距结果表明,线路参数不准确时文献[12]测距算法误差较大,基本没有参考价值;而本文算法不受线路参数的影响,始终保持较高的测距精度,这是本文算法相比其他依赖于线路参数测距算法的突出优势。结合配电网普遍使用线路典型参数的实际情况,所提算法的实用性较强。

为验证前文IIDG接入对零序电压投影量梯度的影响,在线路4末端接入不同容量IIDG,单相接地故障后的零序电压投影量梯度如图10所示。

零序电压投影量梯度随着IIDG的接入略有增大,但总体分布与不接入IIDG时保持一致,因此IIDG的接入不影响测距方法且会增强零序电压投影量的梯度分布特征。

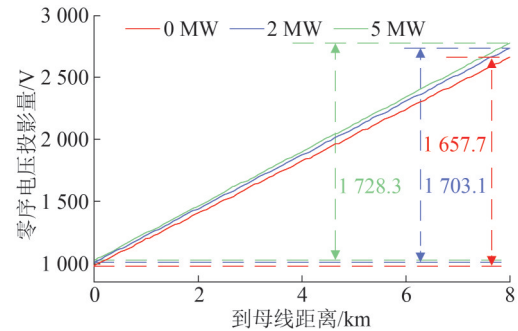


图10 接入IIDG后零序电压投影量梯度变化

Fig.10 The gradient change of zero sequence voltage projection after access to IIDG

#### 4.2 上游仅存在一个检测点

为验证分支线信息测距的可行性以及上游只有一个检测点时测距方法的正确性,在线路4距离母线2 km处设置A相接地故障,不同过渡电阻下的测距结果如表1所示。

利用分支线信息测距的最大绝对误差和最小绝对误差分别为0.4 m和0.2 m;利用线路参数测距的最大绝对误差和最小绝对误差分别为0.6 m和0.3 m,二者均具备较高的精度,因此利用分支线信息和线路参数均能正确求解故障距离,验证了此种情况下测距方法的可靠性。所以,当可获得线路实测零序参数时,综合利用分支线信息及线路参数两种算法进行测距;不能获得实测参数时则仅利用分支线信

息进行测距。

表1 仅存在一个检测点的测距结果  
Table 1 The ranging result of only one detection point exists

| 过渡电阻/ $\Omega$ | 测距结果/m  |         | 综合测距结果/m |
|----------------|---------|---------|----------|
|                | 利用分支线信息 | 利用线路参数  |          |
| 10             | 2 000.4 | 2 000.5 | 2 000.45 |
| 50             | 2 000.4 | 2 000.3 | 2 000.35 |
| 100            | 1 999.8 | 2 000.6 | 2 000.20 |
| 500            | 1 999.7 | 2 000.5 | 2 000.10 |

### 4.3 混合线路故障

配电网中混合线路较多,因此测距方法在混合线路的适用性尤为重要,为验证本文所提方法在混合线路测距的可行性,在线路5距离母线8 km处设置A相接地故障,过渡电阻为10  $\Omega$ 。由第3章可知,首先须将故障线路长度折算为等效长度,根据式(4)、式(5),故障线路等效长度为10.24 km,各检测点距离母线的等效长度分别为0 km、3 km、6 km、10.24 km。

利用前文所述的拟合方法求得故障点上、下游的函数分布,如式(11)所示。

$$\begin{cases} U(x) = 188.781x + 1\,091.637 \\ U(x) = 2\,383.247 \end{cases} \quad (11)$$

联立求解,等效故障距离 $x'_f=6\,841.8$  m,由式(10)可还原为故障点到母线的实际距离。所以故障点到母线的实际距离 $x_f=8\,037.2$  m,测距绝对误差为37.2 m。

改变过渡电阻的大小,测距结果如表2所示。

表2 混合线路测距结果  
Table 2 Hybrid line ranging results

| 过渡电阻/ $\Omega$ | 测距结果/m  | 绝对误差/m |
|----------------|---------|--------|
| 10             | 8 037.2 | 37.2   |
| 50             | 8 037.3 | 37.3   |
| 100            | 8 037.1 | 37.1   |
| 500            | 8 038.1 | 38.1   |

由表2可知,混合线路的最大绝对误差为38.1 m,最小绝对误差为37.1 m,其基本不受过渡电阻大小的影响。由于不同线路类型的对地电容不同,其对压降的作用也不同,因此混合线路相对于单一类型线路的测距误差会稍大一些,但仍在工程可接受的范围之内。

## 5 结束语

文中首先分析了单相接地故障后故障线路为单一类型线路和混合线路时零序电压投影量的分布特征。对于故障点上游,单一类型线路上零序电压投影量为关于到母线距离的一次函数,混合线路零序电压投影量则由多个斜率不同的一次函数组成,将混合线路进行等效后二者均为关于到母线距离的一次函数。对于故障点下游,零序电压投影量为常数,不随到母线距离的变化而变化。基于此特征,提出一种基于零序电压投影量梯度的测距算法。仿真验证了所提算法适用于多分支、混合线路等复杂配电网结构且不受故障位置与过渡电阻的影响,在故障点上游存在多个检测点的情况下可克服单一类型线路理论参数不准确对测距的影响,算法简单易于实现。

文中基于常规辐射状配电网进行分析,且仅在单一类型线路测距时可以克服线路理论参数和实际参数不一致对精度的影响,对于混合线路上的测距仍须深入研究,下一步须针对这些不足开展研究。

## 参考文献

- [1] 徐丙垠,薛永端,冯光,等.配电网接地故障保护若干问题的探讨[J].电力系统自动化,2019,43(20):1-7.  
XU Bingyin, XUE Yongduan, FENG Guang, et al. Discussion on several problems of earthing fault protection in distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(20): 1-7.
- [2] 刘健,张志华,王毅钊.基于电压信息的配电网断线故障定位[J].电力系统自动化,2020,44(21):123-131.  
LIU Jian, ZHANG Zhihua, WANG Yizhao. Voltage information based line - broken fault location for distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(21): 123-131.
- [3] 任伟,薛永端,徐丙垠,等.小电阻接地系统高阻接地故障纵联差动保护[J].电网技术,2021,45(8):3276-3282.  
REN Wei, XUE Yongduan, XU Bingyin, et al. Longitudinal differential protection of high resistance grounding faults in low - resistance grounding system [J]. Power System Technology, 2021,

- 45(8):3276-3282.
- [4] 付晓奇,徐粮珍,赵宝丽.10kV配网中性点小电阻接地技术与应用[J].电力系统保护与控制,2010,38(23):227-230.  
FU Xiaochi, XU Liangzhen, ZHAO Baoli. Discussion on the technology and application of 10 kV distribution network neutral grounding through small resistance [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(23): 227-230.
- [5] 张健磊,高湛军,陈明,等.考虑复故障的有源配电网故障定位方法[J].电工技术学报,2021,36(11):2265-2276.  
ZHANG Jianlei, GAO Zhanjun, CHEN Ming, et al. Fault location method for active distribution networks considering combination faults [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(11): 2265-2276.
- [6] ABOSHADY F M, THOMAS D W P, SUMNER M. A new single end wideband impedance based fault location scheme for distribution systems [J]. Electric Power Systems Research, 2019, 173: 263-270.
- [7] MAJIDI M, ETEZADI-AMOLI M. A new fault location technique in smart distribution networks using synchronized/nonsynchronized measurements [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(3): 1358-1368.
- [8] 张建文,周鹏,陈焕桐.基于改进阻抗法的单相接地故障测距仿真[J].电测与仪表,2018,55(3):84-87.  
ZHANG Jianwen, ZHOU Peng, CHEN Huanxu. Simulation of transmission line single-phase ground fault location based on improved impedance method [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(3): 84-87.
- [9] 周聪聪,舒勤,韩晓言.基于线模行波突变的配电网单相接地故障测距方法[J].电网技术,2014,38(7):1973-1978.  
ZHOU Congcong, SHU Qin, HAN Xiaoyan. A single-phase earth fault location scheme for distribution network based on mutation of line mode traveling wave [J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1973-1978.
- [10] 赵乔,王增平,董文娜,等.基于免疫二进制粒子群优化算法的配电网故障定位方法研究[J].电力系统保护与控制,2020,48(20):83-89.  
ZHAO Qiao, WANG Zengping, DONG Wenna, et al. Research on fault location in a distribution network based on an immune binary particle swarm algorithm [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 83-89.
- [11] 戴志辉,王旭.基于改进阻抗法的有源配电网故障测距算法[J].电网技术,2017,41(6):2027-2034.  
DAI Zhihui, WANG Xu. Impedance method based fault location algorithm for active distribution system [J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 2027-2034.
- [12] 齐郑,黄朝晖,陈艳波.基于零序分量的阻抗法配电网故障定位技术[J].电力系统保护与控制,2023,51(6):54-62.  
QI Zheng, HUANG Zhaohui, CHEN Yanbo. Impedance fault location technology for a distribution network based on a zero-sequence component [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 54-62.
- [13] 谢李为,李勇,罗隆福,等.基于极点对称分解的多分支线路故障定位方法[J].中国电机工程学报,2021,41(21):7326-7338.  
XIE Liwei, LI Yong, LUO Longfu, et al. Fault location method for multi-branch lines based on extreme-point symmetric mode decomposition [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(21): 7326-7338.
- [14] SHU H C, LIU X H, TIAN X C. Single-ended fault location for hybrid feeders based on characteristic distribution of traveling wave along a line [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(1): 339-350.
- [15] 徐彪,尹项根,张哲,等.矩阵算法和优化算法相结合的配电网故障定位[J].电力系统自动化,2019,43(5):152-158.  
XU Biao, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Fault location for distribution network based on matrix algorithm and optimization algorithm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(5): 152-158.
- [16] 邓飞,梁仕斌,田庆生,等.基于有向拓扑-时间延时和容错机制的配电网故障定位方法[J].电气自动化,2019,41(3):73-77.  
DENG Fei, LIANG Shibin, TIAN Qingsheng, et al. Distribution network fault location based on directional topology-time delay and fault tolerance mechanism [J]. Electrical Automation, 2019, 41(3): 73-77.
- [17] 黄佳乐,杨冠鲁.配电网故障区间定位的改进矩阵算法[J].电力系统保护与控制,2014,42(11):41-45.  
HUANG Jiale, YANG Guanlu. Modified matrix algorithm for fault section location of distribution network [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 41-45.
- [18] 刘鹏程,李新利.基于多种群遗传算法的含分布式电源的配电网故障区段定位算法[J].电力系统保护与控制,2016,44(2):36-41.  
LIU Pengcheng, LI Xinli. Fault-section location of distribution network containing distributed generation based on the multiple-population genetic algorithm [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 36-41.
- [19] 彭华,王文超,朱永利,等.基于LSTM神经网络的风电场集电线路单相接地智能测距[J].电力系统保护与控制,2021,49(16):60-66.  
PENG Hua, WANG Wenchao, ZHU Yongli, et al. An intelligent single-phase grounding fault location for a wind farm collection line based on an LSTM neural network [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(16): 60-66.
- [20] 孟子超,杜文娟,王海风.基于迁移学习深度卷积神经网络的配电网故障区域定位[J].南方电网技术,2019,13(7):25-33.  
MENG Zichao, DU Wenjuan, WANG Haifeng. Distribution network fault area location based on deep convolution neural network with

- transfer learning[J].Southern Power System Technology, 2019, 13(7):25-33.
- [21] 朱健,董礼清,薛晨,等.基于线电压分布特征的相间短路故障测距[J].供用电,2023,40(1):49-55.
- ZHU Jian, DONG Liqing, XUE Chen, et al. Phase to phase short circuit fault location based on line voltage distribution characteristics[J].Distribution & Utilization, 2023, 40(1):49-55.
- [22] 刘江东,董礼清,薛晨,等.基于零序电压分布特征的小电流接地故障测距初探[J].电力系统保护与控制,2022,50(3):59-67.
- LIU Jiandong, DONG Liqing, XUE Chen, et al. Fault location of a small current grounding fault based on distribution characteristics of zero sequence voltage[J].Power System Protection and Control, 2022, 50(3):59-67.
- [23] 林志超,刘鑫星,王英民,等.基于零序电流比较的小电阻接地系统接地故障保护[J].电力系统保护与控制,2018,46(22):15-21.
- LIN Zhichao, LIU Xinxing, WANG Yingmin, et al. Grounding fault protection based on zero sequence current comparison in low resistance grounding system [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(22):15-21.
- [24] 杨伟涛,曾德辉,汪隆君,等.逆变型分布式电源接入对小电阻接地系统馈线零序电流保护的影响[J].电力自动化设备,2018,38(9):162-168.
- YANG Weitao, ZENG Dehui, WANG Longjun, et al. Influence of inverter interfaced distributed generators on zero-sequence current protection for feeder of low resistance grounding system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(9):162-168.
- [25] 曹金铭,范开俊,徐丙垠,等.基于容量边界值的高比例逆变型分布式电源配电网三级保护适用性分析[J].电网技术,2024,48(8):3438-3448.
- CAO Jinming, FAN Kaijun, XU Bingyin, et al. Applicability analysis of capacity boundary value based three-level protection in distribution networks containing high percentage of inverter interfaced distributed energy resources [J]. Power System Technology, 2024, 48(8):3438-3448.

收稿日期:2024-09-17

修回日期:2024-12-09

作者简介:

朱文贺(2001),男,硕士在读,主要研究方向为配电网故障定位;  
李守钦(1968),男,硕士,高级工程师,主要从事油田配电系统工程设计及油气田地面电气配套技术研究工作;

李广(1994),男,博士在读,主要研究方向为配电网故障检测;  
齐兰涛(1974),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为油田综合能源管理与新能源开发相关技术;

仇志华(1977),通信作者(zzh-upc@163.com),男,博士,教授,主要研究方向为新型配电系统保护与控制、多能互补综合能源系统优化设计与智能运行技术。

(责任编辑 车永强)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2025.09.002

# 计及网损的碳排放流配电优化运行

徐建军, 王 贝\*, 彭 程, 赵书琪

(东北石油大学电气信息工程学院, 黑龙江 大庆 163319)

**摘要:** 碳达峰碳中和目标背景下, 碳排放流结合配电网的优化运行是重点研究内容。基于此, 本文提出了基于有损网络碳排放流计算方法的配电网优化运行模型。首先, 提出了一种对有损网络通过复功率进行网络等效方法, 利用更新后的系统潮流计算出新的节点碳势; 其次, 建立基于二阶锥潮流规划的配电网优化调度模型, 引入需求响应模型, 通过引导电力用户在高峰时段或系统紧急情况下调整用电行为, 实现负荷的灵活调节; 然后, 以配电网总运行成本最低和碳排放量最低为优化目标建立本文模型; 最后, 通过二机四节点系统验证碳排放流计算方法的可行性, 对改进33节点系统进行仿真分析, 并给出三种对比场景, 进行算法的有效性分析。实验结果表明, 本文提出的碳排放流计算方法能提高碳流的准确性, 本文提出的模型能够在保证计算时间的前提下, 有效降低碳排放量以及运行成本, 具有良好的应用前景。

**关键词:** 碳排放流计算; 优化调度模型; 需求响应; 节点碳势; 二阶锥模型

中图分类号: TM7

文献标志码: A

文章编号: 1007-9904(2025)09-0010-13

## Optimal Operation of Distribution Networks With Carbon Emission Flow Considering Network Losses

XU Jianjun, WANG Bei\*, PENG Cheng, ZHAO Shuqi

(School of Electrical and Information Engineering, Northeast Petroleum University, Daqing 163319, China)

**Abstract:** Under the background of the "Carbon Peak and Carbon Neutrality" goals, the integration of carbon emission flow with the optimal operation of distribution networks is a key research focus. Based on this, this paper proposes an optimal operation model for distribution networks based on the carbon emission flow calculation method for lossy networks. Firstly, a network equivalence method for lossy networks using complex power is proposed, and the updated system power flow is utilized to calculate the new nodal carbon potential. Secondly, an optimal dispatch model for distribution networks based on second-order cone power flow programming is established, incorporating a demand response model. This model guides electricity users to adjust their consumption behavior during peak hours or system emergencies, enabling flexible load regulation. Thirdly, the model is constructed with the objectives of minimizing the total operating cost and carbon emissions of the distribution network. Finally, the feasibility of the carbon emission flow calculation method is verified using a two-machine four-node system, and simulation analysis is conducted on the modified 33-node system, and three comparative scenarios are provided to analyze the algorithm effectiveness. The experimental results demonstrate that the proposed carbon emission flow calculation method can improve the accuracy of carbon flow, and the proposed model can effectively reduce carbon emissions and operating costs while ensuring computational efficiency, showing promising application prospects.

**Keywords:** carbon emission flow calculation; optimal dispatch model; demand response; nodal carbon potential; second-order cone model

基金项目: 黑龙江省自然科学基金(LH2019E016); 黑龙江省重点研发计划(2024ZXJ01A04)。

Natural Science Foundation of Heilongjiang Province (LH2019E016); Key Research and Development Program of Heilongjiang Province (2024ZXJ01A04)。

## 0 引言

在全球工业化进程加速与人口持续增长的背景下, 二氧化碳排放量急剧上升, 气候危机与能源短缺问题日益严峻<sup>[1-3]</sup>。推动低碳发展成为缓解温室效

应、应对环境挑战、实现社会可持续发展的必经之路<sup>[3-7]</sup>。文献[8]提出了一种新的模型来分析电力系统内机组和负载的碳排放。文献[9]提出了一种计及混合交易模式的多区域互联电力系统碳排放流计算方法,通过分裂法与潮流追踪实现交易网络解耦,精准计算碳流分布并避免“碳泄漏”。文献[10]提出了一种基于碳排放流理论的互联系统源荷互动低碳经济调度模型,通过构建联合运行方式和激励型低碳需求响应机制,实现了源侧碳势优化与荷侧用能行为调整的协同。文献[11]提出了一种结合能量流与碳排放流的方法,通过解耦计算,高效分析了综合能源系统的碳排放分布,为低碳优化提供了理论基础。

文献[12]提出了一种考虑网络损耗的碳排放流理论,通过将网络损耗分摊至各负荷节点,将有损网络转换为无损网络,实现了碳排放流理论在实际电力系统中的应用,仿真结果表明,该方法能清晰追踪碳排放流的具体流向。文献[13]提出了一种基于碳排放流理论与深度强化学习的电力系统低碳优化调度方法,有效提升了系统经济性与调度效率。文献[14-16]提出了一种基于区块链技术的配电网碳流溯源方法,通过主从多链结构、智能合约与云计算框架,实现了碳排放流的可靠计算与安全溯源,为电力系统碳减排提供了技术支撑。

文献[17]提出一种基于复功率分布矩阵的电力系统碳流追踪方法,通过构建火电机组碳排放模型和网损碳排放划分机制,精准计算负荷、支路及网损的碳排放分布,为电力系统碳减排提供理论支撑。文献[18]基于碳排放流理论建立了配电网低碳优化运行模型,通过分析碳排放流分布规律与储能元件碳排放特性,为配电网低碳高效发展提供了理论依据与实践参考。文献[19]提出了一种基于复结构碳排放流理论的碳责任分摊方法,通过引入“复结构碳势”概念,“追踪碳轨迹”与“绿轨迹”,实现了网损与用户用电行为的碳责任精准分摊。该方法拓展了电力碳排放的研究维度,为配电网低碳运行提供了新的优化空间。

文献[20-21]提出一种考虑碳排放分摊的配电网区域分布式控制方法,通过谱聚类划分、碳流计算与一致性优化求解,实现了新能源及储能接入下碳排放的精准溯源与合理分摊,同时降低了通信负担。

文献[22]提出了一种考虑网损与新能源减碳贡献的电力系统碳排放流计算方法,通过引入“节点损耗”变量将有损网络转换为无损网络<sup>[23-24]</sup>,并结合负荷角度间接分析新能源机组,实现了碳流分布的精准计算与减碳贡献的量化评估。文献[25]提出了一种计及站-网损耗分摊的区域综合能源系统碳排放流计算方法,通过构建电-气-热网络统一结构模型和标准化矩阵碳排放流集线器,实现了网络损耗的双向分摊与能源站碳责任的精准界定。

综上所述,配电网低碳调度运行是重点发展趋势,当前研究缺乏有损网络的碳排放流计算方法,同时在进行配电网调度运行过程中大多仅对低碳因素进行考虑,缺乏对整个系统的运行成本问题的研究,而目前研究大多仅考虑了需求响应中的低碳因素并未考虑新能源消纳因素。为此,本文提出了一种针对有损网络进行复功率网络等效,更新系统潮流并计算出新的节点碳势,并通过二机四节点系统验证本文碳流计算方法可行性,设置四种不同场景,由浅入深验证配电网优化运行的可行性,并采用改进33节点系统进行仿真分析,并对算法的可行性进行分析,验证了本文模型能够有效降低碳排放和运行成本。

## 1 碳排放流计算

基于碳排放流依附于有功潮流的特点,大部分配电网都是呈辐射状分布,针对此特点,采用顺序计算的方法。系统所有节点的节点碳势可由式(1)计算得到。

$$\mathbf{E}_N = (\mathbf{P}_N - \mathbf{P}_A^T)^{-1} \mathbf{P}_C \mathbf{E}_C \quad (1)$$

式中: $\mathbf{E}_N$ 为节点碳势矩阵,矩阵元素由所有节点的节点碳势构成,单位为kg/kWh; $\mathbf{P}_N$ 为节点有功通量矩阵,节点有功通量为潮流方向下流入节点有功潮流的“绝对值”,当系统中支路潮流分布矩阵和机组注入分布矩阵已知时,有功通量矩阵可由二者计算得出,单位为MW; $\mathbf{P}_A$ 为支路有功潮流分布矩阵,描述电力系统潮流分布,单位为MW; $\mathbf{P}_C$ 为机组注入分布矩阵,单位为MW; $\mathbf{E}_C$ 为发电机组注入碳排放强度分布矩阵,单位为kg/kWh。式(1)为忽略网损的情况下得出的计算方法,当考虑网损时计算方法存在一定的局限性,使得配电网的调度运行无法达到最优状态。

式(1)仅适用于无损网络,当系统网损不能忽略时,需要对网络进行等效,等效为理想的无损网络后进行计算。对于电力系统而言,传统的碳排放追踪方法往往只考虑有功功率,忽略了无功功率对系统碳排放的影响。无功功率会影响系统的网损和电压,进而影响有功功率的分布。故针对考虑网损的碳排放计算时,也应考虑无功功率的影响。因此,对网络进行等效时,建立复功率分布矩阵,整个系统的碳流分布最终与有功潮流有关。等效前需要得到电力网络中的各个节点 $i$ 、 $j$ ,支路 $i-j$ 中有功功率 $P$ 与无功功率 $Q$ 的流动情况。

以节点 $i$ 分析,共有 $n$ 个节点, $S'_i$ 为等效后节点 $i$ 的复功率,由初始实际节点复功率以及节点损耗构成。

$$S'_i = S_i + \Delta S_i \quad (2)$$

式中: $S_i$ 为流过节点 $i$ 的初始复功率; $\Delta S_i$ 为节点 $i$ 处待求的节点损耗。

分析支路 $i-j$ ,节点损耗此时分担给支路网损以及负荷所分摊损耗,即支路 $i-j$ 上所等效后的支路复功率 $S'_{ij}$ 由该支路实际复功率与该支路分摊损耗构成。

$$S'_{ij} = S_{ij} + \Delta S_{ij} \quad (3)$$

式中: $\Delta S_{ij}$ 为节点 $i$ 节点损耗向节点 $j$ 分摊所导致的附加的损耗; $S_{ij}$ 为支路 $i-j$ 上的实际初始复功率。

$$S_{ij} = S_{ij,\text{end}} + S_{ij,\text{loss}} \quad (4)$$

式中: $S_{ij,\text{end}}$ 为支路 $i-j$ 末端的复功率; $S_{ij,\text{loss}}$ 为初始阶段该支路的网损。

同时,节点 $i$ 的初始复功率可表示为

$$S_i = \sum_{i \in \phi_i} (-S_{ij}) + S_{Gi} \quad (5)$$

式中: $\phi_i$ 为与节点 $i$ 直接相连且有有功功率流动的节点的集合; $S_{Gi}$ 为发电机组向节点 $i$ 输入的复功率。

当不考虑节点损耗分摊给支路 $i-j$ 的附加损耗时,网损 $S_{ij,\text{loss}}$ 与该支路始端和末端复功率分布关系为

$$S_{ij,\text{loss}} = S_{ji} - (-S_{ij}) = S_{ij} + S_{ji} \quad (6)$$

式中: $S_{ji}$ 为支路 $j-i$ 上初始复功率。按照上述方法继续对负荷侧进行等效,等效后的负荷 $S'_{fi}$ 为在初始负荷的基础上加上节点损耗分摊给负荷侧的损耗。

$$S'_{fi} = S_{fi} + \Delta S_{fi} \quad (7)$$

式中: $S_{fi}$ 为初始负荷复功率; $\Delta S_{fi}$ 为节点损耗分摊给

负荷侧的损耗。

由节点损耗分摊给支路网损以及负荷的损耗采用复比例共享原则,即对有功无功进行统一研究,达到对任一支路以及负荷的损耗分摊。对节点损耗进行分摊后,总的节点损耗为

$$\Delta S_i = \Delta S_{fi} + \sum_{j \in \phi_i} S_{ij} \quad (8)$$

其中的损耗采用比例共享原则为:

$$\frac{\Delta S_{ij}}{\Delta S_i} = \frac{S_{ij}}{S_i} \quad (9)$$

$$\frac{\Delta S_{fi}}{\Delta S_i} = \frac{S_{fi}}{S_i} \quad (10)$$

等效完成的无损网络可由上述过程进行描述,但其中节点损耗未知,需要计算出节点损耗来得到分配节点损耗后等效的负荷以及支路潮流分布。计算节点损耗可利用等效后的潮流分布建立方程,等效前的节点复功率与节点损耗之和等于等效后的机组注入复功率与支路末端即节点 $j$ 相连的所有等效后的支路复功率 $S'_{ij}$ 之和。

$$S_j + \Delta S_j = \sum_{i \in \phi_j} S'_{ij} + S_{Gj} \quad (11)$$

式中: $\phi_j$ 为与节点 $j$ 直接相连且有有功功率流动的节点的集合; $S_j$ 为节点 $j$ 的复功率; $\Delta S_j$ 为节点 $j$ 的节点损耗; $S_{Gj}$ 为节点 $j$ 的机组注入复功率。

将式(3)、式(9)代入式(11)得

$$S_j + \Delta S_j = \sum_{i \in \phi_j} (S_{ij,\text{end}} + S_{ij,\text{loss}}) + \sum_{i \in \phi_j} \frac{S_{ij}}{S_i} \Delta S_i + S_{Gj} \quad (12)$$

此时节点 $j$ 的复功率是由与节点 $j$ 直接相连的上游节点的注入以及机组注入组成。

$$S_j = \sum_{i \in \phi_j} S_{ij,\text{end}} + S_{Gj} \quad (13)$$

将式(13)代入式(12)得

$$\Delta S_j - \sum_{i \in \phi_j} \frac{S_{ij}}{S_i} \Delta S_i = \sum_{i \in \phi_j} S_{ij,\text{loss}} \quad (14)$$

将式(14)改为矩阵形式。

$$\mathbf{A}_s \Delta \mathbf{S} = \mathbf{S}_{\text{loss}} \quad (15)$$

式中: $\Delta \mathbf{S}$ 为由各节点损耗组成的复功率 $n$ 阶列向量; $\mathbf{S}_{\text{loss}}$ 为由初始状态下与各节点直接相连支路损耗组成的 $n$ 阶列向量; $\mathbf{A}_s$ 为 $n$ 阶上游复功率分布矩阵。

上游复功率分布矩阵 $\mathbf{A}_s$ 中的各个元素 $A_{s,ij}$ 为

$$A_{s,ij} = \begin{cases} 1 & , i = j \\ -S_{ij}/S_i & , i \in \phi_j \\ 0 & , \text{其他} \end{cases} \quad (16)$$

通过上述分析可得 $\Delta S$ ,即节点损耗已知的情況下,可对有损的网络进行无损等效,具体损耗等效方法如式(9)、式(10)所示。

基于复比例共享原则,对已知网络进行等效,将发电机组发出的复功率按照比例分摊到负荷、支路,以此来分析节点损耗按照比例分摊给直接相连且有有功功率流动的支路以及负荷上,网络等效为无损网络后进行节点碳势的计算。

对于电力系统碳排放来说,复功率考虑了电力系统中的有功和无功两个方面,能够更全面地反映电力系统的运行状态,有功功率直接关联电能的消耗和转换,而无功功率则关系系统的电压水平和电能质量。通过复功率分布矩阵,可以更准确地追踪电力系统中的碳流,进而更加准确地将有损网络转化为无损网络。具体的等效为理想的无损网络的转换过程如图1所示。

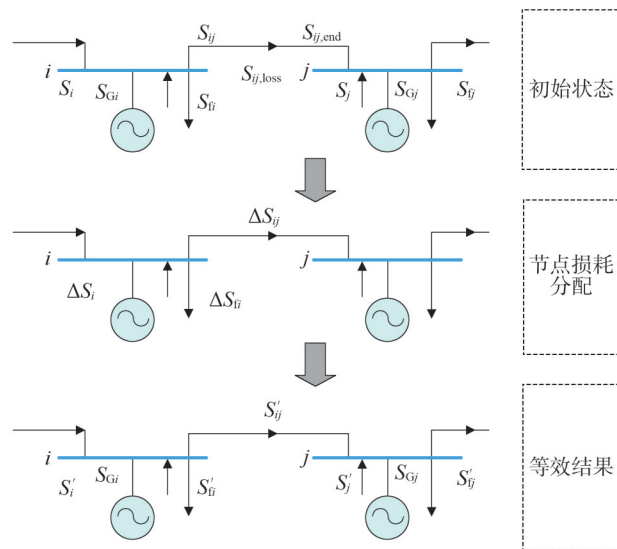


图1 等效电路转换图

Fig.1 Equivalent circuit transformation diagram

等效后的无损网络也考虑了无功功率对有功功率的影响等因素,得到的等效后的复功率分布矩阵更能直接反映系统此时的运行状态,得到等效后的复功率分布矩阵后,根据式(1)计算各节点的节点碳势,实现了各节点碳势实时可知。

## 2 基于碳排放流的配电系统低碳优化运行

碳排放流计算主要与有功潮流有关,即采用上述方法将主网有损网络等效为无损网络后,由式(1)计算出主网节点碳势。现有节点碳势计算方法未考虑网损,考虑网损的计算也未考虑无功功率的影响,本文针对配电网的低碳优化运行,将有损网络转化为无损网络,以此排除忽略无功功率和网损而造成的碳排放的低估。

### 2.1 碳流在配电网的运行特点

碳排放流是依附于电力潮流存在的一种虚拟网络流,用于表征某一支路上所流过功率对应的碳排放量。碳流为节点碳势与该节点注入的有功功率的比值,即碳流只和有功功率有关。

针对整个配电系统的优化运行,传统的配电网优化调度仅考虑分布式发电机组和风光等发电,未考虑储能元件。在配电系统中,当网络中存在运行的分布式燃机以及正在放电的储能元件时,机组以及储能元件所在节点碳势会受到一定的影响;反之,该节点下游的其他节点碳势均等于该节点的节点碳势,即从碳流的角度来看,该节点下游的碳流密度等于该节点的节点碳势。

配电网中节点碳势受潮流分布影响,且会随着主网运行方式和分布式能源出力等因素变化而变化,导致碳排放流的时空差异性。本文综合考虑了分布式燃机、光伏发电和储能元件的运行特点,分布式燃机的放电碳势较高,而光伏的放电碳势为0,储能元件则需要考虑储能的充放电状态,储能元件充电的过程,就是积累碳排放的过程,放电时看作发电机组。根据上述方法对配电网进行网络等效,得到理想的无损网络,由式(1)计算出各个节点的节点碳势。

储能元件充放电过程则需要放电碳势的实时准确值。

$$e_{s,w} = \frac{1}{\eta_2} \cdot \frac{F_0 + \int_{T_0}^{T_1} L(t) dt}{Q_0 + \int_{T_0}^{T_1} P(t) \eta_1 dt} \quad (17)$$

式中: $F_0$ 为储能元件由放电转为充电时的碳流量; $Q_0$ 为由放电转为充电时所含的电量; $e_{s,w}$ 为第 $w$ 个储能元件的放电碳势; $P(t)$ 和 $L(t)$ 为在充电过程中 $t$ 时刻的充电功率、充电瞬时碳流率; $\eta_1$ 和 $\eta_2$ 为储能的充

电、放电转换效率;  $\int_{T_0}^{T_1} L(t) dt$  为充电过程中积累的碳流量;  $T_0, T_1$  为由放电变为充电的时刻和充电结束的时刻;  $\int_{T_0}^{T_1} P(t) \eta_1 dt$  为充电过程中积累的电量。

## 2.2 改进黑猩猩算法

黑猩猩优化算法(chimp optimization algorithm, COA)的核心是模拟黑猩猩对猎物的驱赶、追逐、拦截及攻击四种狩猎策略。

首先,需要随机给出黑猩猩的初始位置  $Z_{ch}$ 。

$$Z_{ch} = \text{rand}(Z_{\text{sou}} - Z_{\text{db}}) + Z_{\text{db}} \quad (18)$$

式中:  $Z_{\text{sou}}$  为搜索范围空间的上边界;  $Z_{\text{db}}$  为搜索空间的下边界。

然后,黑猩猩逐步靠近并包围猎物。

$$Z_{ch}(T+1) = Z_{wz}(T) - \mathbf{a} \cdot \mathbf{d} \quad (19)$$

$$\mathbf{d} = \left| \mathbf{c} \cdot Z_{wz}(T) - \mathbf{m} \cdot Z_{ch}(T) \right| \quad (20)$$

式中:  $Z_{ch}(T)$  为迭代次数为  $T$  时位置向量;  $Z_{wz}(T)$  为迭代次数为  $T$  时猎物的位置向量;  $\mathbf{d}$  为黑猩猩与猎物的距离向量;  $\mathbf{a}, \mathbf{c}$  为系数向量;  $\mathbf{m}$  为混沌映射的向量。

向量  $\mathbf{a}, \mathbf{c}$  的元素为:

$$a_x = 2F' \cdot r_1 - F' \quad (21)$$

$$c_y = 2r_2 \quad (22)$$

式中:  $F'$  为收敛因子,迭代过程中为线性从 2.5 减少到 0;  $r_1, r_2$  为  $[0, 1]$  内的随机数。

捕猎的过程中可表示为:

$$\begin{cases} d_A = \left| c_1 \cdot Z_A(T) - m_1 \cdot Z_{ch1}(T) \right| \\ d_B = \left| c_2 \cdot Z_B(T) - m_2 \cdot Z_{ch2}(T) \right| \\ d_C = \left| c_3 \cdot Z_C(T) - m_3 \cdot Z_{ch3}(T) \right| \\ d_D = \left| c_4 \cdot Z_D(T) - m_4 \cdot Z_{ch4}(T) \right| \end{cases} \quad (23)$$

$$\begin{cases} Z_{ch1}(T+1) = Z_A(T) - a_1 \cdot d_A \\ Z_{ch2}(T+1) = Z_B(T) - a_2 \cdot d_B \\ Z_{ch3}(T+1) = Z_C(T) - a_3 \cdot d_C \\ Z_{ch4}(T+1) = Z_D(T) - a_4 \cdot d_D \end{cases} \quad (24)$$

$$Z(T+1) = \frac{1}{4} [Z_{ch1}(T+1) + Z_{ch2}(T+1) + Z_{ch3}(T+1) + Z_{ch4}(T+1)] \quad (25)$$

式中:  $d_A, d_B, d_C, d_D$  为四个最优黑猩猩与目标猎物的距离;  $Z_A(T), Z_B(T), Z_C(T), Z_D(T)$  为迭代次数为  $T$  时四个最优黑猩猩相对猎物的位置;  $a_1 - a_4, c_1 - c_4$  为系数向量  $\mathbf{a}, \mathbf{c}$  的元素;  $m_1 - m_4$  为混沌映射向量  $\mathbf{m}$  的

元素;  $Z_{ch1}(T) - Z_{ch4}(T)$  为迭代次数为  $T$  时四个最优黑猩猩位置;  $Z(T+1)$  为迭代次数为  $T+1$  时最优黑猩猩位置的平均值。

在狩猎最后阶段,四类群体中其余的黑猩猩根据位置最佳的黑猩猩位置更新自身位置并开始攻击猎物。

## 2.3 基于碳排放流的配电网优化运行模型

电力系统碳排放流与有功功率有关,而无功率会影响有功功率,进而影响碳排放。现有研究缺乏考虑网损的碳排放流研究,采用复功率对配电网有损网络进行等效,等效后的网络同时考虑了无功功率影响和网损,再以等效后有功功率潮流分布矩阵计算碳排放,能够有效提高优化运行结果的准确性。

### 2.3.1 目标函数

优化运行目标为总的综合成本最小,建立配电网低碳优化模型。

$$\begin{cases} \min E = E_g + E_{TP} + E_{SOC} + E_{QI} \\ E_g = \sum_{t=1}^{24} C_{g,t} P_{g,t} \\ E_{TP} = \sum_{t=1}^{24} (P_{G0,t} \cdot e_{G0,t} + \sum_{K=1}^K P_{GK,t} \cdot e_{GK,t}) \\ E_{SOC} = \frac{C_{IN} C_{RE}}{8760} \sum_{t=1}^{24} \sum_{w=1}^{N_{SOC}} P_{SOC,w,t} \\ E_{QI} = \sum_{t=1}^{24} \sum_{q=1}^{N_{PV}} C_{PV,q,t} P_{PVQ,q,t} \end{cases} \quad (26)$$

式中:  $E$  为配电系统总的成本;  $E_g$  为配电网的运行成本;  $E_{TP}$  为系统总的碳排放成本;  $E_{SOC}$  为储能元件的运行成本;  $E_{QI}$  为弃光费用,弃光是指已产生的光伏发电无法被输送或利用,从而被迫放弃;  $C_{g,t}$  和  $P_{g,t}$  为在  $t$  时刻从上级主网所购得的电量和所购电量的价格;  $P_{GK,t}$  和  $e_{GK,t}$  为在  $t$  时刻第  $K$  个分布式燃机的有功出力 and 放电碳势;  $P_{G0,t}$  和  $e_{G0,t}$  为  $t$  时刻来自主网的有功功率以及主网碳势;  $C_{IN}$  和  $C_{RE}$  为开始时所投入的成本以及资本回收系数;  $N_{SOC}, N_{PV}$  为安装储能元件的数量以及光伏的数量;  $C_{PV,q,t}, P_{PVQ,q,t}$  为第  $q$  个光伏发电弃光单位惩罚费用和弃光功率;  $P_{SOC,w,t}$  为第  $w$  个储能元件在  $t$  时刻的充放电功率。

### 2.3.2 约束条件

1) DistFlow 潮流约束。

DistFlow 潮流模型多用于辐射状网络,排除了电

压相角以及电流等因素的影响,由于存在非线性等式约束,DistFlow模型是非凸的,很难求解出DistFlow模型的整体最优解,故DistFlow模型松弛为二阶锥规划模型。二阶锥模型是典型易求解的凸优化问题,因此用于配电网优化调度的最优解。

$$\begin{cases} P_{i,t} = \sum_{(i,j) \in A_1} P_{ij} - \sum_{(k,i) \in A_2} (P_{ki} - r_{ki} l_{ki}) \\ Q_{i,t} = \sum_{(i,j) \in A_1} Q_{ij} - \sum_{(k,i) \in A_2} (Q_{ki} - x_{ki} l_{ki}) \\ \bar{U}_j = \bar{U}_i - 2(r_{ij} P_{ij} + x_{ij} Q_{ij}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) l_{ij} \\ l_{ij} \geq \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{\bar{U}_i} \end{cases} \quad (27)$$

式中: $P_{i,t}$ 、 $Q_{i,t}$ 为在 $t$ 时刻节点 $i$ 有功功率和无功功率注入; $P_{ij}$ 、 $Q_{ij}$ 为支路 $i-j$ 所流过的有功功率和无功功率; $A_1$ 、 $A_2$ 为以节点 $i$ 为始节点的所有支路的集合以及以节点 $i$ 为尾节点的支路的集合; $P_{ki}$ 、 $Q_{ki}$ 为支路 $k-i$ 上所流过的有功功率和无功功率; $r_{ki}$ 、 $x_{ki}$ 、 $r_{ij}$ 、 $x_{ij}$ 为支路 $k-i$ 以及支路 $i-j$ 上的电阻和电抗; $l_{ki}$ 、 $l_{ij}$ 为支路 $k-i$ 以及支路 $i-j$ 上的电流幅值的平方; $\bar{U}_j$ 、 $\bar{U}_i$ 为节点 $j$ 和节点 $i$ 的节点电压的幅值平方。

### 2) 电压幅值与电流幅值约束。

潮流方程的解的集合具有不确定性,同时为了保证配电网系统的热稳定,采用节点电压与电流幅值进一步约束,使解趋于稳定的区间。

$$\begin{cases} U_{i,\min}^2 \leq \bar{U}_i \leq U_{i,\max}^2 \\ l_{ij} \leq \alpha_{ij} I_{ij,\max}^2 \\ \alpha_{ij} \in \{0,1\} \end{cases} \quad (28)$$

式中: $U_{i,\max}$ 为节点 $i$ 处的节点电压最大幅值; $U_{i,\min}$ 为节点 $i$ 处点电压最小幅值; $I_{ij,\max}$ 为支路 $i-j$ 所流过的电流最大幅值; $\alpha_{ij}$ 为支路 $i-j$ 开断状态的开关变量,取值为1时表示支路 $i-j$ 为闭合流通的状态,取值为0时表示支路 $i-j$ 为断开的状态。

### 3) 新能源约束。

$$\begin{cases} P_{PV,q,t} = P_{PV,q,t}^{\max} - P_{PVQ,q,t} \\ 0 \leq P_{PVQ,q,t} \leq P_{PV,q,t}^{\max} \\ P_{PV,q,t}^2 + Q_{PV,q,t}^2 \leq S_{PV,q}^2 \end{cases} \quad (29)$$

式中: $P_{PV,q,t}$ 、 $P_{PV,q,t}^{\max}$ 为第 $q$ 个光伏发电在 $t$ 时刻的实际有功功率、最大有功功率; $Q_{PV,q,t}$ 为第 $q$ 个光伏发电在 $t$ 时刻实际的无功功率; $S_{PV,q}$ 为第 $q$ 个光伏发电的装机容量。

### 4) 储能元件运行约束。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{cd,w,t} \leq P_{cd}^{\max} \\ 0 \leq P_{h,w,t} \leq P_h^{\max} \\ 10\% S_w^{\max} \leq S_{w,t} \leq 90\% S_w^{\max} \\ S_{w,t} = S_{w,t-1} + (\eta_{cd,w} P_{cd,w,t} - P_{h,w,t} / \eta_{h,w}) \end{cases} \quad (30)$$

式中: $P_{cd,w,t}$ 、 $P_{h,w,t}$ 为储能元件 $w$ 在 $t$ 时刻的充电功率以及放电功率; $P_{cd}^{\max}$ 、 $P_h^{\max}$ 为储能元件的最大充电功率和最大放电功率; $S_{w,t}$ 、 $S_w^{\max}$ 为储能元件 $w$ 的荷电状态以及最大荷电状态; $\eta_{cd,w}$ 、 $\eta_{h,w}$ 为储能元件 $w$ 的充电转换效率以及放电转换效率。

### 5) 分布式燃机发电功率约束。

$$\begin{cases} P_{GK,\min} \leq P_{GK,i,t} \leq P_{GK,\max} \\ Q_{GK,\min} \leq Q_{GK,i,t} \leq Q_{GK,\max} \end{cases} \quad (31)$$

式中: $P_{GK,\min}$ 、 $P_{GK,\max}$ 为第 $K$ 个分布式燃机的最小有功功率和最大有功功率; $Q_{GK,\min}$ 、 $Q_{GK,\max}$ 为第 $K$ 个分布式燃机发出的最小和最大无功功率; $P_{GK,i,t}$ 、 $Q_{GK,i,t}$ 为第 $K$ 个分布式燃机在节点 $i$ 处 $t$ 时刻输出的有功功率和无功功率。

### 6) 分布式燃机爬坡约束。

$$-P_{DGK,\max} \leq P_{GK,i,t} - P_{GK,i,t-1} \leq P_{UGK,\max} \quad (32)$$

式中: $P_{DGK,\max}$ 、 $P_{UGK,\max}$ 分别为第 $K$ 个分布式燃机向下和向上调节的最大出力。

## 2.4 配电网低碳需求响应模型

### 1) 目标函数。

配电网低碳需求响应主要分为碳排放因素和新能源消纳因素。

$$f = \sum_{j=1}^M \sum_{t=1}^{24} (p_{fu}(j,t) - p_{fd}(j,t)) E_N(j,t) - \sum_{j=1}^M \sum_{t=1}^{24} p_{fu}(j,t) P_{dropnew}(j,t) \quad (33)$$

式中: $f$ 为需求响应的目标函数; $p_{fu}(j,t)$ 、 $p_{fd}(j,t)$ 为节点 $j$ 处所接负荷在 $t$ 时刻的负荷增加量以及负荷减少量; $P_{dropnew}(j,t)$ 为节点 $j$ 的在 $t$ 时刻光伏发电舍弃量; $M$ 为节点总数; $E_N(j,t)$ 为节点 $j$ 在 $t$ 时刻的节点碳势。

### 2) 约束条件。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{fu}(t) \leq u_{fu} P_{fu,\max}(t) \\ 0 \leq P_{fd}(t) \leq u_{fd} P_{fd,\max}(t) \\ \left| \sum_{j=1}^M P_{fu,j} - P_{fd,j} \right| = 0 \end{cases} \quad (34)$$

式中: $u_{fu}$ 、 $u_{fd}$ 为0-1元素,负荷增加时取1,减少时取0,相同节点不可同时为1; $P_{fu}(t)$ 、 $P_{fd}(t)$ 为 $t$ 时刻系统负荷的增加量和负荷的减少量; $P_{fu,j}$ 、 $P_{fd,j}$ 为节点 $j$ 处

相连负荷的增加量和负荷减少量; $P_{fd,max}(t)$ 、 $P_{fu,max}(t)$ 为系统负荷在 $t$ 时刻可增大和减少的最大量。

3)需求响应成本。

当用户因调整自身用电功率导致用电体验不佳时,电网应当向用户提供相应的补偿措施。

$$C_{DR} = \sum_{t=1}^{24} c_{DR} (P_{fu}(t) - P_{fd}(t)) \Delta t \quad (35)$$

式中: $C_{DR}$ 、 $c_{DR}$ 为需求响应补偿费用和成本系数; $\Delta t$ 为需求响应过程的时间差。

2.5 考虑网损的配电网低碳优化调度求解方法

碳流计算需要考虑配电网整体潮流状态以及来自自主网的主网碳势,故本模型考虑全系统综合运行成本问题。首先进行网络等效,在考虑无功功率的影响下,将配电网系统的有损网络转化为无损网络后,更新系统潮流,计算节点碳势。利用更新后的系统潮流分布进行优化分析,其中分布式燃机机组碳势固定,优化运行过程中需要求解机组的出力情况。当主网节点碳势高于机组碳势,需要降低主网的供电,增大分布式燃机的供电;当机组碳势较高时,降低机组的开机,增大来自自主网的供电,提高主网供电的消纳。储能元件工作状态也与其所在的节点碳势有关,当节点碳势高于储能元件的放电碳势时,由储能元件储存的低碳电能进行放电;当储能元件的放电碳势小于节点碳势时,储能元件进行充电,增大主网的供电,此时储能元件看作负荷。光伏给定了在任意 $t$ 时刻的光伏出力情况,并取光伏的碳势为零。在一个阶段结束后,实时调整机组的运行状态,再进行下一阶段的优化运行。

3 算例分析

3.1 有损网络等效可行性

3.1.1 网络转换验证

以改进二机四节点系统进行验证,能够清楚地得到无损到有损转化的流程以及网损的分配。该改进的二机四节点系统的节点1和节点2有两个发电机组,机组2为新能源机组,机组碳排放强度分别为 $0.875 \text{ kg/kWh}$ 和 $0 \text{ kg/kWh}$ ,发电机组分别输入的复功率为 $S_{G1} = 200 + 100j \text{ MW}$ 和 $S_{G2} = 144 + 69j \text{ MW}$ ,节点3和节点4的负荷分别为 $S_{f3} = 130 + 35j \text{ MW}$ 和 $S_{f4} = 200 + 130j \text{ MW}$ 。经过计算,系统总的网损为 $14 + 14j \text{ MW}$ ,此时改进二机四节点的拓扑结构如图

2所示。

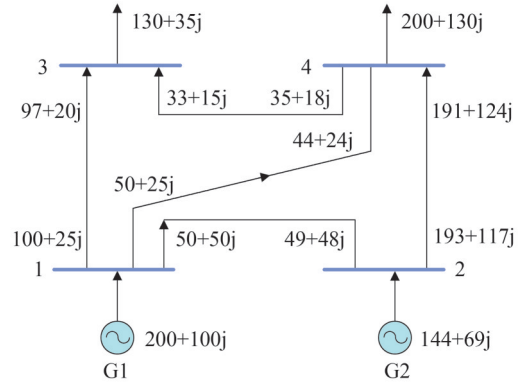


图2 二机四节点拓扑结构

Fig.2 Two-machine four-node topology

上游复功率分布矩阵 $A_s$ 和初始状态下与上述各节点直接相连支路损耗组成的 $n$ 阶列向量 $S_{loss}$ 分别为:

$$A_s = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{50+50j}{200+100j} & 1 & 0 & 0 \\ \frac{100+25j}{200+100j} & 0 & 1 & \frac{35+18j}{235+148j} \\ \frac{50+25j}{200+100j} & \frac{193+117j}{193+117j} & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (36)$$

$$S_{loss} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1+2j \\ 5+8j \\ 8+4j \end{bmatrix} \quad (37)$$

结合式(15)、式(16)得

$$\Delta S = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{50+50j}{200+100j} & 1 & 0 & 0 \\ \frac{100+25j}{200+100j} & 0 & 1 & \frac{35+18j}{235+148j} \\ \frac{50+25j}{200+100j} & \frac{193+117j}{193+117j} & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 1+2j \\ 5+8j \\ 8+4j \end{bmatrix} \quad (38)$$

$$\Delta S = [0 \quad 1+2j \quad 6.35+8.74j \quad 9+6j]^T \quad (39)$$

按照以上步骤验证节点损耗是否按照共享原则

分配给节点负荷以及支路,此时由计算可得,分配给  $S_{13}$  与  $S_{14}$  负荷的额外损耗分量为  $6.35+8.74j$  MW 和  $7.65+5.26j$  MW。由上述可知,系统总的损耗为  $14+14j$  MW,验证了考虑复功率对有损等效为无损网络的可行性。分析此时的线损,支路1-2、1-3、1-4三条支路上分摊的损耗为0 MW,支路2-4和4-3分摊的损耗为  $1+2j$  MW 与  $1.35+0.74j$  MW,支路分摊的总损耗为  $2.35+2.74j$  MW,符合式(3)。经分析可知,该方法能够快速准确地同时考虑有功、无功影响下将有损网络等效为无损网络,并可以快速得到理想无损网络。

### 3.1.2 碳流计算分析

在网络等效的基础上,对改进二机四节点系统进行碳流计算,计算结果如表1、表2所示,可得系统各节点碳势以及各个支路的碳流率。

表1 各节点碳势

Table 1 Nodal carbon potential of each node 单位:kg/kWh

| 名称   | 节点1   | 节点2   | 节点3   | 节点4   |
|------|-------|-------|-------|-------|
| 节点碳势 | 0.875 | 0.302 | 0.781 | 0.530 |

表2 各支路碳流率

Table 2 Carbon flow rate in each branch 单位:t/h

| 名称  | 支路1-2 | 支路1-3  | 支路1-4  | 支路2-4 | 支路4-3 |
|-----|-------|--------|--------|-------|-------|
| 碳流率 | 52.50 | 196.88 | 100.63 | 52.50 | 44.91 |

## 3.2 改进33节点系统仿真分析

本分析基于 MATLAB,通过 Gurobi/Yalmip 对优化调度和需求响应进行求解。目标优化通过黑猩猩优化算法进行优化求解,并验证收敛性。为更好地验证模型的可行性,设置四组场景。

场景一:以配电网总的综合成本为优化目标,忽略需求响应和改进碳流计算方法。

场景二:考虑配电网总的综合成本以及需求响应,不考虑改进碳流计算方法。

场景三:以配电网总的综合成本为运行目标,并利用改进碳流计算方法进行网络等效,考虑需求响应中的低碳因素,不考虑新能源消纳因素。

场景四:该场景为本文模型,同时考虑配电网总运行成本和需求响应,采用上述碳流计算方法更新

系统潮流,计算该系统节点碳势后进行系统优化。

该仿真分析以东北某地区配电网系统为例,图3为改进33节点系统。节点1可从上级主网进行购电;节点20、节点27、节点31分别接入光伏发电机组,机组容量分别为1000 kW、600 kW、800 kW;节点10、节点17、节点21、节点32分别接入装机容量为400 kW、600 kW、400 kW、300 kW的分布式燃机;节点11、节点25分别接入容量均为600 kW的储能设备,且该设备的最大充放电功率为160 kW,充放电转换效率为95%;系统可从节点1处向主网进行购电。

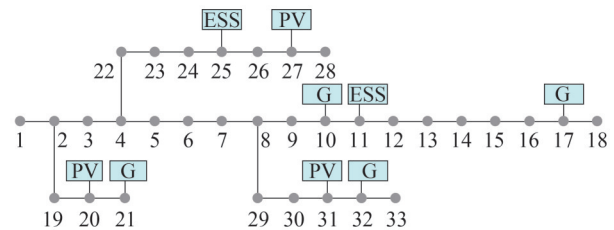


图3 改进33节点系统

Fig.3 Modified 33-node system

图4为该系统各节点各时间段的负荷预测值。图5为光伏发电预测值和各时间段内所有节点的负荷预测总量。由图5可知,该日的光伏发电出力13521 kW,该日内总的负荷需求为34610.34 kW。负荷需求缺额由主网购电以及分布式燃机提供。10:00—13:00的光伏出力高于该时段的负荷需求。

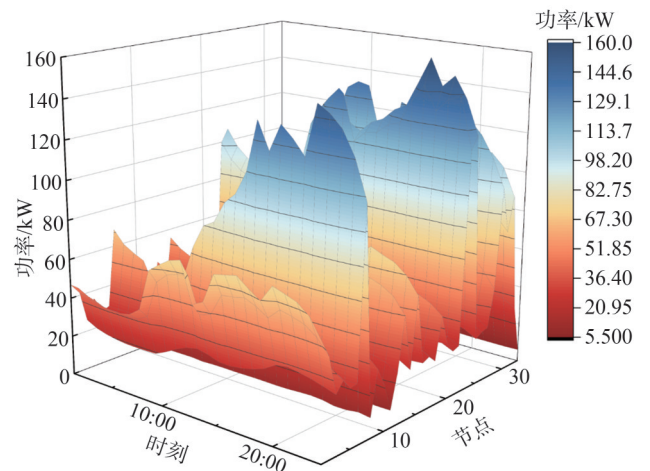


图4 负荷预测值

Fig.4 Load forecast values

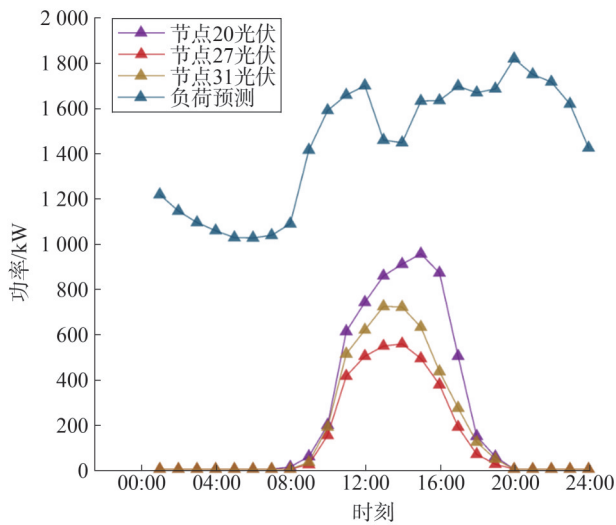


图5 光伏预测与负荷对比

Fig.5 Comparison of photovoltaic prediction and load

图6为主网的碳势实时值,中午时火电比例升高,即主网碳势升高,将由碳势低的光伏发电以及分布式燃机供电。

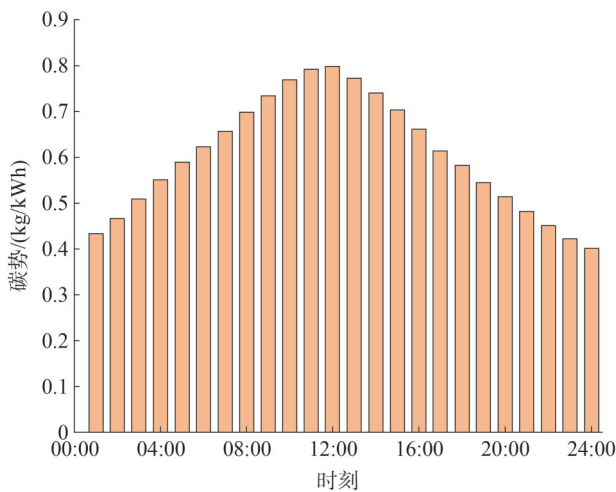


图6 主网实时碳势

Fig.6 Real-time carbon potential of the main grid

### 3.3 仿真结果分析

需求响应结果如图7所示。

表3为需求响应各场景的负荷调整率以及需求响应成本。场景一未进行需求响应,即为原负荷。场景二、场景三需求响应结果较为接近,场景二考虑了总运行成本最低以及需求响应,场景三仅考虑了

碳排放量以及低碳需求响应,未考虑需求响应中的新能源消纳因素和未使用改进的碳流计算方法。与场景二和场景三相比,本文模型(场景四)负荷调整升高,需求响应成本略有增高。

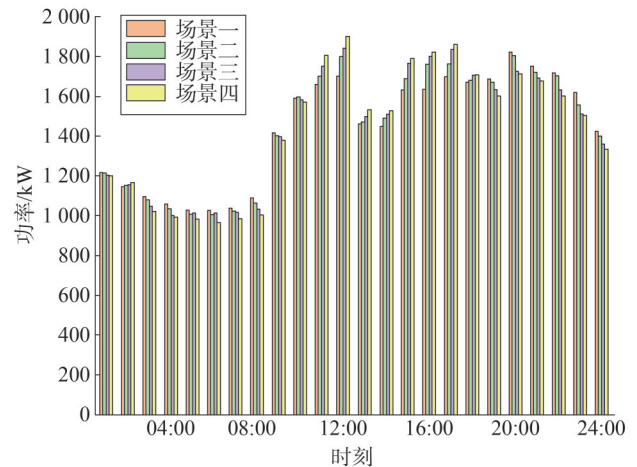


图7 需求响应结果

Fig.7 Demand response results

表3 响应成本与负荷调整率

Table 3 Response costs and load adjustment rates

| 参数       | 场景二    | 场景三    | 场景四    |
|----------|--------|--------|--------|
| 负荷调整率/%  | 10.98  | 11.08  | 11.42  |
| 需求响应成本/元 | 127.68 | 127.87 | 131.65 |

分布式燃机出力结果如图8所示。

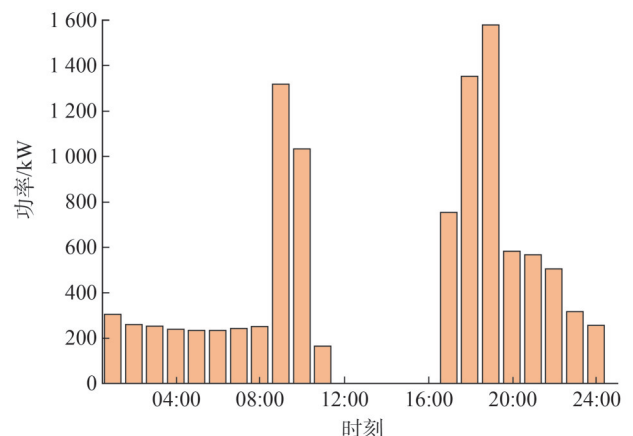


图8 发电机组出力情况

Fig.8 Power generation unit output status

由图 8 可知,中午时光伏出力远超负荷,无须分布式燃机以及主网出力;00:00—08:00、21:00—24:00 为主网低碳时段,主要由主网进行供电,分布式燃机的开机会引起低碳电能的消纳问题;09:00—11:00、17:00—20:00 为主网高碳时段,主要由分布式燃机进行供电,此时来自主网电能的火电比例升高,由分布式燃机进行主要供电。主网购电情况如图 9 所示。

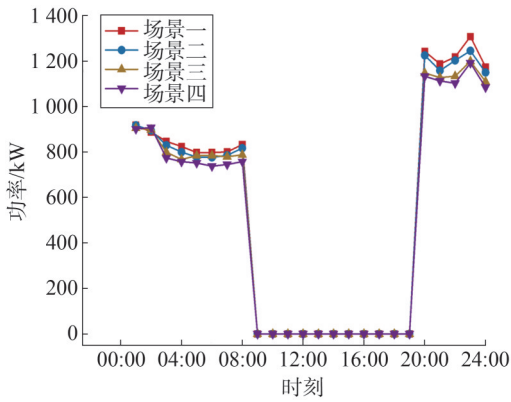


图 9 主网购电量

Fig.9 Main grid purchased electricity

对比可知,场景一、场景二、场景三的购电量分别为 12 840.06 kWh、12 584.17 kWh、12 225.97 kWh,场景四购电量为 11 962.04 kWh,相较于其他模型,场景四购电量明显降低。新能源消纳情况如图 10 所示。

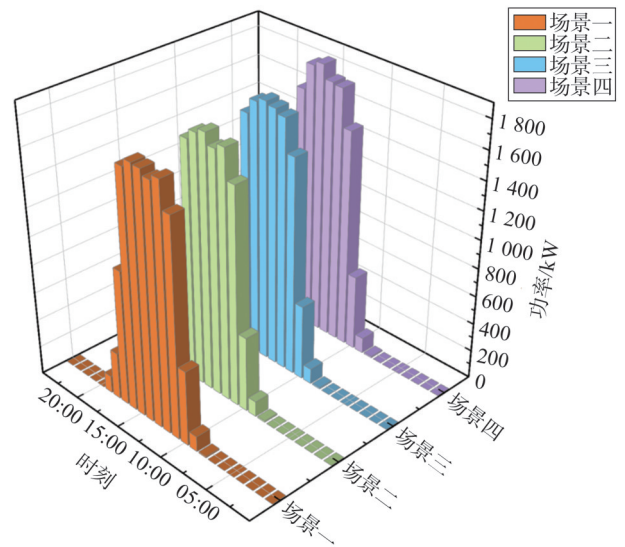


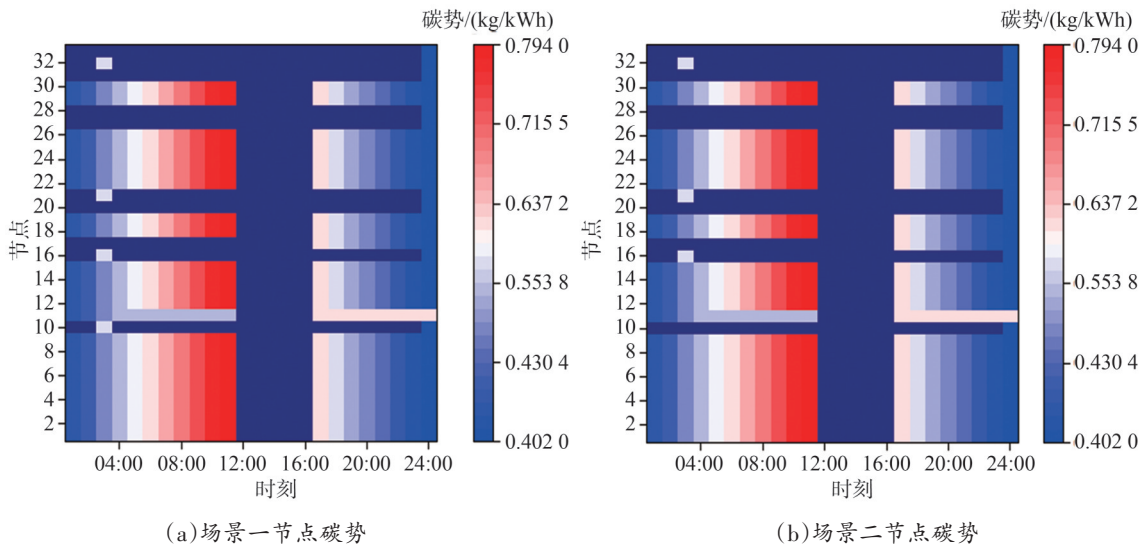
图 10 新能源消纳

Fig.10 Renewable energy integration

场景一、场景二、场景三的新能源舍弃量分别为 1 376.03 kW、1 277.89 kW、1 101.89 kW。场景四舍弃量为 899.12 kW,新能源消纳率为 93.35%,相较于其他三种场景的新能源消纳率有明显提升。

图 11 为各场景下各个节点各个时间节点的碳势情况。在无光伏出力的情况下,对主网碳势和分布式燃机碳势以及储能的放电碳势进行比较,由碳势较低的进行供电。在光伏发电下游节点,随着光伏发电增加,节点碳势逐渐下降,并在中午时段下降为 0。

表 4 为各场景下的碳排放量以及总的成本情



(a)场景一节点碳势

(b)场景二节点碳势

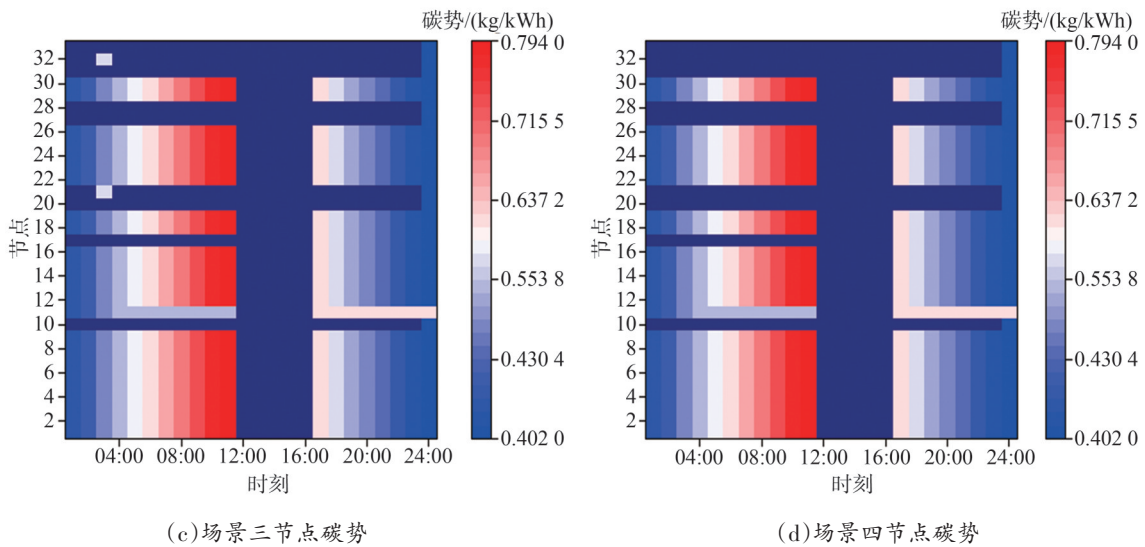


图 11 节点碳势情况  
Fig.11 Nodal carbon potential status

况。场景一未考虑需求响应,碳排放和成本都较高;场景二仅考虑了需求响应中的低碳因素,使得运行成本升高;场景三考虑了需求响应,但系统总运行成本里主要以碳排放成本最低为目标,故运行成本较高;场景四相较于其他三个场景,运行成本以及碳排放都较低。

表 4 各场景运行成本碳排放量  
Table 4 Operating costs and carbon emissions for different scenarios

| 参数      | 场景一       | 场景二       | 场景三       | 场景四       |
|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 运行成本/元  | 16 731.23 | 17 102.74 | 17 202.87 | 16 053.38 |
| 碳排放量/kg | 14 275.29 | 13 879.94 | 13 590.84 | 13 095.95 |

### 3.4 黑猩猩优化算法有效性分析

为验证黑猩猩优化算法的有效性以及在配电网优化方面的优势,针对模型四分别采用黑猩猩优化算法、粒子群算法以及遗传算法进行求解,图 12 为三种算法的求解过程对比。经对比可得,使用黑猩猩优化算法求解目标优化问题时,能够获得更优质的解决方案,且该算法的迭代次数较其他算法明显减少,这表明该算法相较其他两个算法,在收敛速度方面也显示出了一定的提升,进一步验证了 COA 算法的有效性。

表 5 为针对本文模型的三种算法的计算结果分

析。由表 5 可知,黑猩猩优化算法与粒子群算法和遗传算法在迭代次数和适应度值进行对比,黑猩猩优化算法的迭代次数更少,收敛时间更短,优化效果更好。

表 5 各场景运行成本碳排放量  
Table 5 Operating costs and carbon emissions for different scenarios

| 算法     | 迭代次数 | 收敛时间/s |
|--------|------|--------|
| COA 算法 | 11   | 3.79   |
| 粒子群算法  | 26   | 6.89   |
| 遗传算法   | 22   | 6.31   |

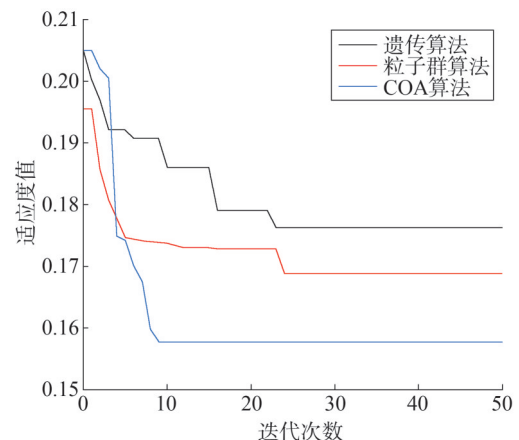


图 12 不同算法求解过程对比  
Fig.12 Comparison of different algorithm solution processes

## 4 结论

针对配电网低碳优化运行问题,本文提出了一种计及网损与复功率影响的碳排放流计算方法及优化模型,得出以下结论:

1)通过构建复功率分布矩阵将有损网络等效为无损网络,充分考虑了无功功率对网损及潮流分布的影响。算例表明,该方法将系统网损分配误差降低,提升了节点碳势计算精度,有效解决了传统方法因忽略无功分量导致的碳排放低估问题,为低碳调度提供了更精准的碳流数据支撑。

2)所构建的"经济成本-碳排放-需求响应"协同优化模型,通过储能充放电策略优化、分布式电源优先级调度及主网购电动态调整,在改进33节点系统中实现了综合成本相较于场景一低9.8%,碳排放量比场景一低8.3%的优化效果。采用黑猩猩优化算法,使得模型的优化时间大大减少,提高了优化效率,新能源消纳率达到93.35%,验证了模型在促进清洁能源消纳与系统低碳化转型中有着重要作用。

## 参考文献

- [1] 刘欣,宁新福,金翼,等.配电网分布式储能的分层优化配置方法[J].浙江电力,2023,42(5):95-104.  
LIU Xin, NING Xinfu, JIN Yi, et al. A hierarchical optimal configuration method for distributed energy storage in distribution networks[J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(5): 95-104.
- [2] 刘奕辰,肖红道,刘晓宏,等.考虑绿证交易及碳排放约束的含风光储微网低碳优化调度[J].浙江电力,2024,43(8):66-73.  
LIU Yichen, XIAO Hongyi, LIU Xiaohong, et al. Low-carbon optimal scheduling for hybrid wind / PV / storage microgrids considering GEC trading and carbon emission constraints [J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(8): 66-73.
- [3] 曾鸣,薛松,魏阳,等.低碳智慧岛能源体系设计及经济可靠性评价模型[J].电力自动化设备,2012,32(12):58-63.  
ZENG Ming, XUE Song, WEI Yang, et al. Energy system for low-carbon-smart islands and economy-reliability assessment model [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(12): 58-63.
- [4] 张沈习,王丹阳,程浩忠,等."双碳"目标下低碳综合能源系统规划关键技术及挑战[J].电力系统自动化,2022,46(8):189-207.  
ZHANG Shenxi, WANG Danyang, CHENG Haozhong, et al. Key technologies and challenges of low-carbon integrated energy system planning for carbon emission peak and carbon neutrality [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(8): 189-207.
- [5] PENG C, XU J J, ZHAO S Q, et al. A new distributed power supply for distribution network considering SOP access [C] // 2023 International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications (AEECA). IEEE, 2023: 86-92.
- [6] 朱泽磊,周京阳,韩忠旭,等.基于多阶段不同政策机制的低碳电力调度模型[J].电网技术,2013,37(2):287-294.  
ZHU Zelei, ZHOU Jingyang, HAN Zhongxu, et al. A low-carbon power dispatch model based on policy mechanisms corresponding to different stages [J]. Power System Technology, 2013, 37(2): 287-294.
- [7] 彭程,徐建勇,赵书琪,等.考虑分层碳排放的多时间尺度光储充一体站日前运行策略[J].电气技术,2025,26(1):1-13.  
PENG Cheng, XU Jianyong, ZHAO Shuqi, et al. Day-ahead operation strategy for a multi-timescale integrated photovoltaic storage and charging station considering carbon emission stratification [J]. Electrical Engineering, 2025, 26(1): 1-13.
- [8] HU J, QIN K, MA R, et al. A study on carbon emission flow tracking for new type power systems [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2025, 165: 110455.
- [9] 唐爱红,余文晗,张莹,等.计及混合交易模式的多区域互联电力系统碳排放流计算方法[J].电网技术,2024,48(9):3535-3543.  
TANG Aihong, YU Wenhan, ZHANG Ying, et al. Calculation method of carbon emission flow in multi-regional interconnected power system considering hybrid trading mode [J]. Power System Technology, 2024, 48(9): 3535-3543.
- [10] XU F, LU Y, HUO Q H, et al. Flexible low-carbon optimal dispatch of honeycombed active distribution network [J]. Energies, 2022, 15(19): 7107.
- [11] 刘可真,李林耘,林铮,等.考虑碳排放流的电-气互联系统源荷互动低碳经济调度[J].电力自动化设备,2024,44(5):1-10.  
LIU Kezhen, LI Linyun, LIN Zheng, et al. Low-carbon economic dispatching of source-load interaction for electricity-gas system considering carbon emission flow [J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(5): 1-10.
- [12] HUANG J H, DUAN W Y, ZHOU Q, et al. Methodology for carbon emission flow calculation of integrated energy systems [J]. Energy Reports, 2022, 8: 1090-1097.
- [13] 冯欣,杨军.考虑网络损耗的碳排放流理论改进与完善[J].电力自动化设备,2016,36(5):81-86.  
FENG Xin, YANG Jun. Improvement and enhancement of carbon emission flow theory considering power loss [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(5): 81-86.
- [14] 魏子强,温鹏,梁志,等.计及需求响应比例的园区综合能源系统低碳经济调度方法[J].太阳能学报,2023,44(10):38-45.  
WEI Ziqiang, WEN Peng, LIANG Zhi, et al. Low carbon economic dispatching method of park integrated energy system considering proportion of demand response [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2023, 44(10): 38-45.

- [15] LI J F, HE X T, LI W D, et al. Low-carbon optimal learning scheduling of the power system based on carbon capture system and carbon emission flow theory [J]. Electric Power Systems Research, 2023, 218: 109215.
- [16] SUN H Y, LI T, YANG C, et al. Research on carbon flow traceability system for distribution network based on blockchain and power flow calculation [J]. Frontiers in Energy Research, 2023, 11: 1118109.
- [17] 闫丽梅, 胡汶硕. 基于复功率分布矩阵的电力系统碳流追踪方法 [J]. 综合智慧能源, 2023, 45(8): 1-10.  
YAN Limei, HU Wenshuo. Carbon flow tracking method of power systems based on the complex power distribution matrix [J]. Integrated Intelligent Energy, 2023, 45(8): 1-10.
- [18] 周天睿, 康重庆. 基于碳排放流的配电系统低碳优化运行方法研究 [J]. 全球能源互联网, 2019, 2(3): 241-247.  
ZHOU Tianrui, KANG Chongqing. Research on low-carbon oriented optimal operation of distribution networks based on carbon emission flow theory [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2019, 2(3): 241-247.
- [19] WANG W Y, HUO Q H, DENG H W, et al. Carbon responsibility allocation method based on complex structure carbon emission flow theory [J]. Scientific Reports, 2023, 13: 1521.
- [20] 刘丽军, 胡鑫, 林锟, 等. 计及碳排放分摊的配电网分布式低碳调度策略 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(24): 9594-9607.  
LIU Lijun, HU Xin, LIN Kun, et al. Distributed low carbon dispatch for distribution networks with carbon emission sharing [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(24): 9594-9607.
- [21] 葛津铭, 刘志文, 王朝斌, 等. 考虑需求响应的高比例光伏配电网低碳调度 [J]. 电网技术, 2024, 48(5): 1929-1937.  
GE Jinming, LIU Zhiwen, WANG Chaobin, et al. Low-carbon dispatching of high proportion photovoltaic distribution network considering demand response [J]. Power System Technology, 2024, 48(5): 1929-1937.
- [22] 宋泽溟, 冯华, 陈晓刚, 等. 基于节点碳势的配电网分布式资源低碳调度策略 [J]. 高电压技术, 2023, 49(6): 2320-2332.
- SONG Zehao, FENG Hua, CHEN Xiaogang, et al. Low-carbon scheduling strategy of distributed energy resources based on node carbon intensity for distribution networks [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2320-2332.
- [23] 陈庆澳, 高强, 毛泽民, 等. 计及网损与新能源出力的电力系统碳排放流分析 [J]. 天津理工大学学报, 2025, 41(3): 46-54.  
CHEN Qing'ao, GAO Qiang, MAO Zemin, et al. Analysis of carbon emission flow in power system considering network loss and new energy output [J]. Journal of Tianjin University of Technology, 2025, 41(3): 46-54.
- [24] 李继方, 冯硕, 石晓阳, 等. 基于分布式发电的储能系统能量管理策略 [J]. 太阳能学报, 2023, 44(8): 30-38.  
LI Jifang, FENG Shuo, SHI Xiaoyang, et al. Energy management strategy for energy storage system based on distributed generation [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2023, 44(8): 30-38.
- [25] 曹逸滔, 王丹, 贾宏杰, 等. 计及站-网损耗分摊的区域综合能源系统碳排放流计算方法 [J]. 电力系统自动化, 2024, 48(12): 14-23.  
CAO Yitao, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Calculation method for carbon emission flow in regional integrated energy system considering station-network loss allocation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(12): 14-23.

收稿日期: 2025-03-21

修回日期: 2025-06-30

作者简介:

徐建军(1971), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统自动化、能源变换与控制技术;

王 贝(2001), 通信作者(1627691592@qq.com), 男, 硕士在读, 主要从事配电网优化调度、碳排放流和综合能源系统的研究;

彭 程(1999), 男, 博士在读, 主要研究方向为综合能源系统、微电网;

赵书琪(1999), 女, 博士在读, 主要研究方向为综合能源系统、碳排放流、配电网。

(责任编辑 车永强)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2025.09.003

# 基于相电压模变换和混沌振子的配电网故障选线方法研究

吕东飞\*, 马涛, 郭艳, 刘广, 孔雪城

(国网山东省电力公司淄博供电公司, 山东 淄博 255020)

**摘要:**针对配电网单相接地故障识别及故障选线准确性低的问题,提出了一种基于相电压模变换与混沌振子的创新方法。首先,利用模变换的方法获取电压信号的线模分量。其次,建立一个优化的降噪光滑模型,以有效平衡波形相似度与光滑度之间的矛盾。这一过程不仅降低了噪声对信号的影响,还增强了故障特征的可辨识度。最后,处理后的电压线模分量输入混沌振子系统,以获得每条线路的相图轨迹。混沌振子系统能够捕捉到信号中的复杂动态特征,通过分析相图的纹理参数,利用欧氏距离方法判断相图轨迹的混沌状态,最终实现故障的准确选线。仿真实验结果显示,该方法在面对过渡电阻、故障合闸角以及噪声干扰等因素时,仍然表现出较强的鲁棒性,有效提高了故障选线准确率。

**关键词:**故障选线;内禀模态函数;优良降噪;混沌振子;纹理参数

中图分类号:TN713

文献标志码:A

文章编号:1007-9904(2025)09-0023-09

## Research on Fault Line Selection Method for Distribution Networks Based on Phase Voltage Modal Transformation and Chaotic Oscillator

LYU Dongfei\*, MA Tao, GUO Yan, LIU Guang, KONG Xuecheng

(State Grid Zibo Power Supply Company, Zibo 255020, China)

**Abstract:** To address the issue of low accuracy in identifying single-phase grounding faults and selecting fault lines in distribution networks, an innovative method based on phase voltage modal transformation and chaotic oscillators is proposed. First, modal transformation technique is employed to obtain the modal components of the voltage signals. Next, an optimized noise reduction and smoothing model is established to effectively balance the trade-off between waveform similarity and smoothness. This process not only reduces the impact of noise on the signals but also enhances the discernibility of fault features. Finally, the processed voltage modal components are input into a chaotic oscillator system to obtain the phase diagram trajectories for each line. The chaotic oscillator system captures the complex dynamic characteristics of the signals. By analyzing the texture parameters of the phase diagrams and utilizing the Euclidean distance method to assess the chaotic state of the trajectories, accurate fault line selection is achieved. Simulation results indicate that this method demonstrates strong robustness against factors such as transition resistance, fault closing angle, and noise interference, effectively improving the accuracy of fault line selection.

**Keywords:** fault line selection; intrinsic mode function; excellent noise reduction; chaotic oscillator; texture parameters

## 0 引言

目前,我国的配电网普遍采用小电流接地系统。在小电流系统发生单相接地故障时,线电压依然保

持对称,能够持续带故障运行2~3 h。然而,在故障期间,非故障相的电压会升高至线电压水平,若长期处于故障状态,将严重影响系统的绝缘水平<sup>[1-2]</sup>。因此,亟须采取有效措施,及时且准确地识别故障线路。由于配电网在单相接地故障时整体系统表现出较强的非线性特征,现有的故障选线方法往往难以满足实际需求。

目前针对小电流接地系统故障的研究成果较多<sup>[3-4]</sup>,主要方法包括:稳态信息选线法、暂态信息选

**基金项目:**国网山东省电力公司科技项目“10 kV小电流接地系统单相接地故障精准判别处置技术研究”(520603240009)。  
Science and Technology Project of State Grid Shandong Electric Power Company “Research on Precise Identification and Handling Technology for Single-phase Grounding Faults in 10 kV Low Current Grounding Systems”(520603240009).

线法、注入信号法。当系统发生间歇性弧光接地故障或高阻接地故障时,稳态信息选线法不再适用。注入信号法,需要额外的设备,且注入信号会影响电网的安全稳定运行。相比稳态特征,暂态特征含量更为丰富,且不容易受中性点接地方式的干扰。文献[5]针对零序导纳构造了选线判据,并提出2种改进导纳法的选线方案。文献[6]对单相接地故障中暂态原理进行了深入研究,提出了一种故障区段定位模型。文献[7]使用互补集合经验模态分解算法分解零序电流,依据幅值相位定位故障线路,但是互补经验模态分解算法存在伪分量,影响故障选线准确率。

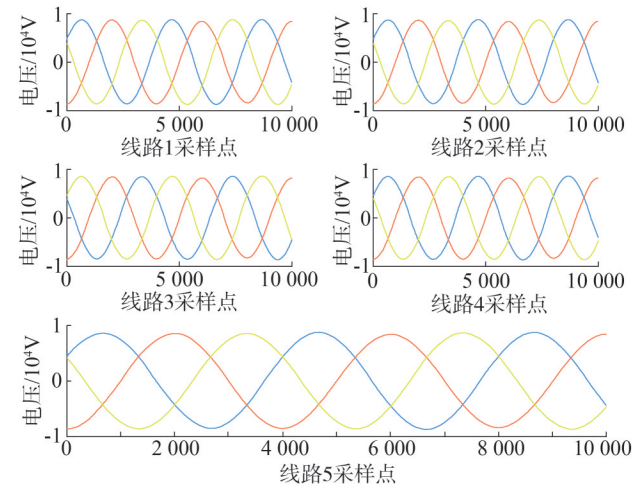
针对现有故障选线方法的不足,本文提出了一种基于相电压模变换和混沌振子的配电网故障选线方法。利用电压模变换方法将电压转成电压线模分量,利用变分模态分解算法分解电压线模分量,通过优良降噪光滑模型选出合适的内禀模态函数,完成电压线模分量的降噪。将降噪后的电压线模分量输入混沌振子中,通过混沌振子的相图轨迹判断出故障线路,并通过图像的纹理参数,给出故障选线的数值判据。

### 1 相电压的模变换

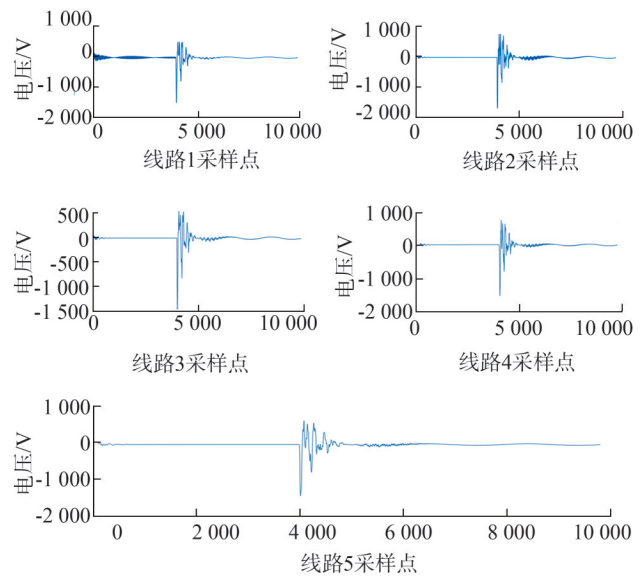
模变换法是分析小电流接地故障暂态过程的一种有效方法。例如,Karenbauer方法(也称为1、2、0变换方法)应用广泛<sup>[8-9]</sup>。1模分量和2模分量合称为线模分量,分别以AB相和AC相间构成回路,其参数与不对称分量分析中的正序回路参数相同。0模分量,又称为地模分量,通过三相导体与大地间构成回路,因此其参数与零序回路参数相同。这种方法的核心在于将复杂的三相系统故障分解为不同的模分量进行分析,从而简化故障特征的提取和分析。通过这种变换,可以更容易地识别出故障类型、位置和严重程度,进而提高电力系统的故障诊断效率和准确性。此外,模变换法还具有较强的适应性和鲁棒性,能够应对各种复杂的电力系统故障情况,因此在电力工程中得到了广泛应用和认可。

假设系统有5条线路,线路2发生1 000 Ω B相接地故障,各线路三相电压如图1(a)所示,各线路电压线模变换结果如图1(b)所示。从图1(a)可以看出,直接利用三相电压很难选出故障线路。

从图1(b)可以看出,故障线路电压的线模分量与正常线路电压的线模分量有所区别。通过计算正常线路与故障线路的线模电压变化值是不一样的。因此,可以利用深度学习挖掘各线路电压的线模分量特征进行故障选线。



(a) 1 000 Ω 接地各线路三相电压



(b) 线模变换结果

图1 发生故障时各线路电压的线模分量

Fig.1 Line mode components of voltage for each line

### 2 变分模态分解原理

变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)的目标是将模态估计问题转化为变分问题<sup>[10-12]</sup>。通过VMD,可以将任意原始信号 $x(t)$ 分解为多个分量,分量数量 $K$ 由先设定的模态数据决定。

通过多次迭代,更新每个模态分量的中心频率,从而获得  $K$  个具有特定带宽的内禀模态函数(intrinsic mode function, IMF)。变分模态分解算法的流程包括变分模型的构造以及求解。

1) 变分模型的构造。

原始故障信号  $x(t)$  被分解为  $K$  个模态分量,每个分量都可表示为调幅-调频信号形式,即

$$u_k(t) = A_k(t) \cos(\phi_k(t)) \quad (1)$$

式中:  $t$  为采样时间;  $u_k(t)$  为第  $k$  个模态分量;  $A_k(t)$  为瞬时幅值;  $\phi_k(t)$  为瞬时相位。

约束变分模型为

$$\begin{cases} \min_{\{u_k, \omega_k\}} \left\{ \sum_{k=1}^K \left\| \partial_t \left[ (\delta(t) + \frac{j}{\pi t}) * u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 \right\} \\ \text{s.t. } \sum_{k=1}^K u_k(t) = f(t) \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $\delta(t)$  为脉冲函数;  $f(t)$  为原始信号;  $\omega_k$  为各模态函数  $u_k(t)$  对应的中心频率;  $*$  为卷积运算。

2) 变分问题的求解。

在变分模型中引入惩罚因子  $\alpha$ , 构造增广 Lagrange 函数将约束变分模型转化为非约束变分问题, 即

$$\begin{aligned} L(\{u_k\}, \{\omega_k\}, \lambda(t)) = & \\ & \alpha \sum_{k=1}^K \left\| \partial_t \left[ (\delta(t) + \frac{j}{\pi t}) * u_k(t) \right] e^{-j\omega_k t} \right\|_2^2 + \\ & \left\| f(t) - \sum_{k=1}^K u_k(t) \right\| + \left\langle \lambda(t), f(t) - \sum_{k=1}^K u_k(t) \right\rangle \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $L(\cdot)$  为非约束的增广拉格朗日函数;  $\alpha$  和  $\lambda(t)$  分别为二次惩罚因子和拉格朗日乘法算子;  $\omega_k$  为第  $k$  个内禀模态函数信号的中心频率;  $\langle \cdot \rangle$  为内积运算。

通过乘法算子交替更新  $u_k$  和  $\omega_k$ , 更新过程如式(4)和式(5)所示,  $u_k$  和  $\omega_k$  更新后再对乘法算子  $\hat{\lambda}$  更新。

$$\hat{u}_{k,n+1}(\omega) = \frac{\hat{f}(\omega) - \sum_{i \neq k} \hat{u}_i(\omega) + \frac{\hat{\lambda}(\omega)}{2}}{1 + 2\alpha(\omega - \omega_k)^2} \quad (4)$$

$$\omega_{k,n+1} = \frac{\int_0^\infty \omega |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega}{\int_0^\infty |\hat{u}_k(\omega)|^2 d\omega}, k \in \{1, 2, \dots, K\} \quad (5)$$

$$\hat{\lambda}_{k,n+1}(\omega) = \hat{\lambda}_n(\omega) + \tau(\hat{f}(\omega) - \sum_{k=1}^K \hat{u}_{k,n+1}(\omega)) \quad (6)$$

式中:  $\hat{f}(\omega)$ 、 $\hat{u}_i(\omega)$ 、 $\hat{\lambda}(\omega)$ 、 $\hat{u}_{k,n+1}(\omega)$  分别为  $f(t)$ 、 $u_i(t)$ 、 $\lambda(t)$ 、 $u_{k,n+1}(t)$  傅里叶变换后的结果;  $\omega_{k,n+1}$  为第  $k$  个模态函数功率谱的中心频率;  $|\hat{u}_k(\omega)|$  为傅里叶的逆变换;  $\tau$  为噪声容忍度;  $n$  为迭代次数;  $\omega$  为中心频率。

满足式(7)迭代停止, 得到问题最优化解。

$$\sum_{k=1}^K \frac{\|\hat{u}_{k,n+1} - \hat{u}_{k,n}\|^2}{\sum_{k=1}^K \|\hat{u}_{k,n}\|^2} < \varepsilon \quad (7)$$

式中:  $\varepsilon$  为判别精度。对  $\hat{u}_{k,n+1}(\omega)$  为进行傅里叶变换后得到的实数部分即为模态分量。

### 3 优良光滑降噪模型

利用相似度和光滑度指标构建优良降噪光滑数学模型<sup>[13]</sup>。

VMD 分解后重构的故障信号  $\tilde{x}_\rho(t)$  为

$$\tilde{x}_\rho(t) = \sum_{j=1}^{\rho} \theta_j \quad (8)$$

式中:  $\tilde{x}_\rho(t)$  为第  $\rho$  个重构信号;  $\theta_j$  为第  $j$  个内禀模态函数。

计算重构信号  $\tilde{x}_\rho(t)$  与原始故障信号  $x_\rho(t)$  的均方根误差作为相似度指标  $S_1$ 。

$$S_1 = \sqrt{\frac{\sum_{\rho=1}^N (\tilde{x}_\rho(t) - x_\rho(t))^2}{N}} \quad (9)$$

式中:  $N$  为采样点数量。  $S_1$  值越小, 说明重构后的信号越接近原始信号。

光滑曲线的定义是曲线在定义域内任意一点均有一阶连续倒数。

若两条曲线  $g_1$  和  $g_2$  在点  $x_1$  处光滑, 则应满足在点  $x_1$  处曲率相等, 即

$$\frac{|g_1''(x_1)|}{\{1 + [g_1'(x_1)]^2\}^{3/2}} = \frac{|g_2''(x_1)|}{\{1 + [g_2'(x_1)]^2\}^{3/2}} \quad (10)$$

设  $S_N$  为光滑度, 则两曲线在点  $x_1$  处的光滑度可表示为

$$S_N|_{x=x_1} = \frac{g(x_1 + 2h) - g(x_1 - 2h) - 2[g(x_1 + h) - g(x_1 - h)]}{2} \quad (11)$$

式中:  $g(\cdot)$  为曲线函数;  $h$  为采样间隔。

取  $S_N$  值的标准偏差  $S_M$  为光滑度指标,  $S_M$  的值越小, 信号越光滑。

考虑重构误差和光滑度,设置权重系数 $\mu(0 \leq \mu \leq 1)$ ,得到光滑降噪模型目标函数 $F$ 为

$$F = \mu S_M + (1 - \mu) S_I \quad (12)$$

找到目标函数的最优解,即 $F$ 的最小值,最优解对应的重构模型即为优良降噪光滑数学模型,本文中 $\mu$ 设置为0.3。

为验证VMD优良降噪光滑数学模型的有效性,对比小波阈值去噪方法,仿真信号如式(13)所示,式中 $y_1$ 为原始信号; $y$ 为加噪信号; $s$ 为噪声。仿真信号波形如图2所示。

$$\begin{cases} y_1 = \sin(25\pi t + \cos(50\pi t)) \\ y = y_1 + s \end{cases} \quad (13)$$

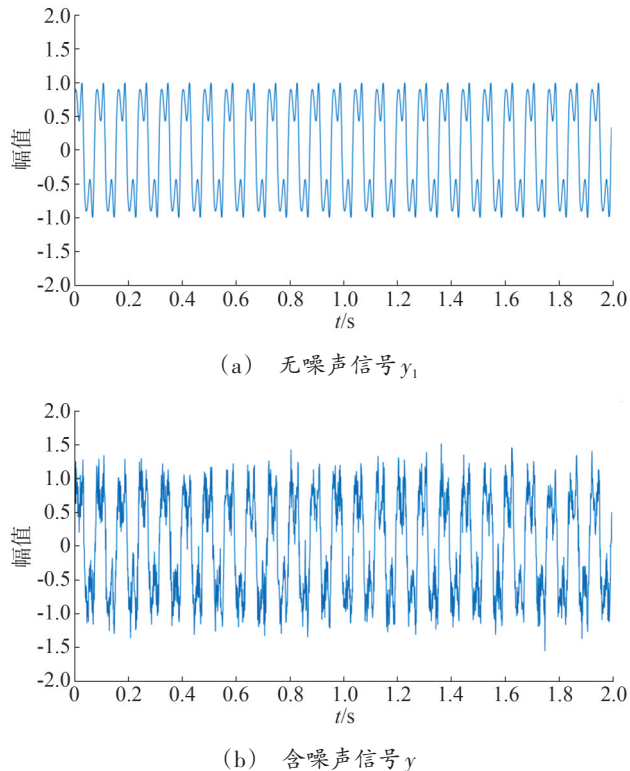


图2 仿真信号时域波形

Fig.2 Time-domain waveforms of simulated signals

利用VMD优良降噪光滑模型和小波阈值对信号 $y$ 去噪,结果如图3所示。

由图3可以看出,VMD优化的降噪光滑模型在降低噪声方面明显优于小波阈值去噪方法。在信噪比的比较中,VMD模型的信噪比达到了1.035 dB,而小波阈值去噪仅为10.016 dB,这表明VMD方法在保持信号质量方面具有更好的表现。此外,小波阈值

去噪需要精确选择小波基函数,选择不当可能导致去噪效果不佳,这无疑增加了实际应用中的复杂性和不确定性。因此,鉴于VMD优化的降噪光滑模型在降噪效果和操作简便性方面的优势,本文应用该模型对电压暂态线模分量信号进行降噪处理,以提高信号的可辨识性和后续分析的准确性。通过这一方法,能够有效改善信号质量,从而为后续的故障检测和诊断提供更可靠的基础。

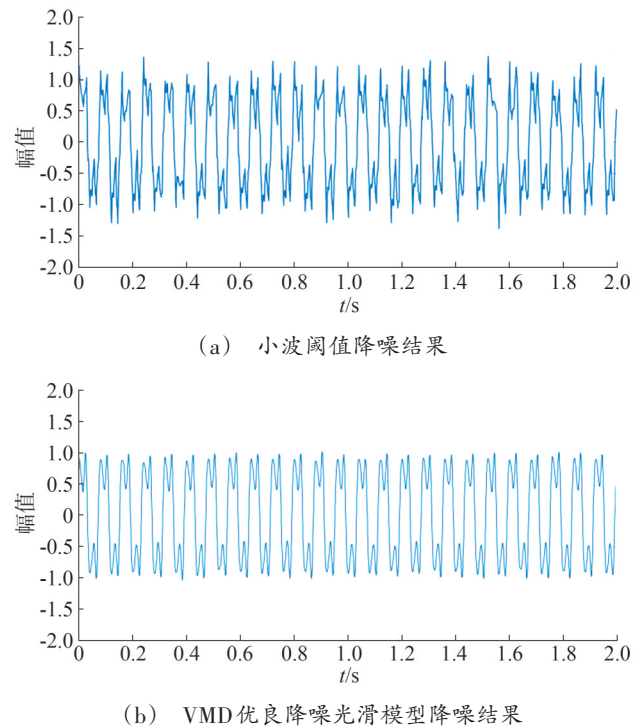


图3 不同模型的降噪效果

Fig.3 Noise reduction effects of different models

## 4 混沌振子

### 4.1 混沌振子基本原理

在微小信号检测领域,混沌系统的应用相当广泛,其中Duffing振子系统是一种典型的混沌系统<sup>[14-16]</sup>。Duffing振子系统以其独特的非线性特性和敏感性,已成为研究混沌行为和用于信号处理的重要工具。Holmes-Duffing振子系统作为标准Duffing振子系统的改进版本,展示了更好的动态特性和复杂性。该系统在保持Duffing振子系统固有优点的基础上,通过引入新的参数和修改方程,提高了系统对微小信号的响应能力和精度<sup>[17-18]</sup>。因此,Holmes-Duffing振子系统在信号检测、故障诊断以及其他工

程应用中展现出了良好的潜力。其方程的具体表达式<sup>[19-21]</sup>如下。

$$X'' + k^* X' - X + X^3 = \gamma \cos t \quad (14)$$

式中: $k^*$ 为阻尼系数; $X$ 为振子的位移量; $\gamma$ 为内驱动信号幅值。通常情况下 $k^*$ 取0.5, $\gamma$ 取不同的值时系统的运动状态不同。

当 $\gamma$ 取0时,系统的运动状态如图4所示。系统存在三个奇点,其中(0,0)为相平面的鞍点,而(1,0)和(-1,0)则为中心点。 $X$ 为位移量, $Y$ 为速度。

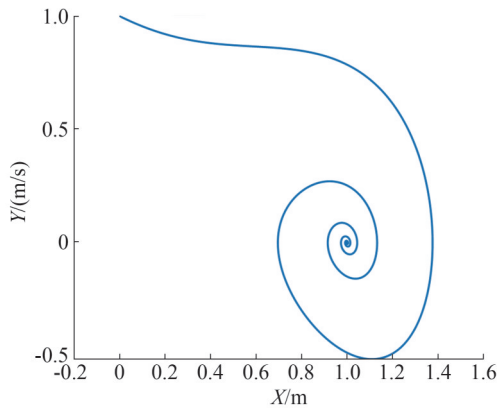


图4 初始轨迹状态图  
Fig.4 Initial trajectory state diagram

当 $\gamma$ 大于0但小于阈值 $\gamma_d$ 时,相轨迹表现为Poincare意义下的吸引子,随着 $\gamma$ 的逐渐增大,相点轨迹变为同宿轨道,系统依次经历同宿轨道状态(如图5所示)、周期分岔状态(如图6所示)以及混沌状态(如图7所示)。

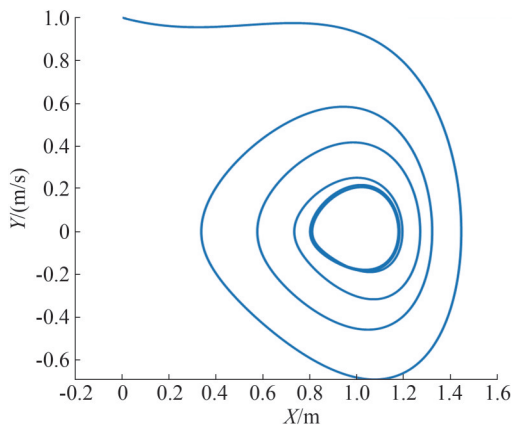


图5 同宿轨迹状态图  
Fig.5 Homoclinic trajectory state diagram

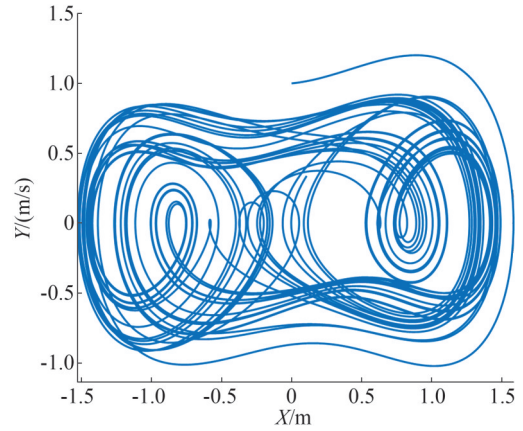


图6 分岔轨迹状态图  
Fig.6 Bifurcation trajectory state diagram

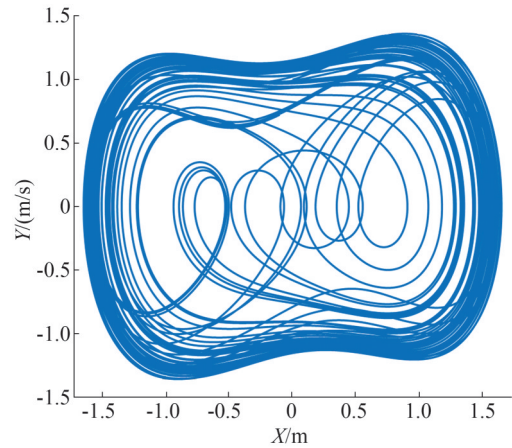


图7 混沌轨迹状态图  
Fig.7 Chaotic trajectory state diagram

当 $\gamma$ 大于阈值 $\gamma_d$ 时,系统运动状态如图8所示。系统表现为大尺度周期状态,此时系统振荡频率与系统外部所加周期力的频率相同。

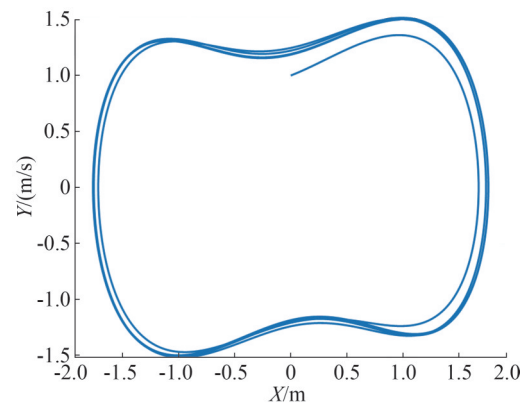


图8 大尺度周期轨迹状态图  
Fig.8 Large scale periodic trajectory state diagram

### 4.2 自主判断相图状态

当系统发生故障时,各配电线路会产生非对称故障信号,将各线路故障信号经降噪处理后的信号输入经过尺度变换的Duffing振子系统中。

$$X'' + k^* \nu X' - \nu^2 X^3 + \nu^2 X^5 = \gamma \cos(\nu\tau) + z \cos(\nu\tau + \varphi) \tag{15}$$

式中: $z$ 为待测信号幅值; $\nu$ 为待测信号角频率; $\varphi$ 为待测信号与内驱动信号的相位差。

此时,系统的总驱动力 $F(t)$ 为

$$F(t) = \sqrt{\gamma^2 + 2\gamma z \cos\varphi + z^2} \tag{16}$$

调整 $\gamma$ 的值,观察系统的状态轨迹,当系统的状态由混沌状态过渡到大尺度周期状态时,记录 $\gamma$ 的值为 $\gamma_c$ 。当 $F(t) < \gamma_c$ 时,系统的状态轨迹为混沌状态,此时 $\varphi$ 取值范围为

$$\pi - \arccos \frac{z}{2\gamma} < \varphi < \pi + \arccos \frac{z}{2\gamma} \tag{17}$$

当 $F(t) > \gamma_c$ 时,系统处于大尺度周期状态。由于正常线路和故障线路存在极性的差异,因此可以利用相图轨迹的差异区分正常线路与故障线路。

由于在判断故障线路时,仅利用混沌振子的大尺度周期状态和混沌状态两种状态判断故障线路,因此可以利用图像纹理参数的欧式距离判断相图之间的相似度。通过图像之间的相似度的大小选择出与其他线路不同的相图轨迹,则为故障线路。图像的纹理参数参考文献[22-24],选择 $0^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $135^\circ$ 的能量、对比度、熵、相关性的均值作为纹理参数的特征向量,计算不同相图纹理参数特征向量的欧式距离。相图纹理参数特征向量的欧式距离的欧式距离越小,表明它们越相似。

通过实验观察,当Duffing振子系统的总驱动力处于 $0.626 \sim 0.825$ 时,输出的相图显示出混沌状态,然而,一旦总驱动力的幅值超过 $0.825$ ,系统的输出特征便会转变为大尺度周期状态,因此 $0.825$ 为系统总驱动力的临界点。将系统调为临界状态,以混沌状态到大尺度周期状态的临界相图作为基准,将临界状态相图的纹理参数作为基准,其纹理参数数值如图9所示。计算其他相图与基准相图的纹理参数的欧式距离,若欧式距离小于指定阈值,则判断为大尺度周期状态,否则为混沌状态。通过比较各线路的相图轨迹实现故障选线。多次实验表明,选择阈值为 $0.5$ ,可以准确判断系统的混沌状态。

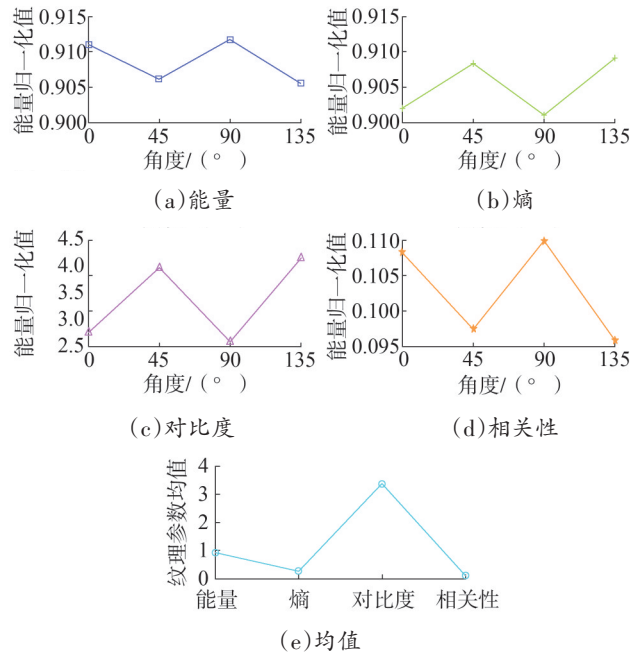


图9 标准相图的纹理参数

Fig.9 Texture parameters of standard phase diagrams

### 5 仿真实验

以图10所示的辐射状配电网作为研究对象<sup>[25]</sup>,其中中性点采用消弧线圈接地方式,过补偿度为8%。

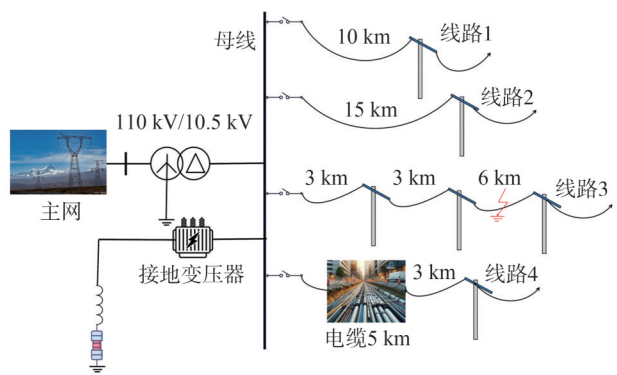


图10 辐射状配电网

Fig.10 Radial distribution network

单位长度架空线的正序参数和零序参数分别为:零序电阻为 $0.251 \Omega/\text{km}$ ;零序电感为 $4.560 \times 10^{-3} \text{ H}/\text{km}$ ;零序电容为 $0.0056 \times 10^{-6} \text{ F}/\text{km}$ ;正序电阻为 $0.178 \Omega/\text{km}$ ;正序电感为 $1.250 \times 10^{-3} \text{ H}/\text{km}$ ;正序电容为 $0.0098 \times 10^{-6} \text{ F}/\text{km}$ 。

单位长度电缆线路的正序参数和零序参数分

别为:零序电阻为 $2.750\ \Omega/\text{km}$ ;零序电感为 $1.118 \times 10^{-3}\ \text{H}/\text{km}$ ;零序电容为 $0.390 \times 10^{-6}\ \text{F}/\text{km}$ ;正序电阻为 $0.278\ \Omega/\text{km}$ ;正序电感为 $0.265 \times 10^{-3}\ \text{H}/\text{km}$ ;正序电容为 $0.438 \times 10^{-6}\ \text{F}/\text{km}$ 。

假设线路4发生纯金属接地,利用VMD算法分解各个线路的电压信号线模分量,利用优良降噪光滑模型择优选择固有模态函数,结果如图11所示。

将降噪后的结果输入混沌振子中,结果如图12所示。由于本文利用的是相图轨迹纹理参数值进行故障选线,因此取消坐标,只显示相图轨迹。从图12可以看出,线路1、线路2和线路3的相图轨迹表现为大尺度周期状态,而线路4的相图轨迹则呈现混沌状态。因此,线路4的相图轨迹与其他线路明显不同,这表明线路4发生了单相接地故障。

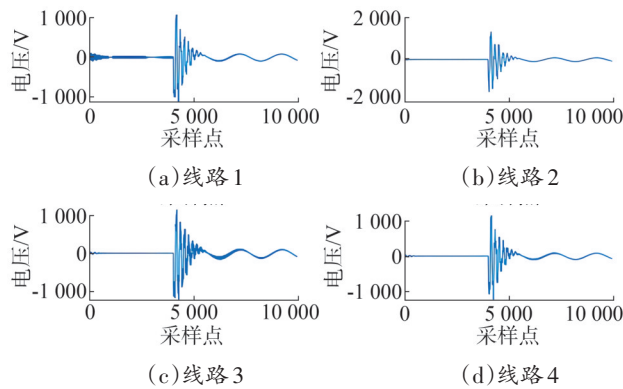


图11 各线路的优良降噪结果

Fig.11 Excellent noise reduction results for each line

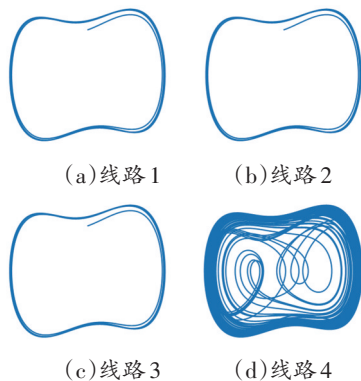


图12 不同线路的相图轨迹

Fig.12 Phase diagram trajectories of different lines

表1给出了各线路纹理参数的数值判据,用于评估线路是否发生故障。从表1可以看出,线路4的

相图与标准相图的欧式距离大于0.5,表明其处于混沌状态。而其余线路的相图与标准相图的欧式距离均小于0.5,处于大尺度周期状态。因此,可以判断线路4为故障线路,与假设故障线路一致,需要及时采取措施进行排查和维护,以确保系统的整体稳定运行。

表1 各线路相图纹理参数

Table 1 Texture parameters of phase diagram of each line

| 线路 | 能量      | 熵       | 对比度     | 相关性     | 欧氏距离    | 状态      |
|----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1  | 0.884 6 | 0.448 7 | 1.226 8 | 0.120 2 | 0.101 3 | 大尺度周期状态 |
| 2  | 0.884 4 | 0.450 6 | 1.272 3 | 0.120 8 | 0.056 3 | 大尺度周期状态 |
| 3  | 0.885 6 | 0.443 2 | 1.203 5 | 0.119 4 | 0.125 2 | 大尺度周期状态 |
| 4  | 0.501 2 | 1.549 1 | 4.551 1 | 0.025 2 | 1.784 5 | 混沌状态    |

假设线路3发生高阻接地,接地电阻为 $1\ 000\ \Omega$ ,将降噪后的结果输入混沌振子中,所得相图如图13所示。

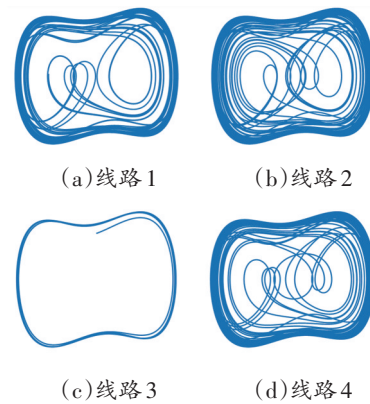


图13 高阻接地故障的相图轨迹

Fig.13 Phase diagram trajectories of high resistance grounding faults

从图13可以看出,线路3处于大尺度周期状态,与其余线路状态不同,因此线路3发生故障。

表2展示了高阻接地故障的相图纹理参数数值。从表2可以看出,线路3的相图与标准相图的欧氏距离小于0.5,表明其处于大尺度周期状态。而其余线路的相图与标准相图的欧氏距离均大于0.5,为混沌状态,说明线路3的相图与其他线路相图不同,线路3是故障线路。这一结果验证了通过相图分析

进行故障判别的有效性,特别是针对高阻接地故障的识别。

表2 高阻接地故障各线路相图纹理参数

Table 2 Texture parameters of phase diagram of each line under high resistance grounding fault

| 线路 | 能量      | 熵       | 对比度     | 相关性     | 欧氏距离    | 状态      |
|----|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 1  | 0.479 7 | 1.759 3 | 5.913 4 | 0.026 4 | 4.783 7 | 混沌状态    |
| 2  | 0.424 2 | 1.936 6 | 6.536 8 | 0.023 8 | 5.434 2 | 混沌状态    |
| 3  | 0.876 8 | 0.486 0 | 1.345 3 | 0.119 1 | 0.029 0 | 大尺度周期状态 |
| 4  | 0.403 4 | 0.017 2 | 6.809 1 | 0.023 0 | 5.718 8 | 混沌状态    |

## 6 结论

为提高配电网故障选线的准确率,文中提出一种基于相电压模变换和混沌振子的配电网故障选线方法,通过分析和研究得出以下结论:

1) VMD优化的降噪光滑模型能够有效对信号进行降噪和光滑处理,其降噪效果优于传统的小波阈值去噪方法。所提模型通过自适应分解信号,能够更好地捕捉信号中的主要特征,同时抑制噪声的影响。

2) 通过比较混沌振子输出的相图轨迹,可以实现对故障线路的选择,所提方法简单高效,并且可以在高阻情况下实现故障线路的选择。

3) 利用相图纹理参数的欧氏距离,可以自主评估混沌振子的相图轨迹,从而为配电网故障线路的识别提供量化依据。

## 参考文献

[1] 何小龙,高红均,高艺文,等.基于GA优化BP神经网络的有源配电网高阻接地故障选线方法[J].智慧电力,2023,51(4):54-61.  
HE Xiaolong, GAO Hongjun, GAO Yiwen, et al. High resistance grounding fault line selection method for active distribution network based on GA optimized BP neural network [J]. Smart Power, 2023, 51(4): 54-61.

[2] 陈池瑶,苗世洪,殷浩然,等.基于注意力机制-卷积神经网络的配电网单相接地故障选线方法[J].电力建设,2023,44(4):82-93.  
CHEN Chiyao, MIAO Shihong, YIN Haoran, et al. Single-phase grounding-fault line selection method based on attention mechanism-convolution neural network for distribution network

[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(4): 82-93.

[3] 张哲玮,杨锐良,王超.基于行波的配电网故障缺陷行波特征图谱绘制及故障原因识别[J].中国设备工程,2024(16):175-178.  
ZHANG Zhewei, YANG Ruiliang, WANG Chao. Traveling wave characteristic map drawing and fault cause identification of distribution network fault defects based on traveling wave [J]. China Plant Engineering, 2024(16): 175-178.

[4] LOPES F, LEITE E, ZAT G, et al. Development of fault location functions in a real digital fault recorder: computational strategies and validation [J]. Electric Power Systems Research, 2024, 234: 110684.

[5] 栾晓明,武守远,贾春娟,等.基于改进零序导纳法的单相接地故障选线原理[J].电网技术,2022,46(1):353-360.  
LUAN Xiaoming, WU Shouyuan, JIA Chunjuan, et al. Fault line selection principle of single-phase-to-ground fault based on improved zero-sequence admittance [J]. Power System Technology, 2022, 46(1): 353-360.

[6] 张闻一.小电流接地系统单相接地故障暂态特征研究[J].电子制作,2021,29(14):30-32.  
ZHANG Wenyi. Study on transient characteristics of single-phase grounding fault in small current grounding system [J]. Practical Electronics, 2021, 29(14): 30-32.

[7] 季鹏,陈芳芳,徐天奇.基于CEEMD分解零序电流幅值相位法的故障选线[J].电子设计工程,2022,30(22):29-33.  
JI Peng, CHEN Fangfang, XU Tianqi. Fault line selection based on CEEMD decomposition of zero sequence current amplitude and phase method [J]. Electronic Design Engineering, 2022, 30(22): 29-33.

[8] 汪士杰.配电网混合线路单相接地故障区段定位及测距方法研究[D].郑州:郑州大学,2021.

[9] 王守鹏,赵冬梅,袁敬中,等.一种用于同塔双回线故障定位的新相模变换法[J].西安理工大学学报,2020,36(3):432-438.  
WANG Shoupeng, ZHAO Dongmei, YUAN Jingzhong, et al. New phase-mode transformation matrix for fault location of double-circuit transmission lines [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2020, 36(3): 432-438.

[10] 孙孔明,李玉敦,范荣奇,等.基于VMD的小电流接地故障融合选线方法[J].工矿自动化,2023,49(3):115-123.  
SUN Kongming, LI Yudun, FAN Rongqi, et al. Fusion fault line selection method of small current grounding fault based on VMD [J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(3): 115-123.

[11] YU L C, ZHANG M Y. Unsupervised gas pipeline network leakage detection method based on improved graph deviation network [J]. Journal of Loss Prevention in the Process Industries, 2024, 91: 105396.

[12] 武雍焯,朱光亚,徐忠林,等.基于VMD-IKHA-DBN的高压输电电缆局部放电模式识别方法[J].电工电能新技术,2024,43(8):56-68.

- WU Yongye, ZHU Guangya, XU Zhonglin, et al. Partial discharge pattern recognition method for high voltage transmission cables based on VMD - IKHA -DBN [J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2024, 43(8):56-68.
- [13] 肖启明,郭谋发.基于变分模态分解与图信号指标的配电网高阻接地故障识别算法[J].*电气技术*, 2021, 22(5):50-55.
- XIAO Qiming, GUO Moufa. High impedance fault detection algorithm based on variational mode decomposition and graph signal indices in distribution networks [J]. *Electrical Engineering*, 2021, 22(5):50-55.
- [14] 魏科文,张靖,何宇,等.基于VMD和相关性聚类的谐振接地系统单相接地故障选线[J].*电力系统保护与控制*, 2021, 49(22):105-113.
- WEI Kewen, ZHANG Jing, HE Yu, et al. Single-phase grounding fault line selection in a resonant grounding system based on VMD and correlation clustering [J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(22):105-113.
- [15] 刘亮.基于Duffing振子系统的小电流单相接地故障选线方法研究[D].阜新:辽宁工程技术大学, 2022.
- [16] CHEN H, SHI N, CHEN L, et al. Enhancing educational Q&A systems using a Chaotic Fuzzy Logic-Augmented large language model[J]. *Front Artif Intell*, 2024, 7:1404940.
- [17] LIU W Y, LI C B, GAO Y K, et al. Simplified chaotic oscillators with two-dimensional offset boosting [J]. *The European Physical Journal Plus*, 2024, 139(7):596.
- [18] 薛太林,靳贰伟,吴杰.基于五次谐波和混沌系统的谐振接地系统故障选线[J].*电测与仪表*, 2022, 59(1):176-182.
- XUE Tailin, JIN Erwei, WU Jie. Fault line selection of resonant grounding system based on fifth harmonic and chaotic system [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2022, 59(1):176-182.
- [19] 马延鋈,武静,王岩,等.基于Duffing振子与传统方法结合的导波检测方法研究[J].*机械强度*, 2024, 46(6):1287-1294.
- MA Yanjun, WU Jing, WANG Yan, et al. Research on guided wave detection method based on Duffing oscillator and the traditional method [J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2024, 46(6):1287-1294.
- [20] 巩学芳,徐武德,马芳兰,等.基于改进双耦合Duffing振子的微弱信号检测方法[J].*自动化与仪器仪表*, 2022(10):42-45.
- GONG Xuefang, XU Wude, MA Fanglan, et al. Weak signal detection method based on improved dual-coupling duffing vibrator [J]. *Automation & Instrumentation*, 2022(10):42-45.
- [21] 王军,申永军,张建超,等.一类分数阶分段Duffing振子的混沌研究[J].*振动与冲击*, 2022, 41(13):8-16.
- WANG Jun, SHEN Yongjun, ZHANG Jianchao, et al. Chaos of a class of piecewise Duffing oscillator with fractional-order derivative term [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2022, 41(13):8-16.
- [22] 刘玉成,曹春诚,邓斌.结合纹理参数和GA-BP神经网络的电力设备图像识别[J].*计算机与数字工程*, 2021, 49(8):1687-1691.
- LIU Yucheng, CAO Chuncheng, DENG Bin. Image recognition of power equipment based on texture parameters and GA-BP neural network [J]. *Computer & Digital Engineering*, 2021, 49(8):1687-1691.
- [23] COBURN C A, ROBERTS A C B. A multiscale texture analysis procedure for improved forest stand classification [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(20):4287-4308.
- [24] 徐巧林,余小燕,吴小波,等.基于图像处理的针织物表面纹理参数分析[J].*针织工业*, 2021(3):10-13.
- XU Qiaolin, SHE Xiaoyan, WU Xiaobo, et al. Knitted textile surface texture parameters analysis based on image processing [J]. *Knitting Industries*, 2021(3):10-13.
- [25] 王晓卫,田影,高杰,等.基于拐点密集区凹凸波动特性的直流配电网故障检测方法[J].*电力系统保护与控制*, 2024, 52(9):1-15.
- WANG Xiaowei, TIAN Ying, GAO Jie, et al. A DC distribution network fault detection method based on bump fluctuation at a dense inflection point [J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(9):1-15.

收稿日期:2024-10-08

修回日期:2025-01-14

作者简介:

吕东飞(1986),通信作者(18742576556@163.com),男,硕士,高级工程师,主要从事配电自动化、配电运检工作;

马涛(1988),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为电力系统及其自动化;

郭艳(1977),女,硕士,主要研究方向为配电自动化技术;

刘广(1986),男,硕士,高级工程师,主要从事配电自动化、配电运检工作;

孔雪城(1992),男,硕士,工程师,主要从事配电自动化、配电运检工作。

(责任编辑 车永强)

# 考虑新能源不确定性的电力系统灵活性评价方法与提升措施

冯树海\*, 史新红, 郑亚先, 石 飞

(中国电力科学研究院有限公司, 江苏 南京 210003)

**摘要:**高比例新能源接入使电力系统灵活性受到更多关注,准确量化新能源不确定性出力带来的灵活性调节需求、对系统灵活性平衡能力进行合理评估和提升,是提高系统对新能源接纳能力的必要措施。提出一种新能源不确定性出力建模方法,采用新能源预测误差置信区间确定灵活性需求,并对常规机组灵活性供给能力建模,从灵活性供需关系角度构建灵活性评价指标;然后构建计及灵活性需求的优化调度模型,利用所提指标评估系统当前灵活性不足情况;最后模拟火电灵活性改造路径和未来新能源装机发展,验证机组灵活性改造对灵活性的提升作用。

**关键词:**高比例新能源;新能源不确定性;电力系统灵活性平衡;灵活性评价指标;新能源消纳

中图分类号:TM715

文献标志码:A

文章编号:1007-9904(2025)09-0032-12

## Power System Flexibility Evaluation Method and Improvement Measures Considering New Energy Uncertainty

FENG Shuhai\*, SHI Xinhong, ZHENG Yaxian, SHI Fei

(China Electric Power Research Institute (Nanjing), Nanjing 210003, China)

**Abstract:** The high proportion of new energy access has attracted more attention to power system flexibility. Accurately quantifying the flexibility adjustment demand caused by the uncertain output of new energy and reasonably evaluating and improving the flexibility balance capacity of the system are necessary measures to improve the system's acceptance capacity of new energy. A novel modeling methodology is proposed to characterize renewable energy uncertainty, where flexibility demand is determined based on confidence intervals of forecasting errors. Concurrently, flexibility supply capacities of conventional units are systematically modeled. Comprehensive flexibility evaluation indices are developed from the perspective of flexibility supply-demand equilibrium. Then, an optimal scheduling model incorporating flexibility requirements is constructed, and the proposed index is applied to evaluate the current insufficient flexibility of the system. Finally, the flexible transformation path of thermal power and the future development of new energy installed capacity are simulated to verify the role of flexible transformation of units in improving flexibility.

**Keywords:** high proportion of new energy; new energy uncertainty; power system flexibility balance; flexibility evaluation index; new energy consumption

## 0 引言

“双碳”目标下,高比例新能源成为我国电力系统发展的必然趋势<sup>[1]</sup>。随着新能源发电占比不断提高、传统火电逐渐退坡、负荷需求持续增长,多方因

素下电力系统源荷两侧波动性叠加,对系统的灵活性调节能力提出了更高要求<sup>[2]</sup>,灵活性成为系统运行关注的核心。

新能源出力的不确定性是系统灵活性需求的主要来源<sup>[3]</sup>。现有对新能源出力不确定性的研究,常用方法是假设新能源出力服从某种概率分布,并通过经验值设定或历史数据拟合等方式求解概率分布相关参数<sup>[4]</sup>。其中,风电出力概率模型一般采用Weibull分布<sup>[5]</sup>,光伏出力概率模型一般采用Beta分布<sup>[6]</sup>或正态分布<sup>[7]</sup>。然而,新能源出力情况受气象条

基金项目:国家电网有限公司科技项目“新型电力系统平衡体系下的电力现货市场出清定价机理及方法研究”(SGSXDK00YJJS2310571)。Science and Technology Project of State Grid Corporation of China “Research on the Pricing Mechanism and Method of Electricity Spot Market Clearing Under the New Power System Balance System”(SGSXDK00YJJS2310571)。

件、地理位置、时间尺度等诸多要素的影响<sup>[8]</sup>,采用特定形状的概率分布往往有较大偏差,难以对新能源出力进行准确预测,进而无法保证计及新能源出力不确定性的优化调度结果的可靠性。

作为电力系统运行基本特性之一,灵活性一直难于量化评估<sup>[9]</sup>。文献[10]采用机组爬坡速率、最大最小出力等运行参数构建常规火电机组的灵活性评价指标,并按可提供灵活性能力的大小对火电机组进行分类;文献[11]从功率调节范围角度出发,对系统内的常规电源、可控负荷、储能等各类资源提供灵活性的能力进行定量分析;文献[12]引入基准容量,提出包括基准化运行范围、基准化爬坡速率等在内的一系列灵活性静态指标,用于评价各类发电资源固有的灵活性供给能力。上述评价方法仅局限于单侧的灵活性资源特性,无法衡量灵活性供需两侧的匹配关系,不足以体现系统维持灵活性平衡的能力。文献[13]以不同时间尺度的爬坡能力表示资源的灵活性供给能力,并与净负荷波动带来的灵活性需求比较后,判定某一时刻系统灵活性是否不足;文献[14]建立不同控制手段和运行状态下的固有灵活性评价指标,评价系统应对风电场出力不确定性所带来的功率不平衡的能力;文献[15]结合电网安全运行要求和常规机组调用情况,确定风电节点的可行出力范围,将该出力范围作为节点灵活性指标。但上述研究均采用确定性的评价方法,无法表征一段时间内系统灵活性充裕程度的概率化特征。在考虑不确定性的灵活性评估方面,对不确定性的建模主要可以分为场景生成与聚类 and 不确定变量概率模型,文献[16]采用层次聚类方法生成一系列新能源典型出力场景,构建单时段功率不平衡量作为灵活性指标;文献[17]研究风电和光伏的功率输出特性,建立不同时间尺度和不同爬坡方向的灵活性指标体系。场景分析法一般需要生成足够多数量的场景,导致计算求解困难<sup>[18]</sup>,因此,本文构建新能源出力的概率模型,同时本文灵活性评价方法不局限于单一时段,而是着重衡量一段时间内的灵活性充裕度;此外,本文方法不局限于灵活性资源固有特性,而是从灵活性供需匹配角度出发,进行系统灵活性平衡能力的评估。

合理评价系统的灵活性后,还需要针对性地研究灵活性提升措施。火电处于我国电源结构主导地

位,是提供系统灵活性的重要电源<sup>[19]</sup>,但灵活性调节能力普遍不足,为解决新能源的消纳问题,对火电进行灵活性改造是电力系统调节能力的主要增量来源<sup>[20]</sup>。目前,火电灵活性改造对于系统灵活性的提升作用还停留在理论定性层面<sup>[21]</sup>,有必要通过定量的灵活性指标的表现证明其有效性。

本文首先基于高斯混合分布和置信区间对新能源不确定性出力建模,量化新能源预测误差产生的灵活性需求;然后从灵活性供需平衡角度定义系统灵活性裕量概率密度分布,提出灵活性概率化评价指标;接着构建计及灵活性约束的优化调度模型,算例对比本文所提模型相对于传统调度模型在灵活性指标评价结果上的优势;最后在给定灵活性充裕度水平下,对比不同调度模式和电源结构下系统对新能源的接纳能力,验证火电机组灵活性改造对提升系统灵活性、提高新能源消纳的有效性。

## 1 电力系统灵活性供需平衡

### 1.1 电力系统灵活性平衡能力

灵活性平衡能力定义为某一时间尺度下系统优化调度各类灵活性资源,以一定经济成本快速响应发电侧和负荷侧的不确定性波动、维持电力平衡的能力<sup>[22]</sup>。在新能源大规模接入背景下,着重关注新能源对灵活性平衡带来的挑战。

图1描述了系统灵活性不足的后果。在负荷低谷或新能源大发时段,若系统中其他可控资源无法提供足够的向下灵活性调节能力,则向下灵活性不足,导致弃风弃光,不利于新能源消纳;在负荷高峰

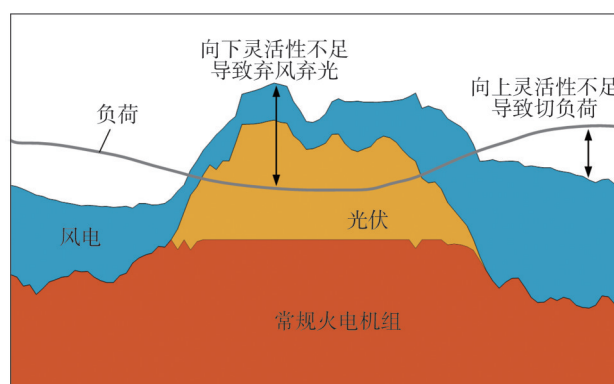


图1 系统灵活性需求及灵活性不足后果

Fig.1 System flexibility requirements and consequences of insufficient flexibility

或新能源出力骤减时段,若系统无法提供向上灵活性调节能力维持电力电量平衡,则会导致切负荷等严重后果<sup>[23]</sup>。

由图1可知,灵活性具有方向性,对系统灵活性平衡能力进行评价时也需要考虑这一特征。而传统电力系统中的可靠性评价模式是单一方向的,无法适用于高比例新能源接入的电力系统。传统可靠性评价与灵活性评价的对比如表1所示<sup>[24-25]</sup>。

表1 可靠性与灵活性评价的对比

Table 1 Comparison of reliability and flexibility evaluation

| 属性   | 可靠性评价         | 灵活性评价           |
|------|---------------|-----------------|
| 评价目的 | 评价系统维持供需平衡的能力 |                 |
| 平衡资源 | 常规发电机组        | 源-荷-储均可作为灵活性资源  |
| 平衡机制 | 电源单向匹配负荷      | 源荷双向互动          |
| 平衡标准 | 电源出力与负荷需求相等   | 灵活性供给相对于需求的充裕程度 |
| 平衡方向 | 单一方向          | 向上、向下           |

## 1.2 新能源不确定性建模

首先采用高斯混合模型(Gaussian mixture model, GMM)对新能源出力数据进行聚类<sup>[26]</sup>,以提取新能源历史出力特征;然后采用多分类逻辑回归(multinomial logistic regression, MLR)和高斯过程回归(Gaussian process regression, GPR)分别对新能源出力场景发生概率、以及每一场景中新能源出力概率分布进行预测。具体过程如下。

### 1) 预测分时段新能源出力场景。

采用多分类逻辑回归模型研究分时段新能源出力场景和输入特征(前几个时段新能源出力、前一天相同时段新能源出力)的关系,计算该时段每种新能源出力场景的发生概率,即为

$$\mathbf{X}_{\text{MLR}} = [n_{d,t-1}^n, n_{d,t-2}^n, \dots, n_{d,t-j}^n, n_{d-1,t}^n] \quad (1)$$

$$\mathbf{Y}_{\text{MLR}} = [s_{d,t}] \quad (2)$$

式中: $\mathbf{X}_{\text{MLR}}$ 为MLR模型输入自变量向量; $n_{d,t-j}^n$ 为第 $d$ 天时段 $t-j$ 新能源出力,其中 $j$ 为向前选取的最大时段数; $\mathbf{Y}_{\text{MLR}}$ 为MLR模型输入因变量向量; $s_{d,t}$ 为第 $d$ 天时段 $t$ 新能源出力场景。

训练完成后,输入测试集中的自变量,自变量来自已有的新能源历史出力数据,与式(1)格式相同,

MLR模型输出该时段各新能源出力场景发生的概率为

$$p(\mathbf{X}_{\text{MLR}}^{\text{test}}) = \beta_s \quad (3)$$

式中: $\mathbf{X}_{\text{MLR}}^{\text{test}}$ 为MLR模型测试集输入自变量向量; $\beta_s$ 为预测该时段未来场景 $s$ 的发生概率,满足 $\beta_s \geq 0$ ,  $\sum_{s=1}^S \beta_s = 1$ ,其中 $S$ 为总场景数。

### 2) 预测分场景新能源概率出力。

为了得到每一场景下的新能源出力概率分布,采用高斯过程回归模型进行预测。GPR用于新能源预测时有以下两个突出优势:①GPR是一种非参数模型,在处理复杂非线性的新能源出力预测时,能够灵活适应不同类型的数据分布和关系;②与传统的回归模型不同,GPR不仅给出预测值,还能提供不确定性度量(即预测方差),对新能源出力预测而言,量化预测的不确定性对系统调度和风险管理具有重要意义。GPR模型训练表示为:

$$\mathbf{X}_{\text{GPR},s} = [n_{d,t-1}^n, n_{d,t-2}^n, \dots, n_{d,t-j}^n, n_{d-1,t}^n], d \in D_s \quad (4)$$

$$\mathbf{Y}_{\text{GPR},s} = [n_{d,t}^n], d \in D_s \quad (5)$$

式中: $\mathbf{X}_{\text{GPR},s}$ 为该时段第 $s$ 个场景的输入自变量向量; $D_s$ 为该时段中属于第 $s$ 个场景的自然日向量; $\mathbf{Y}_{\text{GPR},s}$ 为该时段第 $s$ 个场景的输入因变量向量。

训练完成后,输入测试集中的自变量,GPR模型输出该时段场景 $s$ 下的新能源概率出力。本文方法属于离线预测,预测数据的时间尺度取决于输入历史数据的时间尺度,与实际运行需求相一致,该方法采用置信区间表征新能源预测误差范围,充分考虑了预测结果与实际出力存在偏差的可能性。为了提高模型预测精度,可以通过增大训练数据集以涵盖更多样化的天气和运行工况,或采用递归更新策略,定期引入最新的数据重新训练模型,从而得到更为准确的预测结果。

$$p(\mathbf{X}_{\text{GPR},s}^{\text{test}}) = N(E_s, \sigma_s^2) \quad (6)$$

式中: $\mathbf{X}_{\text{GPR},s}^{\text{test}}$ 为GPR模型场景 $s$ 下的测试集输入自变量向量; $N(E_s, \sigma_s^2)$ 表示服从参数为 $(E_s, \sigma_s^2)$ 的正态分布,其中 $E_s$ 为该时段场景 $s$ 下的新能源预测出力期望值, $\sigma_s^2$ 为该时段场景 $s$ 下的新能源预测出力方差。

### 3) 多场景出力结果融合。

最后,根据分时段新能源出力场景发生概率和各场景下的新能源概率出力结果,得到新能源预测概率出力模型为

$$p_s = \sum_{s=1}^S \beta_s \cdot N(E_s, \sigma_s^2) \quad (7)$$

### 1.3 灵活性调节需求量化

定义净负荷为总负荷与新能源出力的差值,结合上一节所构建的新能源不确定出力模型,灵活性需求如图2所示。

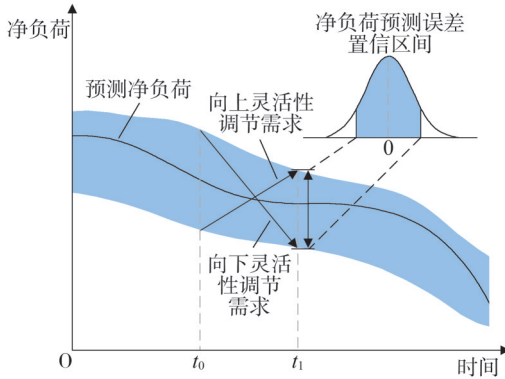


图2 系统灵活性需求量化

Fig.2 Quantification of system flexibility requirements

某一时段的灵活性需求取决于该时段及其相邻下一时段的净负荷预测误差置信区间,如图2中蓝色区域所示。以向上灵活性需求为例,某一时刻向上灵活性需求可由下一时刻预测误差置信区间上界与该时刻预测误差置信区间下界的差值来确定,即需要其他资源提供的最大时段间调节量。特别地,当差值为负时,表明该时刻向上灵活性需求为0。向下灵活性需求同理。可表示为:

$$F_t^{D,+} = \max \{P_{t+1}^{NL,U} - P_t^{NL,D}, 0\} \quad (8)$$

$$F_t^{D,-} = \min \{P_{t+1}^{NL,D} - P_t^{NL,U}, 0\} \quad (9)$$

式中: $F_t^{D,+}$ 、 $F_t^{D,-}$ 分别为向上、向下灵活性需求(包含方向); $P_t^{NL,U}$ 、 $P_t^{NL,D}$ 分别为 $t$ 时刻净负荷预测误差置信区间上界、下界。

### 1.4 灵活性供给能力建模

以常规火电机组为例构建灵活性供给能力模型,其灵活性供给能力同时与时间尺度和机组出力状态相关。图3表示了机组在一定出力状态下灵活性调节范围随着时间尺度的变化情况。随着时间尺度的增大,一开始机组的灵活性供给范围不断扩大,变化速度取决于机组的爬坡速率。但由于受到机组自身技术出力范围 $[P_{\min}, P_{\max}]$ 的限制,机组的灵活性供给能力有限,不会随着时间尺度的增加无限增大,

而是逐渐维持在某一固定值。特别地,对于下调灵活性供给能力,机组可以在满足运行条件时通过停机获取额外的下调能力。

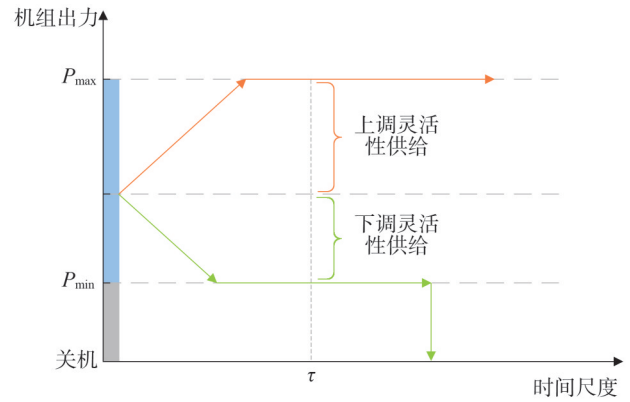


图3 机组灵活性供给能力与时间尺度的关系

Fig.3 Relationship between flexible supply capacity of unit and time scale

图4表示机组灵活性供给能力随出力状态的变化关系。在一定时间尺度下,对于上调灵活性能力,机组出力水平较低时,灵活性供给能力主要受爬坡能力 $R$ 的约束,为一定值(爬坡速率不变,时间尺度一定)。随着机组出力增加,当上调空间小于爬坡能力,其灵活性供给能力受到最大出力约束,随出力的增加而递减。下调灵活性同理。

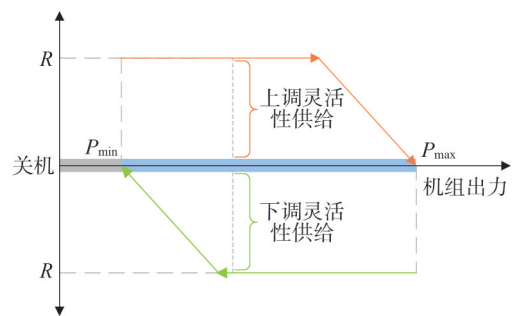


图4 机组灵活性供给能力与出力状态的关系

Fig.4 The relationship between flexible supply capacity and output state of unit

可表示为:

$$F_{i,t}^{S,+} = \min \{R_i^U, P_{i,\max}^G - P_{i,t}^G\} \quad (10)$$

$$F_{i,t}^{S,-} = \max \{-R_i^D, P_{i,\min}^G - P_{i,t}^G\} \quad (11)$$

式中: $F_{i,t}^{S,+}$ 、 $F_{i,t}^{S,-}$ 分别为 $t$ 时刻机组 $i$ 上调、下调灵活性

供给能力(正负表示方向); $R_i^U$ 、 $R_i^D$ 分别为机组*i*的上爬坡速率、下爬坡速率; $P_{i,t}^G$ 为*t*时刻机组*i*的出力状态; $P_{i,\max}^G$ 、 $P_{i,\min}^G$ 分别为机组*i*的出力上限、下限。

## 2 灵活性评价指标

类比可靠性评价中的失负荷概率(loss of load probability, LOLP)和电力不足期望(expected demand not supplied, EDNS),以衡量电力系统应对波动性问题、维持系统稳定运行的能力为目标,构建基于供需概率的灵活性平衡能力评价指标,包含灵活性不足概率(lack of flexibility probability, LOFP)和灵活性不足期望(expected flexibility not supplied, EFNS)两项指标。为了从数学角度表征两项指标,首先将系统灵活性裕量表示为:

$$M_t^+ = \sum_{i=1}^{N_G} F_{i,t}^{S,+} - F_t^{D,+} \quad (12)$$

$$M_t^- = -\left(\sum_{i=1}^{N_G} F_{i,t}^{S,-} - F_t^{D,-}\right) \quad (13)$$

式中: $M_t^+$ 、 $M_t^-$ 分别为向上、向下灵活性裕量; $N_G$ 为机组总数。

当灵活性裕量为正值时表示系统灵活性充裕,为负值时表示系统灵活性不足,向上灵活性不足和向下灵活性不足将分别导致失负荷、弃风弃光现象。统计灵活性裕量的概率密度分布如图5所示。

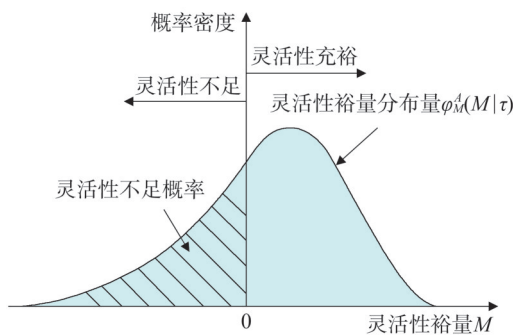


图5 灵活性裕量概率密度分布示意图

Fig.5 Illustrative diagram of the probability density distribution of flexibility margin

所提出的灵活性指标定义及计算方法如下。

1)向上灵活性不足概率。

定义为系统中灵活性资源所能提供的向上灵活性供给能力不能满足系统向上灵活性需求的概率,

物理意义为研究时段内向上灵活性不足时间与总时间的比值,即为

$$\delta_{\text{LOFP}}^+ = \Pr\{M_t^+ \leq 0\} \quad (14)$$

式中: $\delta_{\text{LOFP}}^+$ 为向上灵活性不足概率指标; $\Pr\{\cdot\}$ 为发生概率。

2)向下灵活性不足概率。

定义为系统中灵活性资源所能提供的向下灵活性供给能力不能满足系统向下灵活性需求的概率,物理意义为研究时段内向下灵活性不足时间与总时间的比值,即为

$$\delta_{\text{LOFP}}^- = \Pr\{M_t^- \leq 0\} \quad (15)$$

式中: $\delta_{\text{LOFP}}^-$ 为向下灵活性不足概率指标。

3)向上灵活性不足期望。

定义为研究周期内电力系统灵活性资源所能提供的向上灵活性与系统实际向上灵活性需求的差额的期望值,即失负荷期望值,即为

$$\delta_{\text{EFNS}}^+ = (-M_t^+) \cdot \Pr\{M_t^+ \leq 0\} \quad (16)$$

式中: $\delta_{\text{EFNS}}^+$ 为向上灵活性不足期望指标。

4)向下灵活性不足期望。

定义为研究周期内电力系统灵活性资源所能提供的向下灵活性与系统实际向下灵活性需求的差额的期望值,即弃风弃光期望值,即为

$$\delta_{\text{EFNS}}^- = (-M_t^-) \cdot \Pr\{M_t^- \leq 0\} \quad (17)$$

式中: $\delta_{\text{EFNS}}^-$ 为向下灵活性不足期望指标。

## 3 考虑灵活性需求的优化调度模型

### 3.1 目标函数

目标函数为在优先接纳新能源功率的基础上,全网发电总成本最低,同时计及灵活性缺额惩罚成本为

$$\min \left\{ \sum_{i=1}^{N_G} \sum_{t=1}^T (C_{i,t}^f + C_{i,t}^U + C_{i,t}^D) + \sum_{t=1}^T \left( \sum_{d=1}^{N_D} C_{d,t}^{\text{LOSS}} + \sum_{r=1}^{N_R} C_{r,t}^{\text{RC}} \right) + \sum_{t=1}^T (C_t^{\text{FU}} + C_t^{\text{FD}}) \right\} \quad (18)$$

式中: $C_{i,t}^f$ 、 $C_{i,t}^U$ 、 $C_{i,t}^D$ 分别为机组*i*在时段*t*的发电成本、启动成本和停机成本; $C_{d,t}^{\text{LOSS}}$ 为负荷*d*在时段*t*的失负荷惩罚成本; $C_{r,t}^{\text{RC}}$ 为新能源*r*在时段*t*的弃电惩罚成本; $C_t^{\text{FU}}$ 为时段*t*的上调灵活性不足惩罚成本; $C_t^{\text{FD}}$ 为

时段  $t$  的下调灵活性不足惩罚成本;  $T$  为调度周期;  $N_D$  为负荷数量;  $N_R$  为新能源数量。

具体表示为

$$C_{i,t}^f = a_i (P_{i,t}^G)^2 + b_i P_{i,t}^G + c_i \quad (19)$$

$$C_{i,t}^U \geq C_i^{su} (u_{i,t} - u_{i,t-1}), C_{i,t}^U \geq 0 \quad (20)$$

$$C_{i,t}^D \geq C_i^{sd} (u_{i,t-1} - u_{i,t}), C_{i,t}^D \geq 0 \quad (21)$$

$$C_{d,t}^{LOSS} = \pi^{LOSS} \cdot P_{d,t}^{LOSS} \quad (22)$$

$$C_{r,t}^{RC} = \pi^{RC} \cdot P_{r,t}^{RC} \quad (23)$$

$$C_t^{FU} = \pi^{FU} \cdot V_t^+ \quad (24)$$

$$C_t^{FD} = \pi^{FD} \cdot |V_t^-| \quad (25)$$

式中:  $P_{i,t}^G$  为机组  $i$  在时段  $t$  的出力;  $a_i, b_i, c_i$  分别为机组  $i$  的发电成本曲线的二次项系数、一次项系数和常数项;  $C_i^{su}, C_i^{sd}$  分别为机组  $i$  的启动成本和停机成本;  $u_{i,t}$  为机组  $i$  在时段  $t$  的状态, 1 表示运行, 0 表示停机;  $P_{d,t}^{LOSS}$  为负荷  $d$  在时段  $t$  的失负荷量;  $P_{r,t}^{RC}$  为新能源  $r$  在时段  $t$  的弃电量;  $\pi^{LOSS}, \pi^{RC}$  分别为单位失负荷成本、单位弃电价格;  $V_t^+, V_t^-$  分别为时段  $t$  上调、下调灵活性缺额(正负表示方向);  $\pi^{FU}, \pi^{FD}$  分别为上调、下调灵活性不足惩罚系数。

### 3.2 约束条件

1) 功率平衡约束为

$$\sum_{i=1}^{N_G} P_{i,t}^G + \sum_{r=1}^{N_R} (P_{r,t}^R - P_{r,t}^{RC}) = \sum_{d=1}^{N_D} (P_{d,t}^D - P_{d,t}^{LOSS}) \quad (26)$$

式中:  $P_{r,t}^R$  为新能源  $r$  在时段  $t$  的出力;  $P_{d,t}^D$  为负荷  $d$  在时段  $t$  的负荷需求。

2) 机组出力上下限约束为

$$u_{i,t} P_{i,\min}^G \leq P_{i,t}^G \leq u_{i,t} P_{i,\max}^G \quad (27)$$

式中:  $P_{i,\max}^G, P_{i,\min}^G$  分别为机组  $i$  的技术出力上限、下限。

3) 机组爬坡约束为

$$-R_i^D \leq P_{i,t}^G - P_{i,t-1}^G \leq R_i^U \quad (28)$$

式中:  $R_i^U, R_i^D$  分别为机组  $i$  最大向上、向下爬坡速率。

4) 机组启停约束为:

$$\sum_{k=0}^{T_i^{\text{on}}-1} u_{i,t+k} \geq T_i^{\text{on}} (u_{i,t} - u_{i,t-1}) \quad (29)$$

$$\sum_{k=0}^{T_i^{\text{off}}-1} (1 - u_{i,t+k}) \geq T_i^{\text{off}} (u_{i,t-1} - u_{i,t}) \quad (30)$$

式中:  $T_i^{\text{on}}, T_i^{\text{off}}$  分别为机组  $i$  允许的最小运行、停机时间。

5) 灵活性平衡约束为:

$$\sum_{i=1}^{N_G} F_{i,t}^{S,+} + V_t^+ \geq F_t^{D,+} \quad (31)$$

$$\sum_{i=1}^{N_G} F_{i,t}^{S,-} + V_t^- \leq F_t^{D,-} \quad (32)$$

本文研究特定时间尺度下的灵活性供需关系, 机组灵活性出力相关约束如式(10)一式(11)所示, 系统灵活性需求的确定如式(8)一式(9)所示, 不再赘述。

该模型可以基于 MATLAB 工具箱 YALMIP 建模, 将目标函数和约束条件显式写出, 并调用商业求解器 CPLEX 求解。

## 4 算例分析

算例整体流程如图6所示。

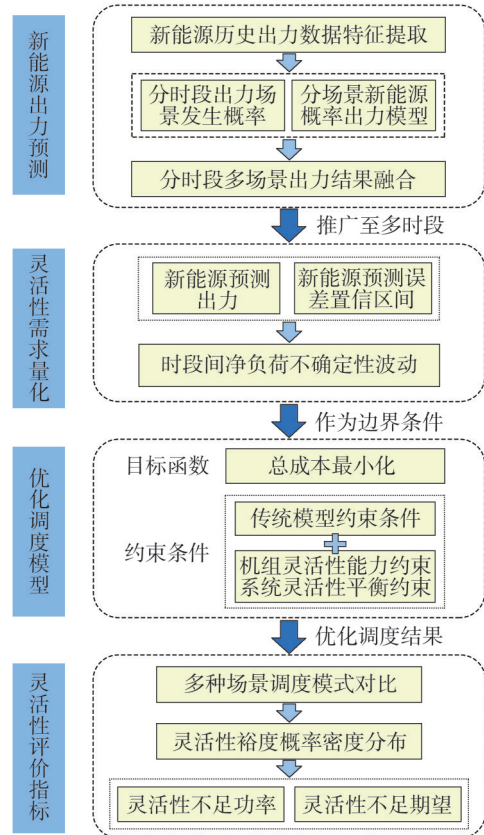


图6 算例流程图

Fig.6 Example flow chart

### 4.1 新能源出力预测结果分析

选取我国东部某省份某年新能源出力数据作为研究数据集, 划分该年前300天的新能源出力数据

为训练集,后65天的数据为测试集,以1h为颗粒度,将一天分为24个时段,研究该省电网全年新能源概率出力特性。

以预测第333天第9个时段的新能源概率出力为例,通过MLR模型计算得到该时段4个新能源出力场景发生的概率,通过GPR模型计算得到该时段每个出力场景下新能源概率出力,如表2所示。

表2 新能源概率出力结果(第333天,第9时段)

Table 2 New energy probability output results (Day 333, Period 9)

| 场景编号 | 场景发生概率 | 新能源出力分布             |
|------|--------|---------------------|
| 场景1  | 0.335  | $N(0.163, 0.018^2)$ |
| 场景2  | 0.003  | $N(0.418, 0.563^2)$ |
| 场景3  | 0.580  | $N(0.099, 0.040^2)$ |
| 场景4  | 0.082  | $N(0.015, 0.299^2)$ |

综合新能源出力场景发生概率计算结果和各新能源出力场景下的新能源概率出力结果,得到该时段新能源概率出力预测结果,采用混合高斯分布进行表征,如图7所示。对比预测结果和真实值,新能源出力真实值落在概率密度曲线上概率较高处,预测结果具有可信度。

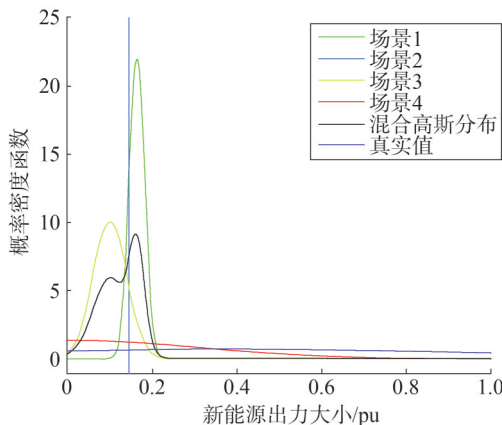


图7 新能源概率出力预测结果(第333天,第9时段)

Fig.7 New energy probability output forecast results (Day 333, Period 9)

由单一时段推广至全天,可以得到未来某天每一时段的新能源预测出力的完整概率分布,采用置信区间表征全天的新能源预测出力结果,如图8所示。

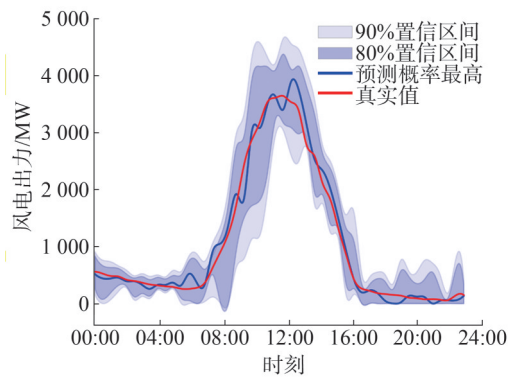


图8 新能源预测出力及预测误差置信区间

Fig.8 New energy forecast output and forecast error confidence interval

从图8可见,预测出力概率最高值和实际出力曲线相似度很高,概率密度最高值能较好表征真实值的变化趋势;同时置信区间可以很好地覆盖实际出力曲线,绝大部分新能源出力真实值均处于置信区间的预测范围内,允许新能源具有一定程度的波动性,说明本文提出的新能源概率出力特性建模性能良好,能在得到精度较高的点预测结果的同时,保证区间预测的结果准确可靠。

#### 4.2 考虑灵活性需求对系统调度结果及灵活性指标的影响

为了体现本文模型效果,设置以下两种对比场景。

场景2a:不考虑灵活性需求及机组灵活性相关约束的传统调度模式;

场景2b:考虑灵活性需求及机组灵活性相关约束的调度模式(本文模型)。

本例中有5台火电机组参与调度,机组参数如表3所示。

表3 机组参数

Table 3 Unit parameter

| 机组编号 | 最大技术出力 /MW | 最小技术出力/MW | 爬坡速率/(MW/min) | 最短启停时间/h |
|------|------------|-----------|---------------|----------|
| 1    | 200        | 110       | ±0.67         | 4        |
| 2    | 200        | 110       | ±0.67         | 6        |
| 3    | 500        | 250       | ±2.17         | 8        |
| 4    | 800        | 400       | ±4.17         | 10       |
| 5    | 660        | 240       | ±3.33         | 8        |

对4.1节所得新能源预测结果进行合理放缩后参与本例算例系统进行优化调度,以90%置信区间确定灵活性需求。新能源装机为800 MW,新能源装机占比约为25%。原负荷减去新能源出力后得到净负荷,净负荷预测值及其预测误差区间如图9所示。

由式(8)一式(9)计算得出各时段灵活性需求如图10(c)(e)中曲线所示。上调灵活性需求峰值出现在早峰净负荷大幅爬升的时段07:00前后,下调灵活性需求峰值则出现在光伏出力迅速增加的时段11:00—12:00。由于新能源出力越大时其预测误差也越大,因此日间的灵活性需求总体上大于夜间。

场景2a机组组合及机组灵活性出力结果如图10(a)(c)(e)所示,场景2b结果如图10(b)(d)(f)所示。场景2a全天只投入机组1—机组3,这就导致净负荷较高时,机组大都接近满发,而无法提供向上调节能力,如图10(c)时段09:00—11:00、时段13:00—17:00,都出现了灵活性需求大大超过灵活性供给能力的情况,系统灵活性缺额严重。

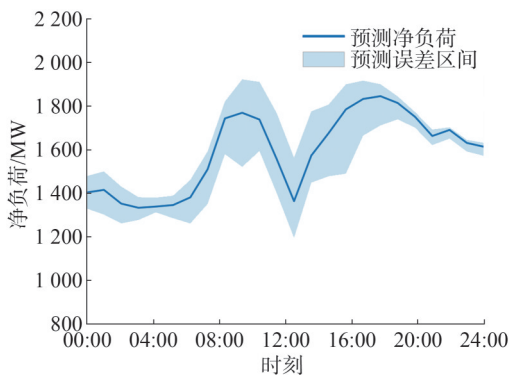
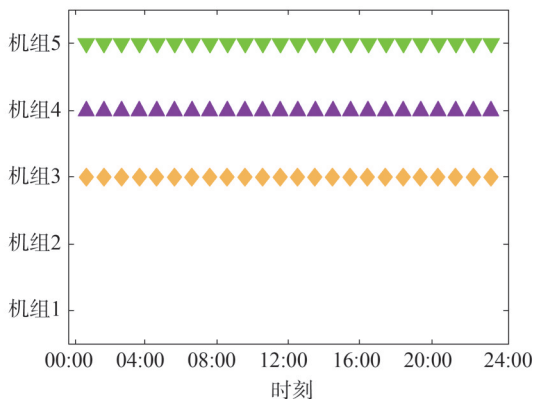
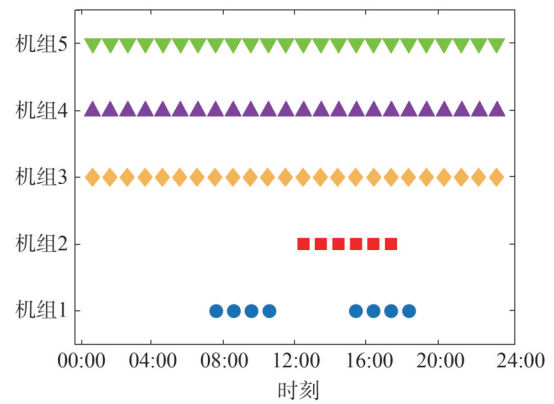


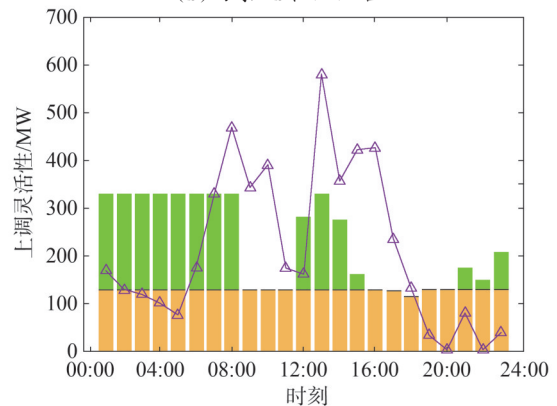
图9 预测净负荷及误差区间  
Fig.9 Predicted net load and error interval



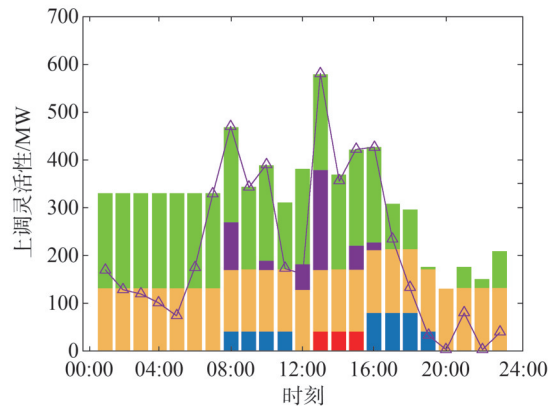
(a)场景2a机组组合



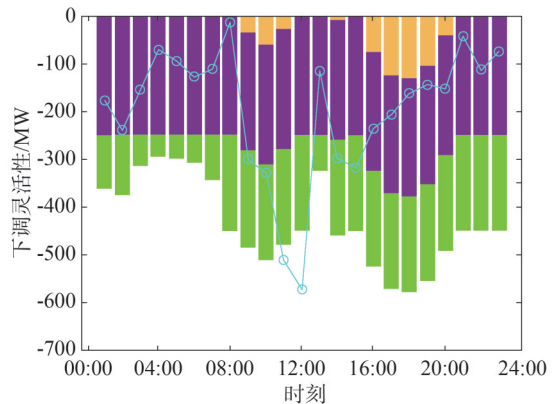
(b)场景2b机组组合



(c)场景2a上调灵活性



(d)场景2b上调灵活性



(e)场景2a下调灵活性

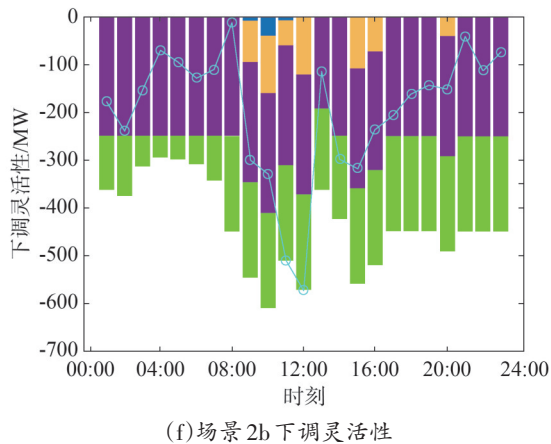
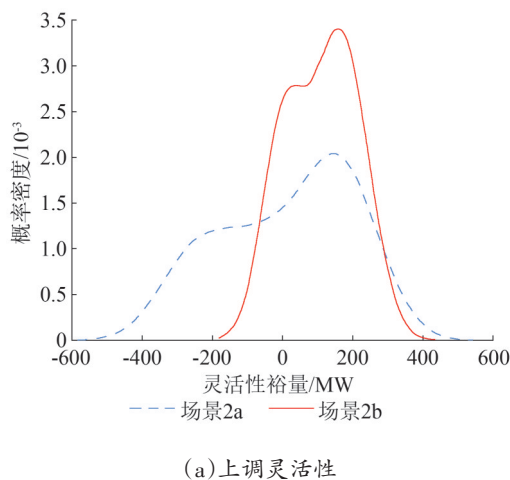


图10 不同场景调度结果对比

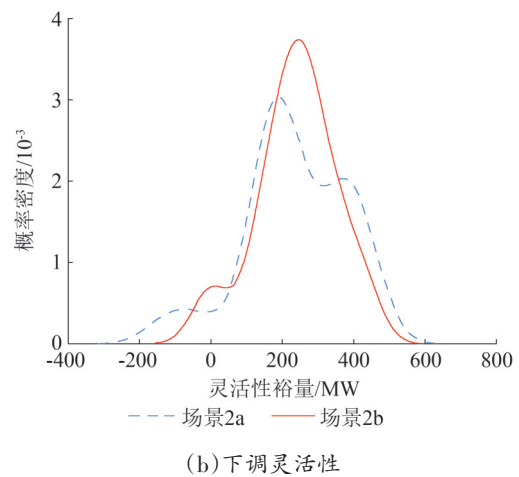
Fig.10 Comparison of scheduling results under different scenarios

场景2b的调度结果增加投入了开停机更灵活的机组1、机组2,在负荷高峰时分摊了其他机组出力,使各台机组都保留一定上调空间,如图10(d)中时段08:00—19:00,多个机组共同提供向上灵活性,使系统总灵活性供给能力能够满足灵活性需求。在整个调度周期内,灵活性供需的变化趋势存在相关性,说明调度结果能根据灵活性需求的变化适时调整机组的投入状态和出力水平,从而更好地应对灵活性需求。

基于所提的灵活性评价指标对两个场景的灵活性平衡能力进行评价。灵活性裕量概率密度曲线如图11所示。场景2b的概率密度曲线在左半平面的部分明显右移,表明考虑灵活性需求后的调度结果使系统运行灵活性不足概率降低。



(a)上调灵活性



(b)下调灵活性

图11 灵活性裕量概率密度曲线对比

Fig.11 Comparison of flexibility margin probability density curves

表4给出了灵活性评价指标的具体值。利用系统灵活性资源和波动性新能源出力的概率分布情况,本文所提各项概率性指标能够合理表征系统的整体灵活性水平。由指标评估结果可见,本文算例系统在传统调度模式即场景2a下存在较为严重的上调灵活性不足,不足概率为43%,结合调度结果分析原因在于净负荷较高时段开机机组较少,即使能在新能源预测出力下能够维持功率平衡,但开机机组均处于较高的出力水平,上调空间极小,一旦新能源实际出力低于预测值,则难以满足净负荷需求,因此系统上调灵活性不足概率较高。而对比场景2b的各项指标,尤其是向上灵活性不足概率和期望值均得到显著降低,分别下降60%和89%,原因在于更多的灵活性资源在线提供更充裕的上调灵活性容量,各项指标的定量表现说明本文模型能够充分激发系统现有资源的灵活性供给潜力,减少发生灵活性不足的时段以及可能导致的失负荷或弃风弃光电量损失。

表4 灵活性评价指标对比

Table 4 Comparison of flexibility evaluation indicators

| 指标                     | 方向 | 场景 2a | 场景 2b      |
|------------------------|----|-------|------------|
| LOFP                   | +  | 0.43  | 0.17(-60%) |
|                        | -  | 0.07  | 0.04(-43%) |
| EFNS/MW                | +  | 78.76 | 8.34(-89%) |
| 运行成本/10 <sup>8</sup> 元 | -  | 7.31  | 1.80(-75%) |
|                        |    | 4.65  | 4.75(+2%)  |

最后,对比两个场景的运行成本,场景2b由于增加两台机组,成本较场景2a有所提高。

#### 4.3 考虑灵活性充裕度要求的系统不同阶段新能源接纳能力分析

火电机组灵活性改造主要指标包括调峰幅度、爬坡速率及启停时间等。为了匹配新能源不同发展阶段需求,有必要进行合理的火电机组灵活性改造规划。结合现有火电灵活性改造技术措施及实施效果,制定火电灵活性改造方案为:1)在新能源装机占比达到30%前提高部分机组深度调峰能力;2)在新能源装机占比达到40%前进一步提升部分机组爬坡速率;3)在新能源装机占比达到50%前进一步考虑机组灵活启停,或以调节性能更佳的燃气机组代替部分煤电。

为了体现火电灵活性改造对提升系统灵活性平衡、提高新能源消纳能力的效果,对比以下三种场景。

场景3a:不考虑灵活性,即约束式(31)一式(32)所示传统调度模式;

场景3b:考虑灵活性的调度模式;

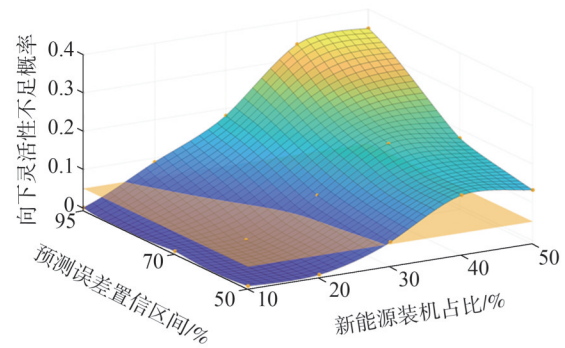
场景3c:进一步考虑机组灵活性改造的调度模式。

由于系统对新能源的接纳能力并不是无限大的,随着新能源装机占比不断提高,系统的向下灵活性不足概率也随之增加,对应于新能源消纳能力不断下降。如果系统下调灵活性严重不足,新能源出力无法被消纳,此时再接入新能源已经没有意义。

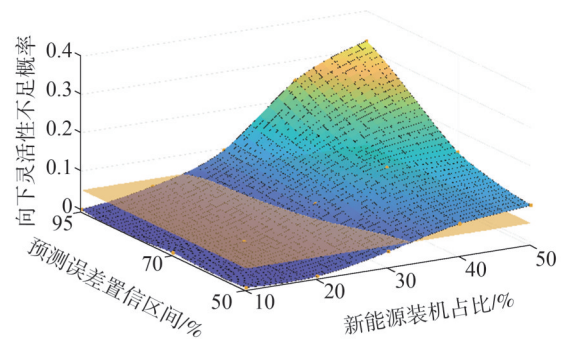
本例研究系统的向下灵活性不足概率随净负荷预测误差置信区间、新能源装机占比的变化关系,并将5%设为系统灵活性充裕度要求。传统调度模式的下调灵活性不足概率变化趋势如图12(a)所示。

由图12可知,随着预测误差置信区间和新能源装机占比的提高,向下灵活性不足概率逐渐增加。以灵活性充裕度要求的5%为竖轴坐标,做一平行于 $xoy$ 的平面,则该平面与灵活性不足概率曲面的交线即为新能源接纳能力边界曲线,意义为在所要求的系统灵活性充裕度水平下,一定预测误差置信区间内系统对新能源的接纳能力。传统调度模式下,系统灵活性充裕度要求为5%时,预测误差置信区间为50%时可接纳新能源占比约为29%,而当预测误差置信

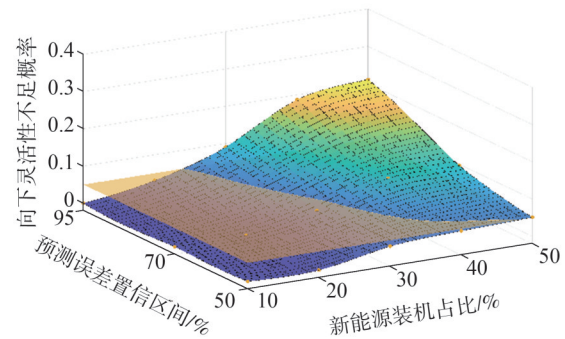
区间提高到95%时,可接纳的新能源占比为16%。



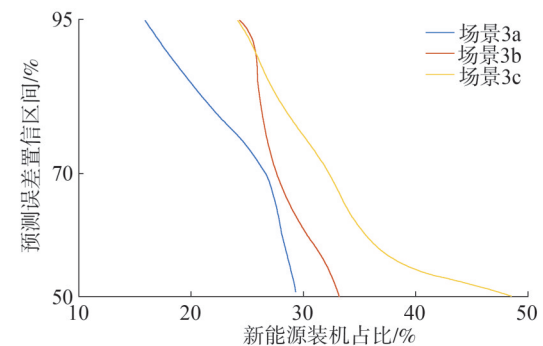
(a) 场景3a



(b) 场景3b



(c) 场景3c



(d) 三个场景对比

图12 不同场景下新能源接纳边界对比  
Fig.12 Comparison of new energy acceptance boundaries under different scenarios

考虑灵活性的调度模式和进一步考虑机组灵活性改造的调度模式可以得到类似的新能源接纳能力边界曲线,如图12(b)(c)所示。将三种场景的交线投影到同一平面,如图12(d)所示,得到不同场景下的新能源接纳能力边界范围由小到大依次为:场景3a、场景3b、场景3c。

对比三条曲线可见,传统调度模式下的新能源接纳边界在预测误差置信区间下降至70%(新能源装机达26%)后曲线形态变得更加陡峭,这表明预测误差置信区间的下降,或新能源预测精度的提高对后续接纳更多新能源的提升效果有限。而考虑灵活性的调度模式能够最大程度发挥当前系统的灵活性潜力,尤其在预测误差置信区间较大时,相比于传统调度模式显著提高了新能源接纳能力。最后,在考虑机组灵活性改造的调度模式下,新能源接纳边界曲线的变化整体上更为平缓,相比于其他两种场景,最多能接纳近50%的新能源同时保障系统合理的灵活性充裕度。

## 5 结束语

高比例新能源发电带来的不确定性对电力系统灵活性的合理评估与提升提出了迫切需求。本文对新能源出力数据进行高斯混合聚类后,通过分时段、分场景建模生成新能源出力预测值和误差区间,所得结果符合历史分布特征且与真实值较为贴近。在灵活性供需建模基础上,考虑灵活性平衡的调度模型能够充分发挥系统现有的灵活性调节能力,并在本文所提出的灵活性评价指标下有较高表现。最后仿真结果表明,对火电进行灵活性改造、统筹合理电源布局,能有效提升系统对大规模新能源接入的友好性。

## 参考文献

- [1] 臧延雪,边晓燕,梁思琪,等.计及线路传输能力的新能源电力系统灵活性评估及优化调度方法[J].电力系统保护与控制,2023,51(11):15-26.  
ZANG Yanxue, BIAN Xiaoyan, LIANG Siqi, et al. Flexibility evaluation and optimal dispatching method of a renewable energy power system considering line transmission capacity [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(11): 15-26.
- [2] RAHMAN M M, DADON S H, HE M, et al. An overview of power system flexibility: high renewable energy penetration scenarios [J]. Energies, 2024, 17(24): 6393.
- [3] 王晓斌,张高航,余忠平,等.新能源高渗透系统灵活性供给能力评价方法研究[J].现代电子技术,2023,46(12):117-123.  
WANG Xiaobin, ZHANG Gaochang, YU Zhongping, et al. Research on evaluation method of flexibility and supply capacity of high permeability new energy system [J]. Modern Electronics Technique, 2023, 46(12): 117-123.
- [4] 鞠立伟,吕硕硕,李鹏.新型电力系统需求侧灵活性资源时空协同优化与动态均衡机制研究综述[J].电力建设,2024,45(9):142-163.  
JU Liwei, LYU Shuoshuo, LI Peng. Review of novel demand-side flexibility resource spatio-temporal co-optimization and dynamic equilibrium mechanism of power systems [J]. Electric Power Construction, 2024, 45(9): 142-163.
- [5] MA X Y, SUN Y Z, FANG H L. Scenario generation of wind power based on statistical uncertainty and variability [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(4): 894-904.
- [6] YING Y Q, WU Y J, SU Y Q, et al. Dispatching approach for active distribution network considering PV generation reliability and load predicting interval [J]. The Journal of Engineering, 2017, 2017(13): 2433-2437.
- [7] MONTOYA O D, GRISALES-NOREÑA L F, RAMOS-PAJA C A. Optimal allocation and sizing of PV generation units in distribution networks via the generalized normal distribution optimization approach [J]. Computers, 2022, 11(4): 53.
- [8] 李丹,梁云嫣,缪书唯,等.基于高斯混合聚类和改进条件变分自编码的多风电场功率日场景生成方法[J/OL].中国电力,2024: 1-13 [2024-11-15]. <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspxfilename=ZGDL20240205002&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.  
LI Dan, LIANG Yunyan, MIAO Shuwei, et al. Daily power scenario generation method for multiple wind farms based on gaussian mixture clustering and improved conditional variational autoencoder [J/OL]. Electric Power, 2024: 1-13 [2024-11-15]. <http://kns.cnki.net/KCMS/detail/detail.aspxfilename=ZGDL20240205002&dbname=CJFD&dbcode=CJFQ>.
- [9] 鲁宗相,李海波,乔颖.高比例可再生能源并网的电力系统灵活性评价与平衡机理[J].中国电机工程学报,2017,37(1):9-20.  
LU Zongxiang, LI Haibo, QIAO Ying. Flexibility evaluation and supply/demand balance principle of power system with high-penetration renewable electricity [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 9-20.
- [10] 王颖,林酉阔,兰晓明,等.考虑随机波动性可再生能源的传统电源灵活性分析[J].电力建设,2017,38(1):131-137.  
WANG Ying, LIN Youkuo, LAN Xiaoming, et al. Flexibility analysis of conventional generation with random fluctuation renewable energy [J]. Electric Power Construction, 2017, 38(1): 131-137.

- [11] 李则衡,陈磊,路晓敏,等.基于系统灵活性的可再生能源接纳评估[J].电网技术,2017,41(7):2187-2194.  
LI Zeheng, CHEN Lei, LU Xiaomin, et al. Assessment of renewable energy accommodation based on system flexibility analysis [J]. Power System Technology, 2017, 41(7):2187-2194.
- [12] 刘英琪,谢敏,韦薇,等.高比例风电接入的电力系统灵活性评估与优化[J].电力建设,2019,40(9):1-10.  
LIU Yingqi, XIE Min, WEI Wei, et al. Assessment and optimization for power system flexibility with high proportion of wind power [J]. Electric Power Construction, 2019, 40(9):1-10.
- [13] WANG Q, HODGE B M. Enhancing power system operational flexibility with flexible ramping products: a review [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(4):1652-1664.
- [14] 肖定垚,王承民,曾平良,等.考虑可再生能源电源功率不确定性的电源灵活性评价[J].电力自动化设备,2015,35(7):120-125.  
XIAO Dingyao, WANG Chengmin, ZENG Pingliang, et al. Power source flexibility evaluation considering renewable energy generation uncertainty [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(7):120-125.
- [15] ZHAO J Y, ZHENG T X, LITVINOV E. Variable resource dispatch through do-not-exceed limit [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(2):820-828.
- [16] AI Q, XIANG J Q, LIU Y L, et al. Multi-scenario flexibility assessment of power systems considering renewable energy output uncertainty [J]. Frontiers in Energy Research, 2024, 12:1359233.
- [17] YUXUAN T, JUNJIE H, XUETAO L. Quantification of flexibility supply and demand and distributionally robust optimal dispatch of renewable energy dominated power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(15):80-90.
- [18] HU J X, CAO Y M, LIU Y M, et al. Optimal scenario reduction method for stochastic programming via probabilistic similarity function [C]//2024 36th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). IEEE, 2024.
- [19] 张凯,袁家海,丁保迪,等.新型电力系统灵活性资源提升效益评估[J].气候变化研究进展,2024,20(3):316-326.  
ZHANG Kai, YUAN Jiahai, DING Baodi, et al. Evaluation of flexibility enhancement benefits for the new power system [J]. Climate Change Research, 2024, 20(3):316-326.
- [20] 李政,李伟起,张忠伟,等.“双碳”目标下我国电力系统灵活性资源发展策略研究[J].中国工程科学,2024,26(4):108-120.  
LI Zheng, LI Weiqi, ZHANG Zhongwei, et al. Development Strategy of flexible resources in china's power system under the carbon peaking and carbon neutrality goals [J]. Strategic Study of CAE, 2024, 26(4):108-120.
- [21] MOUTON D, MARARAKANYE N, BEKKER B. Assessment of methods to measure power system flexibility: a review [C]//2021 56th International Universities Power Engineering Conference (UPEC). IEEE, 2021.
- [22] 鲁宗相,林弋莎,乔颖,等.极高比例可再生能源电力系统的灵活性供需平衡[J].电力系统自动化,2022,46(16):3-16.  
LU Zongxiang, LIN Yisha, QIAO Ying, et al. Flexibility supply-demand balance in power system with ultra-high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(16):3-16.
- [23] 白帆,陈红坤,陈磊,等.基于确定型评价指标的电力系统调度灵活性研究[J].电力系统保护与控制,2020,48(10):52-60.  
BAI Fan, CHEN Hongkun, CHEN Lei, et al. Research on dispatching flexibility of power system based on deterministic evaluation index [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10):52-60.
- [24] 唐君毅,丁碧薇,杨琪.考虑风电预测区间的电力系统灵活性评估方法[J].电气传动,2023,53(7):49-55.  
TANG Junyi, DING Biwei, YANG Qi. Power system flexibility evaluation method considering wind power prediction interval [J]. Electric Drive, 2023, 53(7):49-55.
- [25] 周光东,周明,孙黎滢,等.含波动性电源的电力系统运行灵活性评价方法研究[J].电网技术,2019,43(6):2139-2146.  
HOU Guangdong, ZHOU Ming, SUN Liying, et al. Research on operational flexibility evaluation approach of power system with variable sources [J]. Power System Technology, 2019, 43(6):2139-2146.
- [26] 汪惟源,窦飞,程锦闽,等.一种风光联合出力概率模型建模方法[J].电力系统保护与控制,2020,48(10):22-29.  
WANG Weiyuan, DOU Fei, CHENG Jinmin, et al. A modeling method for a wind and photovoltaic joint power probability model [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10):22-29.

收稿日期:2024-11-15

修回日期:2025-05-09

作者简介:

冯树海(1973),通信作者(fengshuhai@epri.sgcc.com.cn),男,硕士,研究员级高级工程师,研究方向为电力市场、电力系统自动化等;  
史新红(1990),女,硕士,高级工程师,研究方向为电力市场等;  
郑亚先(1982),男,硕士,研究员级高级工程师,研究方向为电力市场等;  
石飞(1981),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力市场、电力系统自动化等。

(责任编辑 郑天茹)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2025.09.005

# 考虑时序特性的高比例新能源电力系统运行方式聚类分析方法

高嵩<sup>1\*</sup>, 庞向坤<sup>1</sup>, 陈思颖<sup>2</sup>, 曹齐<sup>2</sup>, 谢海鹏<sup>2</sup>

(1. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250003; 2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 新能源的随机性和波动性给电力系统的安全稳定运行带来挑战, 分析不同可再生能源渗透水平下电力系统的运行方式对其调度运行非常重要, 因此, 设计一种提取电力系统典型运行方式的综合方法框架。首先, 针对实际运行数据不足的问题, 利用时序随机生产模拟快速生成高维数据。其次, 结合需求响应模型和极端场景, 分析高可再生能源渗透率下的潜在运行风险, 验证灵活资源提升电力系统调节能力。然后, 为解决时序数据聚类的高维和非线性问题, 采用深度时序聚类算法, 结合由卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)和双向长短期记忆网络(bidirectional long short-term memory network, Bi-LSTM)组成的时序自动编码器, 利用动态时序规整作为相似性度量的时序聚类层, 联合优化两个层的损失函数, 得到聚类中心。最后, 基于某省级电网的实际和模拟数据, 分析不同渗透率下的聚类结果, 验证所提出算法的有效性, 证明需求响应对极端场景的调节效果。

**关键词:** 高比例新能源; 时序随机生产模拟; 深度时序聚类算法; 典型运行方式; 需求侧响应

中图分类号: TM721

文献标志码: A

文章编号: 1007-9904(2025)09-0044-14

## Clustering Analysis Method for Operational Modes of High-proportion Renewable Energy Power Systems Considering Temporal Characteristics

GAO Song<sup>1\*</sup>, PANG Xiangkun<sup>1</sup>, CHEN Siying<sup>2</sup>, CAO Qi<sup>2</sup>, XIE Haipeng<sup>2</sup>

(1. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250003, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** The randomness and volatility of renewable energy pose challenges to the safe and stable operation of power systems. Analyzing the operational modes of power systems under different levels of renewable energy penetration is crucial for their scheduling and operation. Therefore, a comprehensive methodology framework is proposed for extracting typical operational modes of power systems. First, to address the issue of insufficient operational data, a temporal stochastic production simulation is used to quickly generate high-dimensional data. Then, by combining demand response models and extreme scenarios, potential operational risks under high renewable energy penetration are analyzed, and the effectiveness of flexible resources in enhancing system regulation is validated. Subsequently, to solve the high-dimensional and nonlinear issues in temporal data clustering, a deep temporal clustering algorithm is employed. This algorithm integrates a temporal autoencoder, which combines convolutional neural networks (CNN) and bidirectional long short-term memory (Bi-LSTM) networks, with a temporal clustering layer using dynamic time warping as a similarity measure. The clustering centers are derived by jointly optimizing the loss functions of both layers. Finally, based on real and simulated data from a provincial power grid, the clustering results under different penetration levels are analyzed, confirming the effectiveness of the proposed algorithm and demonstrating the role of demand response in regulating extreme scenarios.

**Keywords:** high-proportion renewable energy; temporal stochastic production simulation; deep temporal clustering algorithm; typical operational modes; demand-side response

**基金项目:** 国网山东省电力公司科技项目“基于综合指标的新型电力系统充裕性分析及风险预警技术研究”(520626220021)。  
Science and Technology Project of State Grid Shandong Electric Power Company “Research on Adequacy Analysis and Risk Warning Technology of New Power Systems Based on Comprehensive Indicators”(520626220021).

## 0 引言

全球对低碳能源系统持续推动,促使可再生能源在电力系统中迅速发展。随着各国努力实现低碳目标,特别是在风能和太阳能方面<sup>[1]</sup>,可再生能源在能源结构中的比重显著增长。然而,这一转变也为电力系统的运行带来了新的挑战<sup>[2-3]</sup>。风能<sup>[4-5]</sup>和太阳能<sup>[6-7]</sup>等可再生能源的随机性和不确定性引入了显著的发电波动,这种波动会导致电力供应和需求之间的失衡,增加系统不稳定、频率偏差甚至停电的风险<sup>[8]</sup>。因此,必须研究先进的电力系统调度运行和规划方法<sup>[9]</sup>,以适应可再生能源迅猛发展带来的挑战。

随着新型电力系统中可再生能源的渗透率不断提高,其运行方式变得越来越复杂和多变。而传统的电力系统分析方法主要依赖于基于物理模型的仿真和优化,其在捕捉系统运行特性方面面临挑战。因此,近年来,数据驱动的方法逐渐成为提取电力系统典型运行方式的重要工具<sup>[10]</sup>。而为了获得新型电力系统运行产生的大量电气量及其组合产生的高维复杂非线性时序向量,研究者们提出了随机生产模拟方法<sup>[11]</sup>来获得数据,以便更准确地评估和优化电力系统的运行和规划。文献[12]通过重构风、光等可再生能源的时序出力模型,提出了含多能互补的电力系统协调优化策略,并基于此策略构建了以全系统运行生产成本最低为目标的电力系统时序生产仿真模型。文献[13]提出了一种基于随机生产模拟的新能源消纳能力评估方法,通过离散随机变量描述新能源出力随机性,并快速计算评估周期内的新能源消纳电量。然而,现有研究在考虑保留状态之间时间关联性方面存在不足,且很少探讨灵活性资源和极限场景对生产模拟的影响。因此,提出一种利用随机生产模拟获取电力系统运行数据的方法,不仅保留状态时序特征,还综合考虑了需求侧响应和风险场景。

近些年,电力系统在应对极端运行条件时的表现引起了广泛关注。连续高温引发的空调用电高峰和假期期间新能源大量出力造成的低负荷场景,均对电网的稳定性和灵活性提出了严峻挑战。例如,2023年8月,四川和重庆地区再度迎来持续高温天气,为应对高温带来的用电需求增长,部分地区再次

采取了限电措施<sup>[14]</sup>。此类极端天气对电力系统的调峰能力和供电稳定性构成了重大考验。在假期期间,由于用电需求骤降,新能源发电可能大幅超出需求,导致供需失衡的风险。2023年“五一”假期期间,山东省出现了新能源出力过剩引发的连续负电价现象,进一步凸显了高比例新能源接入对系统灵活调节能力的严峻考验<sup>[15]</sup>。基于电网运行实际情况,为更好地反映电力系统在极端情景下的运行挑战,选择“连续高温”和“假期新能源大发”作为典型极限场景进行分析。

电力系统运行方式聚类分析是一种基于数据驱动的分析方法,旨在从海量的历史运行数据中提取典型的运行模式<sup>[16]</sup>。聚类分析通过将相似的运行方式归类,有助于揭示电力系统在不同负荷条件和新能源出力下的典型特征,进而为电力系统的规划、调度和运行提供数据支撑<sup>[17]</sup>。近年来,线性或非线性的特征变换已经被广泛应用,而数据特征的提取很大程度上决定了聚类的性能。很多研究已经集中于使用深度神经网络来学习聚类特征,随着机器学习和大数据技术的发展,越来越多的研究采用聚类分析方法,结合时间序列分析和深度学习技术<sup>[18]</sup>,对电力系统运行方式进行深入挖掘。文献[19]对深度聚类(deep clustering, DC)算法从架构角度进行系统性论述,其通常使用于各种类型的数据,如图像<sup>[20]</sup>、文本<sup>[21]</sup>等,其处理的数据一般为静态数据,并没有显著的时间依赖性。而深度时序聚类(deep temporal clustering, DTC)算法则是为了用于处理具有显著时间依赖性的时序数据<sup>[22]</sup>,其主要目的是解决高维、非线性、时序依赖性较强的数据聚类问题。文献[23-25]指出,深度学习模型首先对电力系统的高维时序数据进行特征提取,将复杂的运行数据映射到一个低维的潜在空间。然后,通过聚类算法对这些低维特征进行聚类分析,从而识别出电力系统在不同工况下的典型运行方式。在传统的聚类方法中,特征提取和聚类是两个独立的步骤。如在文献[26]中对用户负荷进行聚类分析,首先对负荷数据进行了手动的特征选取,再利用提取的特征使用K-means算法进行聚类分析,其根据特征的相似性将数据点分到不同的簇中。在文献[27]中,先使用基于核判别的特征选择方法提取各个风机的关键风速特征,再利用提取的特征输入基

于密度的改进聚类方法中对风电场的不同风机进行集群划分。特征提取和聚类两个步骤相互独立,没有直接的反馈机制,导致特征提取可能并不总是最适合聚类的,同时必然会损失一部分数据特征。而电力系统数据中存在复杂的非线性关系,传统的手动特征提取方法无法捕捉到这些时序模式,导致结果不理想。对于时间序列这一种数据来说,其具有数据量大、高维度和高度异质性等特点<sup>[28]</sup>,因此文献<sup>[29]</sup>指出更应该关注的是曲线的波动性、时间分布等形态特征。然而,欧氏距离无法有效衡量时间序列之间的相似性。

以上研究的深度聚类算法缺乏对电力系统数据时序特征的考虑,采用固定的形态相似度量,针对这些缺陷,提出以动态时间规整作为相似性度量的DTC算法对电力系统典型运行方式进行提取。采用时序自动编码器和时序聚类层两个神经网络联合优化网络损失和聚类损失,最后在隐藏层中提取聚类结果并得到不同比例渗透率的可再生能源接入电力系统对其典型方式种类的影响。特别地,在本文使用的DTC算法中,特征提取和聚类是通过联合优化的方式共同进行的,具体来说,是使用时序自动编码器从原始时序数据中提取潜在特征,自适应地捕捉到数据的关键模式和时序依赖性,而不需要手动选择特征,通过端到端的训练,网络能够在特征提取和聚类过程中共同学习。时序聚类层基于时序自动编码器提取的潜在特征进行聚类,使用卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)和双向长短期记忆网络(bidirectional long short-term memory network, Bi-LSTM)同时捕获局部短期特征和全局长期特征,同时引入动态时间规整作为相似性的距离度量,可以更好地处理时间序列的非线性对齐问题,从而提高聚类的准确性。对某省的真实数据以及运行后的生产模拟数据进行提取,结果表明,越高比例新能源接入后,典型运行方式种类也随之增加;同时,还验证了需求侧响应对于电力系统灵活性提高的重要作用;最后利用极限场景的提取证明了所提算法的有效性。

## 1 方法框架

提出的综合方法框架采用某省的实际运行数据,并利用随机生产仿真生成的模拟数据,分析不

同可再生能源渗透水平对典型电力系统运行模式的影响。此外,还评估了灵活性资源在减轻可再生能源带来的不确定性方面的关键作用。为了实现上述目标,需要解决3个主要问题:

1)海量数据获取。电力系统运行数据的完整收集至关重要,需要获取节点负荷、传统火电机组出力、可再生能源机组出力、可再生能源弃电量、节点切负荷以及储能充放电的时间序列数据,形成一个全面完整的年度运行数据集。

2)典型运行模式提取。有效应对时间序列数据高维度、非线性、变量耦合和时间耦合的挑战,以揭示深层特征并实现可靠且有意义的聚类结果。

3)灵活资源整合与极端场景提取。整合灵活资源以缓解可再生能源不确定性是一个重要挑战。此外,准确模拟电力系统在极端场景下的运行情况对于识别潜在的风险点和脆弱性很有意义。

## 2 时序随机生产模拟方法

为解决第一个问题,利用某省的实际运行数据进行中等可再生能源渗透下的深度聚类,提取典型运行模式。然而,对于高可再生能源渗透的未来场景来说,实际运行数据较为稀缺。因此,需要科学地模拟运行数据。对于低渗透率和高渗透率的场景来说,采用保留时序特征的蒙特卡罗随机生产仿真方法。通过对可再生能源机组和负荷的随机波动进行抽样,模拟一个详细且合理的电力系统运行高维时间序列数组,包括机组出力、储能充放电、可再生能源弃电和节点切负荷等。生成的数据随后经过清理异常数据等预处理步骤。随后,将处理后的数据用于第二阶段的深度时间序列聚类。

利用某省2022年的实际运行数据来代表中等可再生能源渗透率的情景。其他情景采用保留时间序列信息的随机生产模拟(stochastic production simulation, SPS)方法,生成电力系统新的高维运行模式向量。其主要过程如图1所示。

在输入数据模块中,输入时序负荷预测、可再生能源预测值、机组参数、网架拓扑及仿真参数后,执行SPS方法。首先,通过蒙特卡罗法进行状态随机抽样,提取仿真年度内不确定因素的样本值,包括可再生能源输出误差、负荷预测误差等,并结合这些因

素获得可再生能源输出和负荷时间序列的实际值。通过随机因素叠加处理可再生能源和负荷曲线,将线性曲线转化为叠加标准正态分布随机误差的带状曲线,如图2所示。

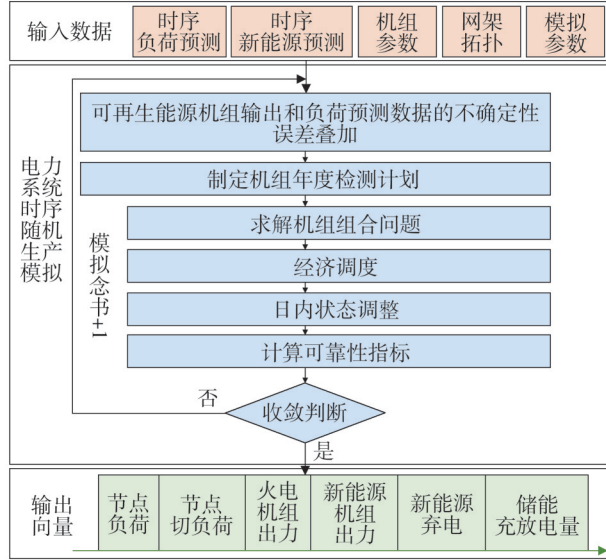


图1 保留时序信息的随机生产模拟流程图

Fig.1 Flowchart of stochastic production simulation retaining temporal information

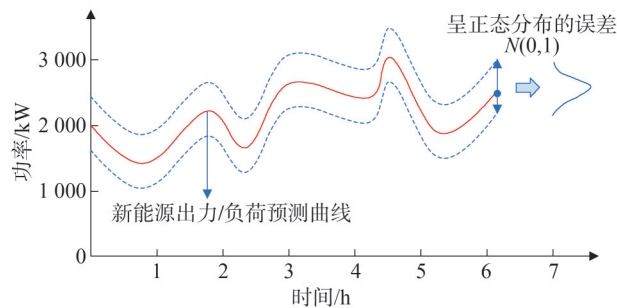


图2 线状预测曲线叠加误差示意图

Fig.2 Schematic diagram of overlay error of the line-shaped prediction curve

该过程的公式为

$$\begin{cases} P_{w/pv,t}^{\text{real}} = P_{w/pv,t}^{\text{pred}} + 10\% \times P_{w/pv,t}^{\text{pred}} \times N(0,1) \\ L_t^{\text{real}} = L_t^{\text{pred}} + \frac{1}{3} \times 10\% \times L_t^{\text{pred}} \times N(0,1) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P_{w/pv,t}^{\text{real}}$ 和 $L_t^{\text{real}}$ 分别为 $t$ 时刻可再生能源(风能、太阳能)出力和负荷的实际值; $P_{w/pv,t}^{\text{pred}}$ 和 $L_t^{\text{pred}}$ 分别为 $t$ 时刻可再生能源出力和负荷的预测值。

接下来,采用等备用容量法定制仿真年度的机组检修计划,并通过求解机组组合问题,确定每个时间步长的机组启停状态。基于机组启停状态结果,通过经济调度问题优化各机组的发电计划。之后再进行日内状态调整,如果机组调节能力不足,则需要切负荷或弃风弃光以确保系统安全稳定运行。最后,通过上述保留时间序列信息的随机生产模拟方法,获得包含电源侧(火电及新能源机组出力等)、电网侧(潮流)、负荷侧(节点负荷及节点切负荷)和储能侧(储能充放电)等全面运行信息的向量。在生成数据的过程中,SPS方法还涉及机组组合问题和经济调度的求解,具体如下。

## 2.1 机组组合求解

在SPS方法中,机组组合问题的求解是关键步骤之一,其目标是在满足系统负荷需求的同时最小化发电成本,包括燃料成本和机组启停成本。

1)目标函数为

$$\begin{cases} \min \sum_{t=t_0}^T (\sum_{i=1}^{N_{th}} C_i^{\text{coal}}(P_{i,t}) + C_i^{\text{start}} + C_i^{\text{stop}}) \\ C_i^{\text{coal}}(P_{i,t}) = A_{c,i} P_{i,t}^2 + B_{c,i} P_{i,t} + C_{c,i} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $C_i^{\text{coal}}$ 为第 $i$ 台火电机组的煤耗成本; $P_{i,t}$ 为 $t$ 时刻第 $i$ 台火电机组的有功出力; $T$ 是一个调度周期; $N_{th}$ 为系统中火电机组数目; $C_i^{\text{start}}$ 、 $C_i^{\text{stop}}$ 为第 $i$ 台火电机组的启停成本; $A_{c,i}$ 、 $B_{c,i}$ 和 $C_{c,i}$ 分别为第 $i$ 台火电机组煤耗成本系数。

2)约束条件如下。

系统功率平衡约束为

$$\sum_{i=1}^{N_{th}} P_{i,t} + \sum_{r=1}^{N_m} P_{r,t}^{\text{new}} + \sum_{g=1}^{N_{RC}} P_{g,t}^{\text{RC}} = \sum_{j=1}^{N_L} L_{j,t} \quad (3)$$

式中: $P_{r,t}^{\text{new}}$ 为第 $r$ 个可再生能源单元在 $t$ 时刻的有功功率输出; $N_m$ 为可再生能源机组的数量; $P_{g,t}^{\text{RC}}$ 为系统在 $t$ 时刻的第 $g$ 个有功功率备用容量; $N_{RC}$ 为系统中备用容量的数量; $L_{j,t}$ 为节点 $j$ 在 $t$ 时刻的功率需求; $N_L$ 为节点数量。

$$\sum_{i=1}^{N_{th}} (U_{i,t} P_{i,\max} - P_{i,t}) \geq \sum_{j=1}^{N_L} \rho L_{j,t} \quad (4)$$

式中: $U_{i,t}$ 为 $t$ 时刻第 $i$ 台火电机组的启停状态; $P_{i,\max}$ 为第 $i$ 台火电机组的最大输出功率; $\rho$ 为系统的旋转备用系数。

机组技术约束为

$$\begin{cases} U_{i,t} P_{i,\min} \leq P_{i,t} \leq U_{i,t} P_{i,\max} \\ V_d \leq P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq V_u \\ T_{\text{stop}} (U_{i,t-1} - U_{i,t}) \leq \sum_{k=t}^{t+T_{\text{stop}}-1} (1 - U_{i,k}) \\ T_{\text{start}} (U_{i,t-1} - U_{i,t}) \leq \sum_{k=t}^{t+T_{\text{start}}-1} (U_{i,k}) \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $U_{i,k}$  为  $k$  时刻第  $i$  台火电机组的启停状态;  $V_d$ 、 $V_u$  分别为启停速度的下限和上限;  $T_{\text{start}}$ 、 $T_{\text{stop}}$  分别为火电机组的最小启停时间。前两个方程描述了机组的功率输出和爬坡约束, 后两个方程描述了机组的启停时间限制。

直流潮流约束为

$$P_{l,\min} \leq P_{l,t} \leq P_{l,\max} \quad (6)$$

式中:  $P_{l,t}$  为  $t$  时刻线路  $l$  的传输功率;  $P_{l,\min}$ 、 $P_{l,\max}$  分别为线路  $l$  的传输功率最小值和最大值。

3) 储能系统建模。

储能技术是一种应对新能源出力间歇性和波动性以及提升电力系统灵活性的重要手段<sup>[30]</sup>, 对储能系统的建模如式(7)和式(8)所示, 式(7)描述储能电池荷电状态  $S_t^{\text{be}}$  的计算, 式(8)描述储能充放电平衡, 此外, 仍需考虑储能的充放电功率极限和容量约束等。

$$S_t^{\text{be}} = (1 - \lambda_{\text{be}}) S_{t-1}^{\text{be}} + \frac{(\eta_c^{\text{be}} P_{c,t}^{\text{be}} - \eta_d^{\text{be}} P_{d,t}^{\text{be}}) \Delta t}{E_{\text{be}}} \quad (7)$$

$$\sum_{t=1}^T (\eta_c^{\text{be}} P_{c,t}^{\text{be}} - \eta_d^{\text{be}} P_{d,t}^{\text{be}}) \Delta t = 0 \quad (8)$$

式中:  $P_{c,t}^{\text{be}}$  为  $t$  时刻电池充电功率, kW;  $P_{d,t}^{\text{be}}$  为  $t$  时刻电池放电功率, kW;  $\lambda_{\text{be}}$  为电池储能系统每小时能量损失率, 即自放电率;  $\eta_c^{\text{be}}$  为电池充电效率;  $\eta_d^{\text{be}}$  为电池放电效率;  $E_{\text{be}}$  为电池储能系统储存容量, kW;  $\Delta t$  为单个时间步长。

## 2.2 经济调度求解

根据机组组合方案得出的启停状态, 构建一个经济调度模型, 以解决不同机组之间的负荷分配问题。

1) 目标函数为

$$\min M_e \left( \sum_{i=0}^T \sum_{j=1}^{N_L} L_{j,t}^{\text{shed}} \right) + \sum_{t=0}^T \left( \sum_{w=1}^{N_w} \Delta P_{w,t} + \sum_{p=1}^{N_{pv}} \Delta P_{p,t} \right) \quad (9)$$

式中:  $M_e$  为一个用于表示优先最小化切负荷的大常数;  $L_{j,t}^{\text{shed}}$  为  $t$  时刻节点  $j$  的切负荷;  $N_w$ 、 $N_{pv}$  分别为风电

机组和光伏机组的数量;  $\Delta P_{w,t}$  为第  $w$  台风电机组在  $t$  时刻的弃电量;  $\Delta P_{p,t}$  为第  $p$  台光伏机组在  $t$  时刻的弃电量。

2) 约束条件为

$$\begin{cases} 0 \leq P_{w,t} \leq P_{w,t}^{\max} \\ 0 \leq P_{p,t} \leq P_{p,t}^{\max} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $P_{w,t}$  为第  $w$  台风电机组在  $t$  时刻的出力;  $P_{w,t}^{\max}$  为其出力上限;  $P_{p,t}$  为第  $p$  台光伏机组在  $t$  时刻的出力,  $P_{p,t}^{\max}$  为其出力上限。该式指明了在自然条件下风能 and 光伏输出的上限和下限。

在上述日前调度计划之后, 为提高系统应对随机波动的能力, 进行日内状态调整, 包括对新能源出力和负荷进行二次采样, 考虑随机机组故障, 并调整机组的运行状态。此调整主要涉及提升机组功率并利用系统的备用容量来满足新的负荷曲线。

在随机生产仿真方法的背景下, 时间序列蒙特卡罗仿真方法的收敛性判定基于系统可靠性指标的估计值, 如负荷损失概率 (loss of load probability, LOLP) 和预期未供电量 (expected energy not supplied, EENS)。当达到收敛标准后, 即会输出年度运行数据。

## 3 需求侧响应模型与极限场景选取

在新型电力系统中, 负荷侧可调资源的重要性不断凸显, 故在运行调度时, 考虑需求侧响应对供需平衡的影响, 对电动汽车、温控负荷群及负荷聚合商 3 种负荷侧可调资源建立模型, 如式(11)一式(15)所示。

$$\begin{cases} R_{EV,t} = R_{EV,t-1} + P_{EV,t} \\ R_{EV,\min,t} \leq R_{EV,t} \leq R_{EV,\max,t} \\ -P_{EV,\max,t}^d \leq P_{EV,t} \leq P_{EV,\max,t}^c \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $R_{EV,t}$  为电动汽车  $t$  时刻的电池电量;  $P_{EV,t}$  为  $t$  时刻的充电功率;  $-P_{EV,\max,t}^d$ 、 $P_{EV,\max,t}^c$  分别为  $t$  时刻放电和充电功率的最大值;  $R_{EV,\max,t}$ 、 $R_{EV,\min,t}$  分别为  $t$  时刻电动汽车的电池电量的上下限。

$$\begin{cases} E_{TL,t} = E_{TL,t-1} + P_{TL,t} - P_{TL,D,t} \\ C \underline{T} \leq E_{TL,t} \leq C \bar{T} \\ P_{TL,D,t} = R | T^{\text{set}} - T_t^{\text{el}} | \\ 0 \leq P_{TL,t} \leq P_{TL,\max,t} \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $E_{TL,t}$  为温控负荷群  $t$  时刻的等效电量;  $P_{TL,t}$  为温控负荷群  $t$  时刻的注入功率;  $P_{TL,D,t}$  为温控负荷群  $t$  时刻维持室内温度恒定的功率损耗;  $\bar{T}$ 、 $\underline{T}$  为温控负荷的温度上限、下限;  $C$  为温控负荷的等效热容;  $R$  为温控负荷的等效热阻;  $T^{set}$  为温控负荷的设定温度;  $T_i^{et}$  为  $t$  时刻的室外温度;  $P_{TL,max,t}$  为  $t$  时刻温控负荷群的功率上限。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{DR,t} \leq P_{DR,max} \\ t + T_{S,max} - 1 \\ \sum_{k=t} u_{DR,k} \leq T_{O,max} \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $P_{DR,t}$  为负荷聚合商  $t$  时刻响应的负荷调节量;  $P_{DR,max}$  为负荷聚合商调节的最大功率;  $u_{DR,k}$  为负荷聚合商在  $k$  时刻的状态变量, 1 表示参与调节, 0 则相反;  $T_{S,max}$  为单个调度周期时长数;  $T_{O,max}$  为负荷聚合商的最大调节时长。

高比例新能源接入电力系统中, 供需不确定性陡增, 为展现风险场景的影响, 在运行调度时添加极限场景, 主要考虑连续高温及假期新能源大发两种极限场景。连续高温情景模拟高峰负荷攀升对系统带来的压力, 如空调用电负荷显著增加可能引发的供电紧张与调峰压力。假期新能源大发情景则模拟用电需求骤降与新能源出力增加所导致的供大于求风险。

$$\begin{cases} L_{j,t} = k_{hot} L_{j,t}, 1.1 < k_{hot} < 1.2 \\ P_{hot,i,t}^{wind} = \rho_{hot} P_{w,t}, 0.8 < \rho_{hot} < 0.9 \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $k_{hot}$  为受连续高温场景影响时的负荷增长影响;  $\rho_{hot}$  为连续高温时对风电出力的减弱影响;  $P_{hot,w,t}^{wind}$  为第  $w$  台风电机组在  $t$  时刻受高温影响后的风电出力。连续高温场景在 6、7 月份选择。

$$\begin{cases} P_{vc,w,t} = k_{vc} P_{w,t}, 1.2 < k_{vc} < 1.3 \\ P_{vc,p,t} = k_{vc} P_{p,t}, 1.2 < k_{vc} < 1.3 \\ L_{vc,j,t} = \rho_{vc} L_{j,t}, 0.7 < \rho_{vc} < 0.9 \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $P_{vc,w,t}$ 、 $P_{vc,p,t}$  分别为  $t$  时刻风电机组  $w$ 、光伏机组  $p$  在新能源大发场景下的出力;  $k_{vc}$  为假期新能源大发场景下风光出力增长比例;  $\rho_{vc}$  为假期场景下对负荷的减弱影响, 该场景在假期时间段内随机选取。

## 4 DTC 算法

基于文献[31]提出的算法, 改进了采用动态时

间规整(dynamic time warping, DTW)距离作为其相似性度量。与欧氏距离和其中提出的其他相似性度量相比, DTW 允许在时间轴上进行非线性对齐, 更好地识别变形模式。此外, 基于现有研究, 为在复杂时间序列场景中实现有效聚类, 本节引入了 DTC 算法, 该算法联合优化了时序特征提取和时间聚类。DTC 算法由适用于高维时序数据特征提取的时序自编码器(temporal auto-encoder, TAE)结构和用于时间序列聚类以获取聚类中心的时序聚类层(temporal clustering layer, TCL)组成。算法的主要框架如图 3 所示。

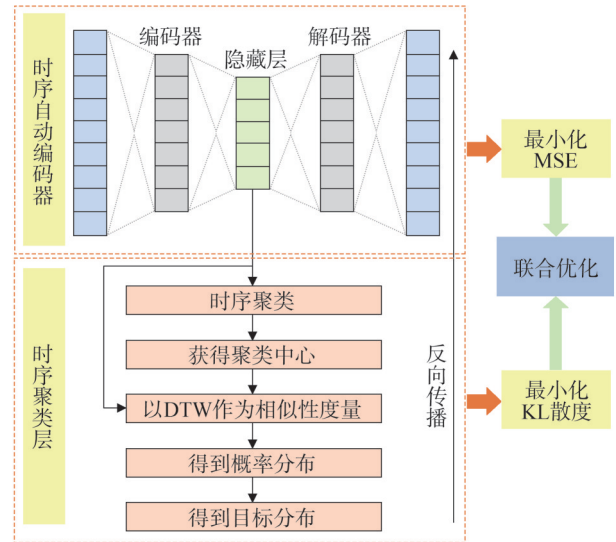


图 3 DTC 算法流程图

Fig.3 Flowchart of the DTC algorithm

算法的具体步骤如下: 给定  $n$  个多元时间序列,  $x_1, x_2, \dots, x_n$  其中每个序列包含长度为  $T_s$  的  $f$  个特征, 即  $x_i \in R^{f \times T_s}$ , 其中  $i_s \in [1, n]$ 。DTC 算法的目标是根据时间序列的深度特征  $h_i$  及其形状相似性, 将这  $n$  个多元时间序列划分为  $m$  个簇, 其中  $1 \leq m \leq n$ 。该算法还识别每个类别的聚类中心, 在本文中, 这些聚类中心对应于新型电力系统的典型运行模式。

### 4.1 TAE 结构

自编码器(autoencoder, AE)是一种无监督学习模型, 主要用于降维和特征提取<sup>[32]</sup>, 其目标是学习高维数据的低维表示。自编码器由两部分组成: 编码器和解码器。编码器将输入数据压缩到低维的潜在

空间表示,而解码器则尝试从这种潜在表示中重构原始输入。因此,潜在表示的有效性对于成功的聚类至关重要。在本文中,为了保留时间序列数据中的时间依赖性和顺序信息,采用一种结合 CNN 和 Bi-LSTM 的 TAE。其结构如图4所示。

TAE的第一层是一个一维CNN(记为1D-CNN)层,旨在从时间序列中提取重要的短期特征,并将输入的高维向量降维为一维。接下来是一个最大池化层,用于保留最显著的特征并增强特征提取能力。所使用的激活函数是泄漏型线性整流函数(leaky rectified linear unit, Leaky-ReLU),这一层有效地降低了数据维度,同时保留了关键和突出的信息。

第二层(Bi-LSTM1和Bi-LSTM2)以第一层的激活结果作为输入,旨在从长时间序列中提取双向时间耦合特征,并获得其潜在表示。与长短期记忆网络相比,Bi-LSTM可以在序列中同时捕捉前向和后向的时间特征<sup>[33]</sup>,生成的潜在表示随后被分配给TCL。CNN和Bi-LSTM的学习过程通过交替最小化两个损失函数来驱动。其中一个损失函

数是TAE的网络损失,它是由重构数据与原始输入序列之间的均方差得出的。最小化网络损失可确保即使在降维之后,编码器仍有效地提取序列的特征。而另一个损失函数则来自时序聚类层的聚类损失。

TAE的输入由时间序列  $x_1, x_2, \dots, x_n$  组成。Bi-LSTM2层的输出表示编码器获得的深度数据特征,记作  $h_{i_s} \in R^{1 \times H}$ ,其中  $i_s \in [1, n]$ ,  $H$  表示潜在特征的长度。在解码器中,数据首先通过一个上采样层进行初步重构,随后通过一个反卷积层重构原始数据,最终得到解码器的输出数据  $\hat{x}_{i_s} \in R^{f \times T_s}$ ,其中  $i_s \in [1, n]$ 。

TAE的网络损失函数如式(16)所示。

$$L_{mse} = \frac{1}{n} \sum_{i_s=1}^n \|x_{i_s} - \hat{x}_{i_s}\|^2 \quad (16)$$

之后得到的潜在表示将被分配给TCL。

#### 4.2 TCL结构

时序聚类层基于TAE模型从原始高维数据中提取的潜在特征进行操作。使用DTW距离作为相似性度量,该层对原始数据进行聚类并识别聚类中心。

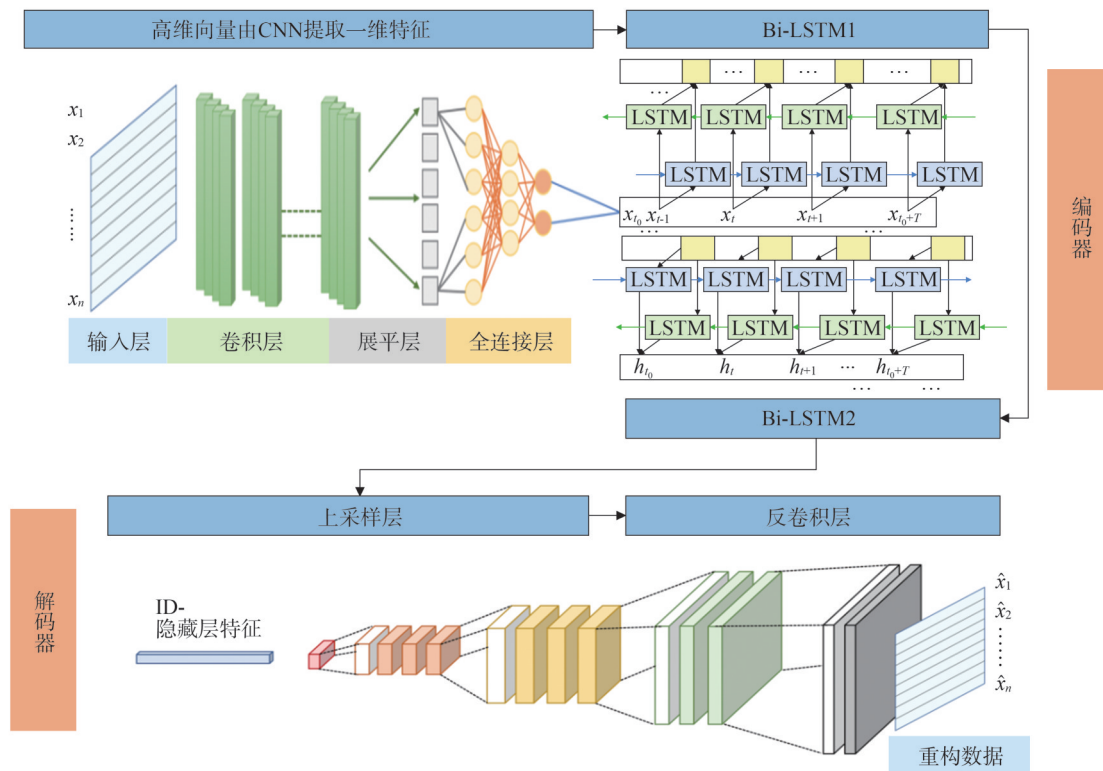


图4 时序自动编码器结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of the TAE structure

它由  $m$  个中心点  $c_j$  组成,其中  $j_s \in [1, m]$ , 每个中心点代表一个聚类的中心。聚类中心的初始化从利用初始化后的 TAE 模型提取输入数据的潜在特征  $h_i$  开始。这些潜在特征  $h_i$  随后被用于在特征空间  $\Gamma$  中执行层次聚类。

DTW 通过找到两个时间序列  $a$  和  $b$  之间的最佳对齐来计算其距离,目的是最小化它们各个对应点之间的累积距离。给定两个序列  $a = (a_1, a_2, \dots, a_n)$  和  $b = (b_1, b_2, \dots, b_x)$ , DTW 距离  $D_{\text{dtw}}(a, b)$  的计算公式为

$$D_{\text{dtw}}(a, b) = \min \{d(a_u, b_v)\} \quad (17)$$

式中:  $d(a_u, b_v)$  为点  $a_u$  和  $b_v$  之间的距离。

在计算 DTW 度量后,根据其和提取出的隐藏特征将原始数据分割为  $m$  个簇,并计算每个簇内元素的平均点  $c_j$ ,以估计初始聚类中心。在初始化中心点之后,使用无监督算法对时序聚类层进行训练。

第一步是计算每个输入数据  $x_i$  属于簇  $j_s$  的概率  $q_{i,j_s}$ 。这个概率由潜在特征表示  $h_{i_s} \in R^{1 \times H}$  与中心点  $c_{j_s}$  之间的接近程度决定,根据已有文献<sup>[34]</sup>,使用  $t$  分布核将距离  $D_{\text{dtw}}(a, b)$  归一化为概率分配。

$$q_{i,j_s} = \frac{\left[1 + D_{\text{dtw}}(h_{i_s}, c_{j_s})\right]^{-\frac{1+\alpha}{2}}}{\sum_{j_s=1}^m \left[1 + D_{\text{dtw}}(h_{i_s}, c_{j_s})\right]^{-\frac{1+\alpha}{2}}} \quad (18)$$

式中:  $q_{i,j_s}$  为编码后的数据  $h_{i_s}$  属于聚类中心  $c_{j_s}$  的概率;  $\alpha$  为一个调节参数,控制距离对概率的影响。这个归一化过程确保了所有输入数据点  $x_i$  的概率分配之和为 1,使得每个数据点对应于某个簇的概率可以合理比较。在本文中,按照文献<sup>[34]</sup>的建议将其取做  $\alpha = 1$ 。

接下来,为了迭代训练时序聚类层,可以将损失函数化为最小化概率分布  $q$  和目标分布  $p$  之间的 Kullback-Leibler 散度(简称 KL 散度)。该损失函数旨在通过优化聚类质量来最大化高置信度的分配。而使用目标分布  $p$  进行计算,其需要强化高置信度的预测,并对损失进行归一化为

$$p_{i,j_s} = \frac{\frac{q_{i,j_s}^2}{\sum_{i_s=1}^n q_{i,j_s}}}{\sum_{j_s=1}^m \frac{q_{i,j_s}^2}{\sum_{i_s=1}^n q_{i,j_s}}} \quad (19)$$

通过迭代优化,聚类中心会被调整得更能反映数据的实际分布和特征,从而提高聚类的准确性。而 KL 散度作为损失函数,其计算公式为

$$L_c = \sum_{i_s=1}^n \sum_{j_s=1}^m p_{i,j_s} \lg \frac{p_{i,j_s}}{q_{i,j_s}} \quad (20)$$

#### 4.3 损失函数的联合优化

在上两节中,通过最小化均方误差的网络损失和 KL 散度的聚类损失,分别进行 TAE 层和 TCL 层的批量联合优化。为了确保初始中心能够很好代表数据,首先对自编码器的参数进行预训练,以获得有效的潜在特征。在预训练之后,通过对所有数据点的嵌入特征进行完全链接的层次聚类来初始化聚类中心。

之后,我们使用式(21)和式(22)所示梯度公式更新自编码器的权重和聚类中心,采用反向传播的小批量随机梯度下降(stochastic gradient descent, SGD)进行优化。

$$\frac{dL_{\text{mse}}}{dh_{i_s}} = \frac{d\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|x_{i_s} - \hat{x}_{i_s}\|^2\right)}{dh_{i_s}} \quad (21)$$

$$\frac{dL_c}{dc_{j_s}} = \frac{\alpha}{1 + \alpha} \sum_{i_s} \left(1 + \frac{D_{\text{dtw}}(h_{i_s}, c_{j_s})}{\alpha}\right) \times (p_{i,j_s} - q_{i,j_s}) \frac{dD_{\text{dtw}}(h_{i_s}, c_{j_s})}{dc_{j_s}} \quad (22)$$

这种方法确保在优化过程中,聚类中心和自编码器能够逐步调整,以更好地反映数据的结构和特征。

## 5 算例验证

### 5.1 数据集获取及训练模型参数设置

采用某省 2022 年全年的数据集,提取中比例可再生能源接入下(新能源渗透率为 43%)电力系统的典型运行方式。针对低比例和高比例渗透率的情况,分别选取 20% 和 60% 渗透率的情景,代表过去及

未来电力系统的运行特征。由此对比,可以最终分析得到高比例新能源接入电力系统对典型运行方式带来的影响。

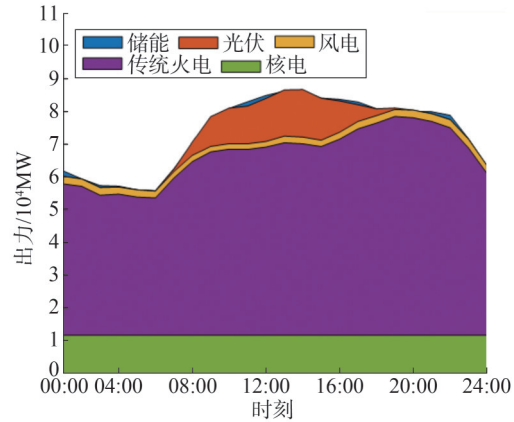
为保证运行模拟生成数据的有效性和可靠性,传统机组装机、储能容量等基本参数均采用某省2022年真实数据。而需求侧响应的数据,定某省电动汽车保有量为166万辆,单个电池电能为60 kWh;负荷聚合商总量设定为727 MW;温控负荷总量设定为夏季4.2万 MW,冬季2.6万 MW,其会随温度有一定波动,故根据该省15 min气温模拟生成。每个数据集时间颗粒度为1 h,并对原始数据集的异常值进行清洗后得到聚类的有效数据集。在本文中,输入特征包括节点负荷、节点切负荷、传统火电机组出力、新能源机组出力、新能源机组弃电、储能充放电量等特征,新能源机组又包含风电机组、光伏机组和核电机组,所以数据维度为10。在本文的模型中,采用1层CNN网络层,其滤波器数量为50,卷积核大小为10。第一个Bi-LSTM层有50个单元,第二个Bi-LSTM则有1个单元。DTC采用Adam优化器,学习率为0.001,批训练大小为64,训练轮数为500次。自动编码器采用预训练方法,本文采取肘部法<sup>[35]</sup>确定最佳聚类数。

### 5.2 算例结果分析

通过上述模型和参数设置,分别对20%、43%、60%新能源渗透率下的电力系统运行方式进行了聚类分析,结果如图5—图6所示。

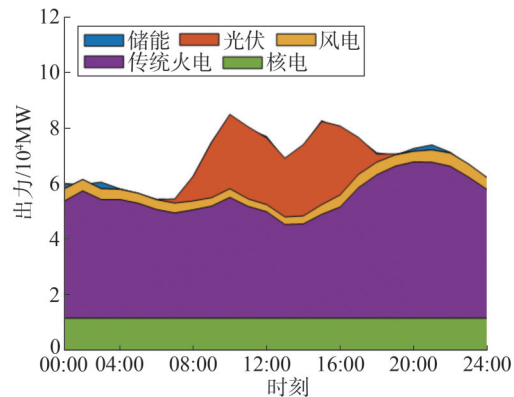
在低比例新能源渗透率下,该省的主要运行方式只有2种。从图5(a)可以看到,系统的负荷整体较低,特别是在凌晨,负荷维持在较低水平。新能源机组(风电机组和光伏机组)的贡献比例有限,主要依赖传统火电满足负荷需求。相较于小负荷模式,

图5(b)的大负荷模式在白天和夜间的负荷均较高。在这两种模式下,新能源机组对总负荷的贡献比例均较小,同时储能的作用在两种模式中都是维持系统稳定性的重要手段。

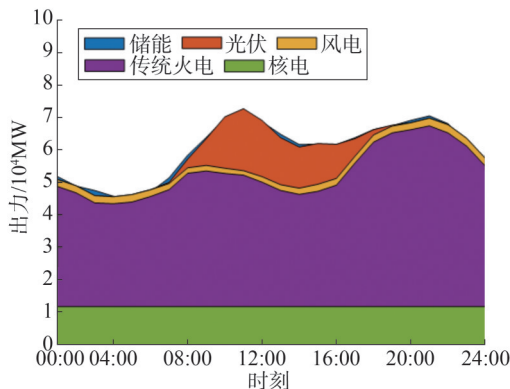


(b)大负荷模式

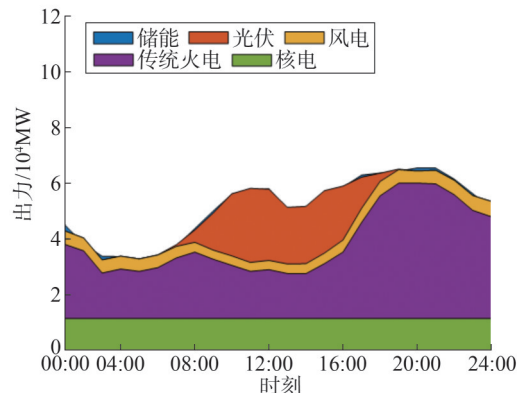
图5 低比例可再生能源渗透率下某省典型运行方式  
Fig.5 Typical operational modes under low renewable energy penetration in a certain province



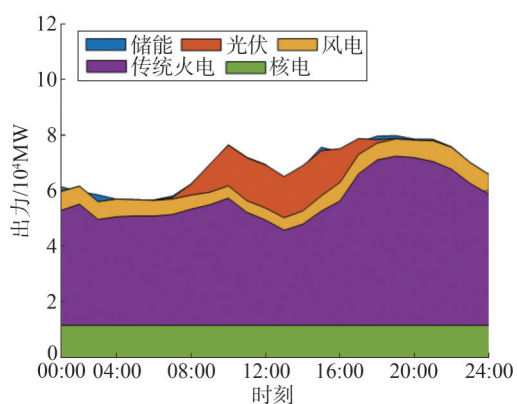
(a)中等负荷,一般模式



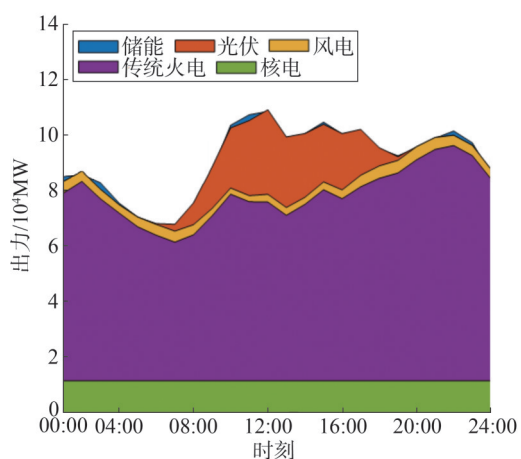
(a)小负荷模式



(b)小负荷模式



(c) 中等负荷模式, 光伏小发, 风电大发



(d) 大负荷模式

图6 中等比例可再生能源渗透率下某省典型运行方式  
Fig.6 Typical operational modes under medium renewable energy penetration in a certain province

而在中比例新能源渗透率下,该省的主要运行方式增加为4种。由图6(a)可以看出,系统在此时处于中等负荷状态,核电机组和火电机组的出力较为稳定,风电机组和光伏机组的出力存在波动,尤其是中午时段光伏机组出力增多。这种模式下系统负荷较为稳定,传统电源占主导,新能源的贡献较为显著,但波动性不大。在图6(b)中,系统在此时处于小负荷状态,火电机组仍然是主要支撑,但新能源机组贡献占比增加。在图6(c)中,系统处于中等负荷状态,但风电机组的出力较大,光伏机组的出力相对较小。这种情况通常出现在阴天或多风天气下,风光互补效应非常明显。而在图6(d)中,系统处于大负荷状态,此时火电机组依旧是主要负荷支撑,但是新能源机组出力也显著增加,储能系统发挥重要作用,

保障系统稳定。

在未来高比例新能源接入电力系统后,该省的典型运行方式的种类出现显著增长,风光等新能源机组的出力逐渐成为主导。当可再生能源渗透率达到60%时,其典型运行方式已经达到了8种,图7展示了这8种方式在全年的分布图,电力系统的运行方式呈现出越来越明显的分散化趋势,即使在相同的模式下,各种运行方式之间的差异性也在增大。这表明典型运行方式的代表性正在减弱,运行规划中需要考虑更多的典型场景和极端运行方式,以更好地涵盖大量复杂的运行情况。由于新能源机组出力的随机和波动性,相邻的两天的运行方式可能完全不同,同时,季节性分布的特征也不再明显,这意味着电力系统的运行调度需要更加灵活和实时化,传统依赖于季节性负荷预测的调度方式可能变得不再适用。这种变化带来的挑战是如何更有效地平衡电力供需,避免频繁的电力波动对电网的稳定性产生不利影响。与此同时,这也要求系统具备更强的灵活性资源,包括储能设备、需求侧响应以及更快速的备用电源,以应对不确定的新能源出力和需求变化。为应对高比例新能源接入带来的挑战,提出以下策略:加强储能系统建设,以平衡新能源波动并减少弃风弃光现象;优化电力市场机制,通过实时电价调节需求,促进灵活响应;提升电网调度能力,引入智能化调度系统应对复杂负荷;构建多元化备用机制,如快速启动的调峰电厂、储能和需求响应,以应对新能源出力的波动,确保电力系统稳定运行。

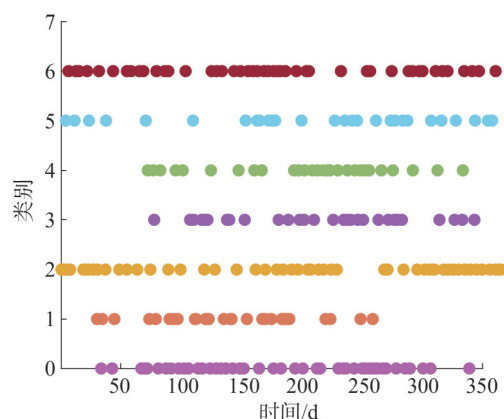
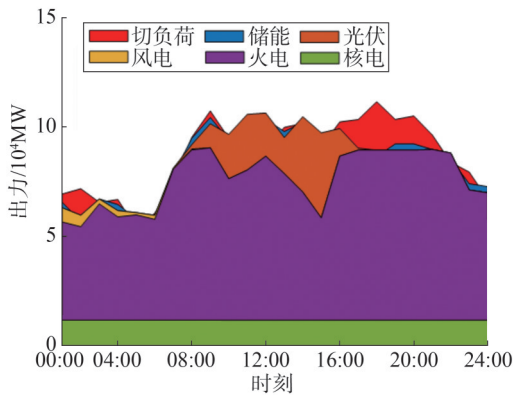


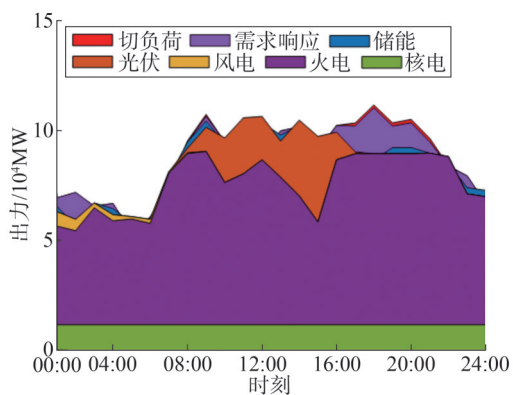
图7 高比例渗透率下典型运行方式时序分布图  
Fig.7 Temporal distribution of typical operational modes under high renewable energy penetration

中比例新能源渗透率情景下,在生产模拟过程中设置两种极限场景:分别是连续高温导致的“供不应求”以及假期新能源大发导致的“供过于求”。经过DTC算法实现聚类,在原先的4种典型运行模式外提取出以下两种极限场景的情况。之后,添加需求侧响应再一次进行以上步骤,可以看出需求侧响应对电力系统调节能力的提升作用。

图8展示了“连续高温”极限场景下的电力系统运行情况,分别考虑了无需求响应和有需求响应两种情景。图8(a)为无需求响应的情景,面对高温时段的极高用电需求,电力系统负荷压力显著增加,导致出现大规模的切负荷现象,储能一种灵活性资源的调节能力有限,难以完全弥补新能源发电波动性所带来的供电缺口。图8(b)中,需求响应机制有效缓解了高温时段的用电压力,通过削减部分高峰负荷,显著减少了负荷缺口,切负荷显著降低,系统运行较为平稳。



(a)连续高温场景下的运行方式



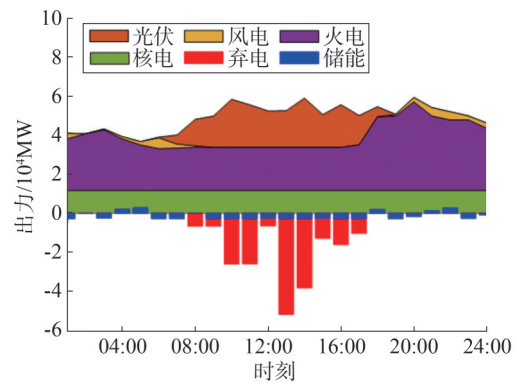
(b)添加需求响应后的连续高温极限场景的运行方式

图8 连续高温的极限场景

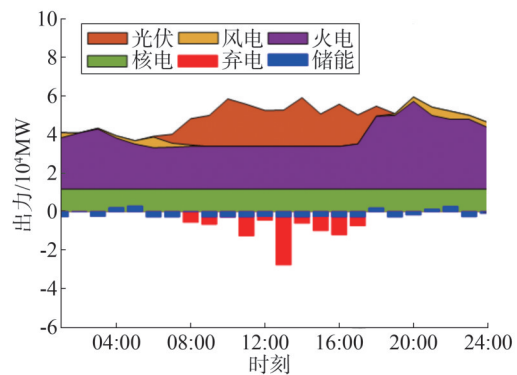
Fig.8 Extreme scenario of continuous high temperatures

总体而言,需求响应在极端高温条件下显著降低了电力系统的压力,有助于提升系统的稳定性。

图9分别展示了没有添加需求响应和添加需求响应后的假期小负荷但新能源大发的情况。在图9(a)中,通过储能的调节,电力系统在新能源发电过剩时段有效吸收了一部分电量,但由于储能容量有限,仍存在很大一部分弃电。而在假期新能源大发添加需求响应的情境下,储能与需求响应的协同作用显著降低了弃电量,表现出需求响应在削峰填谷中的积极作用,能够有效吸收过剩的新能源出力,避免弃电现象的发生。



(a)假期小负荷新能源大发导致大量弃电



(b)添加需求响应后的场景,弃电显著降低

图9 假期新能源大发的极限场景

Fig.9 Extreme scenario of renewable energy overproduction during holidays

## 6 结论

提出一种综合方法框架,基于某省的实际运行数据,并结合随机生产仿真生成的模拟数据,通过所

提出的DTC深入分析不同可再生能源渗透水平对电力系统典型运行模式的影响。

1)在低比例渗透率下,系统运行方式较为简单,依赖传统电源维持负荷稳定,储能系统起到了一定的调节作用。

2)随着新能源渗透率的增加,电力系统的运行模式逐渐多样化,中比例渗透率下风光互补效应更加明显,且储能能在应对波动性方面展现了较好的协同作用。

3)在高比例渗透率下,系统运行方式复杂化和分散性趋势明显,传统负荷预测与调度方式面临挑战,需要更多灵活性资源和动态调度手段以应对新能源出力的不确定性。

4)极端场景的模拟结果表明,储能系统和需求响应在缓解系统压力、提升电网稳定性方面具有显著作用。

本研究的成果可为电网调度策略的优化和风险预警提供数据支持和理论依据,特别是在高比例可再生能源接入的情景下。总体而言,随着新能源渗透率的提高,电力系统的运行将面临越来越复杂的挑战,需要更多灵活性资源的引入与创新调度手段的应用,以保障系统的安全稳定运行。未来的研究方向将包括:探索更复杂的极端场景建模和分析,进一步优化时序聚类算法的鲁棒性,以适应更大规模的数据,同时研究如何提升算法的计算效率,减少大规模数据集上的计算时间;结合实时数据和预测模型,提升对电力系统规划的参考价值,从而更好地应对不断变化的电网需求,为实现安全、稳定和高效的电力系统运行提供支持。

## 参考文献

- [1] HAEGEL N M, KURTZ S R. Global progress toward renewable electricity: tracking the role of solar (version 2)[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2022, 12(6): 1265-1272.
- [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] 吴启亮,章雷其,赵波.可再生能源制氢建模技术研究[J].浙江电力,2023,42(5):18-33.  
WU Qiliang, ZHANG Lei, ZHAO Bo. A study of the modeling technology of hydrogen production from renewable energy sources [J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(5): 18-33.
- [4] 薛禹胜,雷兴,薛峰,等.关于风电不确定性对电力系统影响的评述[J].中国电机工程学报,2014,34(29):5029-5040.  
XUE Yusheng, LEI Xing, XUE Feng, et al. A review on impacts of wind power uncertainties on power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5029-5040.
- [5] 李炳胜,庞传军,程大闯.基于NGBoost的可解释风电功率概率预测[J].浙江电力,2023,42(3):28-36.  
LI Bingsheng, PANG Chuanjun, CHENG Dachuang. Interpretable wind power probabilistic prediction based on NGBoost [J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(3): 28-36.
- [6] KROPOSKI B, JOHNSON B, ZHANG Y C, et al. Achieving a 100% renewable grid: operating electric power systems with extremely high levels of variable renewable energy [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2017, 15(2): 61-73.
- [7] DU E S, ZHANG N, HODGE B M, et al. The role of concentrating solar power toward high renewable energy penetrated power systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6630-6641.
- [8] 鲁宗相,李海波,乔颖.含高比例可再生能源电力系统灵活性规划及挑战[J].电力系统自动化,2016,40(13):147-158.  
LU Zongxiang, LI Haiibo, QIAO Ying. Power system flexibility planning and challenges considering high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(13): 147-158.
- [9] 鲁宗相,李昊,乔颖.从灵活性平衡视角的高比例可再生能源电力系统形态演化分析[J].全球能源互联网,2021,4(1):12-18.  
LU Zongxiang, LI Hao, QIAO Ying. Morphological evolution of power systems with high share of renewable energy generations from the perspective of flexibility balance [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2021, 4(1): 12-18.
- [10] 侯庆春,杜尔顺,田旭,等.数据驱动的电力系统运行方式分析[J].中国电机工程学报,2021,41(1):1-12.  
HOU Qingchun, DU Ershun, TIAN Xu, et al. Data-driven power system operation mode analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(1): 1-12.
- [11] 王锡凡,王秀丽.随机生产模拟及其应用[J].电力系统自动化,2003,27(8):10-15.  
WANG Xifan, WANG Xiuli. Probabilistic production simulation method and its application [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(8): 10-15.
- [12] 石振江,岳云力,岳昊,等.计及可再生能源时序出力重构的电力系统时序生产模拟[J].供用电,2023,40(12):87-96.

- SHI Zhenjiang, YUE Yunli, YUE Hao, et al. Time series production simulation of power system with renewable energy time series output reconstruction[J]. *Distribution & Utilization*, 2023, 40(12): 87-96.
- [13] 刘纯, 屈姬贤, 石文辉. 基于随机生产模拟的新能源消纳能力评估方法[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(10): 3134-3144.
- LIU Chun, QU Jixian, SHI Wenhui. Evaluating method of ability of accommodating renewable energy based on probabilistic production simulation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(10): 3134-3144.
- [14] 李秀中. 川渝再度连续高温“电荒”危机会否重现[N]. *第一财经日报*, 2024-08-30(A07).
- [15] 关立, 周蕾, 刘秉祺, 等. 山东电力现货市场“五一”假期长时间负电价现象分析及启示[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(14): 1-7.
- GUAN Li, ZHOU Lei, LIU Bingqi, et al. Analysis and enlightenment of long-time-scale negative electricity prices in Shandong electricity spot market of China during “May Day” holiday[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(14): 1-7.
- [16] HOU Q C, DU E S, ZHANG N, et al. Impact of high renewable penetration on the power system operation mode: a data-driven approach[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, 35(1): 731-741.
- [17] CHEN D, LU R Z, WANG X, et al. Power system operation mode identification method based on improved clustering algorithm[C]// 2022 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC). IEEE, 2022: 1-5.
- [18] JAYAWARDENE I, HERATH P, VENAYAGAMOORTHY G K. A graph theory-based clustering method for power system networks [C]// 2020 Clemson University Power Systems Conference (PSC). IEEE, 2020: 1-8.
- [19] MIN E X, GUO X F, LIU Q, et al. A survey of clustering with deep learning: from the perspective of network architecture [J]. *IEEE Access*, 2018, 6: 39501-39514.
- [20] LI Y F, HU P, PENG D Z, et al. Image Clustering with External Guidance [EB/OL]. [2024-10-15]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2310.11989>
- [21] ZHANG H L, XU H, WANG X, et al. A clustering framework for unsupervised and semi-supervised new intent discovery[J]. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2024, 36(11): 5468-5481.
- [22] TZIRAKIS P, NICOLAOU M A, SCHULLER B, et al. Time-series clustering with jointly learning deep representations, clusters and temporal boundaries [C] // 2019 14th IEEE International Conference on Automatic Face & Gesture Recognition (FG 2019). IEEE, 2019: 1-5.
- [23] HERSHEY J R, CHEN Z, LE ROUX J, et al. Deep clustering: discriminative embeddings for segmentation and separation [C]// 2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP). IEEE, 2016: 31-35.
- [24] 侯海薇, 丁世飞, 徐晓. 基于无监督表征学习的深度聚类研究进展[J]. *模式识别与人工智能*, 2022, 35(11): 999-1014.
- HOU Haiwei, DING Shifei, XU Xiao. Research progress of deep clustering based on unsupervised representation learning [J]. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2022, 35(11): 999-1014.
- [25] 邓祥, 俞璐. 深度聚类算法综述[J]. *通信技术*, 2021, 54(8): 1807-1814.
- DENG Xiang, YU Lu. Review of deep clustering algorithms [J]. *Communications Technology*, 2021, 54(8): 1807-1814.
- [26] 田雪沁, 陈宇衡, 刘壮壮, 等. 基于K均值聚类的工业负荷参与长周期备用市场能力评估[J]. *节能技术*, 2022, 40(4): 310-314.
- TIAN Xueqin, CHEN Yuheng, LIU Zhuangzhuang, et al. Potential assessment of industrial load participating in capacity market under new power system [J]. *Energy Conservation Technology*, 2022, 40(4): 310-314.
- [27] 臧义超. 基于改进空间密度聚类的超短期风电功率预测[D]. 吉林: 吉林化工学院, 2024.
- [28] YANG Y, CHEN K. Temporal data clustering via weighted clustering ensemble with different representations [J]. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2011, 23(2): 307-320.
- [29] 庄颖睿, 程林, 齐宁, 等. 基于深度时间聚类的微电网典型场景生成方法[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(20): 95-103.
- ZHUANG Yingrui, CHENG Lin, QI Ning, et al. Typical scenario generation algorithm for microgrid based on deep temporal clustering [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(20): 95-103.
- [30] 张浩鹏, 李泽宁, 薛屹洵, 等. 基于共享储能服务的智能楼宇双层优化配置[J/OL]. *中国电机工程学报*, 1-12 [2024-11-13]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2107.TM.20240402.1440.024>.
- ZHANG Haopeng, LI Zenning, XUE Yixun, et al. Intelligent building dual-layer optimization configuration based on shared energy storage services [J/OL]. *Proceedings of the CSEE*, 1-12 [2024-11-13]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2107.TM.20240402.1440.024>.
- [31] MADIRAJU N S, SADAT S M, FISHER D, et al. Deep temporal clustering: fully unsupervised learning of time-domain features [EB/OL]. [2024-10-15]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1802.01059>
- [32] 陶文彬, 钱育蓉, 张伊扬, 等. 基于自编码器的深度聚类算法综述[J]. *计算机工程与应用*, 2022, 58(18): 16-25.
- TAO Wenbin, QIAN Yurong, ZHANG Yiyang, et al. Survey of deep

- clustering algorithm based on autoencoder [J]. Computer Engineering and Applications, 2022, 58(18): 16-25.
- [33] KO M S, LEE K, KIM J K, et al. Deep concatenated residual network with bidirectional LSTM for one-hour-ahead wind power forecasting[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(2): 1321-1335.
- [34] LAURENS V D M, HINTON G. Visualizing Data Using t-SNE[J]. Journal of Machine Learning Research, 2008, 9: 2579-2605.
- [35] 汪颖, 杨维, 肖先勇, 等. 基于去噪自编码器网络特征降维与改进小批优化K均值算法的海量用户用电行为聚类及分析[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(6): 146-153.
- WANG Ying, YANG Wei, XIAO Xianyong, et al. Clustering and analysis of electricity consumption behavior of massive users based on network feature dimension reduction of denoising autoencoder and improved mini-batch K-means algorithm [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(6): 146-153.

---

收稿日期:2024-10-15

修回日期:2025-02-08

作者简介:

高 嵩(1984),通信作者(gaosong3060@163.com),男,硕士,正高级工程师,主要研究方向为电力系统网源协调、源网荷储协调控制;

庞向坤(1981),男,硕士,正高级工程师,主要研究方向为电力系统网源协调、源网荷储协调控制;

陈思颖(2002),女,硕士在读,主要研究方向为电力系统的风险评估和风险预警;

曹 齐(2001),男,硕士在读,主要研究方向为电力系统优化调度和可靠性评估;

谢海鹏(1989),男,博士,副教授,主要研究方向为电力系统可靠性、配电网优化运行、量子信息学应用。

(责任编辑 娄婷婷)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2025.09.006

# 考虑集群电动汽车可行域聚合的电氢能源微网功率波动平抑优化策略

童宇轩<sup>1\*</sup>, 李 灿<sup>2</sup>

(1. 国网浙江省电力有限公司慈溪市供电公司, 浙江 慈溪 315300; 2. 浙江省送变电工程有限公司, 浙江 杭州 310020)

**摘要:**高比例波动性电源的接入使得微网与上级电网联络线功率波动增大,能源系统的安全稳定运行面临挑战。针对能源微网可调节能力不足的问题,提出含集群电动汽车的电氢能源微网架构。首先遵循资源“可行域统一量化”—“可行域高效聚合”的思路,基于虚拟电池模型对差异化电动汽车可调节能力进行统一量化,运用松弛的闵可夫斯基求和方法对集群电动汽车的功率可行域聚合。然后考虑光伏出力波动的不确定性,建立了基于DTW-K-means场景削减的微网功率平抑随机优化模型。最后算例仿真表明,所提模型对促进能源微网功率波动的平抑具有积极作用。

**关键词:**电氢能源微网;电动汽车;虚拟电池模型;可行域聚合;功率波动平抑;随机优化

中图分类号:TM73

文献标志码:A

文章编号:1007-9904(2025)09-0058-10

## The Power Fluctuation Suppression Optimization Strategy of Electric Hydrogen Energy Microgrid Considering the Feasible Domain Aggregation of Cluster Electric Vehicles

TONG Yuxuan<sup>1\*</sup>, LI Can<sup>2</sup>

(1. Cixi Power Supply Company of State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Cixi 315300, China;

2. Zhejiang Electric Transmission &amp; Transformation Co., Ltd., Hangzhou 310020, China)

**Abstract:** The access of high proportion of fluctuating power sources increases the power fluctuation of the contact line between the microgrid and the upper-level power grid. It challenges the safe and stable operation of energy system. Aiming at the problem of insufficient adjustable capacity of energy microgrid, an electric hydrogen energy microgrid architecture incorporating cluster electric vehicles is proposed. First, following the idea of "unified quantification of feasible domains" - "efficient aggregation of feasible domains" for resources, the adjustable capability of differentiated electric vehicles is quantified in a unified manner based on the virtual battery model. The power feasible domain of clustered electric vehicles is aggregated using the relaxed Minkowski summation method. Second, considering the uncertainty in photovoltaic output fluctuations, a stochastic optimization model for power suppression in the microgrid is established based on DTW-K-means scenario reduction. Finally, simulation results show that the proposed model has a positive effect in promoting the suppression of power fluctuations in the energy microgrid.

**Keywords:** electric-hydrogen energy microgrid; electric vehicles; virtual battery model; feasible region aggregation; power fluctuation suppression; stochastic optimization

## 0 引言

综合能源微网(integrated energy microgrid, IEM)在提高电网灵活性方面起到重要作用<sup>[1-2]</sup>,通过可调节的负荷侧资源与多种能量耦合单元,IEM能够适应不同的调节需求并实现多种能源形式的互补利用。随着高比例具有随机波动特性的分布

式电源接入微网,微网与上级电网联络线功率波动急剧增大,电力系统的安全稳定运行面临严峻挑战。

氢能作为一种清洁的二次能源,转换形式多样且用能高效,近年在能源系统中的地位逐渐提高<sup>[3-4]</sup>。通过将电能转化为氢能,再将氢能转化为可用的热能或电能,氢能可以与其他形式的能源交互

形成电氢耦合的能源利用体系。研究表明,通过电解水生产氢气,其能量转换效率能够达到甚至超过80%。相比之下,当氢气进一步用于甲烷化过程,即转化为合成天然气时,整个过程的能量效率可能会下降至60%以下<sup>[5]</sup>。由于氢能直接使用的高效率特性,将其优先应用于需要高品质能源的场景,如对灵活性要求较高的分布式能源微网中,可以极大提升整个能源系统的效能与灵活性。目前电氢能源微网架构已初步运用在低碳经济调度<sup>[6-8]</sup>、新能源消纳<sup>[9-10]</sup>等领域,但在平抑能源微网中波动性电源出力尚无研究报道。

电动汽车(electric vehicle, EV)具有移动储能属性,可以实现与能源微网的双向能量互动(vehicle to grid, V2G),是负荷侧重要的灵活性资源,可参与电网调峰、调频、调压等多种场景<sup>[11]</sup>。电动汽车资源分散于系统结构底层,容量小、规模大、种类繁多,与系统的调控信号相对绝缘,难以直接参与调度,因此想要充分发挥负荷侧资源的灵活调节能力就必须对电动汽车进行整合<sup>[12-13]</sup>。目前的研究往往是对电动汽车的调节特性进行单独建模,然后直接进行功率分配,该方法在处理少量电动汽车时是高效和准确的,但处理大规模的电动汽车集群时会导致计算复杂度急剧上升,即所谓的“维数灾难”<sup>[14]</sup>。文献[15]提出的基于调控优先级的集群划分方法虽然有助于对电动汽车进行能量管理,但实际上并没有简化求解过程中的维度问题,仍需要对每一个子集进行优化。文献[16-17]通过数据驱动的方法预测电动汽车集群参与系统调节的能力,有助于理解电动汽车的运行模式及其对电网的影响,但该方法忽略了灵活性资源的实际可调能力,即电动汽车的灵活性不是静态的功率曲线,而是一个包含多个变量之间复杂关系的决策空间,定义了在不同条件下的可行操作范围,受到多种因素(如电池状态、充电需求等)的影响。上述问题使得直接对集群电动汽车进行精确的定量分析与协同控制变得极其复杂,有必要将电动汽车的功率可行域进行有效聚合,进而构建出一种标准化的外部特性描述方式<sup>[18-20]</sup>。这种标准化的描述不仅能够清晰地反映电动汽车集群的整体调控能力,还能为电力调度机构提供一个直观且易于操作的界面,使其能够在不同的运行场景下灵活地调度和管理大规模的电

动汽车资源。

此外,能源微网中分布式电源出力具有很大的不确定性,会对微网联络线功率平抑的效果产生影响。对预测的出力曲线进行场景生成和削减,得到典型出力时序曲线,从而建立随机优化模型,是较为常见的表征不确定性场景的手段。目前大部分对于时序曲线的削减方法是通过度量距离对曲线进行聚类,传统的度量距离如欧氏距离或其改进方法应用于高维时间序列时,算法的计算时间长,同时忽略了微网波动平抑中所关注的不同时间序列相邻时段含有的大量信息,降低了不确定性波动场景的典型性<sup>[21-23]</sup>。

针对上述存在的问题,提出一种考虑集群电动汽车和电氢耦合单元灵活性的能源微网联络线功率平抑模型,主要创新点为:1)为降低电动汽车资源可调节能力刻画的复杂度,基于虚拟电池(virtual battery, VB)模型对差异化电动汽车功率可行域进行统一量化;2)运用松弛的闵可夫斯基求和方法对集群电动汽车的功率可行域聚合,提升模型求解的效率;3)考虑光伏出力波动不确定性场景中时序曲线形状上的相似性,建立了基于DTW-K-means场景削减的微网功率平抑随机优化模型。

## 1 能源微网运行框架

含集群电动汽车和电氢耦合单元的综合能源微网能够促进系统内多种能源的互补与负荷需求的灵活匹配。本文在传统包含燃气锅炉(gas boiler, GB)、热电联产(cogeneration combined heat and power, CHP)的电热气综合能源架构基础上,新增了氢燃料电池(hydrogen fuel cell, HFC)、甲烷反应器(methane reactor, MR)及质子交换膜电解槽(proton exchange membrane, PEM),同时考虑电动汽车的灵活性充放电能力。以电解槽和氢燃料电池为主体组成的电氢耦合单元可以有效提高能源微网运行的灵活性。光伏(photovoltaic, PV)发电站供应绿色电力,能源微网可以通过与上级电网及天然气管网的互动来弥补能量缺口。此外,电动汽车的需求响应将为能源系统的灵活运行提供一定保障。含集群电动汽车和电氢耦合单元的综合能源微网运行结构如图1所示。

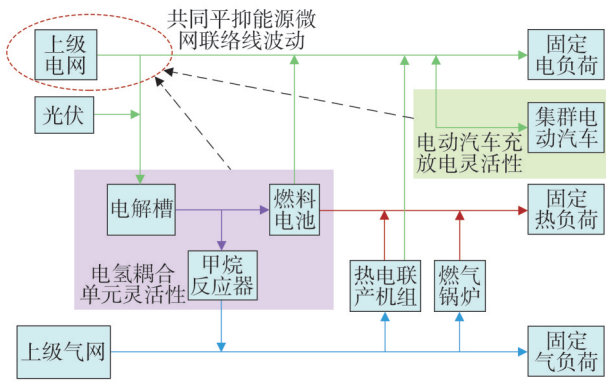


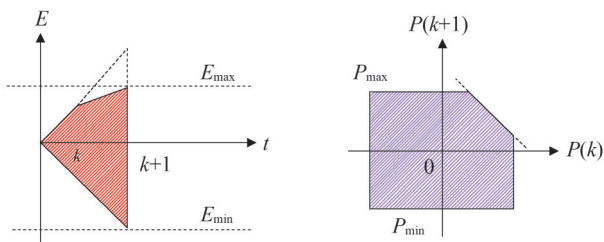
图1 含集群电动汽车的电-氢能源微网运行框架

Fig.1 Operation framework of electric-hydrogen energy microgrid incorporating cluster electric vehicles

## 2 基于虚拟电池模型的集群电动汽车可行域松弛闵可夫斯基聚合

### 2.1 电动汽车可调节能力量化

电动汽车的可调节能力可以理解为电动汽车在一定时间段内可以调节的功率约束集合,即功率可行域。单个电动汽车的功率可行域会受到自身功率和电能的双重限制,并且相邻时段的限制会彼此影响,采用图示法以一个具有  $k$  和  $k+1$  两个时段的时耦资源进行解释说明,如图2所示。虚线代表电量对功率可行域的限制,其中红色区域为资源电量约束,紫色区域为功率可行域。在电量约束的限制未起作用的时段(如电量最小值约束下的  $k$  到  $k+1$  时段),与该时段相关的功率可行域边界为两条直线构成的一个直角。在电量约束的限制起作用的时段(如电量最大值约束下的  $k$  到  $k+1$  时段),与该时段相关的功率可行域区域被压缩,其边界由一个直角变成两个钝角,时耦资源相比非时耦资源的可行域包络线几何表征复杂度增加,对聚合的精度和效率提出了更高的要求。



(a) 2时段资源电量约束 (b) 2时段资源功率可行域

图2 时耦资源电能限制对功率可行域的影响

Fig.2 The influence of time-coupled resource electric energy constraints on the power feasible region

本文通过极端场景法,基于虚拟电池模型量化考虑充电桩、电动汽车电池物理参数、车主出行习惯的功率可行域,从而对差异化电动汽车的可调节能力进行统一量化。虚拟电池模型兼顾物理特性与人为因素,可以有效刻画灵活性资源多时间尺度的灵活性特征,降低了电动汽车可行域刻画的复杂性。同时,虚拟电池模型可以降低用户用电信息暴露的风险,通用的外表征特性有利于对集群电动汽车调度的可视化展示。电动汽车虚拟电池模型的功率和能量边界为:

$$E_{i,t,\max}^{EV} = \min \left\{ \left( E_{i,T_o} + P_{i,\max} (t - T_{i,o}) \tau \right), E_{i,\max} \right\} \quad (1)$$

$$E_{i,t,\min}^{EV'} = \max \left\{ \left( E_{i,T_o} + P_{i,\min} (t - T_{i,o}) \tau \right), E_{i,\min} \right\} \quad (2)$$

$$E_{i,t,\min}^{EV''} = \max \left\{ \left( E_{i,\text{ex}} - P_{i,\max} (T_{i,d} - t) \tau \right), E_{i,\min} \right\} \quad (3)$$

$$E_{i,t,\min}^{EV} = \max \left( E_{i,t,\min}^{EV'}, E_{i,t,\min}^{EV''} \right) \quad (4)$$

$$P_{i,t,\max}^{EV} = \min \left\{ \frac{E_{i,t+1,\max}^{EV} - E_{i,t,\min}^{EV}}{\tau}, P_{i,\max} \right\} \quad (5)$$

$$P_{i,t,\min}^{EV} = \max \left\{ \frac{E_{i,t+1,\min}^{EV} - E_{i,t,\max}^{EV}}{\tau}, P_{i,\min} \right\} \quad (6)$$

式中:  $E_{i,t,\max}^{EV}$  和  $E_{i,t,\min}^{EV}$  为第  $i$  辆电动汽车在  $t$  时段的能量上下限;  $E_{i,t,\min}^{EV'}$  和  $E_{i,t,\min}^{EV''}$  分别为由并网时段向后推的能量下限和由离网时段向前推的能量下限;  $P_{i,t,\max}^{EV}$  和  $P_{i,t,\min}^{EV}$  为第  $i$  辆电动汽车在  $t$  时段的功率上下限,受到能量边界的限制。通过比较电动汽车并网后以额定功率充放电得到的能量与电动汽车电池容量,确定能量边界。通过比较电动汽车相邻时段能量边界差值与额定充放电功率,确定功率边界。  $P_{i,\max}$  和  $P_{i,\min}$  为第  $i$  辆电动汽车实际充放电功率上下限,与充电桩有关;  $E_{i,\max}$  和  $E_{i,\min}$  为第  $i$  辆电动汽车的电池容量上下限;  $E_{i,T_o}$  和  $E_{i,\text{ex}}$  为第  $i$  辆电动汽车并网时和期望离网时的能量;  $T_{i,o}$  和  $T_{i,d}$  为第  $i$  辆电动汽车并网和离网时间;  $\tau$  为时间尺度。

电动汽车的电能在并网和离网时会造成阶跃性的增加和减少,无法保证电动汽车在充放电时电能的时间轴上的连续性,功率和电能失去耦合,需要对电能进行修正。

$$E_{i,t+1}^{EV\text{arr}} = E_{i,T_o} W_{i,t+1} (W_{i,t+1} - W_{i,t}) \quad (7)$$

$$E_{i,t+1}^{EV\text{dep}} = E_{i,\text{ex}} W_{i,t} (W_{i,t} - W_{i,t+1}) \quad (8)$$

$$\Delta E_{i,t+1}^{EV} = E_{i,t+1}^{EV\text{arr}} - E_{i,t+1}^{EV\text{dep}} \quad (9)$$

式中: $E_{i,t+1}^{\text{EVarr}}$ 和 $E_{i,t+1}^{\text{EVdep}}$ 分别为第*i*辆电动汽车在*t*+1时刻电能并网和离网时的阶跃量; $\Delta E_{i,t+1}^{\text{EV}}$ 为第*i*辆电动汽车在*t*+1时刻的能量阶跃量; $W_{i,t}$ 为第*i*辆电动汽车在*t*时刻在网的状态变量,取1代表入网,取0代表离网。

## 2.2 集群电动汽车可行域聚合

电动汽车功率可行域的聚合通常涉及两个阶段:首先,描述单个电动汽车的功率可行域;其次,通过闵可夫斯基和(Minkowski sum)整合这些可行域。闵可夫斯基和的原理本质上是在欧几里得空间中进行点集和的加法运算,聚合后的可行域可以视为集合2的所有顶点沿着集合1的边界移动一圈所覆盖的区域与集合1的并集,如图3所示。这一过程增加了最终包络线的几何复杂性,并且随着维度和数量的增长,求解聚合的效率会显著(指数级)下降<sup>[24-25]</sup>。对于高维空间中的精确聚合,其计算难度依然很大,因此通常采用对资源可行域的近似方法来提升聚合效率。

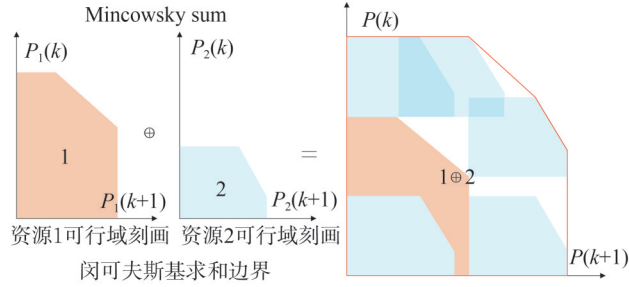


图3 可行域的闵可夫斯基聚合

Fig.3 Minkowski aggregation of feasible domains

本文采用一种松弛的闵可夫斯基求和方法,以外逼近的方式对多个电动汽车资源可行域进行聚合<sup>[9]</sup>。首先将通过虚拟电池模型量化的电动汽车灵活性以半平面表征的凸多胞体(Polytopes)形式表征,实现电动汽车可调节能力向功率可行域的数学映射。其紧凑的向量形式为

$$\varphi_i = \{p_i | A_i p_i \leq b_i\} = \left\{ p_i \left[ \begin{array}{c} E \\ A_i^\alpha \end{array} \right] p_i \leq \left[ \begin{array}{c} b_i^p \\ b_i^E \end{array} \right] \right\} \quad (10)$$

式中: $\varphi_i$ 为单个电动汽车的功率可行域; $p_i$ 为单个电动汽车的调度功率向量; $A_i$ 和 $b_i$ 分别为单个电动汽车灵活性的不等式系数矩阵和列向量; $E$ 为单位矩阵; $A_i^\alpha$ 为与电动汽车充放电效率、电池电量损耗系数

有关的矩阵,本文均设为相同; $b_i^p$ 为电动汽车功率边界列向量,满足 $E p_i \leq b_i^p$ ,即满足电动汽车灵活性的功率约束; $b_i^E$ 为电动汽车电量边界列向量,满足 $A_i^\alpha p_i \leq b_i^E$ ,即满足电动汽车灵活性的电量约束。

对于式(10)所示的2个电动汽车功率可行域 $\varphi_1$ 和 $\varphi_2$ ,可表示为

$$\begin{cases} \varphi_1 = \{p_1 | A_1 p_1 \leq b_1\} \\ \varphi_2 = \{p_2 | A_2 p_2 \leq b_2\} \end{cases} \quad (11)$$

因为 $A_1^\alpha = A_2^\alpha$ ,则有 $A_1 = A_2 = A$ ,此时两者的松弛闵可夫斯基求和可以表示为<sup>[9]</sup>

$$\varphi = \varphi_1 \oplus \varphi_2 = \{p | A p \leq b_1 + b_2\} \quad (12)$$

一般情况下,式(12)得到的聚合可行域对原可行域进行了松弛,得到的松弛可行域要比精确的可行域大。此处需要特别说明,在2时段电动汽车功率可行域聚合的特殊情况下松弛的闵可夫斯基和是准确的。

由此可知,将单个电动汽车可行域的边界进行累加,并考虑并网和离网时引起的能量阶跃,即可得到集群电动汽车的聚合功率可行域。集群电动汽车的可调节数学模型为:

$$\sum_{i=1}^N P_{i,t,\min}^{\text{EV}} \leq P_t^{\text{EV}} \leq \sum_{i=1}^N P_{i,t,\max}^{\text{EV}} \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^N E_{i,t,\min}^{\text{EV}} \leq E_t^{\text{EV}} \leq \sum_{i=1}^N E_{i,t,\max}^{\text{EV}} \quad (14)$$

$$E_{t+1}^{\text{EV}} = E_t^{\text{EV}} + P_t^{\text{EV}} \tau + \sum_{i=1}^N \Delta E_{i,t+1}^{\text{EV}} \quad (15)$$

式中: $P_t^{\text{EV}}$ 和 $E_t^{\text{EV}}$ 为集群电动汽车在*t*时刻的充放电功率和电能; $N$ 为接受调控的电动汽车数量。电动汽车通过虚拟电池模型量化灵活性并进行聚合后,决策变量的数量减少成原来的1/*N*,随着接受调控的电动汽车数量的增加,可以大幅度降低决策变量的维数,提高计算效率。

## 3 电氢能源微网数学模型

### 3.1 质子交换膜电解槽

电解水制氢技术可以加强能源微网的灵活互补能力,电解槽是电解水制氢的关键设备,质子交换膜电解槽具有快速的功率响应能力,且运行的功率范围较广,相比碱性电解槽更能够适应能源微网功率的强波动性。数学模型为

$$\begin{cases} P_t^{\text{PEM,H2}} = \eta_{\text{PEM}} P_t^{\text{PEM,E}} \\ P_{\min}^{\text{PEM,E}} \leq P_t^{\text{PEM,E}} \leq P_{\max}^{\text{PEM,E}} \\ -\Delta P_{\max}^{\text{PEM,E}} \leq P_{t+1}^{\text{PEM,E}} - P_t^{\text{PEM,E}} \leq \Delta P_{\max}^{\text{PEM,E}} \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $P_t^{\text{PEM,H2}}$  为电解槽  $t$  时刻的产氢功率;  $P_t^{\text{PEM,E}}$  为  $t$  时刻的用电功率;  $\eta_{\text{PEM}}$  为电解槽的电-氢转换效率;  $P_{\max}^{\text{PEM,E}}$  和  $P_{\min}^{\text{PEM,E}}$  分别为用电功率的上下限;  $\Delta P_{\max}^{\text{PEM,E}}$  为最大爬坡功率。

### 3.2 氢燃料电池

氢燃料电池通过燃烧氢气按一定热电比进行供电和供热,数学模型为

$$\begin{cases} P_t^{\text{HFC,H}} + P_t^{\text{HFC,E}} = \eta_{\text{HFC}} P_t^{\text{HFC,H2}} \\ P_{\min}^{\text{HFC,H2}} \leq P_t^{\text{HFC,H2}} \leq P_{\max}^{\text{HFC,H2}} \\ -\Delta P_{\max}^{\text{HFC,H2}} \leq P_{t+1}^{\text{HFC,H2}} - P_t^{\text{HFC,H2}} \leq \Delta P_{\max}^{\text{HFC,H2}} \\ \frac{P_t^{\text{HFC,H}}}{P_t^{\text{HFC,E}}} = K_{\text{HFC}} \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $P_t^{\text{HFC,H2}}$  为燃料电池  $t$  时刻的用氢功率;  $P_t^{\text{HFC,E}}$  和  $P_t^{\text{HFC,H}}$  分别为  $t$  时刻的产电功率和产热功率;  $\eta_{\text{HFC}}$  为燃料电池的能量转换效率;  $P_{\max}^{\text{HFC,H2}}$  和  $P_{\min}^{\text{HFC,H2}}$  分别为用氢功率的上下限;  $\Delta P_{\max}^{\text{HFC,H2}}$  为最大爬坡功率;  $K_{\text{HFC}}$  为燃料电池电热比。

### 3.3 燃气锅炉

燃气锅炉可以与电氢耦合单元相互配合,提高能源微网的运行灵活性,数学模型为

$$\begin{cases} P_t^{\text{GB,H}} = \eta_{\text{GB}} P_t^{\text{GB,G}} \\ P_{\min}^{\text{GB,G}} \leq P_t^{\text{GB,G}} \leq P_{\max}^{\text{GB,G}} \\ -\Delta P_{\max}^{\text{GB,G}} \leq P_{t+1}^{\text{GB,G}} - P_t^{\text{GB,G}} \leq \Delta P_{\max}^{\text{GB,G}} \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $P_t^{\text{GB,G}}$  为燃气锅炉  $t$  时刻的用气功率;  $\eta_{\text{GB}}$  为燃气锅炉的气-热转换效率;  $P_t^{\text{GB,H}}$  为  $t$  时刻的产热功率;  $P_{\max}^{\text{GB,G}}$  和  $P_{\min}^{\text{GB,G}}$  分别为用气功率的上下限;  $\Delta P_{\max}^{\text{GB,G}}$  为最大爬坡功率。

### 3.4 热电联产机组

热电联产机组通过燃烧天然气按一定热电比进行热电联供,数学模型为

$$\begin{cases} P_t^{\text{CHP,H}} + P_t^{\text{CHP,E}} = \eta_{\text{CHP}} P_t^{\text{CHP,G}} \\ P_{\min}^{\text{CHP,G}} \leq P_t^{\text{CHP,G}} \leq P_{\max}^{\text{CHP,G}} \\ -\Delta P_{\max}^{\text{CHP,G}} \leq P_{t+1}^{\text{CHP,G}} - P_t^{\text{CHP,G}} \leq \Delta P_{\max}^{\text{CHP,G}} \\ \frac{P_t^{\text{CHP,H}}}{P_t^{\text{CHP,E}}} = K_{\text{CHP}} \end{cases} \quad (19)$$

式中:  $P_t^{\text{CHP,G}}$  为热电联产机组  $t$  时刻的用气功率;  $P_t^{\text{CHP,E}}$  和  $P_t^{\text{CHP,H}}$  分别为  $t$  时刻的产电功率和产热功率;  $\eta_{\text{CHP}}$  为热电联产机组的能量转换效率;  $P_{\max}^{\text{CHP,G}}$  和  $P_{\min}^{\text{CHP,G}}$  分别为用气功率的上下限;  $\Delta P_{\max}^{\text{CHP,G}}$  为最大爬坡功率;

$K_{\text{CHP}}$  为热电联产机组电热比。

### 3.5 甲烷反应器

甲烷反应器将氢气转换为天然气,供给热电联产机组和燃气锅炉产生电能与热能,是连接电气气的重要能量耦合单元,数学模型为

$$\begin{cases} P_t^{\text{MR,G}} = \eta_{\text{MR}} P_t^{\text{MR,H2}} \\ P_{\min}^{\text{MR,H2}} \leq P_t^{\text{MR,H2}} \leq P_{\max}^{\text{MR,H2}} \\ -\Delta P_{\max}^{\text{MR,H2}} \leq P_{t+1}^{\text{MR,H2}} - P_t^{\text{MR,H2}} \leq \Delta P_{\max}^{\text{MR,H2}} \end{cases} \quad (20)$$

式中:  $P_t^{\text{MR,H2}}$  为甲烷反应器  $t$  时刻的用氢功率;  $\eta_{\text{MR}}$  为甲烷反应器的氢-气转换效率;  $P_t^{\text{MR,G}}$  为  $t$  时刻的产气功率;  $P_{\max}^{\text{MR,H2}}$  和  $P_{\min}^{\text{MR,H2}}$  分别为用氢功率的上下限;  $\Delta P_{\max}^{\text{MR,H2}}$  为最大爬坡功率。

## 4 微网功率平抑随机优化模型

本文考虑集群电动汽车和电氢耦合单元的灵活可调能力,以微网与上级电网联络线功率波动最小为最优构建微网联络线功率平抑模型。目标函数为

$$\min \sum_{t=1}^{T-1} \frac{|P_{t+1}^{\text{BUY,E}} - P_t^{\text{BUY,E}}|}{P_{\max}^{\text{BUY,E}}} \quad (21)$$

式中:  $T$  为调度周期;  $P_t^{\text{BUY,E}}$  为  $t$  时刻微网与上级电网的联络线功率,即购电功率;  $P_{\max}^{\text{BUY,E}}$  为购电功率的最大值。

功率平衡约束为:

$$P_t^{\text{EV}} + P_t^{\text{LE}} + P_t^{\text{PEM,E}} = P_t^{\text{PV}} + P_t^{\text{BUY,E}} + P_t^{\text{CHP,E}} + P_t^{\text{HFC,E}} \quad (22)$$

$$P_t^{\text{MR,H2}} + P_t^{\text{HFC,H2}} = P_t^{\text{PEM,H2}} \quad (23)$$

$$P_t^{\text{L,H}} = P_t^{\text{CHP,H}} + P_t^{\text{GB,H}} + P_t^{\text{HFC,H}} \quad (24)$$

$$P_t^{\text{L,G}} + P_t^{\text{GB,G}} + P_t^{\text{CHP,G}} = P_t^{\text{MR,G}} + P_t^{\text{BUY,G}} \quad (25)$$

式中:  $P_t^{\text{LE}}$  为  $t$  时刻微网的电负荷;  $P_t^{\text{L,H}}$  为  $t$  时刻微网的热负荷;  $P_t^{\text{L,G}}$  为  $t$  时刻微网的气负荷;  $P_t^{\text{PV}}$  为  $t$  时刻的光伏出力;  $P_t^{\text{BUY,G}}$  为  $t$  时刻微网的购气功率。

各设备运行约束见第2节和第3节。

本文基于自回归滑动平均模型和场景削减技术,对预测的光伏出力曲线进行场景生成和削减,得到典型的光伏出力时序曲线,从而建立微网功率平抑随机优化模型。

采用自回归滑动平均(auto-regressive moving average, ARMA)模型对光伏出力的不确定性场景进行抽样生成,即为

$$X_t = c_t + \sum_{i=1}^a \psi_i X_{t-i} - \sum_{j=1}^b \theta_j c_{t-j} \quad (26)$$

式中:  $X_t$  为  $t$  时刻的光伏出力时序值;  $a$  和  $b$  分别为自

回归阶数和移动平均阶数; $\psi_l$ 为阶数 $l$ 的自回归系数; $\theta_j$ 为阶数 $j$ 的滑动平均系数; $c_t$ 为引入的 $t$ 时刻的正态白噪声。

场景数量生成过多时会引起模型求解的难度,采用基于动态时间规整(dynamic time warping, DTW)的K-means算法进行场景削减。DTW是起源于语音识别领域的用于测量两个序列之间相似性的算法,特别适用于处理非刚性的时间序列(即序列中的事件不严格同步发生的情况)。在光伏出力的场景下,由于天气变化、季节更替等因素的影响,光伏的输出功率会随时间波动,而这种波动可能不会严格按照同一时间点出现。因此使用DTW来比较不同天的光伏出力曲线,可以更好地捕捉到曲线形状上的相似性,而不仅仅是某几个特定时间点的数值匹配。相比传统方法如欧氏距离等,DTW可以更加有效地度量时间序列间的距离。

假设有两个时间序列 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_T\}$ 和 $B = \{b_1, b_2, \dots, b_T\}$ ,将A和B中的元素组成 $T \times T$ 的矩阵,A和B中对应两点之间的距离组成穿越路径 $W = \{w_1, w_2, \dots, w_m\}$ ,穿越路径中的第 $m$ 个点记作 $w_m(a_T, b_T)$ 。穿越路径 $w_m$ 满足下列约束:

$$w_1 = \{a_1, b_1\}, w_m = \{a_T, b_T\} \quad (27)$$

$$\begin{cases} w_{m+1} = \{\widetilde{a}_T, \widetilde{b}_T\} \\ 0 \leq \widetilde{a}_T - a_T \leq 1 \\ \widetilde{b}_T - b_T \geq 0 \end{cases} \quad (28)$$

式中: $\widetilde{a}_T, \widetilde{b}_T$ 分别为时间序列A和B中的元素。

DTW距离迭代公式为:

$$w_m(a_T, b_T) = d(a_T, b_T) + \min(D(a_{T-1}, b_{T-1}), D(a_{T-1}, b_T), D(a_T, b_{T-1})) \quad (29)$$

$$D(A, B) = \sqrt{\sum w_m(a_T, b_T)} \quad (30)$$

式中: $d(\cdot)$ 为序列之间的欧式距离; $D(\cdot)$ 序列之间的DTW距离。

基于DTW-K-means场景削减的微网功率平抑随机优化模型为:

$$\min \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T p_k f(x_{t,k}) \quad (31)$$

$$\text{s.t. } h(x_{t,k}) \leq 0 \quad (32)$$

式中: $x_{t,k}$ 为 $t$ 时刻 $k$ 场景下的优化变量; $f(x_{t,k})$ 为 $t$ 时刻 $k$ 场景下的目标函数; $p_k$ 为典型场景 $k$ 出现的概率; $h(x_{t,k})$ 为 $t$ 时刻 $k$ 场景下的约束条件; $K$ 为削减后的典型场景。

## 5 算例仿真分析

本文模型通过MATLAB 2024b平台Yalmip编译,调用Cplex求解器进行优化求解。考虑到不同类型的电动汽车功能不同,运行模式上也存在差异,结合交通调查等方式采集不同类型电动汽车用能特征的海量历史数据,可以获得不同类型电动汽车的入网时间、入网电量、离网期望电量等本文虚拟电池模型所需参数的分布情况。本文将电动汽车出行习惯按并网时段分为2类,各参数带有随机值,通过蒙特卡罗法生成表征不同类型电动汽车用能特征的场景, $N[a, b]$ 表示以 $a$ 为期望, $b$ 为方差的正态分布。电动汽车仿真参数见表1,能源微网各设备仿真参数参考文献[3]。场景生成场景数量为1000,削减后的典型场景数量为5。

表1 算例仿真参数

Table 1 Example simulation parameters

| 参数                           | I类电动汽车        | II类电动汽车       |
|------------------------------|---------------|---------------|
| $P_{i,\max}/\text{kW}$       | $N[4, 1]$     | $N[4, 1]$     |
| $P_{i,\min}/\text{kW}$       | $N[-4, 1]$    | $N[-4, 1]$    |
| $E_{i,\text{To}}/E_{i,\max}$ | $N[0.4, 0.1]$ | $N[0.3, 0.1]$ |
| $E_{i,\text{ex}}/E_{i,\max}$ | $N[0.7, 0.1]$ | $N[0.8, 0.1]$ |
| $E_{i,\max}/\text{kWh}$      | $N[48, 4]$    | $N[48, 4]$    |
| $E_{i,\min}/\text{kWh}$      | 9.6           | 9.6           |
| $T_{i,o}$                    | $N[07:00, 1]$ | $N[20:00, 2]$ |
| $T_{i,d}$                    | $N[20:30, 2]$ | $N[08:30, 1]$ |

### 5.1 微网能量平衡结果分析

氢能作为多能微网的中间二次能源,连接着电热气各环节的能量转换和交互过程。图4为微网电功率优化调度结果,可以看出光伏发电由于具有很高的随机性和间断性,发电量在08:00开始快速上升,在12:00左右达到顶峰后持续位于较高水平,在16:00开始快速下降,具有较高的爬坡与滑坡速率,这是造成微网与上级电网联络线功率波动的最主要

原因。为了使得购电量尽可能平稳,与电能直接耦合的能源设备都将参与到平抑光伏波动的计划中。在光伏不出力时段,如00:00—05:00和19:00—24:00,电负荷需要通过购电和其余能源设备供电满足,此时购电量的波动主要受到电负荷波动的影响。由于电负荷波动较小,且PEM在调节速率和范围上具有很强的灵活调节特性,购电量趋于平稳。在光伏发电波动较大时段,如08:45—10:00和15:30—18:00,仅仅通过PEM和其余设备无法完全平抑光伏波动,购电量也出现了大幅波动。

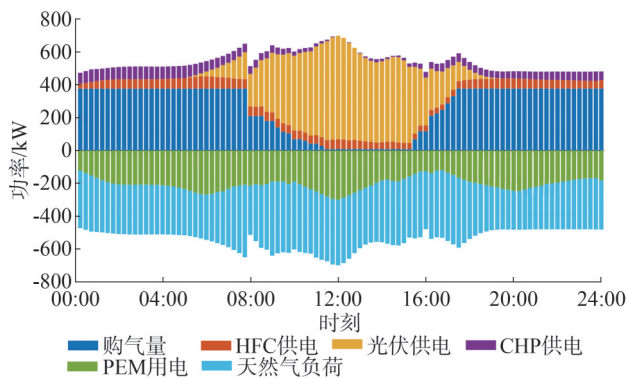


图4 电功率平衡

Fig.4 Electric power balance

图5为微网热功率优化调度结果,可以看出由于热负荷需要由微网内部完全供给,HFC和CHP需要优先满足热负荷,且由于容量配置较小,对电功率波动平抑的影响较小。对于功率平衡而言,由于GB和HFC的能量转换效率更高,所以热功率出力较大。在光伏发电出力较大和波动较大时段,如09:00—17:00,由于CHP的能源直接由天然气供给,而天然气可以通过从外部气网购买补充,所以出力波动较大,体现了较好的灵活性。

图6和图7为气功率和氢功率优化调度结果,可以看出微网大量从外部气网购气以满足内部的天然气负荷以及GB、CHP用气。在10:00—15:00时段,MR将部分氢气转换为天然气以消纳更多的氢能,增加PEM的用电量,从而进一步平抑光伏波动。由于微网内部没有氢负荷,PEM产生的氢气可以完全供给HFC和MR,进一步增加了氢能环节的灵活性。

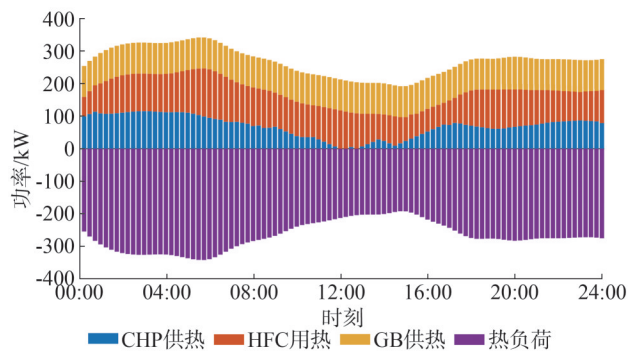


图5 热功率平衡

Fig.5 Thermal power balance

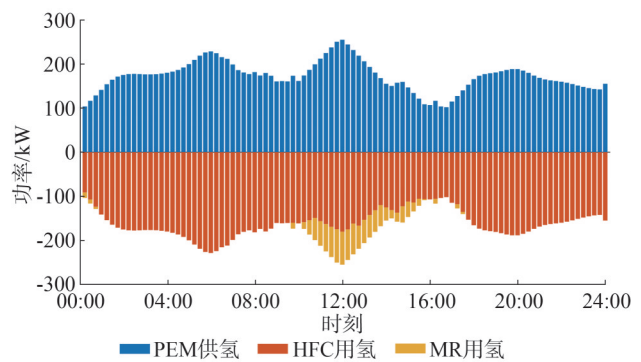


图6 氢功率平衡

Fig.6 Hydrogen power balance

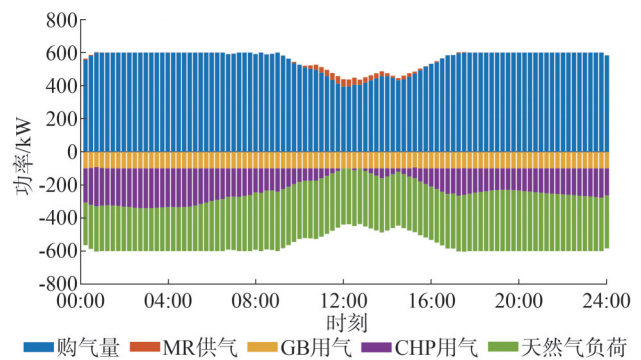


图7 气功率平衡

Fig.7 Gas power balance

### 5.2 集群电动汽车调度结果分析

图8和图9分别为基于虚拟电池模型量化和聚合的集群电动汽车优化调度结果。从电动汽车聚合可行域的边界来看,功率和电量可行域的上下边界变化趋势受电动汽车并网和离网的状态影响。在早晨如07:00和傍晚如20:00时段电动汽车并网后,电

动汽车的充放电功率可行域增大达到峰值。集群电动汽车的电量可行域呈现先下降后上升的趋势,且下边界的变化幅度大于上边界,这是因为支持V2G的电动汽车并网后仍具有充足的电量进行放电,达到保底电量后开始充电从而在离网时达到期望电量。其次,可以看出虚拟电池模型采用具有时移的功率和电量边界描述集群电动汽车的灵活性,并以一套标准的电池参数上报给微电网中的电动汽车聚合商,避免了直接把电动汽车用户资源全信息(如用户出行习惯、电动汽车物理参数等)上报,可以保护隐私。从电动汽车的调度功率来看,在光伏发电波动较大时段,电动汽车可以通过灵活调节充放电功率平抑光伏波动。

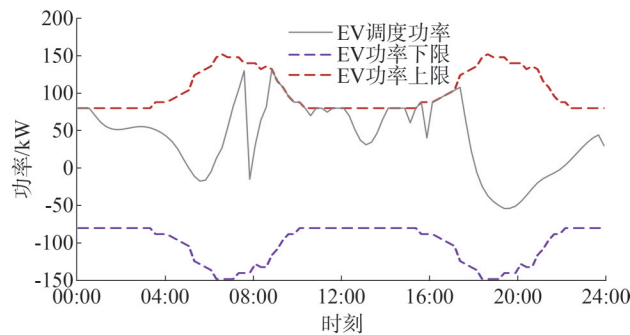


图8 集群电动汽车功率调度结果

Fig.8 Power scheduling results of cluster electric vehicles

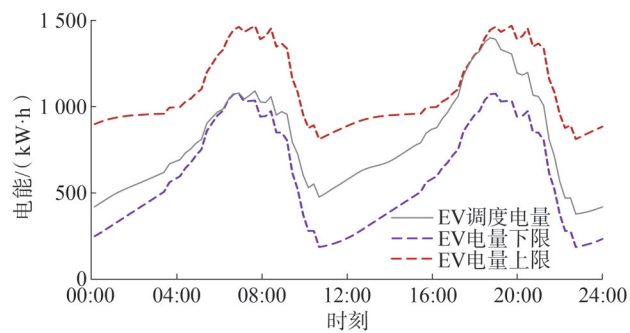


图9 集群电动汽车电量调度结果

Fig.9 Electricity scheduling results of cluster electric vehicles

### 5.3 电动汽车数量对波动平抑效果的影响

图10为不同电动汽车数量接受调控时微网与外部电网联络线的功率波动情况,可以看出,随着电动汽车数量的增加,功率波动逐渐减小。当电动汽车的数量为20时,功率波动总量770.47 kW。当电

动汽车的数量提升到60时,功率波动总量581.46 kW。这是因为更多的电动汽车接受调控,集群电动汽车聚合可行域空间就更大,电动汽车可调节能力就更强,电动汽车的充放电能力增强,可以调控达到的最大充电和放电功率增加,放电保底电量提高。同时可以看出,不同数量电动汽车平抑波动的能力并不是线性变化的,波动减小量根据优化调度的结果分布在不同的时间段,当电动汽车数量偏大时,平抑波动的能力逐渐减弱。

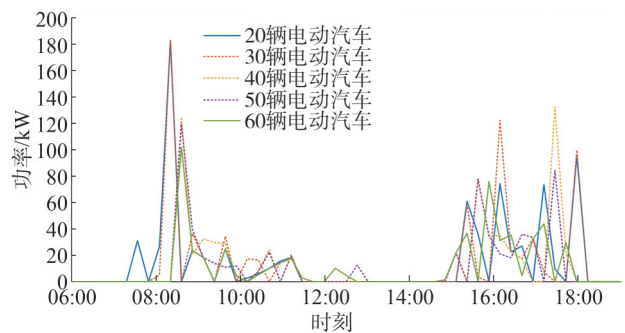


图10 不同电动汽车数对波动平抑效果的影响

Fig.10 Influence of different numbers of electric vehicles on fluctuation suppression effect

### 5.4 电动汽车虚拟电池模型优越性分析

为验证所提集群电动汽车虚拟电池模型的优化性能,将电动汽车单独建模为虚拟电池模型参与优化调度作为传统模型同本文所提虚拟电池聚合模型进行调度结果的对比。表2为集群电动汽车参与调度时不同模型的优化求解时间及聚合模型的求解精度结果,由于基于精确建模的传统模型优化调度结果为理论最优值,而聚合模型为近似模型,所以聚合模型的求解精度是相对于传统模型而言的。可知,随着电动汽车调控数量的增加,所提聚合模型在运算效率上的优势将逐渐变大,加速倍数分别为2.318、4.443和17.899。当数量达到500时,优化调度的求解时间依然可以稳定在0.813 s(毫秒级)。在聚合精度上,本文采用一种松弛的闵可夫斯基求和(即边界求和)方法,以外逼近的方式对多个电动汽车资源可行域的边界直接求和,得到的聚合可行域比实际可行域大,所以随着电动汽车聚合数量的增加,求解精度略有降低,但仍然保持在98%以上。

表2 不同模型的求解时间对比

Table 2 Comparison of solving time of different models

| 电动汽车数量/辆 | 传统模型求解时间/s | 聚合模型求解时间/s | 聚合模型精度/% |
|----------|------------|------------|----------|
| 30       | 1.672      | 0.782      | 99.8     |
| 100      | 3.515      | 0.791      | 99.1     |
| 500      | 14.552     | 0.813      | 98.2     |

## 6 结束语

建立基于虚拟电池模型的松弛冈可夫斯基集群电动汽车功率可行域聚合模型,研究了考虑电动汽车和电氢耦合单元调节灵活性对平抑能源微网功率波动的能力。虚拟电池模型可以有效刻画电动汽车多时间尺度的灵活性,降低异质时耦资源可行域刻画的复杂性。该方法可推广至其他灵活性资源如温控负荷、工业负荷、分布式储能等,具有很高的适配性。松弛的冈可夫斯基聚合方法通过整合集群电动汽车的决策变量大幅降低了模型优化求解的时间,相比传统模型,聚合模型有更好的优化性能。同时虚拟电池模型的整合形式并不会向电网公开其内部模型详细参数信息,在市场竞争中以价值驱动保持绝对优势。电氢耦合单元的引入使得多种能量转换设备的可调节能力得到有限挖掘,大幅提升了能源微网的多能互补能力,提升整个能源系统的灵活性。考虑集群电动汽车的灵活性后,进一步平抑能源微网与上级电网的联络线功率波动。同时,通过DTW-Kmeans对历史光伏出力波动场景进行场景削减,减少了随机优化模型计算的复杂度。因为DTW-Kmeans关注了微网波动平抑场景中不同时间序列相邻时段含有的大量信息,使得决策结果在面对不确定性波动时具有较好的鲁棒性。

## 参考文献

- [1] 樊晓伟,王瑞妙,杨海峰,等.计及源荷不确定的综合能源微电网集群优化运行[J].电力建设,2024,45(8):128-139.  
FAN Xiaowei, WANG Ruimiao, YANG Haifeng, et al. Optimization operation of integrated energy microgrid cluster considering source-load uncertainty[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(8):128-139.
- [2] 童宇轩,胡俊杰,刘雪涛,等.新能源电力系统灵活性供需量化及分布鲁棒优化调度[J].电力系统自动化,2023,47(15):80-90.

- TONG Yuxuan, HU Junjie, LIU Xuetao, et al. Quantification of flexibility supply and demand and distributionally robust optimal dispatch of renewable energy dominated power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(15):80-90.
- [3] 陈鑫,王娟.基于博弈论的风光氢能源系统容量优化[J].分布式能源,2024,9(1):26-34.  
CHEN Xin, WANG Juan. Capacity optimization of wind-solar-hydrogen energy system based on game theory [J]. Distributed Energy, 2024, 9(1):26-34.
- [4] 邱一苇,朱杰,曾扬俊,等.离网型可再生能源发电制氢能量管理技术需求分析与展望[J].电力系统自动化,2024,48(22):43-59.  
QIU Yiwei, ZHU Jie, ZENG Yangjun, et al. Technological requirement analysis and prospect of energy management for off-grid renewable power-to-hydrogen systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(22):43-59.
- [5] 胡俊杰,童宇轩,刘雪涛,等.计及精细化氢能利用的综合能源系统多时间尺度鲁棒优化策略[J].电工技术学报,2024,39(5):1419-1435.  
HU Junjie, TONG Yuxuan, LIU Xuetao, et al. Multi-time-scale robust optimization strategy for integrated energy system considering the refinement of hydrogen energy use [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(5):1419-1435.
- [6] LIU X H, LI X, TIAN J Q, et al. Low-carbon economic dispatch of integrated electricity-gas energy system considering carbon capture, utilization and storage [J]. IEEE Access, 2023, 11:25077-25089.
- [7] 肖白,韩康琦,张晓华.含氢储能的独立微电网IGDT鲁棒规划[J].电力建设,2024,45(4):77-88.  
XIAO Bai, HAN Kangqi, ZHANG Xiaohua. Robust IGDT planning for stand-alone microgrid with hydrogen energy storage [J]. Electric Power Construction, 2024, 45(4):77-88.
- [8] 吴艳娟,张亦炫,王云亮.计及多重需求响应的综合能源系统多时间尺度低碳运行[J].电力工程技术,2024,43(2):21-32.  
WU Yanjuan, ZHANG Yixuan, WANG Yunliang. Multi-time scale low carbon operation integrated energy system considering multiple integrated demand responses [J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(2):21-32.
- [9] 杨佳奇,张顺禹,高飒,等.结合电-热-氢储能的综合能源站多时间尺度优化运行[J].分布式能源,2024,9(2):48-62.  
YANG Jiaqi, ZHANG Shunyu, GAO Sa, et al. Multi-time scale optimal operation of integrated energy station combined with electricity-heat-hydrogen energy storage [J]. Distributed Energy, 2024, 9(2):48-62.
- [10] 薛太林,杨海翔,张海霞,等.考虑P2G及碳捕集的热电联产虚拟电厂低碳优化调度[J].山东电力技术,2024,51(5):1-8.  
XUE Tailin, YANG Haixiang, ZHANG Haixia, et al. Low carbon optimal scheduling of CHP virtual power plants considering P2G

- and carbon capture [J]. Shandong Electric Power, 2024, 51 (5) : 1-8.
- [11] 黄学良,刘永东,沈斐,等.电动汽车与电网互动:综述与展望[J].电力系统自动化,2024,48(7):3-23.  
HUANG Xueliang, LIU Yongdong, SHEN Fei, et al. Vehicle to grid: review and prospect [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(7): 3-23.
- [12] 童宇轩,胡俊杰,杜昊明,等.基于虚拟电池模型的外逼近冈可夫斯基热泵负荷调节可行域聚合方法[J].电网技术,2024,48(8):3340-3349.  
TONG Yuxuan, HU Junjie, DU Haoming, et al. Feasible region aggregation method for load regulation of minkowski heat pump based on external approximation of VB model [J]. Power System Technology, 2024, 48(8): 3340-3349.
- [13] 翁亮涛,王思远,郑伟业,等.基于改进边界收缩算法的灵活性资源聚合模型[J].山东电力技术,2025,52(1):1-11.  
WENG Liangtao, WANG Siyuan, ZHENG Weiye, et al. Flexibility resource aggregation model based on improved boundary shrinkage algorithm [J]. Shandong Electric Power, 2025, 52(1): 1-11.
- [14] 王思远,吴文传.灵活性资源聚合参考模型与量化指标体系[J].电力系统自动化,2024,48(3):1-9.  
WANG Siyuan, WU Wenchuan. Aggregation reference model and quantitative metric system of flexible energy resources [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(3): 1-9.
- [15] 潘振宇,张孝顺,余涛,等.大规模电动汽车集群分层实时优化调度[J].电力系统自动化,2017,41(16):96-104.  
PAN Zhenning, ZHANG Xiaoshun, YU Tao, et al. Hierarchical real-time optimized dispatching for large-scale clusters of electric vehicles [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(16): 96-104.
- [16] 詹祥澎,杨军,韩思宁,等.考虑电动汽车可调度潜力的充电站两阶段市场投标策略[J].电力系统自动化,2021,45(10):86-96.  
ZHAN Xiangpeng, YANG Jun, HAN Sining, et al. Two-stage market bidding strategy of charging station considering schedulable potential capacity of electric vehicle [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(10): 86-96.
- [17] MAO M Q, ZHANG S L, CHANG L C, et al. Schedulable capacity forecasting for electric vehicles based on big data analysis [J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 7(6): 1651-1662.
- [18] KHATAMI R, PARVANIA M, NARAYAN A. Flexibility reserve in power systems: definition and stochastic multi-fidelity optimization [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(1): 644-654.
- [19] ZHAO L, ZHANG W, HAO H, et al. A geometric approach to aggregate flexibility modeling of thermostatically controlled loads [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6): 4721-4731.
- [20] HAO H, WU D, LIAN J M, et al. Optimal coordination of building loads and energy storage for power grid and end user services [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4335-4345.
- [21] 孙惠娟,方杜,彭春华.基于可拓距K-均值聚类 and 正弦微分进化算法的风储联合系统优化配置[J].电力自动化设备,2021,41(10):20-27.  
SUN Huijuan, FANG Du, PENG Chunhua. Optimal allocation of wind-energy storage combined system based on extension distance K-means clustering and sine differential evolution algorithm [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 20-27.
- [22] HAN F J, PU T J, LI M Z, et al. Short-term forecasting of individual residential load based on deep learning and K-means clustering [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2021, 7(2): 261-269.
- [23] 缪雨函,许寅,王颖.面向恢复力提升的高比例分布式光伏接入配电网规划方法[J].山东电力技术,2024,51(8):1-9.  
MIAO Yuhan, XU Yin, WANG Ying. Planning of distribution system integrated with high-penetration photovoltaic for the resilience improvement [J]. Shandong Electric Power, 2024, 51(8): 1-9.
- [24] 周海浪,刘一畔,陈雨果,等.考虑灵活性收益的需求侧资源可行域聚合方法[J].中国电力,2022,55(9):56-63.  
ZHOU Hailang, LIU Yipan, CHEN Yuguo, et al. Demand side feasible region aggregation considering flexibility revenue [J]. Electric Power, 2022, 55(9): 56-63.
- [25] 吴界辰,艾欣,胡俊杰,等.计及不确定因素的需求侧灵活性资源优化调度[J].电力系统自动化,2019,43(14):73-80.  
WU Jiechen, AI Xin, HU Junjie, et al. Optimal dispatch of flexible resource on demand side considering uncertainties [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(14): 73-80.

收稿日期:2024-09-23

修回日期:2025-02-27

作者简介:

童宇轩(1998),通信作者(chant\_for\_winter@qq.com),男,硕士,从事工作为电力系统大数据应用与人工智能;

李 灿(1998),男,硕士在读,研究方向为新能源电力系统与微网。

(责任编辑 郑天茹)

# 面向海缆作业应用的空天地海一体化通信组网关键技术研究

隋 灿\*, 韩志骏, 朱坤双, 侯 炜, 官梓超

(国网山东省电力公司应急管理中心, 山东 济南 250000)

**摘要:**在现代上海缆作业中,通信需求的多样性、紧急性和地点不确定性日益凸显,传统通信方式已难以满足这些需求。分析双模卫星、无线 Mesh 自组网在动态海上环境中的应用优势,在分析海缆作业对无线通信网络需求的基础上,提出了一种“空天地海”一体化通信网络架构,通过双模卫星通信与无线 Mesh 自组网的融合应用,将天基、空基、岸基和海基通信平台资源进行多域协同,通过优化混合无线 Mesh 协议(hybrid wireless Mesh protocol, HWMP)中的路由判据并结合多路径路由算法,实现业务数据的高效传输。该方案不仅为海缆作业场所提供了全方位的无线网络覆盖,为海上作业人员提供坚实的通信保障,也为作业船只和陆地指挥中心之间建立高效可靠的无线通信联系,有效提升了海上作业的效率 and 安全性。

**关键词:**海缆作业;卫星通信;无线 Mesh 自组网;HWMP;路由判据

中图分类号:TN92

文献标志码:A

文章编号:1007-9904(2025)09-0068-11

## Research on Key Technologies of Space-air-ground-ocean Integrated Communication Network for Submarine Cable Operation

SUI Can, HAN Zhijun, ZHU Kunshuang, HOU Wei, GONG Zichao

(Shandong Electric Power Emergency Management Center, Jinan 250000, China)

**Abstract:** In modern offshore cable operations, the diversity, urgency, and location uncertainty of communications have become increasingly prominent, and traditional communication methods can not meet these requirement anymore. The advantages of using dual-mode satellites and wireless mesh ad hoc networks in dynamic marine environments are analyzed in this article. Based on the analysis of the wireless communication requirements for submarine cable operations, a space-air-ground-ocean integrated communication architecture is proposed. Through the integration of dual-mode satellite communication and wireless mesh ad hoc networks, the resources of space-based, air-based, shore-based, and sea-based communication platforms are coordinated across multiple domains. By optimizing the routing metric in the hybrid wireless Mesh protocol (HWMP) and incorporating multipath routing algorithms, efficient cable operation data transmission can be achieved. This scheme not only provides comprehensive wireless network coverage for submarine cable work sites, but also provides robust communication support for offshore personnel, and establishes efficient and reliable wireless communication links between work vessels and land command centers, thereby effectively improving the efficiency and safety of offshore operations.

**Keywords:** submarine cable operation; satellite communication; wireless mesh ad hoc network; HWMP; routing metric

## 0 引言

随着海洋资源的不断开发和利用,海缆作为重要的能源信息传输通道,在保障海上通信、电力输送等方面发挥着不可替代的作用。然而,传统通信系

统在海洋环境中存在覆盖范围有限、信号稳定性差等问题,无法满足现代海缆作业的通信需求,也无法保障海上作业人员的安全。在海缆建设、维护和修复过程中,面临着复杂的海洋环境、恶劣的气候条件以及突发事件等挑战,对海缆作业的应急通信保障提出了更高的要求。海缆作业通信保障需求主要包括以下几点。1)持续语音通信:岸上与海上作业船只之间需要保持持续的语音通信,以便进行作业部

基金项目:国网山东省电力公司科技项目(520641240001)。  
Science and Technology Project of State Grid Shandong Electric Power Company(520641240001)。

署和进度监控;2)全程视频监控:需要实现对海底电缆作业船只的全程视频监控,解决无公网环境下的视频回传问题,实时了解船上作业风险;3)统一指挥通信系统:船上作业指挥部需要与所有作业船只人员建立统一指挥通信系统,满足约 10 km 的通信距离,首先考虑语音通信,其次为视频和信息交互,以便统一指挥和应对风险;4)水下通信:需要解决海下潜水作业人员与船上的语音通信,进行水下定位和生命体征监测,同时实时回传作业面视频,以确保人员安全。

为了应对这一挑战,“空天地海”一体化新型通信系统应运而生。该系统融合了大数据<sup>[1]</sup>、云计算<sup>[2]</sup>、人工智能<sup>[3]</sup>、卫星通信<sup>[4]</sup>、多媒体通信和移动通信等先进技术,通过整合天基、空基、岸基和海基等多种平台,构建“空天地海”一体化的通信网络架构。国内外相关学者对该系统在网络融合应用和关键网络技术方面进行过深入研究。Pang 等人<sup>[5]</sup>通过采用移动边缘计算提出了“空天地海”一体化网络辅助的海上通信网络,并研究了如何克服实施卫星网络进行海上通信的局限性。Kodheli 等人<sup>[6]</sup>研究了空间网络并分析了未来可能的挑战,提出了一个天基信息网络来扩大观测范围并实时传输数据,但未考虑其他平台,对“空天地海”一体化网络的整体性考虑不足,具有一定局限性。陈浩等人<sup>[7]</sup>针对“空天地海”一体化网络的异构性和水声介质访问控制(medium access control, MAC)协议性能难以评估的问题,建立了基于排队论的 QBM 性能评估模型,通过对异构子网的建模,实现了网络的性能评估。管莹莹等人<sup>[8]</sup>分析了“空天地海”一体化网络切片技术发展趋势,并提出了切片间资源重用和智能自适应切片伸缩两个改进方案,以保证服务连续性和服务质量(quality of service, QoS)稳定性,提高网络资源利用率。

综上所述,当前的“空天地海”一体化网络虽然开展了一些研究,但是在网络覆盖范围、架构设计以及网络间互联互通上,仍存在不足之处。因此,有必要提出一种组网方案,将双模卫星通信与无线 Mesh 自组网进行融合应用,以便满足新型应用和业务需求。而双模卫星通信<sup>[9-10]</sup>具有卫星信号覆盖范围广、传输速度快的特点,可以实现海上作业区域内的广泛覆盖。与此同时,无线 Mesh 自组网通过分布式节

点布局,形成了灵活、可靠的网络拓扑结构,能够在海上作业现场提供稳定、高效的通信服务。通过这种结合方式,海上作业人员可以实时传输大量数据,包括视频、声音和位置信息,确保在海缆作业过程中的安全与高效。此外,该系统还能实现海上作业现场与陆地指挥中心的无缝对接,为作业人员提供及时的决策支持,提高海上作业的可靠性和安全性。因此,本文在“空天地海”一体化架构的基础上将双模卫星通信和无线 Mesh 自组网相结合,提出改进的混合无线 Mesh 协议路由算法,以期能为海上海缆作业提供高效可靠的通信网络。

## 1 “空天地海”一体化通信网络

“空天地海”一体化通信网络<sup>[11-12]</sup>架构是将天基卫星、空基平台、陆基基站和海基平台融合为一体的多层次、异构的通信网络体系,通过数据基准、协同感知、智能化处理等技术,可以实现全球覆盖、多平台协同和高效应急响应,为海上搜救、海洋监测、海缆作业等领域提供可靠、稳定、低时延的通信服务,是构建海洋强国的重要基础设施。

天基卫星星座覆盖全球,提供基础通信服务;空基平台如飞机和无人机进行空中中继和扩展通信范围;陆基基站位于海岸或岛屿,为近岸区域提供通信保障;海基平台如船舶和浮标,在海上突发情况下快速建立通信链路。整个网络通过互联和协同,实现了信息高效传输,为海上通信提供有力支撑。“空天地海”一体化通信网络架构如图 1 所示。

### 1.1 太空网络

太空网络由地球静止轨道、中地球轨道和近地轨道卫星组成。地球静止轨道卫星主要用于电视广播、国际电报和微波通信等领域。中地球轨道和近地轨道卫星则更接近地面,能够拍摄高分辨率图像,常用于地形勘测、资源探测和气象监测。太空网络通信的主要优势在于广泛的覆盖范围和高速数据传输能力。通过地球静止轨道卫星,卫星通信能够覆盖全球,为海洋、空中和地面用户提供无缝的信息传输服务。此外,卫星通信还能与地面和海洋通信网络相互协同,实现全球范围的实时信息传递。同时,卫星通信与海洋通信网络配合,为海缆作业提供稳定的通信服务,以保障作业安全。

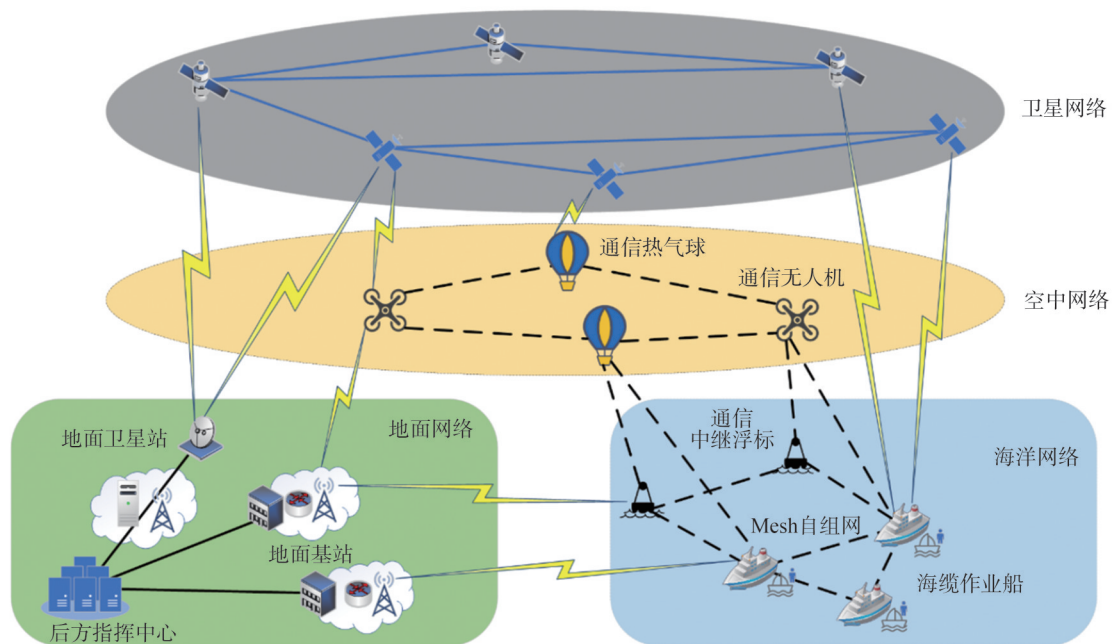


图1 “空天地海”一体化通信网络架构

Fig.1 Space-air-ground-ocean integrated communication network architecture

## 1.2 航空网络

航空网络由飞机、无人机、飞艇和高空平台等组成,可提供飞机与地面站、飞机与海洋网络之间的数据自动路由,并可与卫星交换数据信息。

由于无人机通信平台靠近海面,具有响应时间短、吞吐量高、视距传输可靠性高、机动性和灵活性高等特点。因此,可以使用多架无人机组成空中子网,以协助海缆作业船传输作业信息,将海缆作业面气象、海洋洋流等要素及各作业画面传输到后方指挥中心。

## 1.3 地面网络

地面网络主要由蜂窝网络、地面互联网和移动自组织网络组成。与航空网络相比,其拓扑相对固定,可以为用户提供高数据传输速率和高吞吐量。然而,该网络的覆盖范围有限,难以覆盖某些地区,如极地、偏远山区和深海地区。此外,地面网络容易受自然灾害和人为基础设施破坏的影响,因此仅依靠地面网络无法满足未来日益增长的高质量服务需求。

## 1.4 海洋网络

海洋通信由两个部分组成,即水面网络和水下网络。水面网络包括船舶、浮标和无人水面舰艇。

这些节点位于海洋表面,具备通信能力,可以充当提供边缘服务的通信节点。在海上通信中,船舶充当信息收集节点,从漂浮在海面上并部署在海底的传感器中收集有用的数据并预处理。作为通信终端,船舶可以通过海岸基站、无人机或卫星连接到互联网。

水下网络主要包括水下观测网络和水下自组织网络两种类型。水下观测网络通过部署光纤和海底光缆来实现通信,水下自组织网络由自主水下航行器、遥控航行器、无人水下航行器等固定和可移动传感器节点构成。

## 2 双模卫星与Mesh自组网的融合应用

### 2.1 卫星通信技术

卫星通信系统是一种利用人造地球卫星作为中继站的微波通信技术,用于在多个地面站之间传输无线信号。卫星通信领域涵盖了多种形式的卫星系统,包括传统卫星小数据站(very small aperture terminal, VSAT)、高通量卫星、北斗导航卫星和天通卫星等,它们各自发挥着不同的作用,共同构建了一个全面的卫星通信网络。传统VSAT系统是一种适用于小型站点的卫星通信技术,能够支持数据、语音

和视频传输,并且由于其成本相对较低,在小型用户中具有较高的成本效益;高通量卫星利用多点波束技术和频率复用技术,提供了比传统卫星高数十倍甚至上百倍的容量,特别适合为偏远地区提供宽带互联网接入,从而补充地面通信网络;北斗导航卫星不仅提供定位、导航和授时服务,部分卫星还具备报文通信功能,这使得北斗系统在应急通信和位置报告等领域有广泛的应用;天通卫星移动通信系统主要为国内用户提供语音、数据和短信服务,其覆盖范围补充了地面移动通信网络的不足。

卫星通信有以下优点。1)广覆盖范围:卫星通信能够覆盖偏远地区、海洋、高空等地面通信难以覆盖的区域,为用户提供稳定的通信服务。2)高传输速率:卫星通信满足各类用户对高速数据传输的需求,尤其在需要大量数据传输的应用场景中,具有明显的优势。3)灵活的建站和组网:卫星通信站点建设不受地理位置限制,通信终端可以被飞机、船只等载体搭载,根据用户需求可快速部署和调整,以满足不断变化的通信需求。

## 2.2 无线 Mesh 自组网技术

无线 Mesh 自组网采用点到点或点到多点的拓扑结构<sup>[13-14]</sup>,能提供多条冗余通信路径。在海洋通信中,无线 Mesh 自组网具有以下优势。1)灵活的组网方式:无线 Mesh 网络支持平面结构、分层结构和混合结构等多种组网模式,适用于各种拓扑结构,符合海上海缆作业的实际需求。2)广覆盖范围:通过无线多跳方式,海上作业船即使不在基站接入点的覆盖范围内,也可以通过其他节点以无线多跳方式接入目标网络。3)较强的稳定性:Mesh 网络不需要建立大型基站或发射塔,并具备自我修复功能,即使个别通信设备发生故障,整个系统的通信不会受阻。

## 2.3 双模卫星与无线 Mesh 自组网的组网方案

结合卫星通信技术和无线 Mesh 自组网的特性,可以为海上的海缆作业区域提供一个全面覆盖的无线网络。这种集成方式不但可以借助卫星通信来拓展通信的覆盖面,还能充分利用无线 Mesh 自组网的优点,确保海上作业的安全与顺利进行<sup>[15]</sup>。

海上作业通信网络如图 2 所示。在该组网方案中,海上海缆作业通信网络由后方指挥中心、双模卫星收发机、无线 Mesh 自组网、长期演进(long term evolution, LTE)基站以及海缆作业船上的终端设备

组成。后方指挥中心作为数据管理和指令下达的核心,通过公网和专网卫星与双模卫星收发机连接。双模卫星收发机是连接后方指挥中心和海上作业的关键桥梁,同时支持公网和专网卫星通信,确保了通信的灵活性和可靠性。LTE 基站和无线 Mesh 自组网结合以增强公网的稳定性和覆盖范围。使用公网时,海缆作业船上的终端设备与船上的 LTE 基站连接;使用专网时,终端设备可以直接接入无线 Mesh 自组网。通过多层次的连接和备份,确保海上通信的连续性和稳定性。

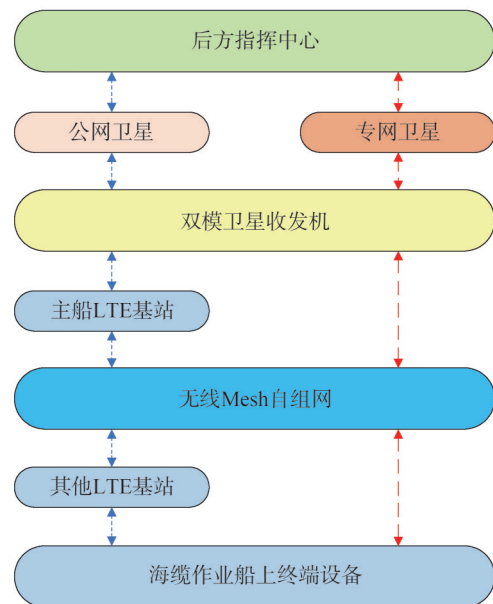


图 2 海上作业通信网络

Fig.2 Maritime operation communication network

在此基础上可以得出完整的网络架构:

1)通信无人机和热气球作为 Mesh 自组网的空中接力部分,与海缆作业船以及中继浮标构成完整的路由网络,将数据传输到海缆作业主船。

2)海缆作业船作为接入节点收集现场的气象、人体生命体征等各种数据,通过多跳组网主船作为汇聚节点收集来自其他作业船的数据,再通过双模卫星收发机将数据传输到卫星。

3)卫星负责将数据实时传输回后方指挥中心。

### 2.3.1 卫星互联网回传

卫星互联网回传系统主要由运营商核心网、亚太 6D 和海缆作业船组成。海缆作业船上的双模卫

星天线中配置了公网调制解调器,船上设备可以通过船上的LTE基站无线接入公网。

在数据回传方面,主要使用卫星、LTE基站和Mesh网络共同为海缆船上的布控球提供运营商信号。布控球可以直接通过回传链路将信息传输到作业风险安全管控平台,此外,布控球内嵌有4G/5G运营商专网SIM卡,在远离陆地的施工环境中,卫星互联网回传技术可以保障通信的实现。这种设计方案充分考虑了海上作业环境的挑战和通信可靠性需求,通过多层次的连接和冗余措施,确保了通信的连续性和稳定性。卫星互联网回传通信架构如图3所示。

### 2.3.2 卫星专网回传

卫星专网数据回传系统中海缆作业船配备了

Mesh自组网模块、双模卫星天线和便携式融合调度一体机,这些设备共同为专网数据传输服务。所有这些设备都通过中星6D卫星与位于后方的融合通信指挥平台相连并实现数据的远程传输。

在前端数据采集方面,海缆作业船上的设备如安全帽、布控球和行为记录仪负责收集信息。网络覆盖则由Mesh自组网模块确保,以提供海上作业区域的稳定网络连接。便携式融合调度一体机连接专网调制解调器和Mesh自组网模块。当公网数据回传出现问题或带宽不够时,通过卫星专网将数据从海上作业现场传输到后方的指挥中心,确保整个海缆作业过程的安全性和效率。卫星专网回传通信架构如图4所示。

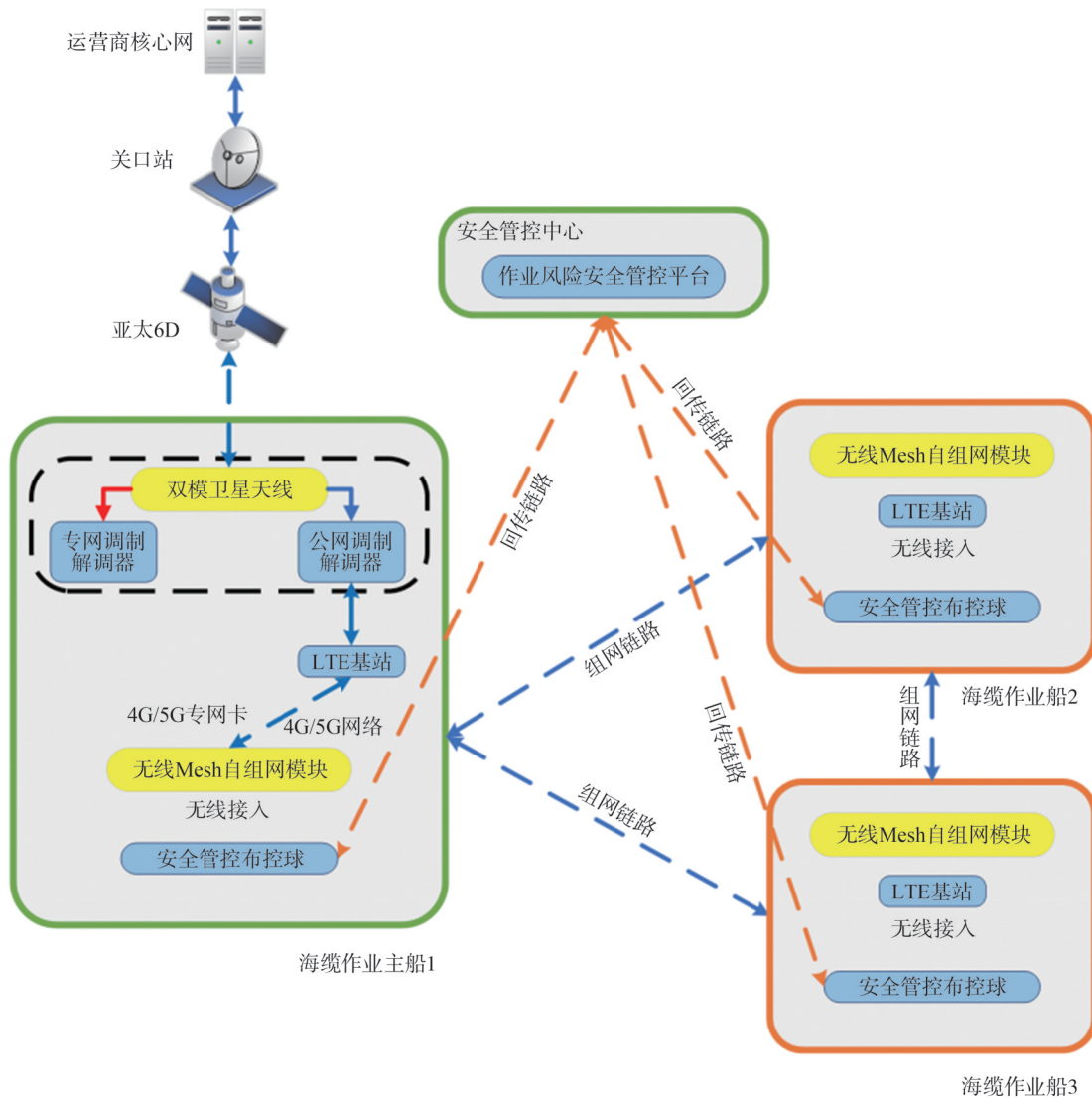


图3 卫星互联网回传通信架构

Fig.3 Backhaul communication architecture for Satellite Internet

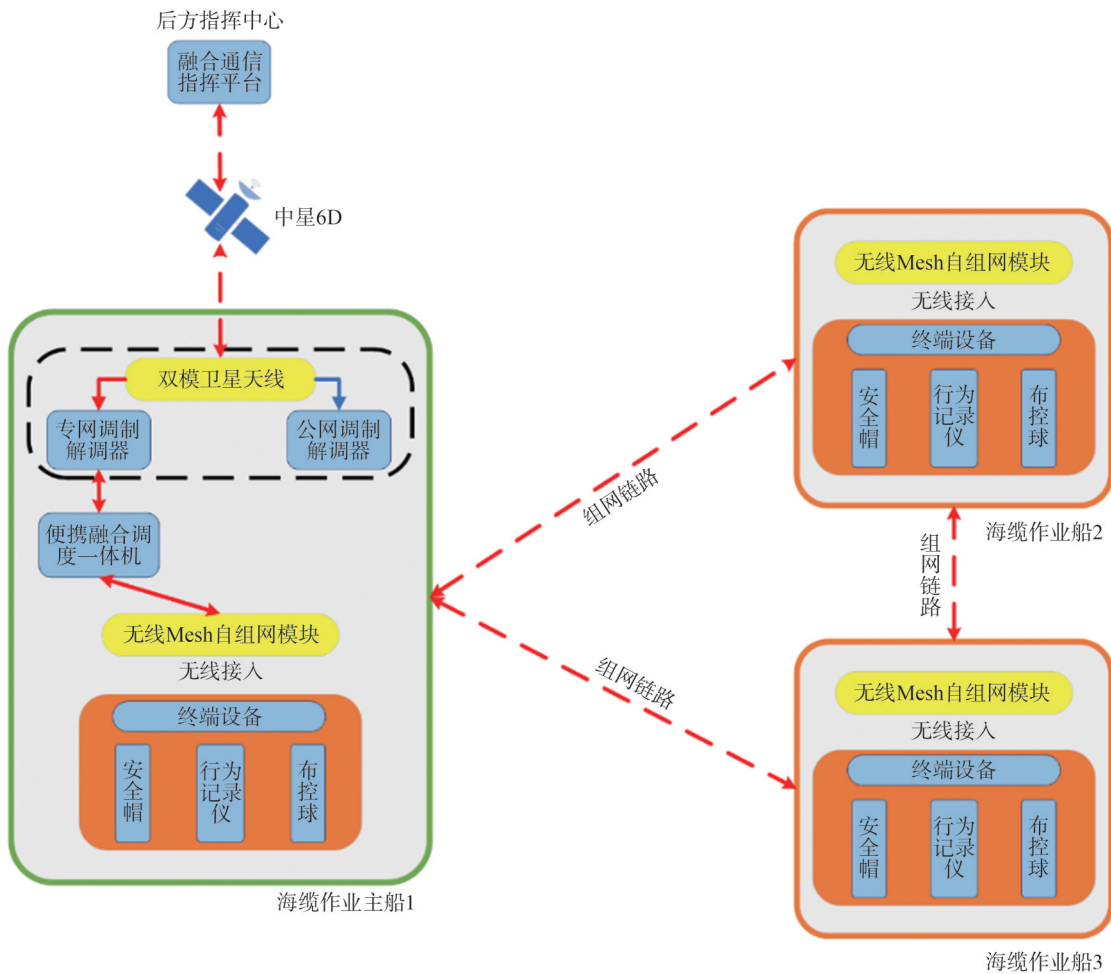


图4 卫星专网回传通信架构

Fig.4 Backhaul communication architecture for satellite private network

### 3 改进的HWMP协议

#### 3.1 HWMP协议

混合无线Mesh协议(hybrid wireless Mesh protocol, HWMP)是一种混合式路由协议,可同时采用主动式和按需式两种路由模式传输数据。根据不同的网络场景,可灵活选择通信方式,更符合Mesh网络的要求。

在主动式树状路由<sup>[16]</sup>模式下,首先配置一个节点作为树状路由的根节点。其他Mesh节点与根节点建立路径,根节点的路由表记录了每个节点的路径信息。当需要发送数据时,数据包通过树路径传递到根节点,然后根据路由表信息,根节点将数据包发送到目的节点。

在按需式模式<sup>[17]</sup>下,源节点无须将数据发送到根节点。其通过向网络内其他节点发送路径请求消

息,收到目的节点的路径回复消息后,直接建立通信路径。这种方式无须经过根节点,通过比较多个收到路径回复消息的路径,选择性能最优的路径进行通信。路由选择基于Metric(空口传输时间)<sup>[18]</sup>大小来决定,Metric受到链路传输速率和丢包率的影响,更合理地反映链路质量。具体的计算公式为

$$C_a = [O + \frac{B_i}{r}] \frac{1}{1 - \eta_{PER}} \quad (1)$$

式中: $C_a$ 为空口传输时间的数值; $O$ 为信道上的访问负载,即其他设备在同一信道上的活动; $B_i$ 为测试帧中包含的bit数,通常的大小被定为8 192; $r$ 为数据传输速率,Mbits/s,是链路的物理层属性; $\eta_{PER}$ 为标准大小 $B_i$ 的帧在以当前传输速率 $r$ 传输时由于传输错误而被破坏的概率, $\eta_{PER}$ 越小,说明链路质量越好。

HWMP中的按需路由模式源自无线自组网按需平面距离向量路由协议(ad hoc on-demand distance

vector routing, AODV)<sup>[19]</sup>,其中如报文格式和路由路径的发现机制等许多特性与AODV协议一致。路径请求(path request, PREQ)报文用于建立协议的反向路径,路径回复(path reply, PREP)报文用于建立协议的正向路径,根节点通告(root announcement, RANN)报文用于通知路径信息,路径错误(path error, PERR)报文用于通告路径错误信息。

### 3.2 按需路由协议的路由判据

虽然Metric通常选择MAC层的一些参数作为路由判据,但这些参数通常忽略了链路质量、拥塞、负载和其他节点干扰等因素,不能全面衡量网络状况。在复杂多变的无线信道环境中,这可能导致无法获得最优路径,从而无法最大程度优化网络性能。因此,需要研究新的路径选择标准,综合考虑多方面因素,并提取更多参数,以提供信道质量判别,有助于选择链路质量稳定、时延较小、重传需求最小的路径,从而避免网络拥塞。

#### 3.2.1 期望传输数量

文献[20]提出了一种用于无线网络的路径选择度量,称为期望传输次数度量(expected transmission count, ETX)。ETX是一种用于选择高吞吐量路径的度量,通过计算路径上所有链路的ETX值之和,并选择具有最小度量值的路径进行数据传输。ETX通过考虑无线链路的不对称性,使用跨层方法来指导数据传输,并通过重传次数来捕获链路状态。其数学表达式为

$$\omega_{\text{ETX}} = \frac{1}{d_f \times d_r} \quad (2)$$

式中: $\omega_{\text{ETX}}$ 为期望传输数量的数值; $d_f$ 为正向传输率,指在一定时间窗口内,从一个网状路由器成功发送到另一个网状路由器的探测包数量与该时间窗口内发送的总探测包数量的比值; $d_r$ 为反向传输率,指在相同时间窗口内,一个网状路由器接收到的来自另一个网状路由器的探测包数量与该时间窗口内应接收的总探测包数量的比值。

#### 3.2.2 时延

此路由判据主要用于评估端到端时延,以满足实时应用的QoS要求。文献[21]中使用M/M/1/K队列模型来模拟网络节点,考虑数据包到达率、服务率、链路容量和碰撞概率等因素,计算端到端时延D。具体计算公式为

$$D = D_i + T \quad (3)$$

式中: $D_i$ 为从MAC层接收数据包到确认字符(acknowledge character, ACK)帧接收的延迟; $T$ 为数据包进入队列到传递给MAC层的时间间隔。

经过对现有无线Mesh网络的路由判据进行总结和分析后,发现这些判据都存在一定的局限性和不足之处。为了解决这些问题,本文将综合考虑网络的负载、处理能力以及干扰等方面,设计一种新型的路由判据,以更好地适应海上Mesh组网应用场景。

#### 3.2.3 新路径选择判据构成

在海上Mesh组网应用场景中,路由判据是决定路由建立和选择的标准,旨在建立和选择最优路径。然而,当网络中传输的数据量超过节点所能承载的最大流量时,就会出现网络拥塞和链路干扰问题,严重影响网络性能。此外,传统的路由判据存在一些局限性,例如网络节点性能的估计不足;某些链路可能被频繁使用,而其他链路却被闲置,导致资源分配不均衡。传统的路由判据可能无法准确估计链路的质量,从而影响数据传输的可靠性和效率。

为了解决这些问题,考虑了各方面的参数值,提出了一种新型的综合判据 $C_N$ ,其中 $N=1$ 表示路径更新过程中PREP帧的新路径开销, $N=2$ 表示路由表中原路径开销,具体表达式为

$$C_N = \alpha F_{C_s} + \beta F_{\text{ETX}} + \gamma F_D \quad (4)$$

式中: $F_{C_s}$ 为归一化后原HWMP协议中的空时判据; $F_{\text{ETX}}$ 为归一化后的ETX路由判据,倾向选择具有更优链路质量的路径; $F_D$ 为归一化后的D路由判据,体现了周边节点对整体端到端时延的影响; $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 分别为 $F_{C_s}$ 、 $F_{\text{ETX}}$ 、 $F_D$ 在综合路由判据 $C_N$ 中所占的比重,满足 $0 \leq \alpha, \beta, \gamma \leq 1$ 且 $\alpha + \beta + \gamma = 1$ 。根据不同的海上业务对通信质量的需求,设置具体的 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 值,例如需求低时延的实时数据传输可以适当提高 $\gamma$ ,从而满足对低时延数据传输的需求。

### 3.3 HWMP多路径路由方案

在海上Mesh组网中,尽管单路径路由具有过程快捷、操作简单和占用内存较小等优点,但在节点频繁移动的Mesh网络中,传输路径的不断变化导致数据丢失率较高,且随着传输数据量的增加,网络带宽资源无法满足通信需求。

在单路径路由中,当部分节点无法正常传输时,

需要重新进行路由发现并构建新的路由路径。这会导致传输暂时中断并增加数据传输时延,造成通信过程中的信息阻塞和丢失。此外,由于只有一条路径传输数据,当网络资源紧张时,单路径路由将无法平衡网络负载,从而导致路由性能下降。为了解决这些问题,多路径路由技术应运而生,允许在网络中同时存在多条路径,提高了可靠性和性能<sup>[22-23]</sup>。

文献[24]中提出的HWMP多路径路由方案中主要包括4个模块:路径发现模块、路径维护模块、路径选择模块、路由自愈模块。

### 3.3.1 使用新判据的多路径路由方案

在原有路径方案的基础上,使用本文提出的新路径选择判据,以更好地满足海上 Mesh 组网场景的需求。首先需要从源节点到目的节点建立初始主动树式路由<sup>[25]</sup>。初始主动树式路由建立过程主要分为3步:1)根节点广播 RANN 帧,通知其他节点其存在;2)中间节点将自身地址写入 RANN 帧中;3)中间节点继续广播 RANN 帧至所有节点。

修改后的路由信息表中包含原有的信息项以及修改的信息项,其中  $C_N$  替代了原有信息项 Metric,原有信息项包括:目标节点 MAC 地址、目标节点序列号  $\phi_i$  (其中  $i$  的值用于区分路径更新过程中 PREP 帧的新路径源节点与路由表中原路径源节点)、首跳邻居节点 MAC 地址、下一跳 MAC 地址、帧队列长度 (queue length, QLEN)、路径过期时间 (expiration time, EXPTIME)、路由发现超过时间 (discovery timeout interval, DTIM)、发现重试数 (discovery retry count, DRET)、路径状态标识 Flags。同时 PREQ 和 PREP 帧也需要进行修改,和路由表相同,使用新路径判据  $C_N$  代替原有路径判据 Metric。

### 3.3.2 多路径路由更新算法

多路径路由协议的关键步骤包括初始多路径路由的建立以及后续路由信息的更新。通过收发新的消息帧在路由表中记录信息,从而建立初始的多路径路由,并通过新的多路径路由更新算法来实现路由信息的更新。后续将主要介绍 PREQ 信息帧建立的反向多径。

在反向多径路由更新的过程中,路径信息更新的主要依据是节点序列号  $\phi_i$  大小和路径开销  $C_N$ ,需要注意的是,当两船距离较远时可以使用无人机或者通信浮标作为中继节点,路径模型如图5所示。其中,S

为源节点,G为目的节点,A、B、C、E、F为中间节点。

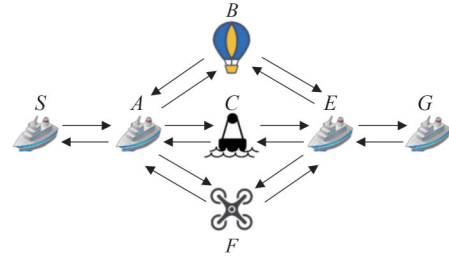


图5 多径拓扑更新示意图

Fig.5 Multi-path topology update diagram

以节点E为例,反向路径更新所需的信息有PREQ帧中的源节点序列号  $\phi_1$ 、节点路由表中的源节点序列号  $\phi_2$ ,路由表中的首跳节点A,下一跳节点B,PREQ的开销  $C_1$  和原路径开销  $C_2$ 。反向多径路由更新流程如图6所示。当中间节点为无人机、中继浮标或空中热气球这些特殊节点时,需要根据当前剩余能量判断能否继续作为路径中的中继节点。

当节点E收到新的PREQ帧时,它会比较收到的PREQ帧中的源节点序列号  $\phi_1$  与节点E当前维护的路径信息中的源节点序列号  $\phi_2$ 。如果节点E的维护路径信息中找不到  $\phi_2$ ,表示该节点不在任何现有路径中,需要为其创造一条新路径。

当节点E找到维护的路径信息中的  $\phi_2$  时:

1)若  $\phi_1 > \phi_2$ ,表示PREQ帧中的路径是新路径。节点E清除路由表中原有的信息,将  $\phi_2$  更新为  $\phi_1$ ,并添加一条新路径,从目的节点G到源节点S,下一跳节点为B,源节点的首跳节点设为A。

2)若  $\phi_1 < \phi_2$ ,表示PREQ帧中的路径是淘汰路径。节点E保持原有的路由信息不变。

3)若  $\phi_1 = \phi_2$ ,检查A是否为路由表中路径信息的源节点首跳节点。若源节点的首跳节点不为A,则添加一条源节点首跳节点为A、下一跳节点为B的路径信息。若源节点首跳节点为A,则比较路径开销,若  $C_1 \leq C_2$ ,说明新路径开销更小,更新路由信息;若  $C_1 > C_2$ ,维持原路径不变。

正向多径路由更新流程与反向多径路由更新流程类似,只需将PREQ帧替换为PREP帧,源节点序列号替换为目的节点序列号即可,因此不再赘述正向多径路由更新流程。

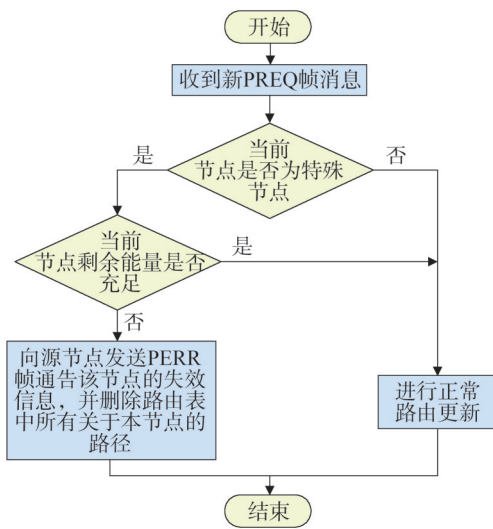


图6 反向多路径路由更新流程图

Fig.6 Reverse multi-path routing update flowchart

### 3.4 仿真与分析

采用NS2网络仿真器进行分析,主要在平均端到端时延、丢包率和网络吞吐量等方面进行比较。通过反复的仿真测试不同权值组合对网络性能的影响,并综合考虑各项业务所需性能后取定的权值为 $\alpha = 0.4, \beta = 0.3, \gamma = 0.3$ 。其他参数设置如表1所示。

表1 仿真环境参数表

Table 1 Simulation environment parameter table

| 参数名称           | 取值      |
|----------------|---------|
| MAC 类型         | 802.11b |
| 流量发生器类型        | CBR     |
| 仿真时间/s         | 50      |
| 数据包大小/B        | 1 024   |
| 通信范围/km        | 10      |
| 仿真场景范围/(km×km) | 30×30   |
| Mesh 节点数量      | 64      |

时延与 CBR 速率的关系如图 7 所示。由图 7 可知,多路径+新路由判据的 HWMP 协议在端到端时延方面具有很大的优势,当 CBR 速率大于 150 kbits/s 时,其端到端时延显著降低。由于该方案综合考虑了各节点的综合性能以及各节点之间的相互影响,

选择了最佳的发送路径,因此可以有效地减小网络的拥塞状况,减小通信时延。

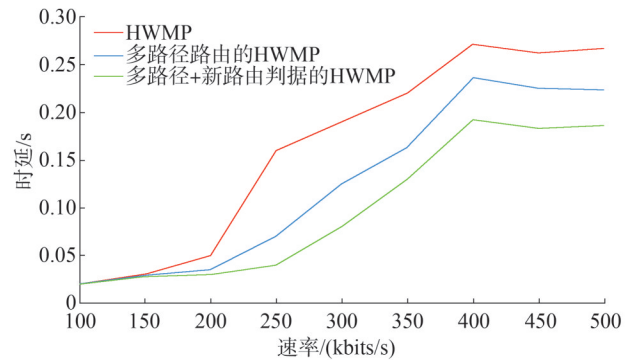


图7 时延与 CBR 速率的关系

Fig.7 Relationship between delay and CBR rate

丢包率与 CBR 速率的关系如图 8 所示。由图 8 可知,当 CBR 速率大于 150 kbits/s 时,多路径+新路由判据的 HWMP 协议具有更小的丢包率。这是由于新路由判据在数据传送路径的选择上具有优势,并且多路径路由方案节点的路由表中存有备用路径,两者结合可以有效地减少数据丢包率。

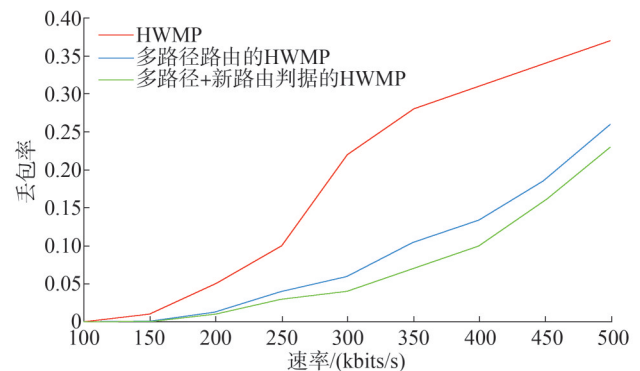


图8 丢包率与 CBR 速率的关系

Fig.8 Relationship between packet loss rate and CBR rate

吞吐量与 CBR 速率的关系如图 9 所示。由图 9 可知,当 CBR 速率大于 150 kbits/s 时,多路径+新路由判据的 HWMP 协议的网络吞吐量得到了明显的改善。这主要是因为随着数据传输率的提高,网络的负荷与干扰也随之增大,使得 HWMP 协议的吞吐量提升缓慢。而多路径路由方案和新路由判据考虑了网络的总体性能,从而使网络的吞吐量稳定地提高。

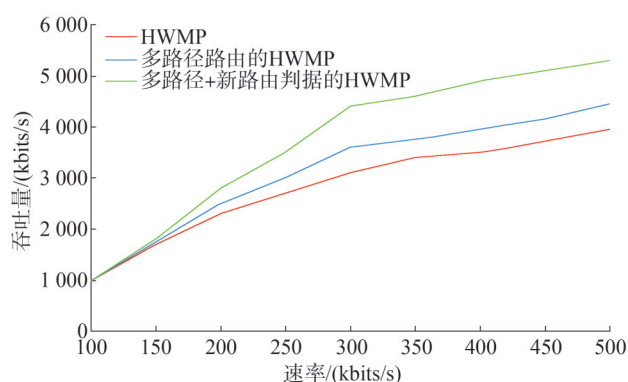


图9 吞吐量与CBR速率的关系

Fig.9 Relationship between throughput and CBR rate

#### 4 结束语

提出了一种“空天地海”一体化通信网络架构,该架构通过将双模卫星通信与无线 Mesh 自组网相结合,改变 HWMP 中的路由判据,并结合多路径路由算法,实现了业务数据的高效传输。仿真结果表明,改进后的 HWMP 协议在不显著增加开销的情况下,有效提升了 Mesh 网络的吞吐量,同时也较大幅度降低了丢包率。这一方案不仅为海缆作业场所提供了全方位的无线网络覆盖,确保海上作业人员的通信可靠性,还为作业船只和陆地指挥中心之间建立了高效可靠的无线通信联系,有效提升了海上作业的效率 and 安全性。

#### 参考文献

- [1] 刘毅. 移动通信领域中大数据分析的应用研究[J]. 通讯世界, 2024, 31(5): 154-156.  
LIU Yi. Research on the application of big data analysis in mobile communication field[J]. Telecom World, 2024, 31(5): 154-156.
- [2] WANG H X, LIU T T, KIM B, et al. Architectural design alternatives based on cloud / edge / fog computing for connected vehicles [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2020, 22(4): 2349-2377.
- [3] 张林丛, 桂洁森. 通信领域的人工智能技术应用[J]. 信息记录材料, 2024, 25(5): 166-168.  
ZHANG Lincong, GUI Jiemiao. Application of artificial intelligence technology in communication field [J]. Information Recording Materials, 2024, 25(5): 166-168.
- [4] 安建平, 李建国, 于季弘, 等. 空天通信网络关键技术综述[J]. 电子学报, 2022, 50(2): 470-479.  
AN Jianping, LI Jianguo, YU Jihong, et al. Key technologies of space-air-ground communication networks: a survey [J]. Acta Electronica Sinica, 2022, 50(2): 470-479.
- [5] PANG Y, WANG D S, WANG D D, et al. A space-air-ground integrated network assisted maritime communication network based on mobile edge computing [C] // 2020 IEEE World Congress on Services (SERVICES). IEEE, 2020: 269-274.
- [6] KODHELI O, LAGUNAS E, MATURO N, et al. Satellite communications in the new space era: a survey and future challenges [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2021, 23(1): 70-109.
- [7] 陈浩, 郭佳妮, 宋姗姗, 等. 基于随机接入的空天地海一体化网络性能分析[J]. 移动通信, 2022, 46(10): 35-40.  
CHEN Hao, GUOJIA Ni, SONG Shanshan, et al. Performance analysis of space-air-ground-sea integrated network based on random access [J]. Mobile Communications, 2022, 46(10): 35-40.
- [8] 管莹莹, 宋静, 宋清洋, 等. 空天地海一体化网络切片研究综述 [J]. 移动通信, 2022, 46(10): 20-25.  
GUAN Yingying, SONG Jing, SONG Qingyang, et al. Space-air-ground-sea integrated network slicing: a survey [J]. Mobile Communications, 2022, 46(10): 20-25.
- [9] 袁基炜, 侯请, 马芳, 等. 卫星通信在我国海洋业务中的应用分析 [J]. 中国卫通, 2023(6): 290-296. YUAN Jiwei, HOU Qing, MA Fang, et al. Application analysis of satellite communication in China's marine industries [J]. China Satcom, 2023(6): 290-296.
- [10] 刘智鑫, 胡向晖, 胡柳静, 等. 卫星通信与 5G 融合应用浅析 [J]. 通信学报, 2023, 44(5): 1-10. LIU Zhixin, HU Xianghui, HU Liuqing, et al. Analysis of the integration application of satellite communication and 5G [J]. Journal of Communications, 2023, 44(5): 1-10.
- [11] 林彬, 张治强, 韩晓玲, 等. “空天地海”一体化的海上应急通信网络技术综述 [J]. 移动通信, 2020, 44(9): 19-26.  
LIN Bin, ZHANG Zhiqiang, HAN Xiaoling, et al. Key technologies for space-air-ground-ocean integrated networks towards maritime emergency: an overview [J]. Mobile Communications, 2020, 44(9): 19-26.
- [12] GUO H Z, LI J Y, LIU J J, et al. A survey on space-air-ground-sea integrated network security in 6G [J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2022, 24(1): 53-87.
- [13] 邓创. 基于无线自组网的电力应急现场指挥通信系统 [J]. 电力信息与通信技术, 2015, 13(5): 67-72.  
DENG Chuang. A power system emergency communication system based on MANET [J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2015, 13(5): 67-72.
- [14] 刘作学, 代健美. WiFi-Mesh 无线自组网系统关键技术综述 [J]. 装备学院学报, 2016, 27(2): 95-101.  
LIU Zuoxue, DAI Jianmei. Comprehensive study on key technologies of WiFi-mesh wireless network [J]. Journal of Equipment Academy, 2016, 27(2): 95-101.
- [15] 梁能. 卫星通信与无线 Mesh 自组网在海洋渔业中的融合应用 [J]. 长江信息通信, 2023, 36(12): 15-18.

- LIANG Neng. The integrated application of satellite communication and wireless mesh ad hoc networks in marine fisheries [J]. *Changjiang Information & Communications*, 2023, 36(12): 15-18.
- [16] ZHOU J Z, CHUNG Y C. Tree-turn routing: an efficient deadlock-free routing algorithm for irregular networks [J]. *The Journal of Supercomputing*, 2012, 59(2): 882-900.
- [17] SHENG M, LI J D, SHI Y. Relative degree adaptive flooding broadcast algorithm for ad hoc networks [J]. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2005, 51(2): 216-222.
- [18] SETH S, GANKOTIYA A, SINGH G, et al. Throughput analysis of HWMP routing protocol in wireless mesh networks [M] // DAS V V, VIJAYAKUMAR R, DEBNATH N C, et al, eds. *Communications in Computer and Information Science*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010: 482-484.
- [19] PERKINS C, BELDING-ROYER E, DAS S R. Ad hoc on-demand distance vector (AODV) routing [J]. *RFC*, 2003, 3561: 1-37.
- [20] NARAGUND J G, BANAKAR R M. Analysis of HWMP-ETX routing in wireless mesh networks [C] // 2013 2nd International Conference on Advanced Computing, Networking and Security. IEEE, 2013: 208-213.
- [21] BEN-OTHMAN J, MOKDAD L, CHEIKH M O. Q-HWMP: improving end-to-end QoS for 802.11s based mesh networks [C] // 2010 IEEE Global Telecommunications Conference GLOBECOM. IEEE, 2010: 1-6.
- [22] LIU Y X, DONG M X, OTA K, et al. ActiveTrust: secure and trustable routing in wireless sensor networks [J]. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 2016, 11(9): 2013-2027.
- [23] SINGH S, NIKOLOVSKI S, CHAKRABARTI P. GWLBC: gray wolf optimization based load balanced clustering for sustainable WSNs in smart city environment [J]. *Sensors: Basel, Switzerland*, 2022, 22(19): 7113.
- [24] 徐文. 基于HWMP路由的多路径和双路由协作机制设计研究 [D]. 济南: 山东大学, 2023.
- [25] NATARAJU A B, MAHESHAPPA H D, DEVKATTE A. Performance analysis of HWMP protocol for Wireless Mesh networks using NS3 [C] // 2016 IEEE Region 10 Conference (TENCON). IEEE, 2016: 1593-1598.

收稿日期: 2024-08-26

修回日期: 2024-12-11

作者简介:

隋 灿(1983), 通信作者(suican0622@126.com), 男, 高级工程师, 从事电力应急管理工作;

韩志骏(1979), 男, 高级工程师, 从事安全应急管理工作;

朱坤双(1984), 男, 高级工程师, 从事电力应急管理工作;

侯 炜(1987), 男, 高级工程师, 从事电力应急管理工作;

宫梓超(1987), 男, 工程师, 从事电力工程和应急管理工作。

(责任编辑 郑天茹)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2025.09.008

# 基于CBR指数与EoFgu的电力系统高隔离性以太网技术研究

江 淞, 贾 平\*, 李 沛, 汪大洋, 赵金城

(国网江苏省电力有限公司信息通信分公司, 江苏 南京 210000)

**摘要:**为保障电力通信系统的稳定性,研究提出基于灵活以太网(flexible ethernet, FlexE)/切片分组网(slicing packet network, SPN)装置的小颗粒切片和恒定比特率(constant bit rate, CBR)业务改进策略。该策略构建支持小颗粒技术的切片分组网框架,并设计保护倒换方法。同时为保障高隔离以太网对电力系统的适应性,对以太网的操作维护管理(operation administration and maintenance, OAM)配置流程进行优化。此外,为解决时钟抖动的问题,研究还提出基于改进直接数字式频率合成器的时钟恢复方法。实验分析表明,当字节数为200 B时,基于EoFgu-CBR的网络设备的时延为117  $\mu\text{s}$ ,低于其他厂家的设备。这说明提出的基于FlexE/SPN装置的小颗粒切片和CBR业务改进策略能有效保障电力系统通信的实时性。

**关键词:**灵活以太网;切片分组网;恒定比特率;细粒度单元;电力网络

中图分类号:TP393

文献标志码:A

文章编号:1007-9904(2025)09-0079-08

## Research on High Isolation Ethernet Technology in Power Systems Based on CBR Index and EoFgu

JIANG Song, JIA Ping\*, LI Pei, WANG Dayang, ZHAO Jincheng

(Information and communication branch, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

**Abstract:** To ensure the stability of the power communication system, the strategies for improving small granularity slicing and constant bit rate (CBR) business that based on flexible Ethernet (FlexE)/slicing packet network (SPN) devices are proposed. This strategy establishes a framework for slicing packet network that supports small granularity slicing together with a protection switching approach. At the same time, in order to ensure the adaptability of high-isolation Ethernet for the power systems, the Operation Administration and Maintenance (OAM) configuration process for Ethernet is optimized. Furthermore, to address the issue of clock jitter, a clock recovery method based on the improved direct digital frequency synthesizer is proposed. Experimental analysis shows that when the byte size is 200 B, the latency of network devices based on EoFgu-CBR is 117  $\mu\text{s}$ , which is lower than that of devices from other manufacturers. This indicates that the proposed strategy for small granularity slicing and CBR business based on FlexE/SPN devices can effectively guarantee the real-time performance of power system communications.

**Keywords:** flexible ethernet; slice grouping network; constant bit rate; fine-grained unit; electric power network

## 0 引言

切片分组网(slicing packet network, SPN)作为一种重要的传送网技术,通过对网络资源的有效配

置可以大幅提升网络的利用率<sup>[1]</sup>。随着5G网络服务的扩大,进一步增加了不同业务对网络的可靠性和带宽需求。SPN在继承分组传送网(packet transport network, PTN)传输方案的基础上增加了标签数据层(tag data model, TDM),从而提高网络切片的低时延性<sup>[2]</sup>。灵活以太网(flexible ethernet, FlexE)是SPN的关键技术之一,用于实现业务隔离与网络切片之间的互通<sup>[3]</sup>。而在电力通信网络中,其接口主要承载恒定比特率(constant bit rate, CBR)

**基金项目:**国网江苏省电力有限公司科技项目“FlexE组网互通方案和关键技术研究”(J2023040)。

Science and Technology Project of State Grid Jiangsu Electric Power Company “Research on FlexE Network Interconnection Scheme and Key Technologies for Power Communication”(J2023040)。

客户信号。但由于目前传统的电力生产网中设备更新较慢,同步数字体系网络难以实现扩容升级,导致通信系统存在时延和抖动性大等问题<sup>[4]</sup>。卓兰等人针对以太网抖动较大的问题,提出了基于时钟容错同步和数据容错传输的以太网网络协议,该协议通过定义新型数据封装和路由转发技术实现了时钟的高精度同步,并通过多路径传输技术有效提高了网络的可靠性<sup>[5]</sup>。周飞飞等人针对变电站信息控制实时性与流量增长矛盾的问题,提出了基于时间敏感网络的二层以太网技术。该技术引入了时隙窗口独占和共享的思想,并在传输通道中采用了帧抢占机制,实验结果显示,该技术能有效降低信息传输的时延<sup>[6]</sup>。承载在细粒度单元(fine granularity unit, FGU)小颗粒通道上的CBR业务可以改善原有通信业务的不足,同时能够满足5G垂直行业中对小带宽业务的需求。此外,由于电路数据在FlexE中以IP包的形式进行传输,导致其时延会发生改变,进而提高了接收端的时钟恢复难度。而直接数字式频率合成器(direct digital synthesizer, DDS)能把一系列数字量形式的信号通过数/模转换器转换成模拟量形式的信号,进而降低时钟恢复过程中的时钟偏移。

因此,为降低电力通信的时延,在FlexE/SPN网络设备基础上对CBR技术进行创新性探讨,分析FGU小颗粒刚性管道TDM承载,并改进其时钟恢复技术。同时,对电力系统高隔离性以太网的操作维护管理(operation administration and maintenance, OAM)配置及其保护倒换方法进行了研究,以提高以太网的可靠性和稳定性。在研究提出的SPN构架中, FlexE通过硬件功能模块建立软件下发配置,并建立业务数据传输通道和主备用路径,同时通过硬件对警告信息进行采集,以实现保护倒转。而改进DDS则会根据码流速度自动调节脉冲计数,继而实现降低时钟抖动的目的。此外,为进一步提高带宽利用率,创新性地提出细粒度单元电力通信(electric power communication of fine granularity unit, EoFgu)方案。所谓EoFgu是指一种面向电力通信的FGU技术,其在SPN通道层和OAM技术的优势上利用帧间隙的空闲资源并将信息随业务码块发送,进而达到提高宽带利用率的目的。

## 1 电力系统高隔离性以太网设计及配置

### 1.1 SPN框架构建及保护倒换设计

SPN在融合了分组、承载、光层等多种技术,是一种基于以太网内核的承载网络架构<sup>[7]</sup>。SPN分为切片分组层、切片通道层和切片传送层,其中切片通道层可以实现以太网物理接口和FlexE绑定组的时隙化处理。在FlexE/SPN装置的基础上对承载SPN小颗粒技术(FGU技术)的CBR业务进行研究。图1为承载了FGU技术和CBR业务的SPN框架。

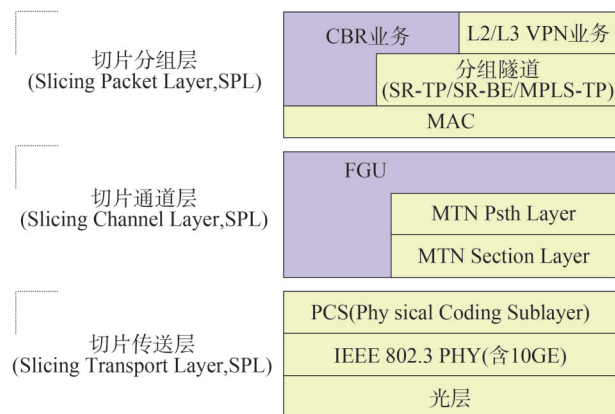


图1 支持小颗粒技术的SPN架构

Fig.1 The SPN architecture supporting the small granularity technology

由图1可知,SPN构架分为切片分组层、切片通道层和切片传送层。切片分组层负责实现对IP、以太、CBR业务的寻址转发和承载管道封装,提供L2VPN、L3VPN、CBR透传等多种业务类型。研究在原有FlexE/SPN技术的基础上通过层次化设计,将FGU与CBR技术进行应用于SPN架构中。在SPN设备软件模块中,主要分为管控维层、平台层和设备层。管控维层又分为命令提示符(command, CMD)和网关两部分,该层主要负责业务信息的输入<sup>[8-9]</sup>。在新建FlexE业务时,当FlexE业务盘插入设备后, CMD会自动生成相应的FlexE-phy配置,而若要删除该项配置,则需要拔出FlexE业务盘。在配置FlexE-Group时,为维护系统稳定,不同速率的FlexE-phy不能被配置在同一FlexE-Group中;若要删除该项设置,必须保证其下游的FlexE-client已被完全删除。此外,为充分发挥FlexE的优点,研究将

其保护类型设置为 1+1,其保护倒换处理过程如图 2 所示。

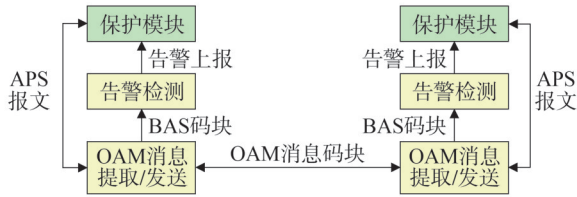


图 2 保护倒换处理过程

Fig.2 Protective reverse-switching processing process

由图 2 可知,若在 FlexE OAM 的提取周期中未能检测到相对应的 OAM 码块,此时就会产生相对应的告警。在 SPN 设备检测到有告警信息后,其会将告警上报至保护模块,保护模块收到信息后便会触发保护倒换,同时发送自动保护倒换 (automatic protection switching, APS) 报文至 OAM 消息提取/发送模块,并告知其向对端发送相应的保护动作。保护倒转功能的核心模块为 66b 模块,其内部分 4 类通道,每类通道分为 40 条子通道,这 40 条子通道具有阻断机制,用以实现保护倒换。

### 1.2 基于 TDM 机制的 FGU 复帧结构设计及配置

研究采用 TDM 机制,固定发送周期、时隙数量、时隙位置,独享带宽资源,实现端到端硬隔离<sup>[10-11]</sup>。同时,研究还采用复帧方式对 SPN 通道层 5G 切片以太网通道及 10GE 标准以太网接口进行时隙划分,实现带宽精细化灵活配置及高效利用。FGU 复帧示意图如图 3 所示。

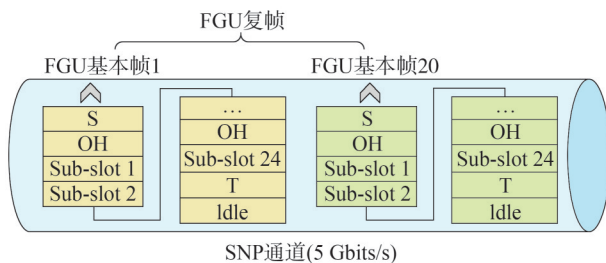


图 3 FGU 复帧示意图

Fig.3 Schematic diagram of the FGU complex frame

如图 3 所示,在一个 FGU 复帧中通常包括 20 个 FGU 基本帧,每个 FGU 基本帧支持 24 个 10 Mbits/s

时隙,由此可知支持小颗粒技术的 SPN 的 5 Gbits/s 通道总共可支持 480 个 10 Mbits/s 时隙。表 1 为研究的小颗粒 FGU 帧结构设计说明。

表 1 FGU 帧结构数据  
Table 1 FGU Frame Structure Data

| 基本单元            | 取值      |
|-----------------|---------|
| 封装              | SO+D+T7 |
| 帧长(66b)/bits    | 197     |
| 净荷长度/B          | 1560    |
| 开销/B            | 7       |
| 复帧数量(5 G/10 G)  | 20/40   |
| 每帧时隙数           | 24      |
| 每时隙长度(66b)/bits | 8       |
| 时隙总数(5 G/10 G)  | 480/960 |
| 时隙速率/(Mbits/s)  | 10      |
| 带宽利用率/%         | 96      |

表 1 中 FGU 的净荷长度为 1 560 B,开销为 7 B 每帧时隙数为 24,时隙速率为 10 Mbits/s,带宽利用率为 96%。为确定以太网链路的连通性,提出 EoFgu 方案,采用以太网 OAM 进行操作管理和维护。在 FGU 中通过复用 SPN 通道层的 OAM 机制提供端到端的连通性检测,主要技术为通过定时发送检测报文来探测网络的连通性<sup>[12-13]</sup>。EoFgu 在利用 SPN 通道层和 OAM 技术的优势上利用帧间隙的空闲资源并随业务码块发送,以提高带宽利用率,OAM 的配置处理流程如图 4 所示。

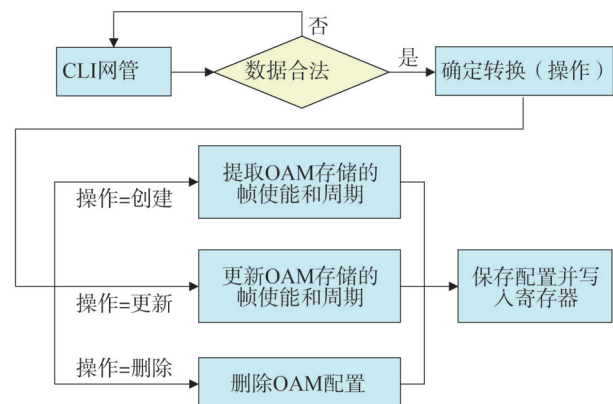


图 4 OAM 的配置处理流程

Fig.4 Configuration process of OAM

由图4可知,对于OAM数据来说,其若能通过数据合法性检验,则对其进行创建、更新和删除操作。若无法通过数据合法性检验,则由命令行(command line, CLI)网管对其进行重新配置。在对合法的OAM数据进行操作时,首次配置视为创建,后续操作均视为更新。在删除OAM配置时,所有的相关数据均会被初始化为0。各操作的配置均会被写入寄存器,以待生效。

### 1.3 基于改进DDS的CBR业务系统构建

通过上述方法虽然构建了一个CBR业务系统,但由于以太网对CBR业务的时钟抖动要求较高,而当前的时钟恢复方法可能会导致时钟漂移,降低服务质量。鉴于此,研究提出基于DDS的时钟恢复方法。DDS的输出频率如式(1)所示。

$$f_o = \frac{Kf_c}{2^N} \quad (1)$$

式中: $f_o$ 为输出频率; $K$ 为频率控制字; $f_c$ 为时钟频率; $N$ 为相位累加器的值。

由于DDS的输出频率取决于相位累加器的值,导致利用DDS进行时钟恢复存在一定误差,且输出的频带范围小<sup>[14-15]</sup>。因此,为了降低误差和能耗,并提高输出频带范围,研究利用数据流的缓存填充度来确定时钟,并利用小数分频来确定脉冲计数。周期分频比计算如式(2)所示。

$$\frac{P(Q-a) + (P+1)a}{Q} = P + \frac{a}{Q} = P + aQ^{-1} \quad (2)$$

式中: $P$ 为分频数; $Q$ 为周期数; $a$ 为分频次数。此时输出载波频率计算如式(3)所示。

$$f_1 = f_r(P + a \times Q - 1) \quad (3)$$

式中: $f_1$ 为输出载波频率; $f_r$ 为参考频率。只读存储器地址位数计算如式(4)所示。

$$L = \frac{3}{2}(W+t)(R+A) - \frac{1}{2}t(R-a) - \frac{1}{2}A \quad (4)$$

式中: $L$ 为只读存储器地址位数; $W$ 为最大抖动时延; $t$ 为时钟脉冲调整电路的反应时间; $R$ 为读取速度; $A$ 为最大存储值。

通过上述方法可以在FPGA中实现时钟恢复。值得注意的是,考虑到通信专网的时钟稳准度,研究将跟踪范围确定为 $-1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-4}$ 。通过上述方法即可实现CBR业务的时钟恢复,接着研究将据此构建CBR业务系统。CBR业务系统如图5所示。

由图5可知, CBR业务系统的网络节点接口(network node interface, NNI)侧采用若干10 Mbits/s硬管道,客户侧报文成帧模式分组转发,带宽可保证,时延较低。分组转发缓存机制引入抖动,业务隔离性和安全性不足,无法媲美纯物理线路传输<sup>[16-17]</sup>。为此,引入基于改进DDS的时钟恢复方法。在该系统中,源提供商边缘(provider edge, PE)节点的业务处理流程如下:以太网CBR接口(光模块或RJ45连接器)—物理层(physical layer, PHY)—xMII接口处理—64/66b编码—小颗粒映射—小颗粒复用到大颗粒—主控交换板卡的大颗粒交叉到小颗粒处理板—小颗粒从大颗粒解复用—小颗粒交叉—小颗粒复用到大颗粒—主控交换板卡的大颗粒交叉到NNI FlexE端口。宿PE节点的业务处理流程如下: NNI FlexE端口/主控交换板卡的大颗粒交叉到小颗粒处理板—从大颗粒解复用小颗粒—小颗粒交叉—小颗粒复用到大颗粒—主控交换板卡的大颗粒交叉到以太CBR业务处理板—从大颗粒解复用小颗粒—小颗粒时隙解映射—64/66b解码—xMII接口处理—PHY—以太网CBR接口(光模块或RJ45连接器)。同时,系统的SDT容器封装格式为:容器大小为62个66b块,1个开始(S0)码块、60个数据(D)码块和结束(T7)码块;带宽利用率约为 $60/63 \approx 95.2\%$ ,采用130个FGU承载一路GE带宽,可用带宽为1 250.47 Mbits/s,大于GE码流带宽1 250 Mbits/s<sup>[18-20]</sup>。值得注意的是,端到端业务全程TDM处理,不经过分组处理,业务路径上不存在队列调度和统计复用,每路以太业务独占硬件资源,业务间严格物理隔离。

## 2 异厂家FlexE/SPN网络设备测试方案

为测试改进后CBR业务的电力网络技术,首先对异厂家FlexE/SPN网络设备互通测试方法进行研究。在实验中使用研发完成的FlexE/SPN设备及数据网络分析仪,并使用标准以太网接口,互通的网络位置一般为NPE/PE节点,互连接口涉及业务、OAM、保护、服务质量(quality of service, QoS)和同步等方面的互通。接着利用以太网接口的正交幅度调制(quadrature amplitude modulation, QAM)功能和保护性能进行互通验证,异厂家FlexE/SPN、FlexE/SPN和路由器通过以太网接口互连。图6为FlexE/SPN异

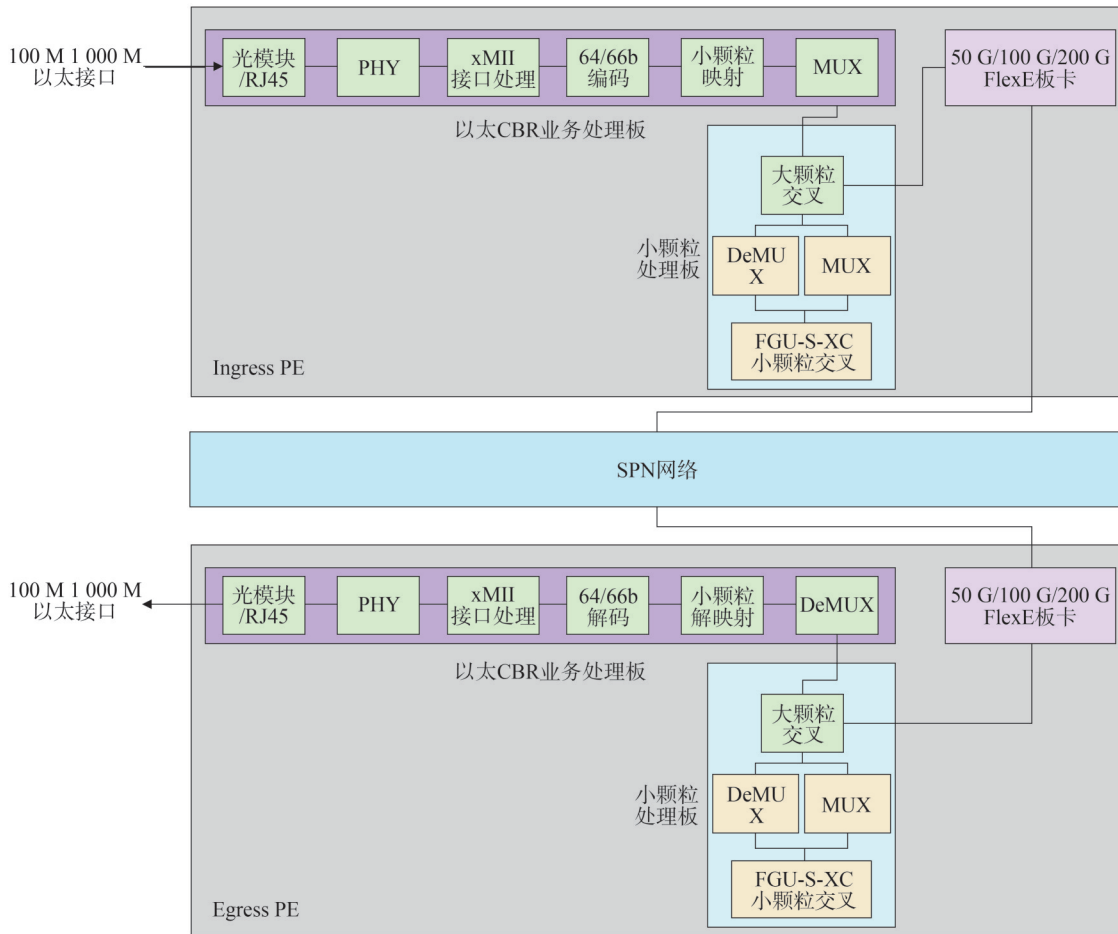


图5 CBR业务系统

Fig.5 CBR business system

厂家基于用户网络接口 (user network interface, UNI) 的网络互通测试组网。

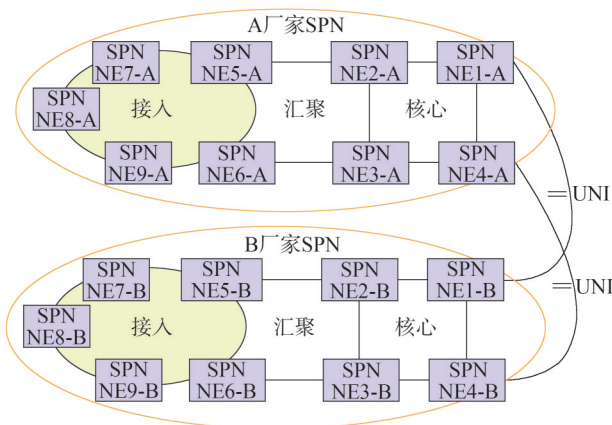


图6 UNI接口的网络互通测试组网

Fig.6 Network interworking test and networking of the UNI interface

实验中将以太网端口 1 和 2 作为 UNI 接口来接通数据网络分析仪,UNI 接口用于用户侧接入路由设备,数据网络分析仪中的 NNI 接口用作设备之间转发数据的接口。在实验中,将数据网络分析仪中 NE1 与 NE2,NE2 与 NE3 之间的端口作为 NNI 口,将数据网络分析仪与 NE1 和 NE3 的对接口作为 UNI 接口。

### 3 基于 EoFgu-CBR 的高隔离性以太网技术评估

在不同厂家 FlexE/SPN 网络设备互通测试中,选取不同厂家生产的网络设备作为对照,将其与研究提出的基于 EoFgu-CBR 的 FlexE/SPN 网络设备进行比较,并选用网络测试仪模拟和测试网络设备的性能。在实验中选择延时性指标来评估不同厂家的网络设备数据包在网络中传输的延迟时间,实验结果

如图7所示。

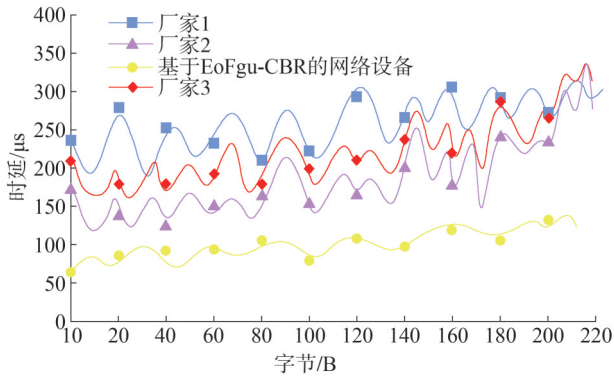


图7 不同厂家网络设备延迟性比较

Fig.7 Comparison of latency of network devices from different manufacturers

图7中随着数据包字节的增加3个厂家的网络设备时延同样呈上升趋势,其中在200 B以内厂家1的时延始终最长。当字节大小为10 B时,基于EoFgu-CBR的网络设备时延最短,仅为59 μs。从整体来看,基于EoFgu-CBR的网络设备的时延始终在150 μs以下。各厂家的误码率及丢包率如表2所示。

表2 误码率及丢包率测试结果

Table 2 Test results of bit error rate and packet loss rate

| 设备               | 误码率                    | 丢包率/% |
|------------------|------------------------|-------|
| 厂家1              | $4.72 \times 10^{-11}$ | 0.63  |
| 厂家2              | $2.41 \times 10^{-11}$ | 0.25  |
| 厂家3              | $2.92 \times 10^{-11}$ | 0.46  |
| 基于EoFgu-CBR的网络设备 | $1.52 \times 10^{-12}$ | 0.08  |

由表2可知,基于EoFgu-CBR的网络设备的丢包率和误码率均低于其他厂家的设备,仅为 $1.52 \times 10^{-12}$ 和0.08%。可见,相较于其他网络设备,该设备由于引入了基于改进DDS的时钟恢复方法,因此其授时精度更高,且由时延导致的误码率和丢包率更低。不同厂家的网络设备的保护倒换能力测试结果如图8所示。

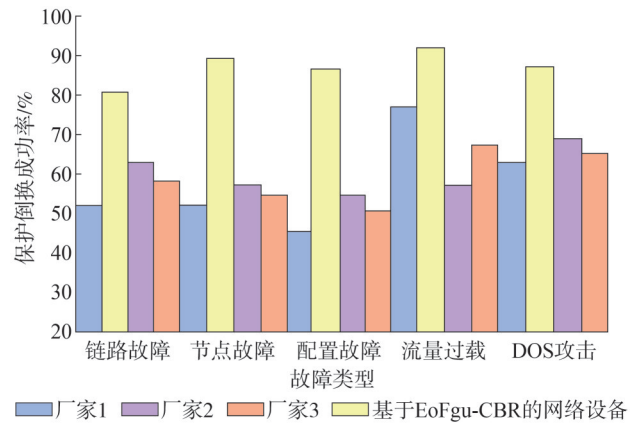


图8 不同厂家的网络设备的保护倒换能力

Fig.8 Protection switching ability of network equipment of different manufacturers

在图8显示的5个故障类型中,从横向来看,基于EoFgu-CBR的网络设备的保护倒换成功率始终最高,其中平均保护倒换成功率的故障类型为流量过载故障,其保护倒换成功率为91.3%,比节点故障、配置故障、拒绝服务(denial of service, DOS)攻击的成功率分别高出2.3%、5.7%、5.6%。为进一步分析基于EoFgu-CBR的高隔离性以太网技术的稳定性,研究对不同厂家网络设备的信号漂移进行测定,测定结果如图9所示。

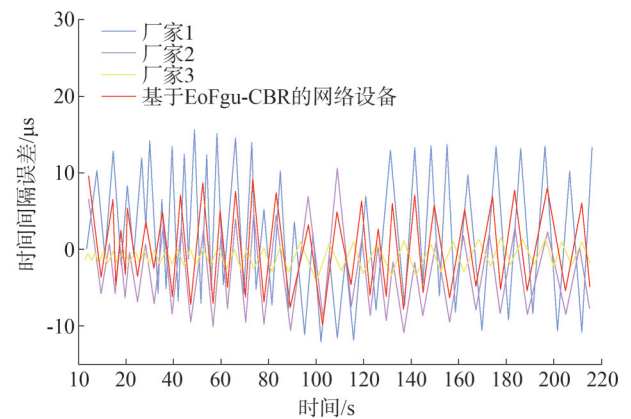


图9 不同厂家网络设备的信号漂移测试

Fig.9 Signal drift test of the network equipment of different manufacturers

图9为不同厂家的网络设备信号漂移测试结果。可以看出,基于EoFgu-CBR网络设备的时间间隔误差变幅为-4.5 ~1.2 μs。基于EoFgu-CBR网络

设备的时间间隔误差变幅随着时间的增加逐渐增加,但始终保持在  $5 \mu\text{s}$  的波动范围内,优于其他设备。综上,研究从网络设备的互通性、自动保护倒换能力、信号漂移出发对基于不同技术的异厂家 FlexE/SPN 网络设备进行测试,结果显示基于 EoFgu-CBR 技术的网络设备性能最佳。

#### 4 结束语

为增强 FlexE/SPN 技术在通信网络中的作用,研究基于 SPN 网络构架,对 CBR 技术进行改进,提出 EoFgu 方案,并提出了基于改进 DDS 的时钟恢复方法,以降低 FlexE/SPN 的丢包率及误码率。同时研究还对电力系统高隔离以太网的 OAM 配置及保护倒换方法进行了设计,以保障以太网的稳定性。研究对不同厂家的 FlexE/SPN 进行测试。经实验分析可知,在网络中传输的延迟时间比较中,当字节大小为 10 B 时,基于 EoFgu-CBR 的网络设备时延为  $59 \mu\text{s}$ ,较其他设备短。从整体来看,基于 EoFgu-CBR 的网络设备的实验始终在  $150 \mu\text{s}$  以下。在网络设备信号漂移测试中,基于 EoFgu-CBR 的温度变幅最小,为  $-4.5 \sim 1.2 \mu\text{s}$ 。综上可知,研究提出的基于 EoFgu-CBR 技术有利于增强 FlexE/SPN 网络设备的稳定性,降低延时性,实现以太网的高隔离性。研究不足之处为在故障分析中只考虑了 5 种较为常见的情况,后续可扩大不同故障类型的研究。

#### 参考文献

- [1] 蔡谦,李晗,张德朝,等.基于切片分组网(SPN)的彩光技术及组网方案[J].电信科学,2020,36(8):160-166.  
CAI Qian, LI Han, ZHANG Dechao, et al. Optical layer key technology and networking scheme based on SPN [J]. Telecommunications Science, 2020, 36(8): 160-166.
- [2] 尹远阳,林贵东,杨广铭,等.面向 5G STN 承载网络 FlexE 切片技术[J].电信科学,2021,37(7):126-133.  
YIN Yuanyang, LIN Guidong, YANG Guangming, et al. FlexE slicing technology for STN bearer network to 5G [J]. Telecommunications Science, 2021, 37(7): 126-133.
- [3] 汪霄祥,谢铖,丁金多,等.基于终端业务定位接入的调度数据网仿真模拟设备开发及应用[J].微型电脑应用,2022,38(11):171-173.  
Wang Xiaoxiang, Xie Cheng, Ding Jinduo, et al. Development and application of simulation equipment for dispatching data network based on terminal service location access [J]. Microcomputer Applications, 2022, 38(11): 171-173.
- [4] 马培勇,吴伟,张文强,等.5G 承载网关键技术及发展[J].电信科学,2020,36(9):122-130.  
MA Peiyong, WU Wei, ZHANG Wenqiang, et al. Key technologies and development of 5G bearer network [J]. Telecommunications Science, 2020, 36(9): 122-130.
- [5] 卓兰,王帅兵,王婷.一种基于时钟容错同步和数据容错传输的以太网网络协议[J].自动化与仪器仪表,2024(4):47-51.  
ZHUO Lan, WANG Shuaibing, WANG Ting. An Ethernet network protocol based on clock fault-tolerant synchronization and data fault-tolerant transmission [J]. Automation & Instrumentation, 2024(4): 47-51.
- [6] 周飞飞,何迎利,赵华,等.基于时间敏感网络的流量调度机制在智能变电站中的研究与实现[J].电力系统保护与控制,2021,49(19):107-114.  
ZHOU Feifei, HE Yingli, ZHAO Hua, et al. Research and realization of a traffic scheduling mechanism based on a time-sensitive network in a smart substation [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(19): 107-114.
- [7] 张森彦,田国会,张营,等.一种先验知识引导的基于二阶段渐进网络的自主抓取策略[J].机器人,2020,42(5):513-524.  
ZHANG Senyan, TIAN Guohui, ZHANG Ying, et al. An autonomous grasping strategy based on two-stage progressive network guided by prior knowledge [J]. Robot, 2020, 42(5): 513-524.
- [8] 张翠翠,卢锐轩,孙佳丽,等.基于时间窗口聚类的电力时序数据压缩研究[J].电子设计工程,2024,32(14):91-94,99.  
ZHANG Cuicui, LU Ruixuan, SUN Jiali, et al. Research on power time series data compression based on time window clustering [J]. Electronic Design Engineering, 2024, 32(14): 91-94, 99.
- [9] 华纬韬,殷俊杰,宋江,等.基于 FlexE 技术的电力数据通信网小颗粒切片调度机制研究[J].电力信息与通信技术,2023,21(6):59-65.  
HUA Weitao, YIN Junjie, SONG Jiang, et al. Research on fine granularity unit slicing schedule mechanism in power data communication network based on FlexE technology [J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2023, 21(6): 59-65.
- [10] 潘娟,王智慧,汪莞乔,等. FlexE 承载电力业务的应用架构及测试验证[J].电力信息与通信技术,2023,21(3):53-59.  
PAN Juan, WANG Zhihui, WANG Wanqiao, et al. FlexE application architecture and test validation for power business [J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2023, 21(3): 53-59.
- [11] 许密,梅增杨,蒋春霞,等.基于 FlexE 技术的电力数据通信网协同保护机制探索[J].电力信息与通信技术,2023,21(3):74-79.  
XU Mi, MEI Zengyang, JIANG Chunxia, et al. Research on cooperative protection mechanism of electric power data

- communication network based on FlexE technology [J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2023, 21(3): 74-79.
- [12] 李逸,吕建新,陈旭辉.基于FPGA的FlexE Shim层的设计与实现[J].网络新媒体技术,2023,12(2):55-61.  
LI Yi, LÜ Jianxin, CHEN Xuhui. Design and implementation of FPGA - based FlexE shim layer [J]. Network New Media Technology, 2023, 12(2): 55-61.
- [13] 李锴,岳磊磊.基于STN的网络建设方法研究[J].通信电源技术,2022,39(16):86-89.  
LI Kai, YUE Leilei. Research on STN-based network construction method [J]. Telecom Power Technology, 2022, 39(16): 86-89.
- [14] 戴小平,胡昱.基于MEC下沉的承载网解决方案分析[J].科学与信息化,2021(23):93-96.  
DAI Xiaoping, HU Yu. Solution analysis of carrying network based on MEC sinking [J]. Technology and Information, 2021 (23) : 93-96.
- [15] 闵令辉,曹晓东,程凯,等.基于正弦数据压缩算法的DDS研究及FPGA实现[J].计算机测量与控制,2023,31(2):269-276.  
MIN Linghui, CAO Xiaodong, CHENG Kai, et al. Research on DDS based on sinusoidal data compression algorithm and FPGA implementation [J]. Computer Measurement & Control, 2023, 31 (2): 269-276.
- [16] 张兴旺,王思山,周海鹰,等.融合轻量级DDS的智能车通信架构设计[J].湖北汽车工业学院学报,2022,36(2):9-13.  
ZHANG Xingwang, WANG Sishan, ZHOU Haiying, et al. Design of intelligent vehicle communication architecture based on lightweight DDS [J]. Journal of Hubei University of Automotive Technology, 2022, 36 (2): 9-13.
- [17] 吴旭,杨虹.融合波形调制功能的DDS信号发生器设计[J].电子制作,2023,31(13):84-86.
- [18] 陈忍,卢选民,蒋艺豪,等.基于OpenDDS的ACARS系统设计与实现[J].测控技术,2023,42(3):71-78.  
CHEN Ren, LU Xuanmin, JIANG Yihao, et al. Design and implementation of ACARS system based on OpenDDS [J]. Measurement & Control Technology, 2023, 42(3): 71-78.
- [19] 樊智勇,腾达,刘哲旭.基于单哈希多维布隆过滤器的DDS自动发现算法[J].计算机应用与软件,2021,38(10):273-277.  
FAN Zhiyong, TENG Da, LIU Zhexu. Dds automatic discovery algorithm based on one hash many dimensions bloom filter [J]. Computer Applications and Software, 2021, 38(10): 273-277.
- [20] 李奇,黄大胜,李倩,等.基于MATLAB和FPGA的DDS发生器的设计与实现[J].信息与电脑,2021,33(2):80-82.  
LI Qi, HUANG Dasheng, LI Qian, et al. Design and implementation of DDS generator based on MATLAB and FPGA [J]. China Computer & Communication, 2021, 33 (2) : 80-82.

收稿日期:2024-09-22

修回日期:2024-12-09

作者简介:

江 淦(1983),男,硕士,高级工程师,从事电力光通信网络、语音交换网络方面工作;

贾 平(1982),通信作者(15251809098@163.com),男,硕士,高级工程师,从事电力光通信网络、语音交换网络方面工作;

李 沛(1986),男,硕士,高级工程师,从事电力光通信网络、语音交换网络方面工作;

汪大洋(1987),男,硕士,高级工程师,从事电力光通信网络、语音交换网络方面工作;

赵金城(1990),男,硕士,工程师,从事电力光通信网络、语音交换网络方面工作。

(责任编辑 姜婷婷)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2025.09.009

·输变电·

# 基于ERGAN和BO-BiGRU的变电站高压开关柜凝露临界温度预测

王鹏飞\*, 陈雪, 李继宇, 陈大才, 蔡旺昕, 赖举添

(国网福建省电力有限公司经济技术研究院, 福建 福州 350013)

**摘要:**作为电力系统的核心电气设备,变电站高压开关柜受中国南方“回南天”气候影响易产生受潮凝露现象,进而发生设备误动或拒动事故,其复杂的受潮凝露机理导致凝露临界温度预测具有建模准确性低、凝露样本匮乏之差的问题。为此,提出一种基于增强相对生成对抗网络(enhanced relative generative adversarial network, ERGAN)和贝叶斯优化双向循环门控单元(Bayesian optimization bidirectional gated recurrent unit, BO-BiGRU)的变电站高压开关柜凝露临界温度预测方法,旨在提高变电站高压开关柜的凝露临界温度预测精度。首先,针对凝露样本匮乏的问题,设计ERGAN扩充训练样本,该模型引入相对损失函数与梯度惩罚项,并使用一维卷积层和谱归一化层重构生成器和判别器,有效提高了生成样本的质量和训练稳定性;其次,通过贝叶斯优化对BiGRU模型的超参数进行迭代寻优,构建BO-BiGRU模型对凝露临界值进行预测。最后,采用福建某变电站35 kV高压开关柜实测数据进行仿真验证。仿真结果表明,以平均绝对误差为例,相较于模型驱动方法,所提方法的预测性能提高了68.95%,为变电站高压开关柜凝露防治奠定基础。

**关键词:**变电站高压开关柜;临界温度预测;ERGAN;贝叶斯优化方法;双向循环门控单元

中图分类号:TM711

文献标志码:A

文章编号:1007-9904(2025)09-0087-09

## Predicting Condensation Critical Temperature of High-voltage Switchgear in Substation Based on ERGAN and BO-BiGRU

WANG Pengfei\*, CHEN Xue, LI Jiyu, CHEN Dacai, CAI Wangxin, LAI Jutian

(State Grid Fujian Economic Research Institute, Fuzhou 350013, China)

**Abstract:** As the core electrical equipment in the power system, the high-voltage switchgear in substations is affected by the climate of southern China, leading to equipment malfunction or refusal to operate. The intricate mechanism of moisture condensation poses challenges in predicting the critical temperature of condensation, resulting in low modeling accuracy and a lack of condensation samples. To tackle these challenges, a prediction method for the critical condensation temperature of high-voltage switchgear in substation is proposed, based on enhanced relative generative adversarial networks (ERGAN) and Bayesian optimization bidirectional gated recurrent unit (BO-BiGRU) networks. This method aims to improve the prediction accuracy of the condensation critical temperature of high-voltage switchgear. Firstly, to address the scarcity of condensation samples, ERGAN is designed to expand the training samples. This model introduces a relative loss function and a gradient penalty term, and utilizes one-dimensional convolutional layers and spectral normalization layers to reconstruct the generator and discriminator, effectively improving the quality of generated samples and training stability. Secondly, Bayesian optimization is employed to iteratively optimize the hyperparameters of BiGRU model, constructing BO-BiGRU model to predict the critical value of condensation. Finally, real-world data from 35 kV high-voltage switchgear in substation in Fujian are used for simulation verification. Simulation results indicate that, taking the mean absolute error as an example, the prediction performance of the proposed method is 68.95% higher than that of model-driven methods, laying a foundation for the prevention and control of condensation in high-voltage switchgear in substations.

**Keywords:** high-voltage switchgear in substation; critical temperature prediction; ERGAN; Bayesian optimization method; bidirectional gated recurrent unit

**基金项目:**国家自然科学基金项目(72401182);国网福建省电力公司经济技术研究院自主研发项目(SGFJJY00XLJS2400112)。

National Key Research and Development Program of China (72401182); Independent Research and Development Project of State Grid Fujian Economic Research Institute (SGFJJY00XLJS2400112).

## 0 引言

变电站高压开关柜是电力系统的一种核心电气设备,它具有安全隔离高压电路、分配电能、提供过载和短路保护等重要功能<sup>[1-3]</sup>。变电站高压开关柜发生故障时易造成大面积停电事故,影响供电能力。在高湿度的情况下,开关柜容易受潮凝露,进而导致内部零件腐蚀,电气绝缘性能下降,甚至发生故障<sup>[4]</sup>。以福建电网为例,由于其属于亚热带季风气候区,雨量较大,且每年3—4月会出现“回南天”,即天气潮湿、多雨、墙壁和地面容易凝结水珠的现象,开关柜的凝露受潮问题不容忽视<sup>[5-6]</sup>。因此,有必要对变电站高压开关柜凝露防治展开研究。

事实上,变电站高压开关柜凝露临界温度的准确预测能够有效地降低凝露防治难度。若能通过预测模型得到开关柜的凝露临界温度值,则可以通过控制开关柜内的温度,降低凝露现象发生的概率<sup>[7]</sup>。现有研究常通过马努斯修正公式计算空气凝露点温度,认为计算结果即为凝露临界温度值。文献[8]通过马努斯修正公式计算露点温度,并通过对比验证了方法的有效性。文献[9]分析开关柜凝露产生机理,并利用马努斯修正公式预测开关柜凝露临界温度值。然而由于开关柜凝露机理复杂,基于数学模型的凝露临界温度预测方法未充分挖掘开关柜各类因素对凝露临界温度的影响,预测精度难以保证。

近年来,数据驱动的机器学习方法在电力系统中广泛应用。文献[10]通过应用轻量型梯度提升机,有效提高了带被动阻尼直流微电网系统稳定性检测的准确性。文献[11]通过集成经验模态分解电池老化数据并利用长短期记忆神经(long short term memory, LSTM)网络与相关向量机对锂电池剩余使用寿命进行预测。文献[12]提出了一种结合注意力机制的LSTM网络对电力系统暂态稳定性进行评估。由于双向循环门控单元(bidirectional gated recurrent unit, BiGRU)结构简单,能够处理长距离依赖和双向上下文信息的特点,其在众多机器学习方法中脱颖而出。文献[13]结合注意力机制和BiGRU建立电动汽车充电温升模型,实现电动汽车充电过程中热失控事故的提前预警。文献[14]结合自回归移动平均模型和BiGRU模型来预测燃料电池的性能退化,有

效提高了预测精度。由于机器学习方法不需要建立数学模型,能够通过历史数据挖掘出数据间的隐含特性,适用于变电站高压开关柜凝露临界温度预测,但上述研究中的机器学习模型均基于大量历史训练样本,在变电站高压开关柜凝露样本匮乏情况下的预测效果难以保证。

生成对抗网络(generative adversarial network, GAN)是一种由生成器和判别器组成的深度学习模型,可以通过博弈对抗过程生成与真实数据相似的样本,常用于扩充数据样本。文献[15]提出一种基于条件式 Wasserstein 生成对抗网络的故障样本增强技术,显著提高了故障识别性能。文献[16]在历史负荷数据匮乏的场景下,利用生成对抗网络和循环卷积生成对抗网络进行空间负荷预测,有效提高了预测精度。但GAN模型在训练过程中容易受数据量、参数设置等因素的影响,训练过程中易出现不稳定和模式崩溃的情况,导致生成样本质量下降,降低变电站高压开关柜凝露临界温度预测的准确性。

综上,为提高变电站高压开关柜凝露临界温度预测的准确性,提出一种基于增强相对生成对抗网络(enhanced relative generative adversarial network, ERGAN)的变电站高压开关柜凝露样本扩充方法,补充凝露训练样本,并提出基于贝叶斯优化双向循环门控单元(Bayesian optimization bidirectional gated recurrent unit, BO-BiGRU)的变电站高压开关柜凝露临界温度预测方法。

## 1 变电站高压开关柜样本扩充方法

考虑到变电站中装设有除湿器等设备,实际上只有部分时刻会发生凝露现象,变电站高压开关柜凝露样本数据匮乏。对此,提出一种基于ERGAN的变电站高压开关柜凝露样本扩充方法补充凝露训练样本,该方法通过引入带梯度惩罚的相对损失函数,并利用一维卷积(1D convolutional neural network, 1D-CNN)层和谱归一化(spectral normalization, SN)层重构生成器和判别器,提高生成凝露样本的质量和训练稳定性,为后续的凝露临界温度预测提供数据支撑。提高训练集数据质量,进而提升凝露临界温度预测模型的预测精度。

### 1.1 GAN模型

GAN是一种基于博弈论的生成模型,包括生成

器和判别器2个网络。生成器的输入为随机噪声 $z$ ,经过多层神经网络后,生成的样本数据的分布逐渐拟合真实样本数据分布。判别器和生成器同时进行训练,判别器的输入为真实样本和生成样本,输出为输入样本是真实样本的概率。判别器和生成器的损失函数如式(1)和式(2)所示。

$$L_G = E_{z \sim P_z} (-\log_2 D(G(z))) \quad (1)$$

$$L_D = E_{x_r \sim P_{\text{data}}} (\log_2 D(x_r)) - E_{z \sim P_z} (\log_2 (1 - D(G(z)))) \quad (2)$$

式中: $L_G$ 为生成器的损失函数; $L_D$ 为判别器的损失函数; $E(\cdot)$ 为数学期望; $D(\cdot)$ 为判别器输出; $G(\cdot)$ 为生成器输出; $x_r$ 为真实样本; $P_{\text{data}}$ 为真实样本数据分布; $P_z$ 为噪声数据分布。

GAN模型能够学习样本数据的分布规律,生成符合样本数据分布规律的非真实样本,能够实现样本扩充功能。但GAN模型的训练过程容易出现以下问题:一是生成器容易出现梯度消失的现象;二是判别器容易出现梯度失稳,进而引起模式崩溃。

## 1.2 ERGAN模型

ERGAN模型在GAN模型的基础上引入了带梯度惩罚的相对损失函数,并根据谱归一化策略重构判别器和生成器,有效提高训练过程稳定性以及生成样本的质量。

### 1.2.1 带梯度惩罚的相对损失函数

在GAN模型的训练过程中,其经常无法达到最优解,主要原因是判别器不断提高生成样本为真的概率,但判别器中真实样本的概率却始终为1,一定程度上阻碍了判别器达到最优解。在这种情况下,判别器的训练过程不够稳定,生成样本的真实性也难以保证。为解决上述问题,本节引入相对判别器,与标准判别器不同的是,相对判别器比较的是生成样本与真实样本间的距离,而非直接判断输入是否为真实样本。相对判别器的输出如式(3)所示。

$$D_R(x_r - x_g) = \sigma(C(x_r) - C(x_g)) \quad (3)$$

式中: $D_R(\cdot)$ 为相对判别器输出; $x_g$ 为生成样本; $\sigma(\cdot)$ 为sigmoid函数; $C(\cdot)$ 为非线性转换层输出。

由式(3)可以看出,相对判别器输出的是生成样本比随机采样的真实样本更加真实的概率。相较于

标准判别器,使用相对判别器进行训练具有更好的收敛性与稳定性<sup>[17]</sup>。

由1.1可知,标准GAN模型在训练过程中可能出现梯度失稳,导致模式崩溃的问题,即生成的样本与真实样本相同。考虑到模式崩溃发生时,判别器的梯度值非常大,在判别器函数中加入梯度惩罚项,可以有效地限制判别器的梯度并减少模式崩溃发生的概率。

引入带梯度惩罚的判别器与生成器的相对损失函数如式(4)和式(5)所示。

$$L_D = -E_{(x_r, x_f) \sim (P_{\text{data}}, P_g)} [\log_2 (\sigma(C(x_r) - C(x_f)))] + G_p \quad (4)$$

$$L_G = -E_{(x_r, x_f) \sim (P_g, P_{\text{data}})} [\log_2 (\sigma(C(x_r) - C(x_f)))] \quad (5)$$

式中: $P_g$ 为生成样本分布; $(x_r, x_f) \sim (P_{\text{data}}, P_g)$ 表示从真实样本与生成样本中分别采样得到; $G_p$ 为梯度惩罚项, $G_p = \lambda E_{\hat{x} \sim P_{\hat{x}}} [(\|\nabla_{\hat{x}} D(\hat{x})\|_2 - 1)^2]$ , $\lambda$ 为梯度惩罚因子, $\hat{x}$ 为随机插值采样。

引入带梯度惩罚的相对损失函数之后,判别器稳定性增强,模型训练过程变得更加稳定可靠,有效避免了模式崩溃的问题。

### 1.2.2 重构生成器与判别器

1.2.1中构建带梯度损失的相对损失函数可以使训练过程更加稳定。但是,在梯度惩罚的过程中,只有梯度模数大于1的样本会受到惩罚,并不能保证每一个样本梯度模数都小于等于1,判别器的1-Lipschitz限制问题并未得到解决。考虑到频谱归一化可以通过频谱范数来标准化网络的参数矩阵,可以有效地解决1-Lipschitz限制问题<sup>[18]</sup>,本节采用谱归一化策略来重构判别器和生成器。重构后的判别器和生成器结构可由多个1D-CNN和SN层组成。使用SN层的判别器可以有效解决1-Lipschitz限制问题,而1D-CNN层可以让判别器和生成器从原始数据中捕获深度凝露特征,提高模型的判别能力,可以有效地防止梯度失稳问题发生,同时提高生成样本的质量。

### 1.2.3 基于ERGAN的变电站高压开关柜样本扩充方法

基于ERGAN的变电站高压开关柜样本扩充架构如图1所示。通过ERGAN模型可以有效扩充变电站高压开关柜环境样本数据,解决了变电站高压开关柜凝露样本数据匮乏的问题,为后续数据驱动

的变电站高压开关柜凝露临界温度预测方法提供了数据基础。

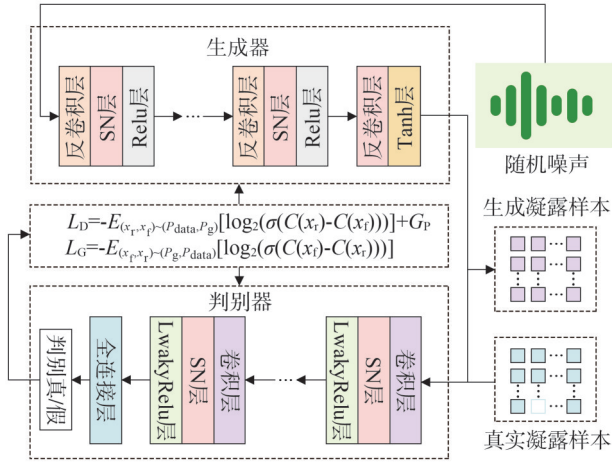


图1 基于ERGAN的变电站高压开关柜样本扩充架构

Fig.1 ERGAN based framework of substation high voltage switchgear sample expansion

### 2 BO-BiGRU 模型

针对传统基于物理模型的凝露临界温度预测方法准确性较低的问题,通过构建基于BO-BiGRU模型,充分挖掘凝露临界温度与开关柜环境因素的隐含特性,有效提高变电站高压开关柜的凝露临界温度准确度,为变电站高压开关柜凝露防治奠定基础。

#### 2.1 BiGRU 模型

BiGRU由两个相反方向的门控循环单元(gated recurrent unit, GRU)组成。BiGRU模型结构如图2所示。由图2可以看出,在BiGRU模型中,输入序列被分别输入两个方向的GRU中。与LSTM相比,GRU在保持时间序列数据处理能力的同时,减少网络参数,缩短训练时间,降低过拟合的概率,提高了预测效率。

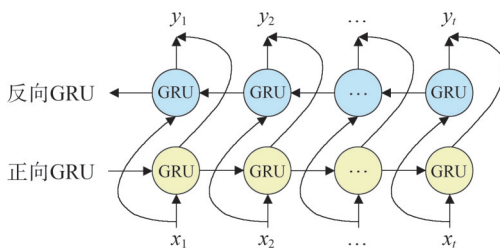


图2 BiGRU模型结构图

Fig.2 BiGRU model structure

BiGRU的计算如式(6)所示。

$$\begin{cases} \vec{y}_t = \text{GRU}(x_t, \vec{y}_{t-1}) \\ \overleftarrow{y}_t = \text{GRU}(x_t, \overleftarrow{y}_{t+1}) \\ y_t = \alpha_t \vec{y}_t + \beta_t \overleftarrow{y}_t + b_t \end{cases} \quad (6)$$

式中:GRU为门控循环单元; $x_t$ 为输入; $\vec{y}_t$ 为前向隐藏层输出; $\overleftarrow{y}_t$ 为后向隐藏层输出; $y_t$ 为输出; $\vec{y}_{t-1}$ 为上一时刻前向隐藏层输出; $\overleftarrow{y}_{t+1}$ 为下一时刻后向隐藏层输出; $\alpha_t$ 为前向隐藏层输出权重; $\beta_t$ 为后向隐藏层输出权重; $b_t$ 为偏置值。

#### 2.2 贝叶斯优化算法

BiGRU的超参数主要包括神经元数量、学习率、批量大小等,其无法直接从数据中推导而来,需要人为根据经验或实验确定。通常情况下,超参数与模型性能之间的确切关系难以用函数形式表达。为此,引入贝叶斯优化(Bayesian optimization, BO)算法来优化BiGRU模型的超参数。BO算法是一种无导数、基于序列的优化方法<sup>[19]</sup>,该方法使用高斯过程回归模型建立优化问题的先验知识,进而估计目标函数 $f(u)$ 。

$$u^* = \arg \max_{u \in U} f(u) \quad (7)$$

式中: $f(u)$ 为目标函数; $u^*$ 为约束下的全局最优解。

BO算法简单、收敛速度快、可扩展性优,适用于超参数寻优的问题。利用BO算法对BiGRU模型中的超参数进行迭代寻优,可以有效提高BiGRU模型的预测性能。在本文中,基于BO算法对超参数进行寻优的BiGRU模型记作BO-BiGRU。

### 3 变电站高压开关柜凝露临界温度预测模型与评价指标

#### 3.1 预测模型架构

变电站高压开关柜凝露临界温度预测结构如图3所示,分为样本扩充、超参数优化、预测、评价4个阶段。

#### 3.2 数据准备

以福建某地2023年变电站高压开关柜环境样本数据进行建模。变电站高压开关柜环境样本数据包括凝露临界温度、空气温度、开关柜表面温度、空气相对湿度、气压、饱和水蒸气压力。采样间隔为15 min,每日采样96个点,每个点包含上述5项信息。考虑到实际变电站中装设有除湿器等设备,每

年只有小部分采样时刻会发生凝露现象,只选取发生凝露现象日期的历史环境样本数据,共1440个采样时刻。

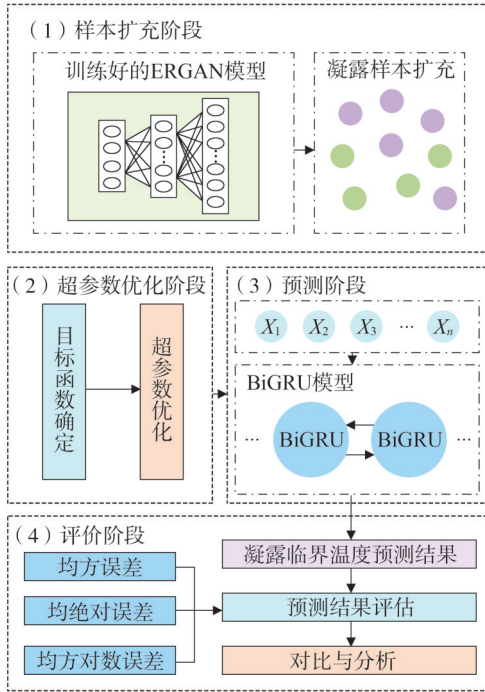


图3 凝露临界温度预测模型架构图

Fig.3 Diagram of the prediction model framework of condensation critical temperature

### 3.2.1 归一化处理

为减轻单位与量纲对预测性能带来的不利影响,对开关柜历史环境样本进行归一化处理,将所有样本数据映射至 $[0,1]$ 。归一化处理的过程如式(8)所示。

$$\tilde{X}_j = \frac{X_j - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (8)$$

式中: $X_j$ 为第 $j$ 个历史环境样本数据; $X_{\min}$ 为历史环境样本数据中的最小值; $X_{\max}$ 为历史环境样本数据中的最大值; $\tilde{X}_j$ 为归一化后的历史环境样本数据。

### 3.2.2 相关性分析

为进一步衡量各类型环境因素与凝露临界温度间的相关性,本文通过计算 Pearson 相关系数来分析各类型环境因素间的关联性。

$$r = \frac{\sum_{c=1}^n (\tilde{X}_c - \bar{X})(T_c - \bar{T})}{\sqrt{\sum_{c=1}^n (\tilde{X}_c - \bar{X})^2 \sum_{c=1}^n (T_c - \bar{T})^2}} \quad (9)$$

式中: $n$ 为环境因素个数; $\tilde{X}_c$ 为第 $c$ 个归一化后的环境样本; $T_c$ 为第 $c$ 个凝露临界温度; $\bar{X}$ 和 $\bar{T}$ 为对应变量的均值。

系数 $r$ 的取值范围为 $[-1,1]$ ,正负代表正相关与负相关, $r$ 的绝对值越大说明该类型环境因素与凝露临界温度的关联性越强。开关柜各类型环境因素与凝露临界温度间的相关系数取值如表1所示。

表1 各类型环境因素与凝露临界温度间的相关系数值

Table 1 The correlation coefficient between each type of environmental factor and the critical temperature of condensation

| 环境因素类型  | 相关系数  |
|---------|-------|
| 空气温度    | -0.62 |
| 开关柜表面温度 | -0.65 |
| 空气相对湿度  | 0.83  |
| 气压      | 0.02  |
| 饱和水蒸气压力 | 0.54  |

由表1可以看出,气压是凝露临界温度间的关联性很小。此外,在开关柜正常运行条件下,气压在一个标准大气压附近浮动,变化不大。因此,在后续的凝露临界温度预测中。气压不作为特征进行输入。

### 3.3 变电站高压开关柜凝露临界温度预测流程

变电站高压开关柜预测流程如图4所示,分为离线训练和在线预测两部分。

### 3.4 评价指标

为量化预测模型的性能,本文采用平均绝对误差 $J_{MAE}$ 、均方误差 $J_{MSE}$ 、均方对数误差 $J_{MSLE}$ 以评估预测模型。指标越小,说明预测值越接近于实际值,预测模型性能越优。上述3种指标的计算如式(10)~式(12)所示。

$$J_{MAE} = \left( \sum_{d=1}^N |T_d - \hat{T}_d| \right) / N \quad (10)$$

$$J_{MSE} = \left( \sum_{d=1}^N |T_d - \hat{T}_d|^2 \right) / N \quad (11)$$

$$J_{MSLE} = \left( \sum_{d=1}^N \left| \log_2(\hat{T}_d + 1) - \log_2(T_d + 1) \right|^2 \right) / N \quad (12)$$

式中: $T_d$ 为测试集中第 $d$ 个采样点的凝露临界温度值; $\hat{T}_d$ 为测试集中第 $d$ 个采样点的凝露临界温度预测值; $N$ 为测试集大小。

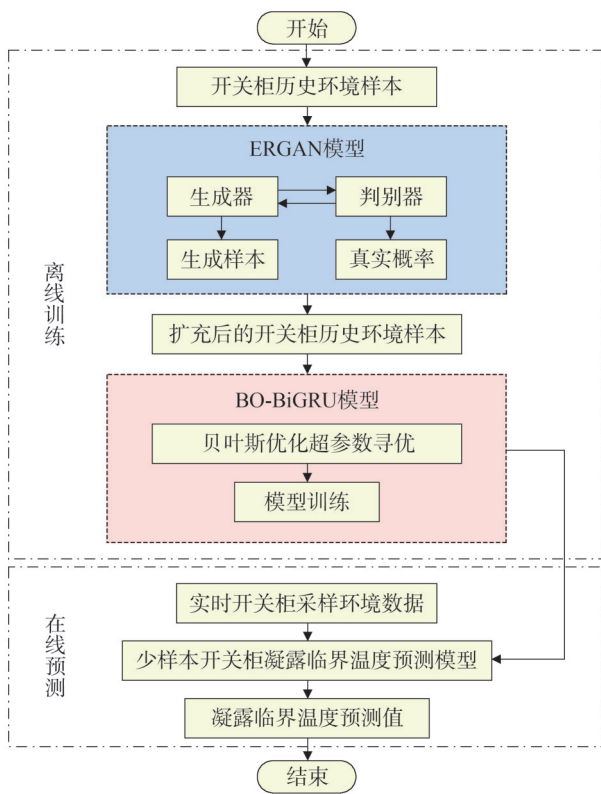


图4 高压开关柜凝露临界温度预测流程图

Fig.4 Flowchart for predicting the critical condensation temperature of high-voltage switchgear

### 3.5 参数设置

#### 3.5.1 ERGAN 参数设置

用于扩充变电站高压开关柜凝露样本的ERGAN模型中生成器与判别器的网络结构与参数见文献[20]。生成器与判别器均采用Adam进行优化<sup>[21]</sup>,学习率为 $10^{-4}$ 。

#### 3.5.2 BO-BiGRU 参数设置

BO-BiGRU模型由一层BiGRU构成,单元数量为128。学习率、批样本大小、隐藏层神经元个数和丢弃率通过BO算法迭代寻优得到。训练过程采用Adam算法对模型的内置参数进行更新。BO算法迭代寻优的结果如表2所示。

## 4 仿真分析

### 4.1 ERGAN 有效性验证

为验证ERGAN方法的有效性,通过ERGAN模型扩充开关柜凝露样本以提高凝露临界温度预测的精度。通过ERGAN分别扩充原有数据集40%、80%

的数据量,即扩充576条、1152条新的开关柜凝露样本,将新样本与原始凝露样本合并后对BO-BiGRU模型进行训练,预测凝露临界温度,并与原始训练集下训练好的BO-BiGRU模型的预测结果进行对比。其中,3次实验的超参数优化方法均为BO方法,仅样本扩充的比例不同。扩充样本后的凝露临界温度预测绝对误差曲线如图5所示。不同扩充比例下凝露临界温度预测误差指标如表3所示。

由图5可以看出,扩充80%样本的预测模型绝对误差最小,说明预测结果最接近于真实情况。原始训练集未扩充凝露样本,预测模型绝对误差最大。

表2 超参数寻优结果

| 超参数名称    | 寻优范围   | 寻优结果      |
|----------|--|-----------|
| 学习率      | $[10^{-3}, 10^{-2}, 10^{-1}, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5]$ | $10^{-2}$ |
| 批样本大小    | $[8, 16, 32, 64, 128, 256, 512]$                       | 64        |
| 隐藏层神经元个数 | $[10, 20, 30, 40, 50, 80, 100, 120, 150]$              | 40        |
| 丢弃率      | $[0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5]$                            | 0.2       |

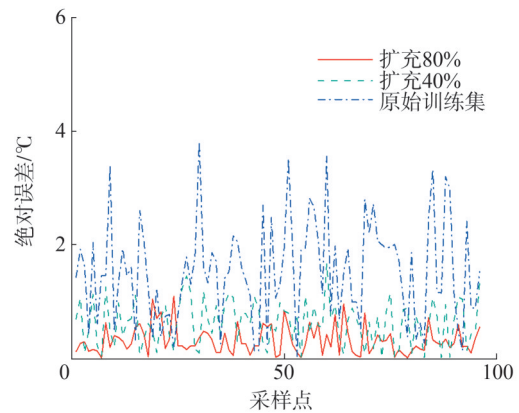


图5 扩充样本后的凝露临界温度预测绝对误差曲线

Fig.5 Absolute error curve of condensation critical temperature prediction after sample expansion

表3 不同扩充比例下凝露临界温度预测误差指标

Table 3 Prediction error indicators for condensation critical temperature under different expansion ratios

| 扩充比例/% | $J_{MAE}$ | $J_{MSE}$ | $J_{MLSE}$ |
|--------|-----------|-----------|------------|
| 0      | 1.531 6   | 3.120 1   | 0.006 8    |
| 40     | 0.631 7   | 0.551 7   | 0.001 1    |
| 80     | 0.327 5   | 0.167 6   | 0.000 3    |

由表3可以看出,扩充样本后,预测模型的性能明显提升。扩充比例为40%时,相较于不扩充凝露样本的情况, $J_{MAE}$ 、 $J_{MSE}$ 和 $J_{MLSE}$ 分别提升58.76%、82.32%和83.82%。扩充比例为80%时,相较于不扩充凝露样本的情况, $J_{MAE}$ 、 $J_{MSE}$ 和 $J_{MLSE}$ 分别提升78.62%、94.63%和95.59%。

综上所述,所提ERGAN模型扩充变电站高压开关柜凝露样本后能够显著提高预测模型的性能,方法有效性得以验证。

#### 4.2 BO-BiGRU有效性验证

为验证BO-BiGRU模型的有效性,在扩充80%凝露样本的情况下对BO-BiGRU、BiGRU、LSTM进行训练,预测凝露临界温度,并与马努斯修正公式计算得到的凝露临界温度进行对比。其中,BO-BiGRU通过BO方法进行超参数优化,BiGRU与LSTM的超参数由人为给定,3种数据驱动方法的样本扩充比例均相同。BO-BiGRU模型训练损失如图6所示。

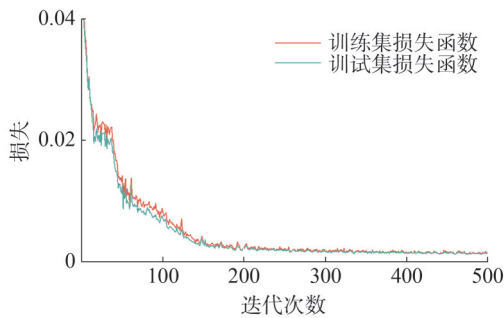


图6 BO-BiGRU模型训练损失图  
Fig.6 BO-BiGRU model training loss graph

由图6可以看出,随着训练过程的进行,训练损失函数和测试损失函数同步下降,最终收敛,说明模型没有出现过拟合现象。

将各模型预测得到的凝露临界温度与马努斯修正公式计算得到的凝露临界温度进行对比。不同模型的凝露临界温度预测绝对误差曲线如图7所示。不同模型的凝露临界温度预测误差指标如表4所示。

由图7可以看出,BO-BiGRU预测模型的绝对误差最小,说明预测结果最接近于真实情况。由于变电站高压开关柜复杂的凝露机理,相较于数据驱动方法,基于物理模型的马努斯修正公式预测得到的凝露临界温度结果偏差更大。

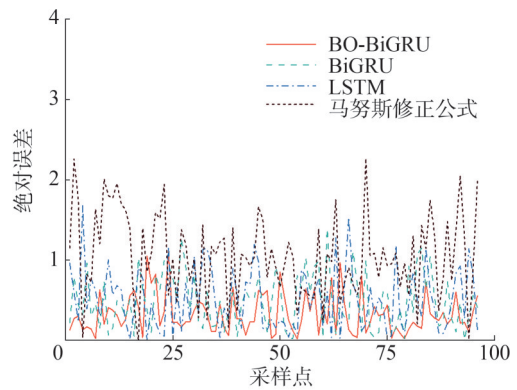


图7 不同模型的凝露临界温度预测绝对误差曲线  
Fig.7 Absolute error curves for condensation critical temperature prediction with different models

表4 不同模型的凝露临界温度预测误差指标

Table 4 Prediction error indicators for condensation critical temperature with different models

| 模型       | $J_{MAE}$ | $J_{MSE}$ | $J_{MLSE}$ | 时间/ms |
|----------|-----------|-----------|------------|-------|
| BO-BiGRU | 0.327 5   | 0.167 6   | 0.000 3    | 21    |
| BiGRU    | 0.488 9   | 0.355 6   | 0.000 7    | 18    |
| LSTM     | 0.514 5   | 0.411 8   | 0.000 8    | 22    |
| 马努斯修正    | 1.054 9   | 1.381 3   | 0.002 9    | 14    |

由表4可以看出,BO-BiGRU预测模型的预测性能最好。相较于马努斯修正公式,BO-BiGRU的 $J_{MAE}$ 、 $J_{MSE}$ 和 $J_{MLSE}$ 分别提升68.95%、87.87%和89.66%。相较于BiGRU,BO-BiGRU的 $J_{MAE}$ 、 $J_{MSE}$ 和 $J_{MLSE}$ 分别提升33.01%、52.87%和57.14%。相较于LSTM,BO-BiGRU的 $J_{MAE}$ 、 $J_{MSE}$ 和 $J_{MLSE}$ 分别提升36.35%、59.30%和62.5%。此外,结合性能指标与预测时间可以看出,BO-BiGRU模型在保证预测效率的同时拥有最佳的预测精度,足以可见BO-BiGRU的优越性。

综上所述,扩充80%凝露样本的BO-BiGRU预测模型的预测性能显著高于其余预测模型,模型有效性得以验证。

#### 4.3 消融实验

为更详细评估和验证所提出的模型在变电站高压开关柜凝露临界温度预测的实际效果和性能影响,针对算法的不同模块进行了一系列消融实验,总体预测的结果如表5所示。

在表5中, $\sqrt{\quad}$ 表示在凝露临界温度预测中经历了

相同的步骤。若 ERGAN 栏没有√,则表示没有通过 ERGAN 模型扩充 80% 的训练样本;若 BiGRU 栏没有√,则代表只使用 GRU 模型进行预测;若 BO 栏没有√,则表示手动进行参数调整。

表5 消融实验结果  
Table 5 The results of ablation study

| ERGAN | BO | BiGRU | $J_{MAE}$ | $J_{MSE}$ | $J_{MLSE}$ |
|-------|----|-------|-----------|-----------|------------|
| √     | √  | √     | 0.327 5   | 0.167 6   | 0.000 3    |
|       | √  | √     | 1.531 6   | 3.120 1   | 0.006 8    |
| √     |    | √     | 0.488 9   | 0.355 6   | 0.000 7    |
| √     | √  |       | 0.537 1   | 0.432 8   | 0.000 8    |
|       |    |       | 1.862 1   | 3.983 6   | 0.009 2    |

由表5可以看出,本文的所有改进方法均对凝露临界温度预测有帮助,预测性能指标提升明显。值得一提的是,利用 ERGAN 进行凝露样本扩充对模型预测精度的提升起到了重要作用。如不采用 ERGAN 模型进行样本扩充,模型  $J_{MAE}$ 、 $J_{MSE}$  和  $J_{MLSE}$  将会下降 78.62%、94.63% 和 95.59%。此外,通过 BO 算法进行超参数迭代寻优和 BiGRU 代替 GRU 均可以进一步提高凝露临界温度的预测性能。

## 5 结论

针对变电站高压开关柜受潮凝露机理复杂导致的凝露临界温度预测模型准确性低、数据样本匮乏的问题,提出一种基于样本扩充的变电站高压开关柜凝露临界温度预测方法,具体贡献如下:

1) 变电站高压开关柜凝露机理复杂,传统的基于物理模型的凝露临界温度预测方法精度有限。基于高压开关柜历史凝露样本数据,通过训练 BO-BiGRU 模型实现凝露临界温度预测,提高了凝露临界温度预测的精确度。

2) 针对变电站高压开关柜凝露样本匮乏的问题,引入带梯度惩罚的相对损失函数并重构判别器和生成器,构建 ERGAN 模型扩充凝露样本,提高凝露样本训练集的多样性,提升预测模型训练效果。

由仿真结果可以看出,本文方法能够有效提高凝露临界温度预测模型性能,具有实际应用价值。未来将继续研究更加先进的深度学习模型以进一步提高

变电站高压开关柜凝露临界温度预测的精确度。

## 参考文献

- [1] 刘东明,李军,王军波,等.高压开关柜无线红外在线测温系统设计[J].山东电力技术,2019,46(12): 55-59.  
LIU Dongming, LI Jun, WANG Junbo, et al. Design of wireless infrared on-line temperature measurement system for high voltage switchgear[J]. Shandong Electric Power, 2019, 46(12): 55-59.
- [2] 林奕夫,叶兆平,陈雪,等.基于二阶电路的开关柜局部放电检测方法[J].浙江电力,2024,43(8): 113-120.  
LIN Yifu, YE Zhaoping, CHEN Xue, et al. A partial discharge detection method for switch cabinets based on a second-order circuit[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(8): 113-120.
- [3] 李璨,咸日常,崔永,等.KYN系列12kV开关柜真空断路器灭弧室触头温度间接测算[J].高电压技术,2023,49(10): 4355-4363.  
LI Can, XIAN Richang, CUI Yong, et al. Indirect measurement of arc-extinguishing chamber contact temperature of KYN Series 12 kV switch cabinet vacuum circuit breaker [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(10): 4355-4363.
- [4] 李元,薛建议,任双赞,等.高压开关柜温湿度分布的三维数值模拟研究[J].电工技术学报,2019,34(24): 5095-5103.  
LI Yuan, XUE Jianyi, REN Shuangzan, et al. Research on 3D numerical simulation of temperature and humidity distribution inside high voltage switchgear [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(24): 5095-5103.
- [5] 刘岫,赵加能,王浩州,等.高湿地区变电站开关柜受潮分析及治理[J].云南电力技术,2021,49(3): 36-38.  
LIU Shen, ZHAO Jianeng, WANG Haozhou, et al. Moisture analysis and comprehensive control of substation switchgear in high humidity area [J]. Yunnan Electric Power, 2021, 49(3): 36-38.
- [6] 杨芳,潘岐泽.12kV高压开关柜受潮凝露防治技术研究[J].高压电器,2018,54(8): 40-47.  
YANG Fang, PAN Qize. Key technologies investigation of damp-proofing and anti-dewing for 12 kV high-voltage switchgear[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(8): 40-47.
- [7] 王喆,李品德,高伟,等.35kV高压配电室全智能防凝露系统的开发及应用[J].电网与清洁能源,2019,35(11): 13-19.  
WANG Zhe, LI Pinde, GAO Wei, et al. Development and application of a fully intelligent condensation prevention system for 35 kV high-voltage power distribution room [J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(11): 13-19.
- [8] 许馨尹,于军琪,李红莲,等.露点温度计算方法对比研究[J].气象与环境学报,2016,32(3): 107-111.  
XU Xinyin, YU Junqi, LI Honglian, et al. Comparative study on calculation methods of dew-point temperature [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2016, 32(3): 107-111.

- [9] 潘岐泽,杨芳,杨志.12 kV 高压开关柜受潮凝露机理及防治关键技术探讨[J].电力系统保护与控制,2019,47(5): 160-172.  
PAN Qize, YANG Fang, YANG Zhi. Discussion on mechanism of the dampness and dewing inside 12 kV high-voltage switchgear and its key control techniques [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 160-172.
- [10] 刘笑,杨建,李力,等.基于机器学习的带被动阻尼直流微电网系统的稳定性检测[J].电工技术学报,2024,39(8): 2281-2293.  
LIU Xiaojiao, YANG Jian, LI Li, et al. Stability detection of DC microgrid systems with passive damping based on machine learning [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(8): 2281-2293.
- [11] 张朝龙,赵筛筛,何怡刚.基于集成经验模态分解与集成机器学习的锂离子电池剩余使用寿命预测方法[J].电力系统保护与控制,2023,51(13): 177-186.  
ZHANG Chaolong, ZHAO Shaishai, HE Yigang. Remaining useful life prediction method for lithium-ion batteries based on ensemble empirical mode decomposition and ensemble machine learning [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(13): 177-186.
- [12] 解治军,张东霞,韩肖清,等.基于改进长短期记忆网络的电力系统暂态稳定评估方法研究[J].电网技术,2024,48(3): 998-1010.  
XIE Zhijun, ZHANG Dongxia, HAN Xiaoqing, et al. Research on transient stability assessment method of power system based on improved long short term memory network [J]. Power System Technology, 2024, 48(3): 998-1010.
- [13] 杜玉蓉,高德欣,郑晓雨,等.基于AT-BiGRU的电动汽车充电安全动态预警方法[J/OL].电力系统自动化,2023:1-14[2024-05-30]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20230302.1807.002.html.  
DU Yurong, GAO Dexin, ZHENG Xiaoyu, et al. Dynamic warning method for electric vehicle charging safety based on attention mechanism and bidirectional gated recurrent unit [J/OL]. Automation of Electric Power Systems, 2023: 1-14 [2024-05-30]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20230302.1807.002.html.
- [14] 吴航宇,王玮,朱文超,等.基于ARIMA-BiGRU双数据驱动的燃料电池性能退化预测方法[J/OL].中国电机工程学报,2024:1-10.[2024-05-30]. https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.psee.231748.  
WU Hangyu, WANG Wei, ZHU Wenchao, et al. A fuel cell performance degradation prediction method based on ARIMA-BiGRU dual data-driven approach [J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2024: 1-10 [2024-05-30]. https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.psee.231748.
- [15] 刘云鹏,许自强,和家慧,等.基于条件式 Wasserstein 生成对抗网络的电力变压器故障样本增强技术[J].电网技术,2020,44(4): 1505-1513.  
LIU Yunpeng, XU Ziqiang, HE Jiahui, et al. Data augmentation method for power transformer fault diagnosis based on conditional Wasserstein generative adversarial network [J]. Power System Technology, 2020, 44(4): 1505-1513.
- [16] 肖白,黄钰茹,姜卓,等.数据匮乏场景下采用生成对抗网络的空间负荷预测方法[J].中国电机工程学报,2020,40(24): 7990-8001.  
XIAO Bai, HUANG Yuru, JIANG Zhuo, et al. The method of spatial load forecasting based on the generative adversarial network for data scarcity scenarios [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(24): 7990-8001.
- [17] JOLICOEUR-MARTINEAU A. The relativistic discriminator: a key element missing from standard GAN [EB/OL]. [2024-05-30]. https://arxiv.org/abs/1807.00734v3.
- [18] MIYATO T, KATAOKA T, KOYAMA M, et al. Spectral normalization for generative adversarial networks [EB/OL]. [2024-05-30]. https://arxiv.org/abs/1802.05957v1.
- [19] AGRAWAL A K, CHAKRABORTY G. On the use of acquisition function-based Bayesian optimization method to efficiently tune SVM hyperparameters for structural damage detection [J]. Structural Control and Health Monitoring, 2021, 28(4): e2693.
- [20] LUO J, ZHANG Y N, YANG F, et al. Imbalanced data fault diagnosis of rolling bearings using enhanced relative generative adversarial network [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2024, 38(2): 541-555.
- [21] KHAIRE U M, DHANALAKSHMI R. High-dimensional microarray dataset classification using an improved Adam optimizer (iAdam) [J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2020, 11(11): 5187-5204.

收稿日期:2024-09-29

修回日期:2024-12-10

作者简介:

王鹏飞(1981),通信作者(pengfei198110@163.com),男,高级工程师,主要研究方向为电网建设、配电自动化、继电保护、工程管理、变电设计、储能研究;

陈雪(1982),女,硕士,高级工程师,主要研究方向为配电网设计与评审;

李继宇(1992),男,硕士,工程师,主要研究方向为配网设计及优化运行,配电网建设管理;

陈大才(1974),男,高级工程师,主要研究方向为配电网评审技术,配电网建设;

蔡旺昕(1996),男,硕士,工程师,主要研究方向为线路结构;

赖举添(1973),男,硕士,工程师,主要研究方向为工程技术经济性分析。

(责任编辑 姜婷婷)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2025.09.010

# 基于回波损耗的GIS特高频内置传感器现场校验方法研究

张丕沛<sup>1\*</sup>, 朱振龙<sup>2</sup>, 于吉<sup>2</sup>, 成鲁钰<sup>2</sup>, 宋磊<sup>2</sup>

(1. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250003; 2. 国网山东省电力公司超高压公司, 山东 济南 250118)

**摘要:**特高频内置传感器布置在气体绝缘金属封闭开关设备(gas insulated switchgear, GIS)内部,可以实时监测局部放电产生的特高频(ultra high frequency, UHF)电磁波信号,然而长期运行过程中受到设备振动、环境温度等因素的影响,内置传感器自身性能可能会发生劣化,从而导致无法准确监测到局部放电信号,因此有必要研究内置传感器的现场校验方法,便于定期对运行中的内置传感器的性能开展评估。文中根据GIS特高频内置传感器的结构原理和多端口网络理论,分析了内置传感器回波损耗的物理意义,确认回波损耗可有效反映内置传感器的运行状态。根据GIS典型气室的结构尺寸,建立了特高频内置传感器等比例的三维仿真模型,并通过回波损耗曲线的仿真结果与现场实测数据对比,验证了仿真模型的正确性。进一步仿真研究了内置传感器介质层绝缘劣化、馈电杆接触不良两种典型缺陷时的回波损耗曲线特征,为运行中的内置传感器现场校验与缺陷诊断提供了参考。

**关键词:**GIS;局部放电;特高频内置传感器;回波损耗;现场校验

中图分类号:TM595

文献标志码:B

文章编号:1007-9904(2025)09-0096-08

## Research on On-site Calibration Method of GIS UHF Built-in Sensors Based on Return Loss

ZHANG Pipei<sup>1\*</sup>, ZHU Zhenlong<sup>2</sup>, YU Ji<sup>2</sup>, CHENG Luyu<sup>2</sup>, SONG Lei<sup>2</sup>

(1.State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250003, China;

2.State Grid Shandong Electric Extrahigh Voltage Company, Jinan 250118, China)

**Abstract:** The ultra-high frequency (UHF) built-in sensors are arranged inside the gas insulated switchgear, which can monitor the UHF electromagnetic wave signals generated by partial discharge in real time. However, due to factors such as equipment vibration and environmental temperature during long-term operation, the performance of the built-in sensors may deteriorate, resulting in the inability to accurately monitor partial discharge signals. Therefore, it is necessary to study the on-site calibration method of the built-in sensors, so as to regularly evaluate the performance of the built-in sensors during operation. This article analyzed the physical meaning of the return loss of built-in sensors based on the structural principle of GIS built-in sensors and the theory of multi-port networks, and confirmed that the return loss can effectively reflect the operating status of the built-in sensors. Subsequently, based on the structural dimensions of typical GIS chambers, a three-dimensional simulation model with an equal proportion of UHF built-in sensors was established, and the correctness of the simulation model was verified by comparing the simulation results of the return loss curve with on-site measured data. Further, the characteristics of return loss curves were researched by simulation for two typical defects of built-in sensor, namely insulation degradation of the dielectric layer and poor contact of the feeder pole, which provided reference for on-site verification and defect diagnosis of the built-in sensor during operation.

**Keywords:** GIS; partial discharge; UHF built-in sensors; return loss; on-site calibration

## 0 引言

气体绝缘金属封闭开关设备(gas insulated

switchgear, GIS)内部的局部放电是危害设备安全稳定运行的重大隐患之一<sup>[1-3]</sup>。为实现对局部放电的实时监测,超特高压GIS设备通常在壳体内部预埋特高频(ultra-high frequency, UHF)内置传感器,并通过GIS壳体上的N型连接器及外部同轴电缆将信号传输至监测主机<sup>[4-6]</sup>。然而运行中的内置传感器会

基金项目:国家电网有限公司科技项目(520626220048)。  
Science and Technology Project of State Grid Corporation of China  
(520626220048)。

受到设备振动、环境温度等诸多因素的影响,若性能发生劣化则会降低监测信号的准确性<sup>[7-9]</sup>,因此有必要对在运内置传感器的性能校验方法开展研究。

文献[10-12]研究了GIS特高频内置传感器的典型结构及工作原理,介绍了内置传感器带宽、增益、驻波比等主要性能参数,并进一步提出了特高频内置传感器的优化设计方法,相关结论可为本文的研究提供理论支撑。文献[13-15]提出了特高频传感器的有效高度测试方法,可以评估传感器将电磁波信号转化为电压信号的性能,目前已成为特高频传感器性能指标的主要校验手段,但测试只能在实验室内的专用测试设备上进行,无法在变电站开展在运内置传感器的现场校验。文献[16-18]提出了基于等效脉冲注入法的特高频内置传感器现场校验方法,通过在相邻传感器注入脉冲信号的方式,检查被测传感器是否能有效检测到信号,该方法不仅可以现场校验单只内置传感器的性能,还可以评估内置传感器的布点合理性,但注入的脉冲信号与局部放电信号的等效性难以保证,通常需要在GIS出厂前开展标准脉冲标定,已经在运的GIS(出厂前未标定的)则无法开展校验。文献[19-21]提出了应用正向传输系数的内置传感器布置方式的现场校验方法,认为相邻传感器间的平均正向传输系数应满足不小于-75 dB,然而该方法只能评估GIS内置传感器布点的合理性,无法对单个内置传感器的性能进行现场校验。

本文基于多端口网络参数理论,通过分析内置传感器回波损耗的物理意义,研究了利用回波损耗评估内置传感器运行状态的有效性,建立了典型气室结构的内置传感器仿真模型,分析了不同缺陷时内置传感器回波损耗曲线的特征规律,为在变电站现场开展内置传感器的性能校验提供了理论参考。

### 1 内置传感器回波损耗的物理意义

GIS内部局部放电激发的电磁波信号的频率通常在0.3 GHz~1.5 GHz,在此频率范围内,GIS及其配置的内置传感器可视为无源的多端口网络,每一个内置传感器即为一个端口,作为信号输入输出的通道。工程上通常用S参数来描述多端口网络各个端口之间的输入输出特性。具有n个端口的典型多端口网络如图1所示<sup>[22-24]</sup>。

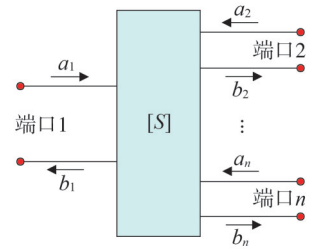


图1 多端口网络示意图

Fig.1 Multi-port network diagram

图1中, $a_n$ 为端口n的输入信号, $b_n$ 为端口n的输出信号。以端口1为例,其回波损耗 $S_{11}$ 的定义为其他端口输入为零时,端口1的输出信号与输入信号之比。

$$S_{11} = 20 \lg \left. \frac{b_1}{a_1} \right|_{a_2, a_3, \dots, a_n = 0} \quad (1)$$

鉴于本文主要研究单个内置传感器的回波损耗,此时其他端口的输入信号 $a_2 \sim a_n$ 均为零,且不需要对其他端口的输出信号 $b_2 \sim b_n$ 进行分析,因此进一步将单个内置传感器及其所处的GIS气室等效为图2所示的原理图。

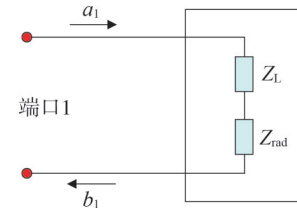


图2 内置传感器回波损耗原理图

Fig.2 Schematic diagram of built-in sensor return loss

图2中, $Z_L$ 为内置传感器的馈线阻抗,主要与传感器天线、馈电杆的材质、尺寸及接触状态相关; $Z_{rad}$ 为传感器的辐射阻抗,其定义为GIS气室内部某个封闭曲面上的电磁场功率密度积分值与传感器天线中感应出的电流平方值之比,可见辐射阻抗不仅反映了内置传感器的发射及接收特性,而且与内置传感器所处的气室结构相关。

根据图2所示的等效原理图,特高频内置传感器回波损耗 $S_{11}$ 可以进一步表示为

$$S_{11} = 20 \lg \rho = 20 \lg \left( \frac{Z_L + Z_{rad} - Z_c}{Z_L + Z_{rad} + Z_c} \right) \quad (2)$$

式中: $Z_c$ 为内置传感器N型接头的特征阻抗,一般为定值 $50\ \Omega$ ; $\rho$ 为N型接头与内置传感器之间的波反射系数,可以反映内置传感器的总体输入阻抗与N型接头特征阻抗的匹配程度。 $\rho$ 越接近零,说明阻抗匹配程度越好,两者之间的反射波越小,特高频内置传感器的传输性能越好,此时回波损耗 $S_{11}$ 的数值也越小。

可以看出,内置传感器回波损耗 $S_{11}$ 的数值大小与其馈线阻抗 $Z_L$ 和辐射阻抗 $Z_{rad}$ 的大小相关,不仅可以反映内置传感器天线、馈电杆的接触状态,还可以反映内置传感器在GIS气室内部的发射及接收特性,从而说明通过测试回波损耗的数值大小可以有效地对内置传感器的运行状态进行评估。

## 2 内置传感器回波损耗仿真模型

内置传感器的回波损耗可以反映其运行状态,而且与内置传感器所处的GIS气室结构有关,因此需要对不同气室的内置传感器正常及缺陷时的回波损耗数值特征开展研究,仿真计算是较为便捷有效的手段。

以安装有同型号圆盘型内置特高频传感器的500 kV GIS断路器气室和母线气室为例,利用三维电磁波有限元仿真软件HFSS建立等比例的三维模型,如图3所示。断路器气室长3 400 mm,壳体内径760 mm,内置传感器安装在气室端部;母线气室长5 000 mm,壳体内径490 mm,内置传感器安装在气室侧壁。内置传感器由圆盘天线、馈电杆、绝缘介质层、金属盖板和N型接头组成,其中圆盘、介质层、金属盖板组成典型的微带天线结构,用于接收GIS气室内部局部放电产生的特高频电磁波信号,馈电杆与盖板外侧N型接头及同轴电缆的内芯相连接,将接收到的特高频电磁波信号传输至特高频局部放电在线监测主机。由于N型接头和同轴电缆的特征阻抗均

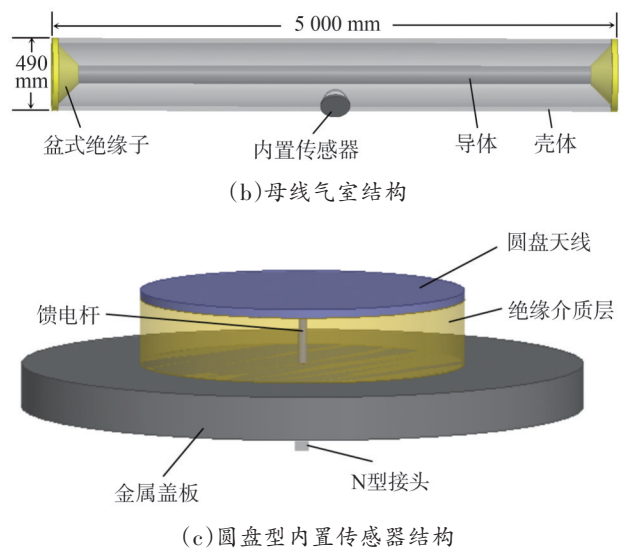


图3 内置传感器回波损耗仿真模型

Fig.3 Built-in sensor return loss simulation model

为 $50\ \Omega$ ,电磁波信号在两者之间不会发生折射、反射,对内置传感器的回波损耗计算结果没有影响,因此仿真模型中未对同轴电缆进行建模。圆盘型内置传感器的尺寸参数如表1所示。

表1 内置传感器尺寸参数

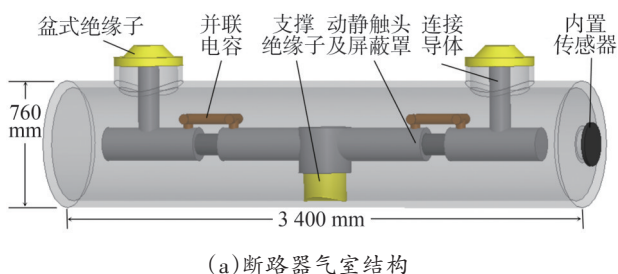
Table 1 Size parameters of built-in sensor 单位:mm

| 参数 | 圆盘天线直径 | 圆盘天线厚度 | 绝缘介质层厚度 | 馈电杆直径 |
|----|--------|--------|---------|-------|
| 尺寸 | 150    | 4      | 30      | 3     |

GIS气室及内置传感器三维建模完成后,还需要对各部件的相关电磁特性参数及边界条件进行赋值。

对于导体、壳体、圆盘天线、金属盖板等金属部件,在电磁场计算中可近似等效为理想导体(电导率无穷大),电磁波在其表面被完全反射,内部的电磁场强度为零,因此仅需要在仿真模型中将金属部件的外表面设置为理想导体表面,无须对其他参数进行赋值。

对于各类绝缘件、六氟化硫气体等非金属传输介质,特高频电磁波在其内部传播时会产生不同程度的衰减,在两种传输介质的交界面上还会发生电磁波的反射和折射,电磁波的衰减特性及折射、反射特性均与传输介质的电导率 $\sigma$ 、磁导率 $\mu$ 和介电常数 $\epsilon$ 三个电磁特性参数相关。对这三个参数赋值后,仿



真软件便可自动完成衰减量及折射、反射的计算。表2给出了内置传感器仿真模型中各传输介质的电磁特性参数<sup>[25]</sup>。

表2 各传输介质的电磁特性参数

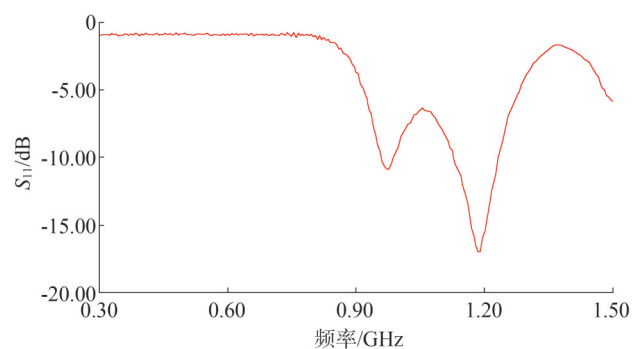
| 传输介质        | $\sigma/(S/m)$ | $\mu/(H/m)$           | $\varepsilon/(F/m)$    |
|-------------|----------------|-----------------------|------------------------|
| 六氟化硫气体      | $10^{-14}$     | $1.25 \times 10^{-6}$ | $8.88 \times 10^{-12}$ |
| 盆式绝缘子、支撑绝缘子 | $10^{-12}$     | $1.26 \times 10^{-6}$ | $3.89 \times 10^{-11}$ |
| 内置传感器绝缘介质层  | $10^{-12}$     | $1.26 \times 10^{-6}$ | $2.27 \times 10^{-11}$ |

对于仿真模型中气室两端的盆式绝缘子,其作用是相邻气室在气体通路上隔离,在其表面同样会发生特高频电磁波的反射和透射,透射波则会穿过盆式绝缘子继续在相邻气室的空里传播。这部分透射波经过了盆式绝缘子的衰减,信号幅值已大大削弱,即使在相邻气室再次反射回来,还要再次经过盆式绝缘子的衰减,因此相邻气室对回波损耗数值大小的影响可以忽略不计。图3所示的仿真模型中,无须考虑相邻气室的影响,只需要将盆式绝缘子表面设置为辐射边界条件,用来模拟开放的自由空间,保证仿真模型的收敛性即可。

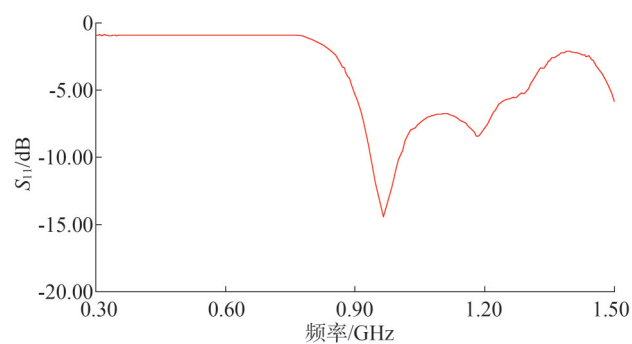
完成上述参数赋值和边界条件设置后,便可对断路器气室和母线气室的内置传感器的回波损耗进行仿真计算。由于GIS内部局部放电产生的特高频电磁波信号频率通常在0.3 GHz~1.5 GHz,因此主要对此频率范围内的回波损耗 $S_{11}$ 曲线进行仿真分析。仿真计算采用离散扫频的求解模式,在0.3 GHz~1.5 GHz频率段,每隔0.005 GHz设置一个求解频率点,则仿真软件依次对各个频率点的回波损耗 $S_{11}$ 值进行求解,并用平滑曲线连接,得到断路器气室和母线气室的内置传感器回波损耗曲线如图4所示。

从图4可以看出,内置传感器的回波损耗曲线均在0 dB以下,这是由于在工频运行状态下,图3所示的GIS断路器气室和母线气室在0.3 GHz~1.5 GHz频段是一个无源网络,其各个端口处的反射波大小始终不大于入射波。两个气室的内置传感器回波损耗曲线形状相近,均在0.97 GHz和1.19 GHz处存在两个极小值,这两个频率点即为内置传感器的谐振

频率,内置传感器在此处的传输特性较为优越,GIS气室内大部分电磁波信号可以被内置传感器转化为电压信号并从N型接头输出,只有极小部分电磁波信号被反射回去。



(a)断路器气室的内置传感器



(b)母线气室的内置传感器

图4 回波损耗曲线仿真结果

Fig.4 Simulation results of return loss curve

然而,断路器气室和母线气室内置传感器在谐振频率点的回波损耗数值大小并不相同,尤其在第二个谐振频率点1.19 GHz处,断路器气室内置传感器的回波损耗数值明显小于母线气室内置传感器。结合电磁波传播理论分析,布置于断路器气室端部的内置传感器与断路器动静触头构成的导电回路为同轴结构,这种结构更有利于高频段的高次模波的传播,从而使断路器气室内置传感器在第二个谐振频率点的回波损耗数值更小,同时也进一步说明了内置传感器的回波损耗大小与其所处的气室结构密切相关。

在变电站现场使用网络分析仪,对相同布置位置、相同结构尺寸的特高频内置传感器进行回波损耗测试,仪器接线及回波损耗实测曲线结果分别如

图5、图6所示。可见回波损耗实测曲线的数值大小及谐振频率点与图4中的仿真结果基本一致,从而验证了图3所示的仿真模型的正确性,可进一步用于内置传感器缺陷时的回波损耗曲线特征研究。

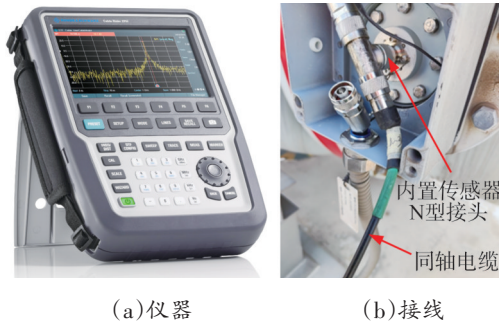
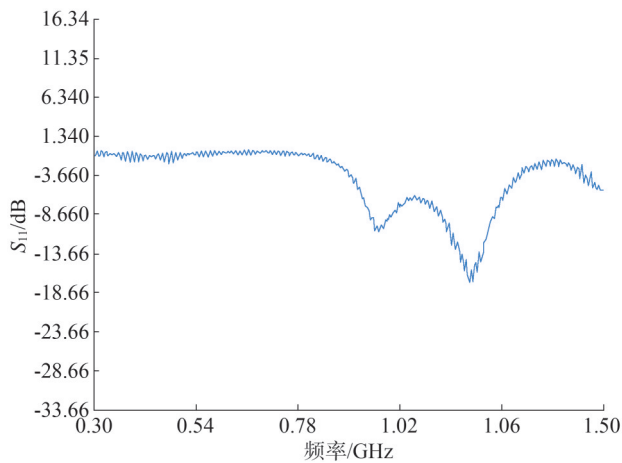
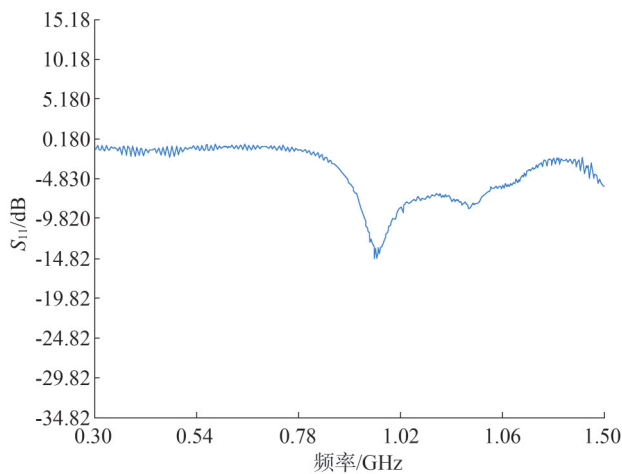


图5 回波损耗测试仪器及接线

Fig.5 Return loss testing instrument and wiring



(a)断路器气室的内置传感器



(b)母线气室的内置传感器

图6 回波损耗实测曲线

Fig.6 Measurement curve of return loss

### 3 典型缺陷下的回波损耗曲线特征

综合内置传感器的结构原理和现场运行经验,其在长期运行过程中,可能出现的自身缺陷主要有两种:一种是长期高温条件下运行导致绝缘介质层发生绝缘劣化,另一种是GIS长期工频振动导致馈电杆与圆盘天线接触不良。本节利用图3所示的仿真模型,对两种典型缺陷时的回波损耗曲线进行仿真分析,旨在研究不同缺陷时回波损耗曲线的特征规律,为变电站现场开展内置传感器性能校验提供理论参考。

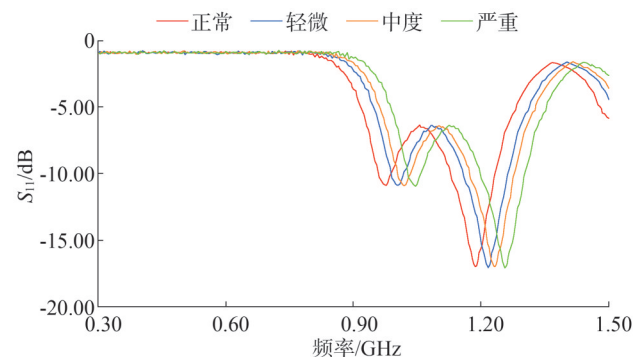
#### 3.1 介质层绝缘劣化

考虑到内置传感器介质层绝缘劣化时,其介电常数 $\epsilon$ 会减小、电导率 $\sigma$ 会增大,因此将图3所示的仿真模型中绝缘介质层的介电常数、电导率分别调整为表3所示的3种情形,以模拟不同的绝缘劣化程度,其余组部件的参数和边界条件保持不变,来模拟介质层绝缘劣化缺陷。此时仿真得到的断路器气室和母线气室内置传感器的回波损耗曲线如图7所示。

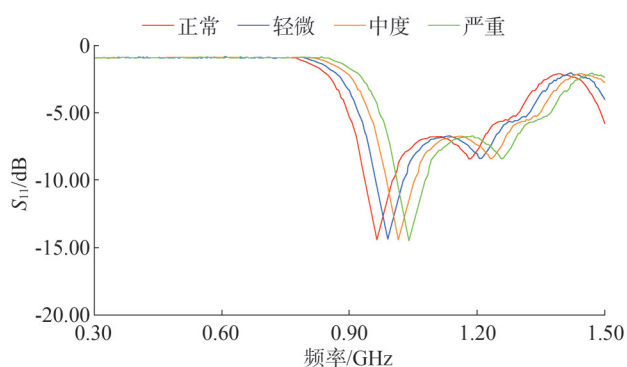
表3 绝缘介质层劣化时的参数设置

Table 3 Parameters for insulation layer degradation

| 劣化程度 | $\epsilon/(F/m)$       | $\sigma/(S/m)$         |
|------|------------------------|------------------------|
| 正常   | $2.27 \times 10^{-11}$ | $1.00 \times 10^{-12}$ |
| 轻微   | $1.70 \times 10^{-11}$ | $1.25 \times 10^{-12}$ |
| 中度   | $1.14 \times 10^{-11}$ | $1.50 \times 10^{-12}$ |
| 严重   | $0.57 \times 10^{-11}$ | $1.75 \times 10^{-12}$ |



(a)断路器气室的内置传感器



(b)母线气室的内置传感器

图7 介质层绝缘劣化时的回波损耗曲线

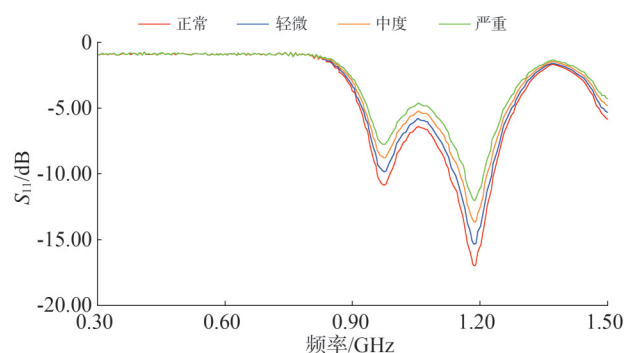
Fig.7 Return loss curve when dielectric layer insulation decreases

从图7可以看出,断路器气室和母线气室的内置传感器介质层绝缘劣化时,其回波损耗曲线均呈现出相同的变化规律,即回波损耗曲线的两个谐振频率点相对于正常状态时有所增大、曲线整体右移,且绝缘劣化程度越严重,谐振频率点变化程度越大、曲线右移越明显,但回波损耗曲线整体数值变化不大。

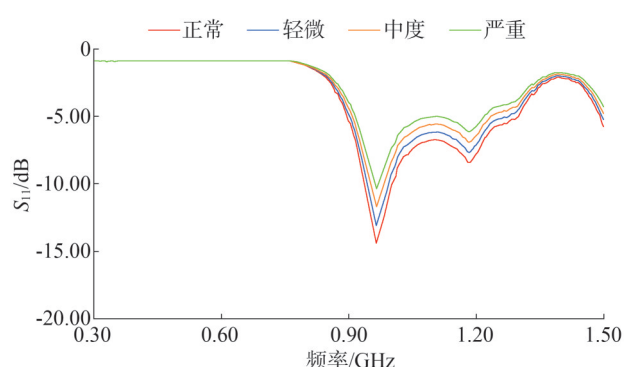
### 3.2 馈电杆接触不良

内置传感器馈电杆接触不良主要表现为馈电杆与圆盘天线的接触面积减小、接触电阻增大,因此在仿真模型中通过将馈电杆与圆盘天线接触部分的直径从3 mm依次缩小为2.25 mm、1.5 mm、0.75 mm,分别模拟馈电杆轻微接触不良、中度接触不良、严重接触不良。此时仿真得到的断路器气室和母线气室内置传感器的回波损耗曲线如图8所示。

可以看出,断路器气室和母线气室的内置传感器馈电杆接触不良时,其回波损耗曲线同样呈现出



(a)断路器气室的内置传感器



(b)母线气室的内置传感器

图8 馈电杆接触不良时的回波损耗曲线

Fig.8 Return loss curve when feeder pole contact is poor

相同的变化规律,即各个频率点的回波损耗数值均有所增大、曲线整体上移,且接触不良程度越严重,回波损耗数值变化程度越大、曲线上移越明显,但回波损耗的谐振频率未发生改变。

### 3.3 基于回波损耗的现场校验方法

结合以上分析可知,对于内置传感器常见的两种自身缺陷,其回波损耗表现出不同的变化特征:介质层绝缘劣化时,回波损耗曲线的谐振频率点增大,曲线整体右移;馈电杆接触不良时,回波损耗数值变大,曲线整体上移。

使用网络分析仪在变电站现场对在运GIS特高频内置传感器开展回波损耗测试,将回波损耗曲线测试结果与初始曲线对比,根据曲线的变化趋势对内置传感器进行缺陷诊断。回波损耗初始曲线为GIS及其内置传感器现场安装后的初次回波损耗测试曲线,对于已经运行多年、安装时未测试初始曲线的GIS内置传感器,可以与相同结构位置的同型号内置传感器(如A、B、C三相之间)的回波损耗实测曲线进行对比。

鉴于回波损耗的测试频段为0.3 GHz~1.5 GHz,不受50 Hz工频电压的影响,且测试接线位置位于壳体外侧,故回波损耗测试无须停电开展,可以方便快捷地对内置传感器的运行状况进行评估。

## 4 结束语

根据GIS特高频内置传感器结构原理及多端口网络参数理论,文中分析了内置传感器回波损耗的物理意义。回波损耗的数值大小不仅可以反映传感

器天线和馈电杆的接触状态,还可以反映内置传感器在GIS气室内部的接收特性,因此利用回波损耗测试对内置传感器的运行状态进行现场评估是有效可行的。

根据GIS断路器和母线气室的结构尺寸,建立了特高频内置传感器等比例的三维仿真模型,对内置传感器介质层绝缘劣化、馈电杆接触不良两种典型缺陷时的回波损耗曲线进行仿真分析。结果表明,介质层绝缘劣化时,内置传感器的回波损耗曲线的谐振频率点增大,曲线整体右移;馈电杆接触不良时,内置传感器的回波损耗数值变大,曲线整体上移。在此基础上提出了在运内置传感器的现场校验方法,即使用网络分析仪对内置传感器进行带电测试,根据回波损耗曲线的变化趋势对内置传感器进行状态评估及缺陷诊断。

## 参考文献

- [1] 何宁辉,朱洪波,周秀,等.GIS内部缺陷检测及诊断分析技术研究[J].电测与仪表,2019,56(24):86-91.  
HE Ninghui, ZHU Hongbo, ZHOU Xiu, et al. Research on GIS internal defect detection and diagnosis analysis technology [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(24): 86-91.
- [2] 刘航斌,林厚飞,褚静,等.基于CWGAN-div和Mi-CNN的GIS局部放电图谱识别[J].浙江电力,2023,42(8):75-83.  
LIU Hangbin, LIN Houfei, CHU Jing, et al. Recognition of partial discharge patterns of GIS based on CWGAN-div and mi-CNN [J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(8): 75-83.
- [3] 王江伟,张丕沛,李杰,等.特高压变电站1000 kV GIS局部放电问题分析[J].山东电力技术,2022,49(7):52-57.  
WANG Jiangwei, ZHANG Pipei, LI Jie, et al. Analysis of partial discharge in 1000 kV GIS of UHV substation [J]. Shandong Electric Power, 2022, 49(7): 52-57.
- [4] 岳美,杨秀龙,许景华,等.基于超声波检测技术的GIS内部自由颗粒缺陷分析[J].山东电力技术,2021,48(2):44-47.  
YUE Mei, YANG Xiulong, XU Jinghua, et al. Analysis of free particle defect in GIS based on ultrasonic detection technology [J]. Shandong Electric Power, 2021, 48(2): 44-47.
- [5] 李兴旺,卢启付,李端姣,等.GIS局部放电特高频在线监测系统传感器配置方案研究[J].高压电器,2012,48(11):70-74.  
LI Xingwang, LU Qifu, LI Duanjiao, et al. Transducers arrangement of the UHF-PD online monitoring system for GIS [J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(11): 70-74.
- [6] 李天辉,荣命哲,王小华,等.GIS内置式局部放电特高频传感器的设计、优化及测试研究[J].中国电机工程学报,2017,37(18):5483-5493.  
LI Tianhui, RONG Mingzhe, WANG Xiaohua, et al. Design, optimization and experiment study of internal UHF sensor for partial discharge detection in GIS [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(18): 5483-5493.
- [7] 王玮,周秀.GIS内置特高频传感器现场运行典型缺陷及预防措施[J].宁夏电力,2020(1):47-51.  
WANG Wei, ZHOU Xiu. Typical defects and preventive measures of GIS built-in UHF sensor on site [J]. Ningxia Electric Power, 2020(1): 47-51.
- [8] 马飞越,牛勃,周秀,等.GIS内置式特高频局放传感器悬浮电位缺陷的分析[J].宁夏电力,2018(5):34-37.  
MA Feiyue, NIU Bo, ZHOU Xiu, et al. Analysis on the deflection of suspended potential for inner ultra high frequency discharge sensor in GIS [J]. Ningxia Electric Power, 2018(5): 34-37.
- [9] 张丕沛,王江伟,李杰.GIS特高频局部放电内置传感器自身放电缺陷分析方法[J].山东电力技术,2021,48(9):28-32.  
ZHANG Pipei, WANG Jiangwei, LI Jie. Defect analysis method of UHF partial discharge in GIS inner sensor [J]. Shandong Electric Power, 2021, 48(9): 28-32.
- [10] 陈璐,司文荣,傅晨钊,等.GIS局部放电检测用内置传感器影响因素研究[J].高压电器,2018,54(11):103-108.  
CHEN Lu, SI Wenrong, FU Chenzhao, et al. Study on influencing factors of inner sensors for GIS partial discharge detection [J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(11): 103-108.
- [11] 邵丕军,朱明晓,刘家齐,等.GIS内置特高频传感器性能参数的数值仿真与优化设计技术[J].高电压技术,2020,46(1):282-291.  
SHAO Xianjun, ZHU Mingxiao, LIU Jiaqi, et al. Numerical simulation and optimization design of performance parameters of internal UHF sensor in GIS [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 282-291.
- [12] 顾乐,陈隽,刘文浩,等.GIS局部放电圆板型内置传感器性能影响因素的研究[J].高压电器,2012,48(2):55-59.  
GU Le, CHEN Jun, LIU Wenhao, et al. Impact factors of disc sensor for partial discharge in GIS [J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(2): 55-59.
- [13] HIKITA M, OHTSUKA S, WADA J, et al. Propagation properties of PD-induced electromagnetic wave in 66 kV GIS model tank with L branch structure [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(5): 1678-1685.
- [14] HIKITA M, OHTSUKA S, WADA J, et al. Study of partial discharge radiated electromagnetic wave propagation characteristics in an actual 154 kV model GIS [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(1): 8-17.
- [15] 庞小峰,李兴旺,吕鸿,等.500 kV GIS断路器内置特高频传感器灵敏度校验方法[J].广东电力,2014,27(10):112-115.  
PANG Xiaofeng, LI Xingwang, Lü Hong, et al. Verification method

- for sensitivity of built-in ultra-high frequency sensor in 500 kV GIS breaker [J]. Guangdong Electric Power, 2014, 27 (10): 112-115.
- [16] 郑书生,舒胜文,陈金祥,等.基于传递函数的GIS特高频传感器性能对比评价方法[J].电网技术,2017,41(2):651-655.  
ZHENG Shusheng, SHU Shengwen, CHEN Jinxiang, et al. Property comparison and evaluation method for ultra-high-frequency sensors installed on GIS based on transfer function [J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 651-655.
- [17] 刘宝宝,张高潮.GIS局部放电内置UHF传感器灵敏度的仿真研究[J].现代电力,2013,30(5):60-63.  
LIU Baobao, ZHANG Gaochao. Simulation study on the sensitivity of internal UHF sensor for GIS partial discharge [J]. Modern Electric Power, 2013, 30(5): 60-63.
- [18] 李兴旺,黎量,唐志国,等.外置式UHF校验信号注入方法的可行性研究[J].高压电器,2015,51(5):71-76.  
LI Xingwang, LI Liang, TANG Zhiguo, et al. Feasibility analysis of radiating UHF verification signal through small hole in metal flange [J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(5): 71-76.
- [19] 李兴旺,卢启付,叶齐政,等.GIS局部放电与等效脉冲注入过程中特高频信号一致性研究[J].高压电器,2013,49(11):99-103.  
LI Xingwang, LU Qifu, YE Qizheng, et al. Study on the consistency of ultra-high frequency signals produced by GIS partial discharge and the process of equivalent pulse injection [J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(11): 99-103.
- [20] 陈晔,叶兆平,郑书生.GIS套管对平面电磁波耦合特性的仿真分析[J].高压电器,2020,56(2):15-20.  
CHEN Ye, YE Zhaoping, ZHENG Shusheng. Simulation and analysis of coupling characteristics of GIS bushing to plane electromagnetic waves [J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(2): 15-20.
- [21] 舒胜文,陈金祥,陈彬,等.应用正向传输系数的GIS局部放电UHF传感器布置方式现场校核方法[J].电网技术,2016,40(9):2910-2916.  
SHU Shengwen, CHEN Jinxiang, CHEN Bin, et al. A field calibration method for UHF partial discharge detection sensor arrangement in GIS based on forward propagation coefficient [J]. Power System Technology, 2016, 40(9): 2910-2916.
- [22] 李欣,叶会生,谢耀恒,等.GIS特高频局部放电传感器接收性能测试方法研究[J].湖南电力,2016,36(2):28-31.  
LI Xin, YE Huisheng, XIE Yaoheng, et al. Measurement methods research on receiving capacity for GIS UHF partial discharge sensor [J]. Hunan Electric Power, 2016, 36(2): 28-31.
- [23] 唐志国,王海青,何宁辉,等.局部放电特高频传感器及系统现场校验与评估技术[J].高压电器,2018,54(11):48-54.  
TANG Zhiguo, WANG Haiqing, HE Ninghui, et al. Field calibration and evaluation of partial discharge UHF sensors and detection system [J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54 (11): 48-54.
- [24] 王彦博,朱明晓,邵先军,等.气体绝缘组合电器中局部放电特高频信号S参数特性仿真与实验研究[J].高电压技术,2018,44(1):234-240.  
WANG Yanbo, ZHU Mingxiao, SHAO Xianjun, et al. Simulation and experimental research on S parameter characteristics of partial discharge UHF signals in GIS [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(1): 234-240.
- [25] 任志刚,李伟,徐兴全,等.不同电压等级GIS局部放电UHF信号传播特性仿真研究[J].高压电器,2019,55(5):88-93.  
REN Zhigang, LI Wei, XU Xingquan, et al. Simulation on propagation characteristics of UHF signals of partial discharge in different voltage levels GIS [J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55 (5): 88-93.

收稿日期:2024-08-14

修回日期:2024-12-02

作者简介:

张丕沛(1996),通信作者(sddky\_zpp@163.com),男,硕士,工程师,主要从事高压设备带电检测与故障分析工作;

朱振龙(1994),男,硕士,工程师,主要从事超高压变电设备检修工作;

于吉(1998),女,硕士,主要从事超高压变电设备检修工作;

成鲁钰(1989),男,硕士,工程师,主要从事超高压变电设备检修工作;

宋磊(1992),男,硕士,工程师,主要从事超高压变电设备检修工作。

(责任编辑 车永强)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2025.09.011

## GIS盆式绝缘子温升特性及其影响规律研究

李杰\*, 王丹, 孙承海, 孙艳迪, 徐冉

(国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250003)

**摘要:**全封闭气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear, GIS)的广泛应用,要求对GIS的温度分布进行预估,用以预防可能出现的过热故障。本文采用有限元方法,研究直流激励下带有252 kV盆式绝缘子的GIS温度特性。建立水平安装的几何模型,获得三维模型下的温度分布,同时搭建相对应的试验平台校对仿真模型。结果表明:由于焦耳热与负载电流的平方成正比,随着导体负载电流的升高,GIS整体温度提高了14℃;由于环境温度的提高和GIS内部气体压力的减小,导致GIS内部气体物性参数发生变化,引起GIS出现不同程度的温度上升。本文对GIS温度分布的预估和检测具有指导意义,有助于掌握实际运行中不同运行条件下GIS的温度分布,能够预警高温导致绝缘性能恶化的情况,同时对绝缘子的设计具有一定的指导意义。

**关键词:**GIS;直流;252 kV盆式绝缘子;温度特性

中图分类号:TM75

文献标志码:A

文章编号:1007-9904(2025)09-0104-09

## Research on Temperature Rise Characteristics and Influencing Patterns of GIS Basin-type Insulators

LI Jie\*, WANG Dan, SUN Chenghai, SUN Yandi, XU Ran

(State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250003)

**Abstract:** The widespread application of Gas Insulated Switchgear (GIS) necessitates the estimation of its temperature distribution to prevent potential overheating failures. This paper employs the finite element method to study the temperature characteristics of GIS equipped with a 252 kV basin-type insulator under DC excitation. A geometric model of horizontal installation is established to obtain the temperature distribution in a three-dimensional model, and a corresponding experimental platform is set up to validate the simulation model. The results show that with the increase of conductor load current, the overall temperature of GIS increases by 14 °C because joule heat is proportional to the square of load current. Increases in ambient temperature and decreases in internal gas pressure also lead to varying degrees of temperature rise in the GIS, as these conditions cause changes in the physical property parameters of the internal gas. Therefore, it is necessary to pay attention to the temperature distribution of GIS under different operating conditions during actual operations. It has guiding significance for the prediction and detection of GIS temperature distribution, which can warn the deterioration of insulation performance caused by high temperature, and also has certain guiding significance for the design of insulators.

**Keywords:** GIS; DC; 252 kV disc-type insulator; temperature characteristics

### 0 引言

全封闭气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear, GIS)和全封闭气体绝缘输电线路(gas insulated transmission line, GIL)因其节省占地空间、

基金项目:国网山东省电力公司科技项目(2023A-131)。

Science and Technology Project of State Grid Shandong Electric Power Company (2023A-131)。

受环境影响小以及使用寿命长等特点在电力系统中得到广泛应用,如在负荷密度较大的城市中心区建设地下管廊隧道<sup>[1-3]</sup>。通常将GIS与GIL的母线和外壳制作成形状稍不均匀场的同轴配置。此外,根据绝缘气体种类的不同可分为混合气体绝缘子和纯SF<sub>6</sub>绝缘子,根据支撑绝缘子的形状不同可分为盆式绝缘子和柱式绝缘子<sup>[4-5]</sup>。

随着高压直流技术的发展和柔性直流输电的应用,高压直流 GIS 和 GIL 得到了越来越多的关注。正常运行过程中,空心导杆流过上千安培的负载电流,产生较大的焦耳热,绝缘气体和固体绝缘子作为导热介质,将热量从高温侧向低温侧传递,当散热量和产热量达到动态平衡后形成稳定的温度分布。若设计结构不合理,则会造成散热困难或产热增加,导致封闭设备出现过热现象,对设备的绝缘性能造成恶劣的影响(如绝缘加速老化、热击穿等)<sup>[6-9]</sup>。因此,需要研究包括气体和固体绝缘子在内的 GIS/GIL 温度分布,特别是在负载电流大的设备中,该项研究尤为必要。随着仿真技术的不断发展,国内外开始采用仿真计算的方式获得 GIS/GIL 内部温度分布<sup>[10]</sup>,模拟并评估温度分布。Chakir 等人<sup>[11]</sup>对 GIL 水平环形空间中的自然对流进行了数值研究,讨论了瑞利数和半径比对换热和流体运动特性的影响。陈敬友等人<sup>[12]</sup>对二维模型下绝缘气体的换热能力进行了研究。Niu 等人<sup>[13]</sup>研究了三维同轴圆柱的交流温度场分布。这些研究大多是基于二维中心旋转对称模型建立的,或是只考虑了同轴外壳和母线之间的传热过程。但实际传热过程中,考虑到流体运动和重力因素,温度分布并不是完全旋转对称分布。因此,考虑三维空间中的温度分布显得尤为重要。

本文以 GIS 为研究对象,建立了带 252 kV 盆式绝缘子的三维仿真模型,搭建与之对应的试验平台。分析了直流载流条件下 GIS 内部传热和温度分布。在介绍仿真模型以及模型的参数的基础上,对温度产生和散热等相关理论进行分析。然后详细介绍了温升试验平台,并基于温升试验平台进行了仿真试验,结合仿真实验,讨论了导体负载电流、环境温度、绝缘气体压力对盆式绝缘子温度分布的影响。

## 1 数学模型

### 1.1 热量的产生

直流激励下,稳态时只考虑焦耳发热,即电流通过金属导体会产生一定的热量,加热功率计算为<sup>[14]</sup>:

$$P = I^2 R \quad (1)$$

$$R = \frac{\rho l}{S} \quad (2)$$

式中: $P$ 为导体流过电流时产生的加热功率,W; $I$ 为流过导体的电流,A; $R$ 为导体电阻, $\Omega$ ; $\rho$ 为导体的电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$ ; $S$ 为导体截面积, $\text{m}^2$ ; $l$ 为导体长度,m。

载流导体的电阻率和温度相关,导体电阻率随温度变化的计算公式为

$$\rho(T) = \rho(T_0) [1 + \beta(T - T_0)] \quad (3)$$

式中: $T$ 为导体温度, $^{\circ}\text{C}$ ; $\rho(T_0)$ 为 $T_0$ 温度下对应的电阻率( $T_0$ 为参考温度,通常取 $20^{\circ}\text{C}$ ),本文计算中取值为 $2.56 \times 10^7 \Omega \cdot \text{m}$ ; $\beta$ 为电阻率的温度系数, $1/^{\circ}\text{C}$ ,表示电阻率随温度变化的敏感程度。

### 1.2 热量的传递

热量的传递方式有三种,分别是热传导、热对流和热辐射<sup>[15]</sup>,载流导体中热量传递方式如图 1 所示。

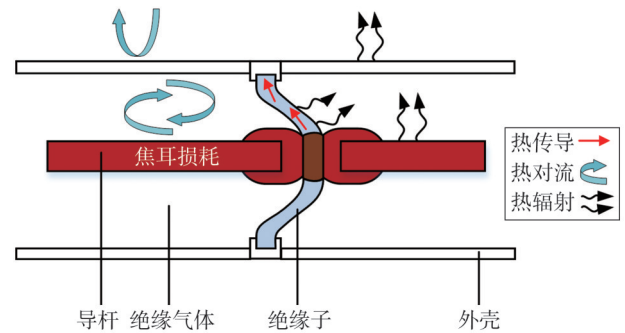


图 1 载流导体中热量传递方式

Fig.1 Heat transfer mechanisms in current-carrying conductors

热传导发生在任意相对静止且有温差的两个物体之间,是基础的传热方式,其数学表达式为

$$q_1 = -\lambda \nabla T \quad (4)$$

式中: $q_1$ 为单位体积的传导热流密度, $\text{W}/\text{m}^2$ ; $\lambda$ 为导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ; $\nabla$ 为梯度算子。

热对流发生在具有相对运动且存在温差的两部分流体之间,同时伴随热传导。热对流的数学表达式为

$$q_2 = h \Delta T \quad (5)$$

式中: $q_2$ 为单位面积的对流传热密度, $\text{W}/\text{m}^2$ ; $h$ 为对流换热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ; $\Delta T$ 为冷热流体之间绝对温度的差值, $^{\circ}\text{C}$ 。换热系数的计算受众多因素的影响,比较复杂。对流换热系数的计算公式为

$$G_r P_r = \frac{\alpha g l^3 \Delta T}{d \eta} \quad (6)$$

$$d = \frac{\lambda}{\rho C_p} \quad (7)$$

$$h = \frac{\lambda c (G_r P_r)^n}{l} \quad (8)$$

式中:  $G_r$ 为格拉晓夫数;  $P_r$ 为普朗特数;  $\alpha$ 为流体的体膨胀系数,  $1/K$ ;  $g$ 为重力加速度,  $m/s^2$ ;  $l$ 为特征长度,  $m$ ;  $d$ 为热扩散系数,  $m^2/s$ ;  $\eta$ 为运动黏度,  $m^2/s$ ;  $\rho$ 为流体密度,  $kg/m^3$ ;  $C_p$ 为流体比热容,  $J/(kg \cdot ^\circ C)$ ;  $c$ 、 $n$ 为计算系数, 与换热表面结构、流体流态等因素有关, 本文中分别取值为0.3、0.25。换热系数也可以通过经验曲线直接查到对应的数值<sup>[16]</sup>。

热辐射发生在所有温度高于 $-273.15^\circ C$ 的物体之间。可以认为每个物体每时每刻都在进行热辐射, 同时热辐射不需要介质, 可在真空中进行。热辐射的数学表达式为

$$q_3 = \varepsilon \sigma (T_a^4 - T_b^4) \quad (9)$$

式中:  $q_3$ 为单位面积的辐射热流密度,  $W/m^2$ ;  $\varepsilon$ 为表面辐射率, 本文所用数值如表1所示<sup>[17]</sup>;  $\sigma$ 为玻尔兹曼常数, 其值为 $1.38 \times 10^{-23} J/K$ ;  $T_a$ 为较高温表面的绝对温度,  $K$ ;  $T_b$ 为较低温表面的绝对温度,  $K$ 。

表1 不同位置的辐射率

Table 1 Emissivity at different locations

| 位置        | 辐射率  |
|-----------|------|
| 绝缘子表面     | 0.93 |
| 外壳外面      | 0.92 |
| 外壳内面及空心导杆 | 0.20 |

单相流的N-S方程描述气体运动, 分别为质量守恒、动量守恒和能量守恒。数学表达式分别为:

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (10)$$

$$\rho(\mathbf{u} \cdot \nabla) \mathbf{u} = -\nabla p + \nabla K + \rho \mathbf{g} \quad (11)$$

$$\rho C_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla q = Q \quad (12)$$

式中:  $\mathbf{u}$ 为速度矢量,  $m/s$ ;  $p$ 为气体相对压强  $Pa$ ;  $K$ 为气体黏性应力张量,  $Pa$ ;  $Q$ 为额外热源,  $W$ ;  $q$ 为热流密度,  $W/m^2$ 。

由于固体间的热传导所传递的热量远大于另外两种传热方式, 因此固体介质的物理特性参

数(如热导率、比热容、密度等)对结果影响较大, 本文中使用的固体绝缘子参数如下: 绝缘子密度为 $2300 kg/m^3$ ; 比热容采用蓝宝石差示扫描量热法测得, 导热系数采用瞬态热线法测得, 测量数据绘制如图2所示<sup>[18]</sup>。

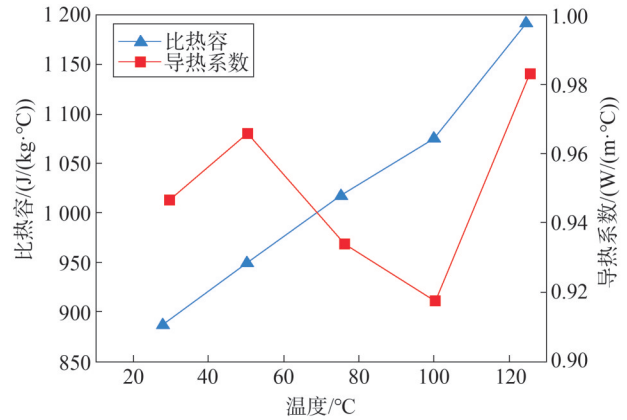


图2 绝缘子传热参数

Fig.2 Heat transfer parameters of insulators

由图2可知, 导热系数随温度变化幅度不大, 在选用温度范围内的数值约等于 $1 W/(m \cdot ^\circ C)$ , 比热容随温度变化较大, 在选用温度范围内最大幅度差为 $350 J/(kg \cdot ^\circ C)$ 。

### 1.3 流体状态

本文仿真计算模型采用的是同轴圆柱结构, 由于温度梯度导致气体密度变动, 引发浮力效应推动同轴圆柱结构内部自然对流。在确保方程组一致性前提下, 对于GIS密闭结构内的自然对流过程, 需要把流体设置为可压缩流动。

对流传热过程中流体的流动形态, 可分为层流和湍流两类<sup>[19]</sup>。其中, 格拉晓夫数  $G_r$  是用于判别封闭环境里流体是处于层流还是湍流状态的关键性指标。当格拉晓夫数小于 $10^8$ 时, 流体表现为层流特性; 而大于 $10^9$ 时为湍流, 位于两者之间就是过渡区。其表达式为

$$G_r = \frac{g \alpha l^3 \Delta T}{\eta^2} \quad (13)$$

根据上式进行计算, 本文所建GIS模型在内部绝缘气体为 $0.5 MPa SF_6$ 的工况下  $G_r=6.1 \times 10^9$ , 因此内部流体处于湍流状态。经验证, 发现使用湍流模型

和层流模型得到的结果相差 0.3 °C。根据计算结果与试验值相对比得知,层流计算结果与试验更贴合。考虑到减少计算复杂性与提高收敛性的需求,同时参照文献[20]在研究直流 GIL 三支柱式绝缘子的温度和电场分布时也有着类似的处理,因此本文采用层流替代湍流是可行的。

## 2 几何模型与边界条件

### 2.1 几何模型

本文构建了基于 252 kV GIS 管道的等效模型,并对模型进行合理的简化,数值仿真模型包括中心导杆、屏蔽罩、盆式绝缘子、外壳和绝缘气体<sup>[21-23]</sup>。由于所研究对象为水平放置状态的 GIS 设备,因此重力方向与 GIS 导杆轴线方向呈 90° 夹角。尽管其具有径向对称分布的气室结构,但在 GIS 设备的重力方向上却存在不对称性。故需要建立 GIS 三维温度场数值仿真模型,以更准确地描述 GIS 设备整体发热特性和温度分布规律。当负载电流流过 GIS 中心导杆时,不同部位的热环境使绝缘气体的密度发生变化,并导致绝缘气体在气室内循环流动,形成自发对流,从而能有效地将热量转移到 GIS 的各个部位<sup>[24]</sup>。

考虑到盆式绝缘子的两边并非完全对称,需要预留足够的空间来保证气体可以完成完整的环流路径。本文选取总长度为 1.1 m 的 GIS 三维模型,建立如图 3(a) 所示温度场计算分析模型。GIS 放置状态设定为横向水平,由于其内部发热过程以及流体流动的状态在 GIS 纵向上呈现对称分布的状态,并且根据陈泽明等人在进行 550 kV GIL 仿真中也发现 GIL 的流场确实是对称分布的,故可以通过建立三维 GIS 模型来进行仿真和计算,同时计及重力与导杆垂直对温度分布的影响,建立 GIS 的仿真模型为沿其导杆垂直方向剖开,只模拟其中一半的物理过程。基于此,几何模型减小为原始尺寸的一半,同时,将剖面设定为对称面,且该面设置为绝热面。为使最终结果更加精确,模型中在绝缘气体以及绝缘子和导杆的边界,设置条形层边界用于计算的过渡,对于其他域则划分成自由四面体网格,其中划分单元的大小以及是否合理则根据有限元仿真软件细则进行划分和判断,本文计算过程中划分的网格结构如图 3

(b) 所示,可以看出网格划分分布均匀,网格单元形状良好未发生扭曲,单元之间的大小变化未出现剧烈现象,相邻单元尺寸比值符合有限元仿真细则的建议(小于 2:1)。综上所述,该 1/2 模型相比整体 GIS 模型大大降低了网格的数量且对计算准确性无影响,从而显著节约计算机存储空间并降低计算时长。

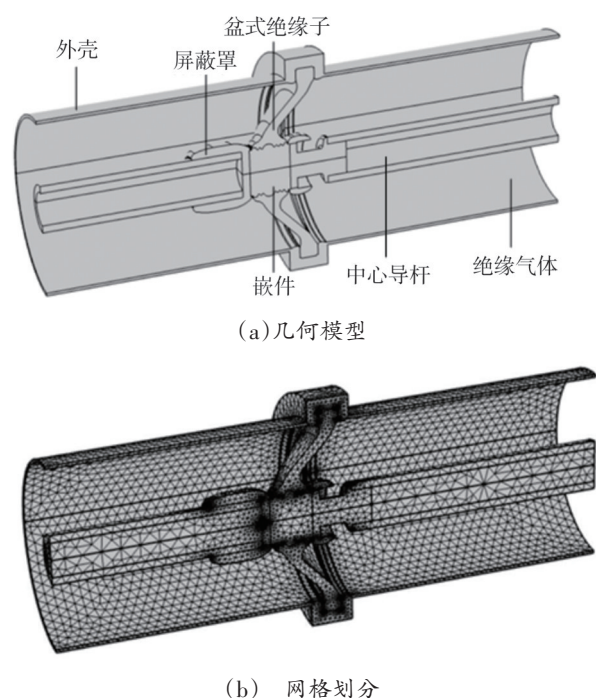


图3 GIS 几何模型

Fig.3 GIS geometric model

### 2.2 边界条件

物体的温度分布会受到其环境的影响,因此研究物体的热边界条件具有重要意义。热传导微分方程通常涉及以下 3 个一般边界条件<sup>[25-26]</sup>。

第 1 类边界条件通常表示物体边界上的温度分布已知,可表示为

$$T|_{\Gamma} = f(x, y, t) \quad (14)$$

式中: $\Gamma$  为物体的边界; $f(x, y, t)$  为已知的关于温度的函数。

第 2 类边界条件通常表示物体边界上的热流密度已知,可表示为

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial m}|_{\Gamma} = g(x, y, t) \quad (15)$$

式中: $g(x, y, t)$  为已知的关于热流密度的函数; $m$  为

边界的法相方向。

第3类边界条件是第1类和第2类边界条件的结合,计及物体边界上的温度和边界上的热流。设边界周围流体温度为 $T_f$ ,可表示为

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial m}|_r = h(T - T_f)|_r \quad (16)$$

$T_f$ 和 $h$ 可视为一个常数,同时也能够作为位置和时间变化的函数。

在流场中,GIS的固体表面选择为无滑移边界,即流速为0,其表达式为

$$u = 0 \quad (17)$$

### 3 温升试验平台搭建

选择一段与温升计算尺寸相同的GIS母线进行温升试验,以便和仿真计算相互验证。温升试验选择在户内实验厅进行,风速不大于0.5 m/s,导杆通流为2 000 A,试验相数为单相,试验大厅的环境温度为10℃左右。每组温升试验前,对GIS管道内实施除尘、抽真空操作,真空度小于30 Pa。通流设备采用的是SDDL-6000Q温升试验装置,输出电流为0~6 000 A,可长时间持续通流。252 kV GIS温升试验样机状态现场照片如图4所示,GIS试验样机包括3个盆式绝缘子,便于在对导杆和外壳进行测温的同时,对盆式绝缘子相应点位进行测温。GIS采用的绝缘气体为0.5 MPa SF<sub>6</sub>。



图4 温升试验样机现场

Fig.4 Field of temperature rise test prototype

为更全面地研究GIS的发热温升规律,本次温升试验测温包括盆式绝缘子、导杆和外壳,具体测温点分布如图5所示。

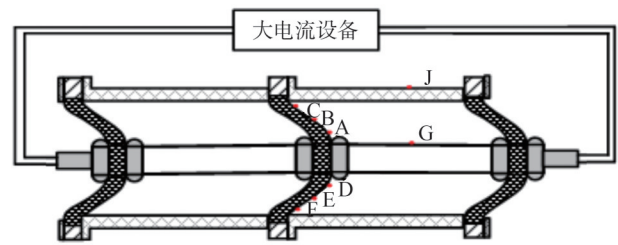


图5 测温点分布

Fig.5 Temperature measurement point distribution

## 4 结果与讨论

### 4.1 仿真结果与验证

为验证本文所建温度场模型的有效性,通过热电偶温度传感器在试验腔体上进行测温试验。为了估算GIS通流条件下达到相对稳定温度的时间,对额定工况下,填充气体为0.5 MPa SF<sub>6</sub>,环境温度为25.9℃的GIS温度场的计算结果进行分析,获得合适的试验通流时间,来保证试验和仿真验证时的相对准确性。选取瞬态20 h进行仿真计算,以确保载流模型温度达到稳定状态并留有适当的裕量。为尽可能获悉GIS腔体内大部分位置的温升变化规律,选取有代表性的点,提取盆式绝缘子上2个点,外壳1个点,导杆1个点温升变化的数据,温度随时间变化如图6所示,由图6可知,大概需通流4 h各点位置的温升可达到稳定温度的90%。当温度达到稳定温度的98%时,一般即可认为温度达到稳定状态。结果发现,当通流8 h时,所选4个点处温度均可达到稳定温度的98%,为节约实际试验过程中的时间成本,即选取瞬态8 h计算结果,相应的温升试验也通流8 h。

为获知温升试验中GIS各测温点的温度随时间变化规律以便于和仿真对照,本试验采取每15 min记一次温度数值的方式,由于测温点较多,关于导杆和外壳的温度变化已多有研究,选取盆式绝缘子上具有代表性的点分析温度随载流时间变化规律,其温度随时间变化的曲线如图7所示。由图7可知,在温升试验时,通流6 h后各点温升增速明显下降,与仿真结果相似,整体各点的温度数值大小以及温升速率和仿真相似。

通过将试验结果与仿真计算数据对比可得,最大误差不超过2℃,整体误差较小,因此试验各点的

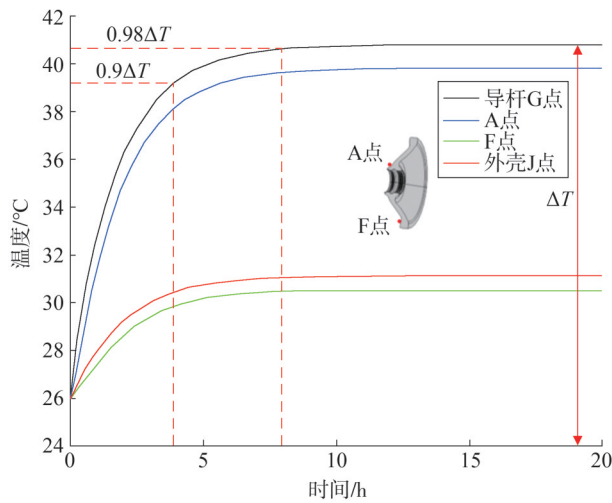
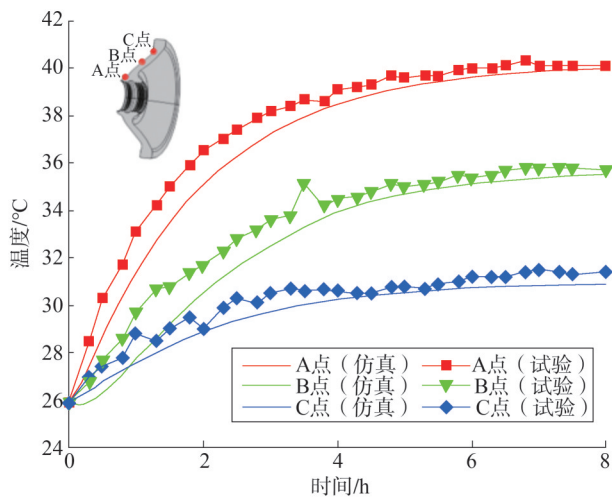
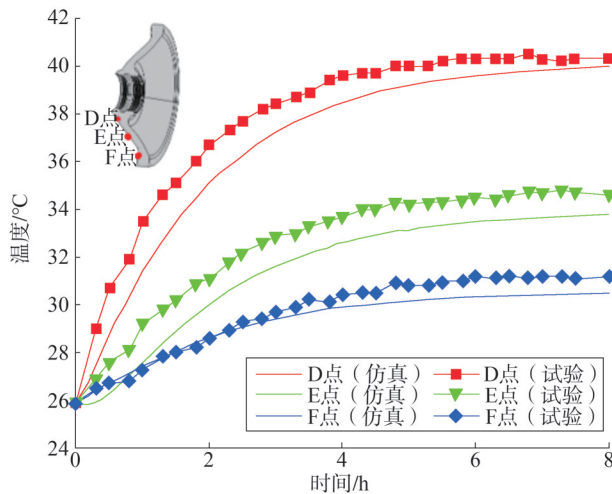


图6 GIS模型随时间变化的温升过程  
Fig.6 Temperature rise process of GIS model



(a) A、B、C 3处仿真与试验结果



(b) D、E、F 3处仿真与试验结果

图7 盆式绝缘子随时间变化的温升过程

Fig.7 Temperature rise process of basin insulators

温度反馈值验证了本文所建 GIS 温度场数值模型的有效性,这为后续不同条件下的 GIS 温度场对比分析研究奠定了基础。

#### 4.2 不同负载电流的影响

为了研究不同载流的影响,绝缘气体为 SF<sub>6</sub>,气压为 0.5 MPa,环境温度设置为 20 °C,分别计算载流 2 000 A、2 500 A 以及 3 150 A 电流的温度分布,结果表明:随着导体载流的增加,导杆和外壳温度分布呈现整体增加的趋势。温度分布如图 8 所示。电流从 2 000 A 增加到 3 150 A,产生的热量明显上升,最高温度之间相差约 14 °C。这是因为在 GIS 内部的热量传递中,金属导体的温度随负载电流的增加迅速升高,SF<sub>6</sub>的自然对流换热无法达到负载电流的变化,导致导杆的温升更加明显。此外,载流增加会产生更多热量,可能会导致绝缘子加速老化或局部放电等,因此,需要特别注意大负载电流条件下温度对固体介质绝缘性能的影响。

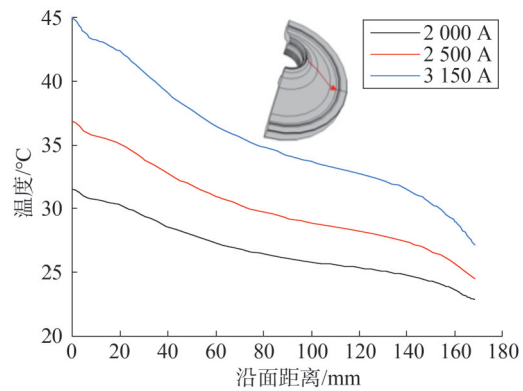


图8 不同载流下的温度分布

Fig.8 Temperature distribution under different load currents

#### 4.3 不同环境温度的影响

考虑到设备温升可能受不同环境温度的影响,分别计算不同环境温度下的 GIS 温度分布,针对 0 °C、20 °C 和 40 °C 的不同环境温度进行模拟计算。不同环境温度下的温度分布如图 9 所示。

不同环境温度对应的表面温度有相似的变化趋势,从载流导体到外壳,表面温度呈下降的趋势。王健等人<sup>[26]</sup>也研究了类似的趋势。由于环境温度的升高,对流换热系数呈线性下降,而导体的产热量随载流的恒定不发生变化,导致 GIS 出现整体温度抬升

的情形。

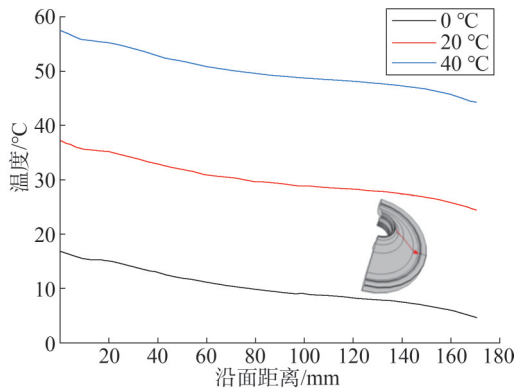


图9 不同环境温度下的温度分布

Fig.9 Temperature distribution under different ambient temperatures

#### 4.4 不同气体压力的影响

GIS可以通过提高绝缘气体的压力提高绝缘水平,所以针对不同气体压力对内部温度的影响进行了模拟计算。分别计算0.4 MPa、0.5 MPa和0.6 MPa下的温度场分布。不同气体压力下的温度分布如图10所示。

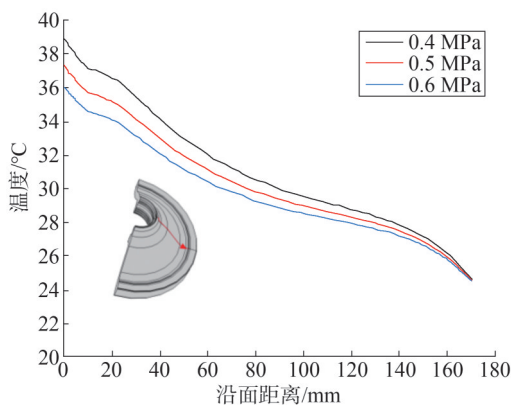


图10 不同气体压力下的温度分布

Fig.10 Temperature distribution under different gas pressures

随着气体压力的升高,内部最高温度出现近似等幅度的下降,下降幅度约为3°C。骆常璐等人<sup>[15]</sup>也得出导体温度随着压力的增加而降低的结论。这是由于气体压力增加导致气体密度、比热容和导热系数均增加,而气体密度增加导致气体流动困难,换

热方式趋近于换热较快的热传导,最终导致温度降低。多种情况共同作用下导致温度降低,其中气体密度变化的对比如图11所示。

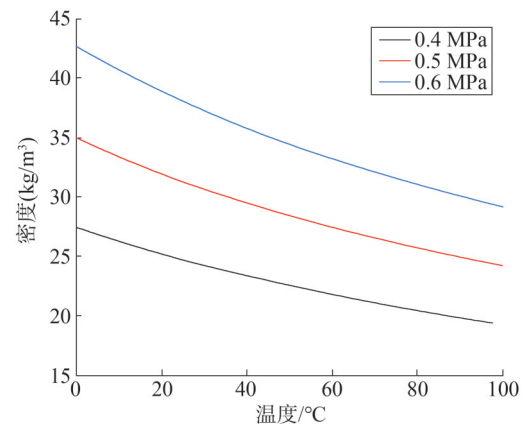


图11 气压对密度的影响

Fig.11 Effect of air pressure on density

## 5 结论

将试验与有限元法计算三维模型的温度场相结合,研究水平安装的GIS模型,结论总结如下。

1) 负载电流越大,绝缘子最高温度与最低温度相差越大,这是因为GIS设备内整体的温升和导杆载流大小有关,发热量随负载电流的增大而增大,绝缘子越靠近导杆的部位温升越明显。

2) 随着环境温度的升高,GIS内部的温度整体抬升。环境温度的升高导致换热通量降低,而载流导体的产热量没有发生变化,最终出现GIS整体温度随环境温度的升高而升高的现象。

3) 气体压力越高,GIS温度越低。不同气压直接影响绝缘气体的物性参数,改变了热量交换的能力,表现为温度的升降。气体密度越大,热量交换越快;比热容大,温度不易升高;导热系数越大,热量交换越多。最终气体密度、比热容和导热系数的增加,都导致温度的降低。

## 参考文献

- [1] LI X L, WAN M D, YAN S Y, et al. Temperature and electric field distribution characteristics of a DC-GIL basin-type spacer with 3D modelling and simulation[J]. Energies, 2021, 14(23): 7889.
- [2] 刘龙, 魏建巍, 江经华, 等. 基于多物理场的三相共箱型隔离开关温度场仿真研究[J]. 高压电器, 2022, 58(3): 86-92.

- LIU Long, WEI Jianwei, JIANG Jinghua, et al. Simulation study on temperature field of three phase enclosed disconnector based on multi physics coupling[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(3): 86-92.
- [3] 王振芹, 曹正第, 王娜. GIL管廊通风温度场研究[J]. 高压电器, 2020, 56(7): 128-132.
- WANG Zhenqin, CAO Zhengdi, WANG Na. Study on ventilation temperature field of GIL tunnel[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(7): 128-132.
- [4] 李国强, 卞荣, 陈科技, 等. 基于多物理场耦合的盆式绝缘子低频沿面闪络特性研究[J]. 浙江电力, 2024, 43(9): 88-96.
- LI Guoqiang, BIAN Rong, CHEN Keji, et al. Study on surface flashover characteristics of basin-type insulators under low-frequency transmission based on multiphysics coupling [J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(9): 88-96.
- [5] 汪建成, 谢文刚, 宫瑞磊, 等. 550 kV GIL三支柱绝缘子设计[J]. 高压电器, 2018, 54(5): 114-118.
- WANG Jiancheng, XIE Wengang, GONG Ruilei, et al. Design of 550 kV GIL three post insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(5): 114-118.
- [6] 赵启. 环保高压开关技术和设备研究现状及展望[J]. 高压电器, 2022, 58(10): 16-24.
- ZHAO Qi. Research status and prospect of environmental protection high voltage switchgear technology and equipment [J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(10): 16-24.
- [7] 杨琪. GIL与GIS母线的结构特点与应用[J]. 高压电器, 2011, 47(8): 72-74.
- YANG Qi. Characteristics and applications of GIL and GIS bus [J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(8): 72-74.
- [8] REBZANI N, CLAVEL E, MARTY P, et al. Numerical multiphysics modeling of temperature rises in gas insulated busbars [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(5): 2579-2586.
- [9] KUEHN T H, GOLDSTEIN R J. Correlating equations for natural convection heat transfer between horizontal circular cylinders [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1976, 19(10): 1127-1134.
- [10] 林令淇. 直流气体绝缘输电线路盆式绝缘子温度分布特性研究[J]. 山东电力技术, 2022, 49(1): 24-29.
- LIN Lingqi. Investigation of the temperature distribution of DC GIL basin type spacer [J]. Shandong Electric Power, 2022, 49(1): 24-29.
- [11] CHAKIR A, KOCH H. Turbulent natural convection and thermal behaviour of cylindrical gas-insulated transmission lines (GIL) [C]//2001 Power Engineering Society Summer Meeting. Conference Proceedings. IEEE, 2002: 162-167.
- [12] 陈敬友, 高兵, 杨帆, 等. 气体绝缘输电线路温升数值计算及绝缘气体换热能力[J]. 高电压技术, 2020, 46(11): 4042-4051.
- CHEN Jingyou, GAO Bing, YANG Fan, et al. Numerical calculation of temperature rise of gas insulated transmission lines and heat transfer capability of insulating gases [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(11): 4042-4051.
- [13] NIU H Q, CHEN Z M, ZHANG H, et al. Multi-physical coupling field study of 500 kV GIL: simulation, characteristics, and analysis [J]. IEEE Access, 2020, 8: 131439-131448.
- [14] 高璐, 贾云飞, 汲胜昌, 等. 环保型1100 kV GIL用三支柱绝缘子多物理场耦合仿真及校核[J]. 高电压技术, 2020, 46(3): 987-995.
- GAO Lu, JIA Yunfei, JI Shengchang, et al. Multi-physical field coupling simulation and verification of tri-post insulator on environment-friendly 1100 kV GIL [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(3): 987-995.
- [15] 骆常璐, 杨蛟龙, 李松磊, 等. 基于等效热路和有限元分析的GIS温升研究[J]. 高压电器, 2021, 57(5): 67-76.
- LUO Changlu, YANG Jiaolong, LI Songlei, et al. Study on temperature rise of GIS based on equivalent thermal circuit and finite element analysis [J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(5): 67-76.
- [16] 刘绍峻. GIS的热计算(II) [J]. 华通技术, 1994(1): 10-15.
- [17] 杨世铭, 陶文铨. 传热学(第4版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [18] 朱兴国, 吴乃爵, 徐来定. 用热线法测定气体的导热系数[J]. 物理实验, 1985, 5(2): 57-58.
- ZHU Xingguo, WU Naijue, XU Laiding. Measurement of gas thermal conductivity with the method of hot-wire [J]. Physics Experimentation, 1985, 5(2): 57-58.
- [19] QIAO Y J, LIANG R, GAO P, et al. Heat transfer analysis of different conditions for SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> gas-insulated transmission lines [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(2): 831-840.
- [20] LI X L, WAN M D, WANG W, et al. Temperature and electric field distribution of tri-post insulator in DC-GIL based on numerical multiphysics modelling [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2023, 17(6): 1232-1242.
- [21] 黄孟丹. GIS设备发热机理与检测方法研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2019.
- [22] 马仲鸣, 李六零, Gary Bowman, 等. 800 kV 气体绝缘金属封闭输电线路及竖井安装[J]. 中国电力, 2008, 41(8): 44-47.
- MA Zhongming, LI Liuling, Gary Bowman, et al. 800 kV gas insulated transmission line in a vertical shaft [J]. Electric Power, 2008, 41(8): 44-47.
- [23] 阮全荣, 施围, 桑志强. 750 kV GIL在拉西瓦水电站应用需考虑的问题[J]. 高压电器, 2003, 39(4): 66-69.

- RUAN Quanrong, SHI Wei, SANG Zhiqiang. Questions to be considered for using 750 kV GIL at Laxiwa hydroelectric power station[J]. High Voltage Apparatus, 2003, 39(4): 66-69.
- [24] 高凯, 李莉华. 气体绝缘输电线路技术及其应用[J]. 中国电力, 2007, 40(1): 84-88.
- GAO Kai, LI Lihua. Technology and application of gas-insulated transmission lines[J]. Electric Power, 2007, 40(1): 84-88.
- [25] KUNZE D, KNIERIM V, 王学刚. 用于发电中心大规模电力输送的气体绝缘输电线路[J]. 中国电力, 2007, 40(9): 87-90.
- KUNZE D, KNIERIM V, WANG Xuegang. Gas insulated transmission lines: bulk power transmission in power generation centres[J]. Electric Power, 2007, 40(9): 87-90.
- [26] 王健, 陈超, 李庆民, 等. 基于热力耦合分析的GIL热致伸缩特性及其影响因素[J]. 高电压技术, 2017, 43(2): 429-437.
- WANG Jian, CHEN Chao, LI Qingmin, et al. Thermal-induced flexible property of gas insulated lines and influencing factors based on thermal mechanical coupling analysis[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(2): 429-437.
- 收稿日期: 2024-11-05  
修回日期: 2025-01-20
- 作者简介:
- 李杰(1986), 通信作者(sut\_sswang@163.com), 男, 博士, 高级工程师, 从事开关类设备状态检测及状态评价工作;
- 王丹(1993), 女, 博士, 工程师, 从事开关类设备状态检测及状态评价工作;
- 孙承海(1986), 男, 工程师, 从事开关类设备状态检测及状态评价工作;
- 孙艳迪(1983), 男, 工程师, 从事开关类设备状态检测及状态评价工作;
- 徐冉(1984), 女, 工程师, 从事开关类设备状态检测及状态评价工作。
- (责任编辑 张丹丹)

从2003年开始，中国科协同相关部门连续举办了22个科普日活动，促进了社会科普工作的蓬勃开展。2024年12月25日，新修订的《中华人民共和国科学技术普及法》，把“科普日”提升为“科普月”，明确每年9月为全国科普月，这是增进全民科学素质的重要举措。今年9月是首个法定全国科普月。

# 全国 科普日 月





关注《山东电力技术》