

# 四川电力技术

SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY

第46卷第5期

2023年10月

四川省电机工程学会

四川电力科学研究院

二零二三年  
第四十六卷  
第五期



农星罗家沟农林牧光互补分布式光伏项目

ISSN 1003-6954



- 四川省一级期刊
- 万方数字化期刊群入网期刊
- 中国学术期刊（光盘版）入编期刊
- 中国期刊全文数据库收录期刊
- 首届《CAJ-CD规范》执行优秀奖获奖期刊

- 中国学术期刊综合评价数据库统计源期刊
- 重庆维普中文科技期刊数据库收录期刊
- 超星数字图书馆入网期刊
- 中国核心期刊（遴选）数据库收录期刊



# 非接触供（取）电技术及其应用 征稿启事

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

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

## 一、征稿方向（包括但不限于）

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

## 二、截止时间

2024年3月31日截稿，并在《四川电力技术》择期刊出。

## 三、投稿要求

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

## 四、投稿方式

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

## 五、投稿联系人

陈老师：15198096957

程老师：028-69995169

罗老师：028-69995168



《四川电力技术》  
编辑委员会

主任委员 胡海舰  
副主任委员 刘俊勇  
委 员 (按姓氏笔画笔形为序)  
马芳平 王 卓 王渝红  
司马文霞 年 珩 朱 康  
何正友 余 熙 吴广宁  
张安安 李 旻 李富祥  
李镇义 杨迎春 汪康康  
肖 欣 肖先勇 苏少春  
邹见效 陈 峰 胡朝华  
唐万斌 梅生伟 黄 琦  
董秀成 蒋兴良 韩晓言  
廖学静  
秘 书 李世平  
程文婷

四川电力技术

双月刊 1978 年创刊  
中国标准连续出版物号:  
ISSN 1003-6954  
CN 51-1315/TM  
2023 年第 46 卷第 5 期(总 287 期)  
主管单位:四川省电力公司  
主办单位:四川省电机工程学会  
四川电力科学研究院  
发行范围:公开  
主 编:李富祥  
副 主 编:程文婷  
编辑出版:《四川电力技术》编辑部  
发 行:四川电力科学研究院  
地 址:成都市高新区锦晖西二街 16 号  
邮政编码:610041  
电话:(028)69995169/5168/5165  
邮箱:cdscljs@163.com  
设 计:四川科锐得实业集团有限公司  
文化传播分公司  
印 刷:四川和乐印务有限责任公司  
国内定价:每册 12.00 元  
[期刊基本参数]CN 51-1315/TM\*1978\*  
b\*A4\*94\*zh\*P\*¥12.00\*3000\*15  
\*2023-10

目 次

· 高压技术 ·

隔直装置安装位置对电网主变压器直流偏磁电流分布影响研究  
..... 李小鹏,张华杰,吴嘉煜,周文越(1)

土壤直埋 110 kV 电缆中间接头稳态载流量仿真研究  
..... 陈 莉,邵千秋,王然然,唐 军(7)

新能源并网谐振过电压分析..... 邹福强,吴 冲,钟 帆,李卫兰,刘 毅,张胜飞(12)  
基于发射光谱法的氩等离子体射流诊断研究 ..... 张大伟,陈晓颖,郝 莎(21)

· 电力设计与优化 ·

基于联合模型的短期电力负荷预测方法 ..... 蔡君懿,李琪林,严 平(27)  
考虑储能峰谷价差套利的综合能源系统策略性经济配置  
..... 蔡含虎,孙建伟,谢彦祥,蒋艾町,夏 雪,肖 汉(35)

海上风电柔性直流送出换流站 MMC 换流阀损耗研究  
..... 李浩原,彭开军,王江天,刘 超,李文津,周思远,周国梁(43)

角钢塔连接螺栓考虑预紧力的拉剪计算方法研究  
..... 鄢秀庆,龚 涛,刘翔云,蒲 凡,李 钟(51)

基于 LSTM 模型的四川省建筑业电气化率预测研究  
..... 魏 阳,胡彭超,刘洪利,陈玉敏,刘雪原,刘 畅(56)

· 电力运检技术 ·

强震区电网降雨型地质灾害暴发识别模型研究  
..... 卜祥航,刘 凡,曹永兴,范松海,陈 凌,吴 驰,朱 轲,薛志航(62)

自主可控新一代变电站辅助系统联控策略研究与发展  
..... 马驰奔,吴 杰,常政威,熊兴中,刘 骏(68)

· 安全专栏 ·

电力作业现场智能安全监督研究与应用  
..... 权 杰,李富祥,常政威,丁宣文,杜春忠(75)

电力企业安全风险控制能力评价模型构建与应用  
..... 周 林,徐昌前,李富祥,邓元实,刘 涛,杨 琳(81)

· 经验交流 ·

某 110 kV GIS 盆式绝缘子局部放电检测与解体分析  
..... 高 竣,邱 炜,蔡 川,刘 鑫,郭 超,石凯萌,陈星宇,何 凯,陈 佳(86)

一台变压器绕组变形故障的检测及分析..... 李 林,谢 茜(91)



CONTENTS

• High Voltage Technology •

Research on Influence of Installation Position of DC Blocking Devices on DC Magnetic Bias Current Distribution of Main Transformer in Power Grid ..... LI Xiaopeng, ZHANG Huajie, WU Jiayu, ZHOU Wenyue(1)

Simulation Study on Steady-state Current Carrying Capacity of Intermediate Joints of Directly Buried 110 kV Cables ..... CHEN Li, SHAO Qianqiu, WANG Ranran, TANG Jun(7)

Resonant Overvoltage Analysis of Renewable Energy Grid-connected System ..... ZOU Fuqiang, WU Chong, ZHONG Fan, LI Weilan, LIU Yi, ZHANG Shengfei(12)

Diagnostic Study of Argon Plasma Jet Based on Emission Spectroscopy ..... ZHANG Dawei, CHEN Xiaoying, HAO Sha(21)

• Electric Power Design and Optimization •

Short-term Load Forecasting Method Based on Combined Model ..... CAI Junyi, LI Qilin, YAN Ping(27)

Strategic Economic Allocation of Integrated Energy System Considering Energy Storage Peak-Valley Price Spread Arbitrage ..... CAI Hanhu, SUN Jianwei, XIE Yanxiang, JIANG Aiting, XIA Xue, XIAO Han(35)

Study on Loss of MMC Converter Valve Applied in Converter Station of Offshore Wind Power VSC-HVDC Transmission ..... LI Haoyuan, PENG Kaijun, WANG Jiangtian, LIU Chao, LI Wenjin, ZHOU Siyuan, ZHOU Guoliang(43)

Research on Calculation Method of Connecting Bolts Used in Angle Steel Tower under Tension and Shear Action with Pre-tightening Force ..... YAN Xiuqing, GONG Tao,LIU Xiangyun, PU Fan,LI Zhong(51)

Prediction on Electrification Rate of Construction Industry in Sichuan Province Based on LSTM Model ..... WEI Yang, HU Pengchao, LIU Hongli, CHEN Yumin, LIU Xueyuan, LIU Chang(56)

• Operation and Maintenance Technology •

Research on Identification Model of Rainfall Induced Geological Hazard Outbreak for Power Grid in Strong Earthquake Area ..... BU Xianghang, LIU Fan, CAO Yongxing, FAN Songhai, CHEN Ling, WU Chi, ZHU Ke, XUE Zhihang(62)

Research and Development of Auxiliary System Joint Control Strategy in New Generation Substation with Autonomous and Controllable Technology ..... MA Chiyi, WU Jie, CHANG Zhengwei, XIONG Xingzhong, LIU Jun(68)

• Electric Power Safety •

Research and Application of Intelligent Safety Supervision ]in Power Operation Sites ..... QUAN Jie, LI Fuxiang, CHANG Zhengwei, DING Xuanwen, DU Chunzhong(75)

Construction and Application of Assessment Model for Safety Risk Control Capability of Electric Power Enterprises ..... ZHOU Lin, XU Changqian, LI Fuxiang, DENG Yuanshi, LIU Tao, YANG Lin(81)

• Experience Sharing •

Partial Discharge Detection and Disassembly Analysis of A 110 kV GIS Basin-type Insulator ..... GAO Jun, QIU Wei, CAI Chuan, LIU Xin, GUO Chao, SHI Kaimeng, CHEN Xingyu, HE Kai, CHEN Jia(86)

Detection and Analysis of Winding Deformation of A Transformer ..... LI Lin , XIE Qian(91)



# 隔直装置安装位置对电网主变压器直流偏磁电流分布影响研究

李小鹏<sup>1</sup>, 张华杰<sup>1</sup>, 吴嘉煜<sup>2</sup>, 周文越<sup>1</sup>

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;

2. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

**摘要:**针对城市电网直流偏磁主变压器中性点安装隔直装置后,导致周围其他主变压器中性点直流增加出现直流偏磁这一现象,提出研究隔直装置安装位置对城市电网主变压器直流偏磁电流分布的影响。考虑地铁回流系统结构、换乘站综合接地系统连接特征以及地铁和城市电网空间、电气连接关系,基于CDEGS仿真软件建立西南某城市电网及地铁网络耦合模型。在此基础上,仿真分析了不同类型变电站安装隔直装置后,电网变电站主变压器直流偏磁电流幅值变化特征。分析结果表明,为地铁主变电所供电的220 kV变电站安装隔直装置后,与其直连的变电站主变压器直流偏磁电流总量减少超过15%,能够显著抑制直流偏磁电流,为城市电网变电站隔直装置安装位置确定提供理论依据。

**关键词:**隔直装置安装位置; 地铁杂散电流; 城市电网; 主变压器直流偏磁电流

**中图分类号:**TM 74 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2023)05-0001-06

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20230501

## Research on Influence of Installation Position of DC Blocking Devices on DC Magnetic Bias Current Distribution of Main Transformer in Power Grid

LI Xiaopeng<sup>1</sup>, ZHANG Huajie<sup>1</sup>, WU Jiayu<sup>2</sup>, ZHOU Wenyue<sup>1</sup>

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

2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China)

**Abstract:** A study on the influence of installation position of DC blocking devices on DC magnetic bias current distribution of main transformer in urban power grid is proposed after the installation of DC blocking devices at the neutral point of main transformer in urban power grid, which leads to the increase of DC at the neutral point of the surrounding main transformers and the phenomenon of DC bias magnetization. By considering the structure of subway return system, the grounding system of transfer stations and the spatial and electrical connection relationship between subway and urban power grid, a coupling model of urban power grid and subway network for a city in southwest China is established based on CDEGS simulation software. On this basis, the simulation analyzes the characteristics of amplitude change of DC magnetic bias current of main transformer in grid substation after the installation of DC blocking devices in different types of substations. The analysis results show that after installing DC blocking devices in 220 kV substation supplying the metro main substation, the total DC magnetic bias current of substation which directly connected to it is reduced more than 15%, which can significantly suppress the DC magnetic bias current and provides a theoretical basis for the determination of installation position of DC blocking devices in substations of urban power grid.

**Key words:** installation position of DC blocking devices; metro stray current; urban power grid; DC magnetic bias current of main transformer

## 0 引言

地铁杂散电流入侵城市电网后,城市电网主变压器出现直流偏磁现象,造成变压器振动加剧、噪声增大,危害电网安全稳定运行<sup>[1-3]</sup>。为保障电网及主变压器运行安全,电网普遍采用安装隔直装置的方式阻断直流入侵,抑制主变压器直流偏磁发生<sup>[4-6]</sup>。然而,隔直装置虽然能有效阻断流入主变压器的直流偏磁电流,但由于城市电网中存在复杂的电气拓扑结构,为直流偏磁电流流通提供多条路径,频繁导致城市电网中其他正常运行的主变压器中性点直流增加,并出现直流偏磁现象<sup>[7]</sup>。可见,隔直安装位置的选取对城市电网中直流偏磁电流分布存在一定的影响。因此,为有效抑制电网主变压器直流偏磁现象发生,有必要分析隔直装置安装位置对城市电网中主变压器直流偏磁电流的影响。

近年来,直流偏磁电流在城市电网中的分布已得到广泛研究。针对高压直流输电引起的直流偏磁电流,文献[8]考虑土壤结构,基于复镜像法计算多层水平土壤结构中的电流分布,仿真结果表明直流偏磁电流主要分布于接地极方圆 70 km 范围内的城市电网;文献[9-10]考虑高压直流输电接地极与变电站距离、变压器并联运行数量和变电站间距等因素对城市电网中主变压器直流偏磁电流分布的影响。针对地磁暴引起的直流偏磁电流,文献[11]基于 Matlab 软件建立电网等效模型,计算某电网中多座 500 kV 变电站的直流偏磁电流,仿真结果表明在电网的终点和拐角处容易诱发较大的直流偏磁电流;文献[12]探究多种高压直流输电运行方式对直流偏磁电流分布的影响,结果表明在单极大地回线和双极运行方式下可能存在直流偏磁电流,而且直流偏磁电流取决于直流极线电阻和接地极电阻等因素。针对地铁杂散电流引起的直流偏磁电流,文献[13]基于 PSCAD 仿真软件建立交流电网的杂散电流分布仿真模型,仿真分析电网中直流偏磁电流的分布,仿真结果表明直流偏磁电流主要通过电网中的输电线路传播;文献[14]总结土壤电阻率、变电站位置和变电站接地电阻和出线方式等因素对电网中直流偏磁电流分布的影响,提出对变压器中性点加装 3  $\Omega$  限流电阻时可获得较好直流抑制效果。虽然上述文献分别探究不同因素对电网中直流偏磁

电流分布影响,但是目前未有分析隔直装置安装位置对城市电网中直流偏磁电流分布影响的研究。

综上,下面考虑地铁网络结构、换乘站综合接地系统连接特征以及地铁网络和城市电网空间、电气关系,以西南某城市电网、地铁网络为研究对象,基于 CDEGS 仿真软件建立耦合模型,探究隔直装置安装位置对电网中地铁杂散电流分布的影响,为选择隔直装置安装位置提供依据。

## 1 直流偏磁电流仿真计算方法

依据电网与地铁拓扑结构、电气设备连接关系,并考虑城市电网与地铁网络之间电缆铠装层、大地之间的电气、空间耦合关系,基于 CDEGS 仿真软件建立城市电网与地铁网络耦合模型。

### 1.1 地铁模型

考虑地铁线路牵引供电系统及回流系统的拓扑结构、电气设备连接关系,建立地铁线路模型<sup>[15]</sup>。在此基础上进一步考虑地铁线路间换乘站综合接地系统电气连接特征,建立地铁网络模型。

#### 1.1.1 地铁线路模型

地铁牵引供电系统主要包括接触网、机车和牵引变电站<sup>[16]</sup>,依据接触网和牵引变电站连接关系,建立牵引供电系统模型,如图 1 所示。

地铁回流系统中全线贯通的金属结构包括轨道、排流网、贯通地线,在实际工程中它们均由多根纵向金属并联而成。依据实际工程导体连接结构特征,将轨道、排流网、贯通地线视为多电阻并联电路,并将其等效为单根纵向导体,如图 1 所示。

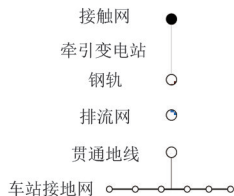


图 1 地铁线路模型

1) 钢轨:在单行地铁线路中,两根钢轨通过均流线连接组成并联结构,根据钢轨的拓扑结构和电气连接关系,可将两根钢轨等效为一根具有单根钢轨一半电阻值的钢轨导体。

2) 排流网:排流网位于钢轨正下方,由多根纵向排流条通过横向钢筋连接组成并联结构。同理,根据排流网的拓扑结构和电气连接关系,可将排流



网等效为一根排流网导体。假设纵向排流条总数为  $n$ ,则排流网导体电阻为单根排流条电阻的  $1/n$ 。

3) 车站接地网:地铁线路沿线车站的排流网下方设有接地网。根据接地网的拓扑结构和电气连接关系,可将车站接地网等效为与车站接地网具有相同接地电阻阻值的网状导体结构,其中网状导体结构的面积  $S_{cz}$  为

$$S_{cz} = 0.25\rho_d^2/R_{dw}^2 \quad (1)$$

式中: $\rho_d$  为土壤电阻率; $R_{dw}$  为接地网的接地电阻。

4) 贯通地线:将地铁全线贯通的 35 kV 电力电缆的铠装层视为贯通地线。由于贯通地线在地铁全线贯通并在车站位置接地,所以将其等效为一根平行于接触网且连接地铁沿线车站接地网的导体。同时,35 kV 电力电缆为三相双回线路,即贯通地线导体电阻为单根 35 kV 电力电缆铠装层电阻的  $1/6$ 。

### 1.1.2 地铁网络模型

地铁换乘站连接多条地铁线路,不同地铁线路在地铁换乘站位置都设有单独的接地网。由于车站接地网与结构钢筋等自然接地体相连,使得不同地铁线路在地铁换乘站通过结构钢筋实现接地系统电气连通<sup>[17]</sup>。

由于 CDEGS 软件导体数量有限,可通过将换乘站位置不同的地铁线路的多个接地网等效为单个接地网,如图 2 所示。由于换乘站处多个接地网属于并联关系,则换乘站接地网等效导体面积  $S_{hc}$  为

$$S_{hc} = S_{cz} \times m^2 \quad (2)$$

式中, $m$  为途经同一座换乘站的地铁线路数量。

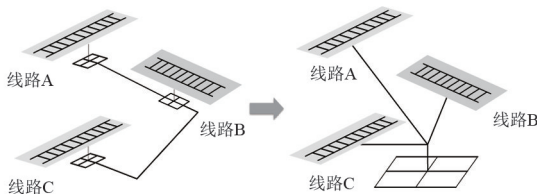


图 2 换乘站等效模型

## 1.2 电网模型

### 1.2.1 变压器模型

变压器根据绕组结构可分为自耦变压器、非自耦变压器。实际工程中,500 kV 变电站通常采用自耦变压器,220 kV 变电站通常采用非自耦变压器<sup>[18]</sup>。此外,变压器电阻主要集中在绕组位置,因此不同电压等级的变压器分别等效为与绕组相同拓扑结构的导体。

### 1.2.2 输电线模型

电网中地铁杂散电流可通过输电线、避雷线和电缆铠装层在不同变电站间流动。根据输电线、避雷线和电缆铠装层的电气连接关系,输电线等效为连接相邻变电站变压器的导体;避雷线等效为平行于输电线并且连接相邻变电站接地网的导体;电缆铠装层也等效为连接相邻变电站接地网的导体。

### 1.2.3 隔直装置模型

由于隔直装置阻断直流偏磁电流从变压器中性点位置入侵城市电网,所以隔直装置等效为变压器中性点断开与变电站接地网的电气连接。当变压器模型加装隔直装置后,变压器中性点不连接变电站接地网,即变压器中性点悬空,如图 3 所示。同时,变电站安装隔直装置即默认隔直装置的工作状态为投入。

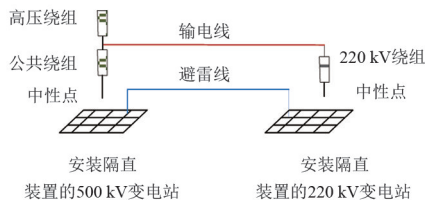


图 3 隔直装置等效模型

## 1.3 地铁网络模型和城市电网模型耦合

地铁网络模型和城市电网模型间通过土壤、电缆铠装层实现电气、大地耦合<sup>[19]</sup>。为实现地铁网络模型和城市电网模型的大地耦合,可通过将两者设置于相同的土壤模型中。

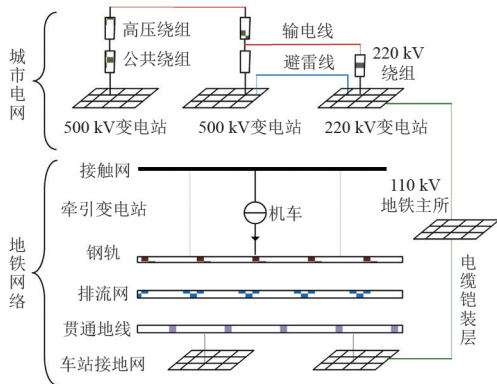


图 4 基于 CDEGS 仿真软件的耦合模型

地铁网络模型和城市电网模型间主要通过电缆铠装层实现电气耦合。220 kV 变电站为 110 kV 地铁主所供电电缆和 110 kV 地铁主所地铁牵引变电站供电电缆在电缆首尾两端接地,使得地铁杂散电流可通过电缆铠装层从牵引变电站的接地网流入 220 kV 变电站。电缆铠装层等效为连接 220 kV 变电站接地网和地铁牵引变电站接地网的导体,该导

体电阻  $R_k$  为

$$R_k = R_{zs} + R_{zsdw} \quad (3)$$

式中,  $R_{zs}$ 、 $R_{zsdw}$  分别为 110 kV 电缆铠装层电阻和 110 kV 地铁主所接地网接地电阻。

#### 1.4 耦合建模方法应用

西南某城市共有 9 条地铁线路采用直流牵引供电, 地铁全网沿线共有 300 个车站, 其中包含 153 个牵引变电站和 40 个换乘站, 线路累加长度达到 364 km。依据该城市地铁网络结构及拓扑连接关系, 利用地铁网络建模方法搭建如图 5 所示的地铁网络模型。同时, 该城市电网包含 7 座 500 kV 变电站和 61 座 220 kV 变电站, 依据该城市电网结构及拓扑连接关系, 利用电网建模方法搭建如图 5 所示的城市电网模型。根据地铁网络和城市电网空间、电气关系, 将 22 座为地铁主所供电的 220 kV 变电站通过电缆铠装层导体与对应地铁牵引变电站接地网相连实现电气耦合, 建立城市电网与地铁网络耦合模型。同时规定耦合模型中 500 kV 变电站编号为 a1、a2、a3……; 不为地铁主所供电的 220 kV 变电站编号为 b1、b2、b3……; 为地铁主所供电的 220 kV 变电站编号为 c1、c2、c3……。

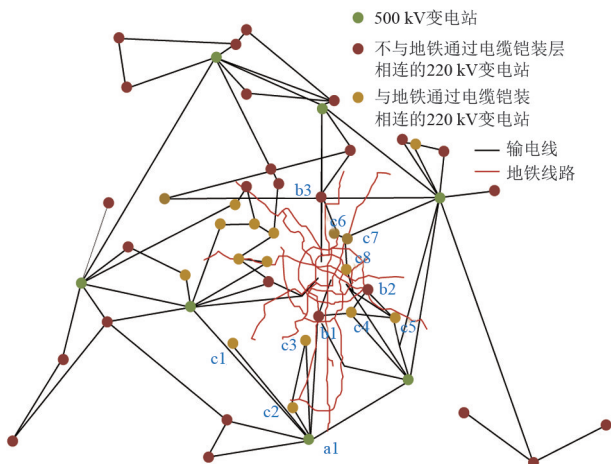


图 5 西南某城市的电网与地铁耦合模型部分拓扑结构

输电线、钢轨等设备等效过程中导体电阻率均可以在电力系统和地铁设计、施工及运行中直接或间接测量得到<sup>[17, 20-22]</sup>。耦合模型基本参数的数值如表 1 所示。

## 2 500 kV 变电站安装隔直装置对直流偏磁电流分布影响

分析在 500 kV 电压等级的变电站位置安装隔

表 1 耦合模型基本参数

| 等效导体                                  | 数值    | 等效导体                                         | 数值    |
|---------------------------------------|-------|----------------------------------------------|-------|
| 500 kV 变压器<br>高压绕组/ $\Omega$          | 0.080 | 输电线电阻/<br>( $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ )  | 0.010 |
| 500 kV 变压器<br>中压绕组/ $\Omega$          | 0.030 | 避雷线电阻/<br>( $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ )  | 0.500 |
| 220 kV 变压器<br>绕组/ $\Omega$            | 0.090 | 接触网电阻/<br>( $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ )  | 0.008 |
| 牵引变电站等效<br>电阻/ $\Omega$               | 0.020 | 钢轨电阻/<br>( $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ )   | 0.040 |
| 车站接地网<br>面积/ $\text{m}^2$             | 5600  | 排流网电阻/<br>( $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ )  | 0.110 |
| 土壤电阻率/<br>( $\Omega \cdot \text{m}$ ) | 180   | 贯通地线电阻/<br>( $\Omega \cdot \text{km}^{-1}$ ) | 0.300 |

直装置对城市电网主变压器直流偏磁电流幅值的影响。设置耦合模型中单座 500 kV 变电站依次安装隔直装置, 以典型 500 kV 变电站 a1 为例分析。变电站 c1、c2、c3、b1 是变电站 a1 安装隔直装置后主变压器直流偏磁电流幅值变化相对较大的变电站, 仿真的结果如图 6 所示。部分输电线路电流变化情况如表 2 所示。

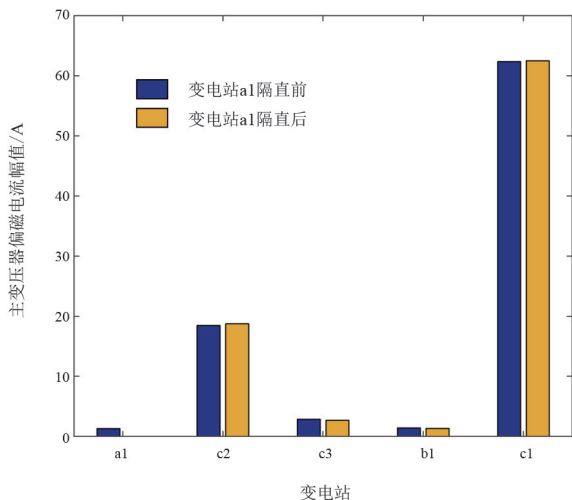


图 6 500 kV 变电站 a1 及其直连部分变电站主变压器偏磁电流幅值

由仿真结果可知, 当变电站 a1 安装隔直装置后主变压器直流偏磁电流幅值减小 1.29 A, 同时该区域变电站 c1、c2 主变压器直流偏磁电流幅值小幅抬升。在该区域电网中, 变电站 c1、c2 受到地铁杂散电流严重影响, 因此这两座变电站主变压器偏磁电流较大, 但是当变电站 a1 安装隔直装置后变电站 c2、c1 主变压器直流偏磁电流幅值仅分别增加 1.50%、0.21%。表 2 中  $I_{kc2}$ 、 $I_{kc1}$  分别为变电站 c2、c1 的电缆铠装层电流,  $I_{la1-c2}$ 、 $I_{la1-c1}$  分别为变电站 a1 和 c2、a1 和 c1 输电线电流。由表 2 可知, 当变电站



a1 安装隔直装置后变电站 c2、c1 的铠装层电流几乎不变,输电线电流分别增大 0.30 A、0.13 A。

表 2 变电站 a1 隔直前后部分输电线路电流幅值

单位:A

| 工况         | $I_{kc2}$ | $I_{kc1}$ | $I_{la1-c2}$ | $I_{la1-c1}$ |
|------------|-----------|-----------|--------------|--------------|
| 变电站 a1 未隔直 | 92.76     | 126.62    | 13.46        | 62.36        |
| 变电站 a1 隔直  | 92.75     | 126.63    | 13.76        | 62.49        |

变电站 a1 与变电站 c2、c1 的输电距离分别为 23 164 m、7679 m,输电线路越长意味着线路电阻越大,所以变电站 a1 安装隔直装置只是切断变电站 c2、c1 间一条相对高阻的流电路径。然而,变电站 c2、c1 通过电缆连接相同的地铁牵引变电站,变电站 a1 隔直后地铁杂散电流仍通过电缆铠装层入侵变电站 c2、c1,使得该区域中主变压器直流偏磁电流最大的变电站 c1 电流幅值仅增长 0.21%。

变电站 b1、c1 与变电站 a1 之间输电线长度分别为 22 916 m、23 164 m,但是变电站 b1、c1 分别流入变电站 a1 抑制主变压器直流偏磁电流的 6%、9%,说明 500 kV 变电站安装隔直装置抑制的主变压器直流偏磁电流在电网重新分配比例与变电站间输电线长度没有直接关系。

综上,500 kV 枢纽变电站 a1 安装隔直装置会导致该区域中多座变电站主变压器直流偏磁电流幅值抬升,但是变电站 a1 安装隔直装置只是阻断其连接的变电站站间一条相对高阻的流电路径。

3 220 kV 变电站安装隔直装置对直流偏磁电流分布影响

基于建立的城市电网与地铁网络耦合模型,分别在是否为地铁主所供电的两种变电站安装隔直装置,分析对城市电网主变压器直流偏磁电流幅值的影响。

3.1 不为地铁主所供电的 220 kV 变电站安装隔直装置

设置在耦合模型中单座不为地铁主所供电的 220 kV 变电站依次安装隔直装置,以典型变电站 b2 为例进行仿真,结果如图 7 所示。变电站 b2 通过输电线、避雷线与变电站 c4、c5 直接相连,拓扑连接结构见图 5。图 7 中  $I_{b2}$ 、 $I_{c4}$ 、 $I_{c5}$  分别为变电站 b2、c4、c5 主变压器偏磁电流, $I_{bb2-c4}$ 、 $I_{bb2-c5}$  分别为变电站 b2 和 c4、变电站 b2 和 c5 间避雷线电流。

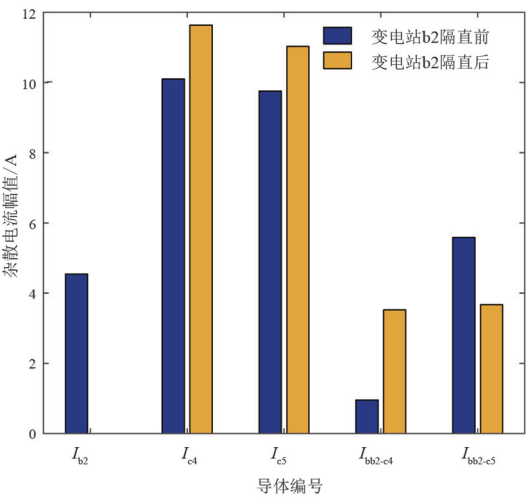


图 7 不与地铁通过电缆相连的 220 kV 变电站 b2 隔直前后的导体电流幅值

由仿真结果可知,当变电站 b2 安装隔直装置时主变压器偏磁电流幅值减小 4.54 A,与其直连的变电站偏磁电流总和减少 7.13%。在变电站 b2 隔直前后,变电站 b2 与变电站 c4、c5 间的避雷线电流幅值分别相差 4.62 A、0.15 A,说明变电站 b2 安装隔直装置后变压器不再是直流偏磁电流低阻流电路径,使得变电站 b2 两侧的避雷线电流的幅值相近。

综上,不为地铁主所供电的 220 kV 变电站安装隔直装置,将导致该变电站避雷线进线、出线电流幅值相近。直流偏磁电流通过避雷线流入电网中其他变电站,增加其他变电站直流偏磁风险。

3.2 为地铁主所供电的 220 kV 变电站安装隔直装置

分别在耦合模型中为地铁主所供电的 220 kV 变电站安装隔直装置,以典型变电站 c6、c7 为例进行仿真,结果如图 8 和表 3 所示。变电站 c6 与变电站 c7 为相同的地铁牵引变电站供电,变电站 c6 通过输电线、避雷线与变电站 b3、c7 直接相连,同时变电站 c7 又通过输电线、避雷线与变电站 c8 直接相连,拓扑连接结构见图 5。

由图 8 可知,当变电站 c6、c7 安装隔直装置时主变压器偏磁电流幅值分别减小 25.02 A、20.89 A,变电站 c6、c7 直连变电站的主变压器偏磁电流总和分别减少 19.08%、15.69%。与地铁直连的 220 kV 变电站安装隔直装置,导致此类变电站及周围变电站主变压器偏磁电流幅值总和明显减少,抑制效果显著。由表 3 可知,在变电站 c6、c7 均未安装隔直装置、变电站 c6、c7 分别安装隔直装置 3 种工况下,电缆铠装层电流幅值总和分别为 105.55 A、103.94 A、104.15 A。当变电站 c7 安装隔直装置时变电站 c6、

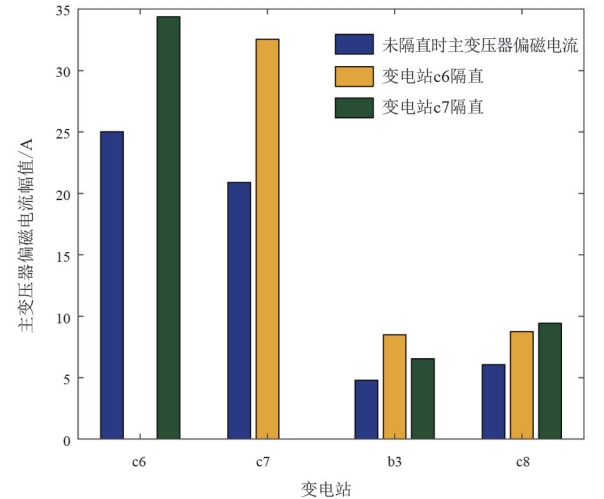


图 8 为地铁主所供电的 220 kV 变电站 c6、c7 及其附近变电站主变压器偏磁电流幅值

表 3 变电站 c6、c7 隔直前后电缆铠装层电流

| 工况             | 铠装层电流/A |        |
|----------------|---------|--------|
|                | 变电站 c6  | 变电站 c7 |
| 变电站 c6、c7 均未隔直 | 51.78   | 53.77  |
| 变电站 c6 隔直      | 45.73   | 58.21  |
| 变电站 c7 隔直      | 55.09   | 49.06  |

c7 电缆铠装层电流分别增加 3.31 A、减少 4.71 A，而当变电站 c6 安装隔直装置时变电站 c6、c7 电缆铠装层电流分别减少 6.05 A、增加 4.44 A。在变电站 c6、c7 分别安装隔直装置时，电缆铠装层电流变化趋势相反，说明对于电缆铠装层连接的两侧变电站，当一侧变电站安装隔直装置会导致另一侧变电站流入更多的杂散电流。虽然与地铁通过电缆铠装层相连的 220 kV 变电站安装隔直装置时能减少一定量的电缆铠装层电流，但是与地铁直连的 220 kV 变电站位于杂散电流入侵电网的重要路径上，因此仍有大量杂散电流从该位置入侵电网。

4 结 论

通过搭建城市电网与地铁网络耦合模型，仿真分析隔直装置安装位置对城市电网中地铁杂散电流分布的影响。分析结果表明：500 kV 变电站安装隔直装置只是阻断其连接变电站站间一条相对高阻的流通路径，对该区域电网主变压器直流偏磁电流分布影响较小；不为地铁主所供电的 220 kV 变电站安装隔直装置后，在一定程度上增加该区域主变压器的直流偏磁风险；为地铁主所供电的 220 kV 变电站

安装隔直装置后，与其直连变电站的直流偏磁电流总量减少超过 15%，抑制效果显著。综上，应重点关注为地铁主所供电且直流偏磁现象严重的 220 kV 变电站，在此类变电站安装隔直装置能有效抑制城市电网中直流偏磁电流。

参考文献

[1] WANG Aimin, LIN Sheng, WU Jianzhou, et al. Relationship analysis between metro rail potential and neutral direct current of nearby transformers[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 7(3): 1795–1804.

[2] 全江涛, 童歆, 文习山, 等. 复杂运行工况下变压器直流偏磁的抑制[J]. 高电压技术, 2015, 41(7): 2464–2472.

[3] 李晓华, 褚福源, 时胜寒. 轨道交通对沿线 220 kV 变电站中性点电流及振动影响[J]. 电工技术学报, 2021, 36(S2): 423–429.

[4] 马书民, 戎子睿, 林湘宁, 等. 直流偏磁影响下继电保护的误拒动机理分析及对策研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(8): 86–98.

[5] 樊艳芳, 耿山, 巩晓玲, 等. 基于直流偏磁风险指标的变电站选址[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(19): 59–65.

[6] 曹楠, 王天正, 王冬青, 等. 变压器直流偏磁治理站点选择优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 117–122.

[7] PAN Zhouhong, ZHANG Lu, WANG Xiaomao, et al. HVDC ground return current modeling in AC systems considering mutual resistances[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(1): 165–173.

[8] 阮羚, 全江涛, 杨小库, 等. 深层大地电阻率对交流电网直流电流分布的影响[J]. 高电压技术, 2014, 40(11): 3528–3536.

[9] 阮江军, 徐闻婕, 丁志锋, 等. 基于场路直接耦合模型的交流电网直流偏磁电流分布研究[J]. 高电压技术, 2017, 43(4): 1333–1340.

[10] 潘卓洪, 张露, 谭波, 等. 高压直流输电入地电流在交流电网分布的仿真分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(21): 110–115.

[11] 崔明德, 刘春明, 刘连光. 太阳风暴对四川 500 kV 电网影响的评估[J]. 高电压技术, 2010, 36(11): 2849–2855.

[12] 文俊, 刘连光, 项颂, 等. 地磁感应电流对电网安全稳定运行的影响[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 24–30.

[13] 史云涛, 赵丽平, 林圣, 等. 城市电网中地铁杂散电流分布规律及影响因素分析[J]. 电网技术, 2021, 45(5): 1951–1957.

(下转第 94 页)



# 土壤直埋 110 kV 电缆中间接头稳态载流量仿真研究

陈莉<sup>1</sup>, 邵千秋<sup>2</sup>, 王然然<sup>1</sup>, 唐军<sup>1</sup>

(1. 国网四川省电力公司南充供电公司, 四川 南充 637000;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

**摘要:**针对目前没有成熟的交流电缆中间接头载流量校核方法, 搭建了土壤直埋 110 kV 电缆中间接头和电缆本体稳态载流量三维仿真模型, 利用有限元对比研究环境温度、土壤导热系数和敷设深度对电缆中间接头和本体稳态载流量的影响规律。结果表明: 在不同环境温度、土壤导热系数和敷设深度下, 电缆中间接头载流量始终小于电缆本体载流量, 土壤导热系数为  $0.5 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ 、环境温度为 293 K 以及敷设深度为 1.75 m 时的中间接头载流量相较于相同条件下的本体载流量减小了 10.8%。因此, 如按照电缆本体载流量校核电缆载流能力, 将导致中间接头主绝缘处于加速热老化状态。为确保电缆长期稳定运行, 建议以本体载流量确定电缆载流时应留有一定裕度。

**关键词:**直埋交流电缆; 中间接头; 载流量; 有限元仿真

**中图分类号:** TM 726.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2023)05-0007-05

**DOI:** 10.16527/j.issn.1003-6954.20230502

## Simulation Study on Steady-state Current Carrying Capacity of Intermediate Joints of Directly Buried 110 kV Cables

CHEN Li<sup>1</sup>, SHAO Qianqiu<sup>2</sup>, WANG Ranran<sup>1</sup>, TANG Jun<sup>1</sup>

(1. State Grid Nanchong Electric Power Supply Company, Nanchong 637000, Sichuan, China;

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

**Abstract:** As there is no mature standard for checking the current carrying capacity of AC cable intermediate joints at present, a three-dimensional simulation model for the steady-state current carrying capacity of directly buried 110 kV cable intermediate joints and the cable body is established, and the influence law of ambient temperature, soil thermal conductivity and buried depth on steady-state current carrying capacity of intermediate joints is studied comparatively by finite elements. The results show that the carrying capacity of intermediate joint under different ambient temperatures, soil thermal conductivities and buried depths is always less than that of the cable body, and the carrying capacity of intermediate joint under the soil thermal conductivity of  $0.5 \text{ W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1}$ , the ambient temperature of 293 K and the buried depth of 1.75 m is 10.8% less than that of the cable body. According to the above research results, if the cable current carrying capacity is determined by that of the cable body, the major insulation of intermediate joints will be in an accelerated thermal aging state. In order to ensure the long-term stable operation of the cable, it is recommended that a certain margin should be left when the current carrying capacity is determined by the cable body.

**Key words:** directly buried AC cable; intermediate joint; current carrying capacity; finite element simulation

## 0 引言

载流量是高压电力电缆重要的技术指标之一, 是指在一定条件下电力电缆允许通过的持续电流值, 反映了电力电缆线路承载负荷的能力<sup>[1]</sup>。高压

基金项目: 国网四川省电力公司科技项目(521903230001)

电力电缆载流量不仅取决于电缆类型和规格, 还与其实际安装、敷设条件和运行环境有关, 通常以其本体线芯长期允许最高运行温度 363 K 作为载流量的计算校核标准<sup>[2-3]</sup>。国内外学者依据文献[4-5]等标准, 采用解析算法形成了不同敷设条件和运行环境下的系列电力电缆载流量数据表, 为电网规划运行提供了数据支撑<sup>[6-7]</sup>。

由于电力电缆中间接头结构较本体更为复杂,通常采用数值算法计算其实际载流量。现有研究已表明直埋电缆中间接头和本体的载流量存在差异,若按照电缆本体载流量校核会导致中间接头线芯最高运行温度明显高于 363 K,不利于电缆中间接头的长期稳定运行<sup>[8-10]</sup>。然而现有研究采用轴对称数值计算模型,难以正确反映实际对流散热边界条件,并且现尚无成熟的交流电缆中间接头载流量校核方法。

因此,下面搭建了土壤直埋 110 kV 电缆中间接头稳态载流量三维仿真模型,利用 COMSOL Multiphysics 仿真软件研究了环境温度、土壤导热系数和敷设深度对中间接头稳态载流量的影响规律,并与相同条件下的电缆本体稳态载流量相比较,以期确定多种敷设环境下电力电缆中间接头的载流量提供方法参考。

# 1 直埋电缆中间接头和本体的温度场模型

## 1.1 电缆中间接头和本体的结构及参数

选用截面为 1200 mm<sup>2</sup>的 64/110 kV 电缆中间接头作为仿真对象,如图 1 所示。中间接头包含线芯、连接管、高压屏蔽层、三元乙丙橡胶应力锥、交联聚乙烯主绝缘、绝缘屏蔽层、硅橡胶增强绝缘、聚氨酯密封胶和铜壳。类似的,选用截面为 1200 mm<sup>2</sup>的 64/110 kV 电缆本体作为仿真对象,如图 2 所示。电缆本体由轴心向外依次包含线芯、高压屏蔽层、交联聚乙烯绝缘层、绝缘屏蔽层、铜丝编织玻璃纤维缓冲层、铝护套和外护层。中间接头和电缆本体的热力学参数分别如表 1 和表 2 所示<sup>[1,9,11-12]</sup>。

## 1.2 仿真几何模型及边界条件

搭建土壤直埋 110 kV 中间接头和电缆本体的稳态载流量三维仿真模型,分别在接头和本体周围添加土壤;在仿真中设置 A 面为对流热通量边界条件,土

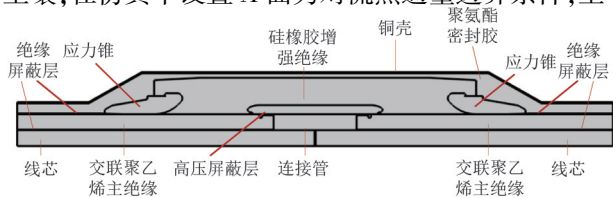


图 1 64/110 kV 电缆中间接头剖面图

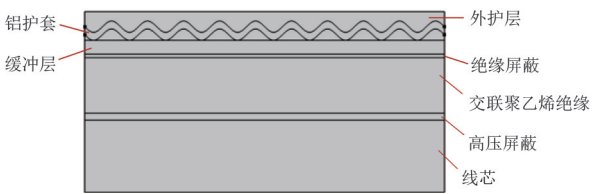


图 2 64/110 kV 电缆本体剖面图

表 1 64/110 kV 电缆中间接头材料热力学参数

| 中间接头结构    | 导热系数/<br>(W · (m · K) <sup>-1</sup> ) | 密度/<br>(kg · m <sup>-3</sup> ) | 恒压热容/<br>(J · (kg · K) <sup>-1</sup> ) |
|-----------|---------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------|
| 线芯        | 400                                   | 8920                           | 385                                    |
| 连接管       | 400                                   | 8920                           | 385                                    |
| 高压屏蔽层     | 0.51                                  | 950                            | 2500                                   |
| 三元乙丙橡胶应力锥 | 0.27                                  | 1180                           | 1700                                   |
| 交联聚乙烯主绝缘  | 0.285                                 | 910                            | 1640                                   |
| 绝缘屏蔽层     | 0.51                                  | 950                            | 2500                                   |
| 硅橡胶增强绝缘   | 0.25                                  | 1150                           | 1565                                   |
| 聚氨酯密封胶    | 0.35                                  | 980                            | 1700                                   |
| 铜壳        | 400                                   | 8920                           | 385                                    |

表 2 64/110 kV 电缆本体材料热力学参数

| 电缆本体结构  | 导热系数/<br>(W · (m · K) <sup>-1</sup> ) | 密度/<br>(kg · m <sup>-3</sup> ) | 恒压热容/<br>(J · (kg · K) <sup>-1</sup> ) |
|---------|---------------------------------------|--------------------------------|----------------------------------------|
| 线芯      | 400                                   | 8920                           | 385                                    |
| 高压屏蔽层   | 0.51                                  | 950                            | 2500                                   |
| 交联聚乙烯绝缘 | 0.285                                 | 910                            | 1640                                   |
| 绝缘屏蔽层   | 0.51                                  | 950                            | 2500                                   |
| 缓冲层     | 0.05                                  | 140                            | 2120                                   |
| 铝护套     | 238                                   | 2700                           | 900                                    |
| 外护层     | 0.17                                  | 200                            | 2000                                   |

壤与空气的对流传热系数取值为 10 W/(m<sup>2</sup> · K); B 面、C 面和 D 面与中间接头或电缆本体的距离分别为 2000 mm,均将其设置为法向热通量为 0 的边界条件。仿真模型如图 3 和图 4 所示。

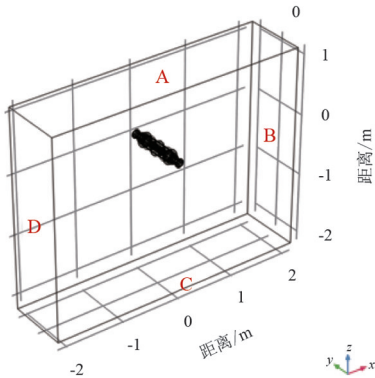


图 3 土壤直埋 110 kV 电缆中间接头稳态载流量仿真模型

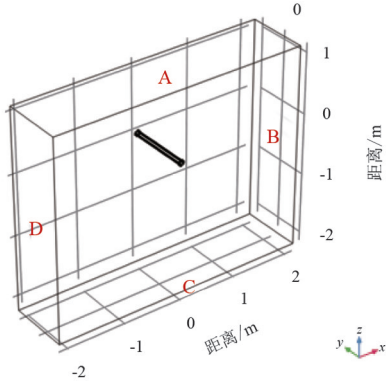


图 4 土壤直埋 110 kV 电缆本体稳态载流量仿真模型

中间接头或电缆本体的内部热量主要来自电流引起的线芯发热。中间接头或电缆本体的温度场计算公式为:

$$Q = I^2 R t \tag{1}$$

$$\rho C \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q_1 \tag{2}$$

式中: $Q$  为线芯产生的焦耳热; $I$  为线芯电流有效值; $t$  为时间; $Q_1$  为材料吸收的焦耳热; $\rho$  为材料密度; $C$  为材料恒压热容; $T$  为材料温度; $k$  为材料导热系数; $R$  为线芯的电阻,计算公式如式(3)一式(7)所示<sup>[13]</sup>。

$$R = R_0 \cdot L \tag{3}$$

$$R_0 = \frac{\rho_{20}}{S} [1 + \alpha(T - 293)] \tag{4}$$

$$R_1 = R_0(1 + \gamma_s) \tag{5}$$

$$\gamma_s = \frac{x_s^4}{192 + 0.8x_s^4} \tag{6}$$

$$x_s^2 = \frac{8\pi f \cdot 10^{-7}}{R_0} k_s \tag{7}$$

式中: $R_0$  为单位长度线芯在温度  $T$  时的直流电阻; $L$  为线芯长度; $\rho_{20}$  为线芯在温度 293 K 时的体积电阻率,其值为  $1.724 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ ;  $S$  为线芯截面积,其值为  $1200 \text{ mm}^2$ ;  $\alpha$  为线芯在温度 293 K 时的温度系数,其值为  $3.93 \times 10^{-8} \text{ K}^{-1}$ ;  $R_1$  为单位长度线芯在温度  $T$  时的交流电阻; $\gamma_s$  为集肤效应系数; $x_s$  为集肤效应中频率与导体结构影响系数; $k_s$  为系数,取值为 0.435; $f$  为电流频率,取值为 50 Hz。

1.3 网格剖分及计算方法

仿真中,在中间接头区域采用极细化网格剖分,在土壤区域采用超细化网格剖分,网格剖分平均单元质量为 0.68,网格单元格数量为 27 591 669。类似的,在电缆本体区域采用极细化网格剖分,在土壤区域采用超细化网格剖分,网格剖分平均单元质量为 0.69,网格单元格数量为 17 267 128。在中间接

头的线芯和连接管上施加电流有效值或在电缆本体的线芯上施加电流有效值,采用“稳态”计算分别获取不同条件下的中间接头或电缆本体稳态载流量。

2 中间接头和电缆本体载流量

2.1 环境温度

环境温度会显著影响中间接头和电缆本体的载流量。以电缆线芯最高运行温度 363 K 作为载流量的校核标准,计算了土壤导热系数为  $0.5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、敷设深度为 1.0 m 时,不同环境温度下的中间接头和电缆本体载流量,结果如图 5 所示。可以看出,不同环境温度下的中间接头载流量始终小于电缆本体载流量。环境温度为 283 K、293 K、303 K 与 313 K 时,电缆本体载流量分别为 1520 A、1422 A、1323 A 和 1208 A,而对应环境温度下的中间接头载流量分别为 1385 A、1295 A、1199 A 和 1095 A,相同环境温度下的中间接头载流量相较于电缆本体下降了约 9%。

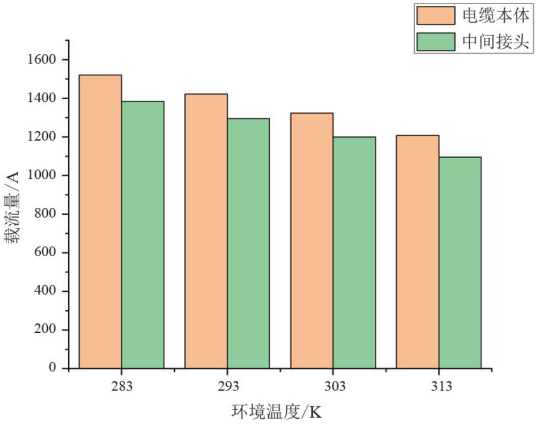


图 5 不同环境温度下的中间接头与电缆本体载流量

为进一步研究中间接头与电缆本体载流量间差异对中间接头绝缘性能的影响,以本体载流量为实际运行过程中流经线芯的电流,计算了不同环境温度下中间接头的温度分布(土壤导热系数为  $0.5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 、敷设深度为 1.0 m),如图 6 所示。

可以看出,当流经线芯的电流为本体载流量时,不同环境温度下的中间接头最高温度均明显高于 363 K。环境温度为 283 K、293 K、303 K 与 313 K 时,中间接头主绝缘交联聚乙烯最高温度分别为 385.55 K、381.87 K、379.42 K 和 376.15 K。长期处于这一温度下的中间接头主绝缘老化速率会明显快于本体主绝缘,导致中间接头绝缘故障率偏高。故



在实际运行中建议按照中间接头载流量来校准电缆稳态载流量,以保障电缆安全稳定运行。

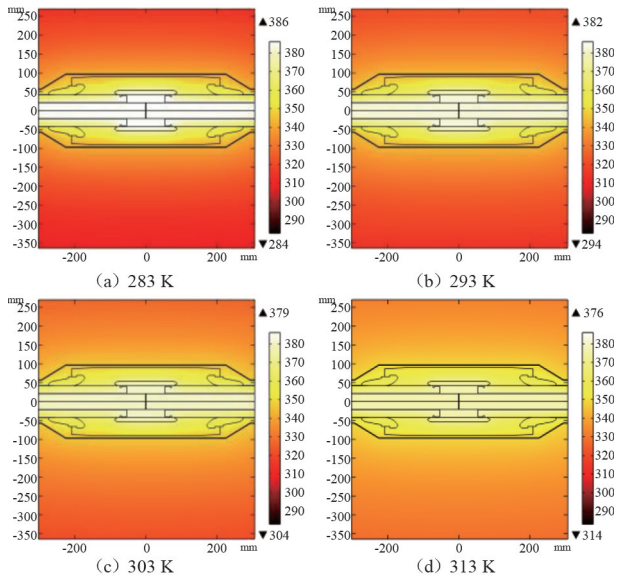


图 6 不同环境温度下的中间接头温度分布

2.2 土壤导热系数

土壤导热系数是影响电缆载流量的重要参数,随着土壤水分的蒸发,电缆散热效果会逐渐变差。在本节中,以线芯最高运行温度 363 K 作为载流量校核标准,计算了环境温度为 293 K、敷设深度为 1.0 m 时,土壤导热系数对中间接头和电缆本体载流量的影响规律,如图 7 所示。显然,不同土壤导热系数下的中间接头载流量小于本体载流量。土壤导热系数为 0.5 W/(m·K)、1.0 W/(m·K)、1.5 W/(m·K) 和 2.0 W/(m·K) 时的中间接头载流量分别为 1295 A、1525 A、1634 A 和 1698 A,相较于相同条件下的本体载流量分别下降了 8.9%、8.3%、7.8%和 7.5%。

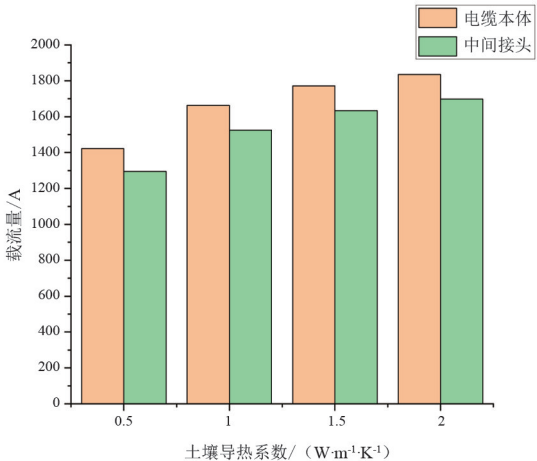


图 7 不同土壤导热系数下的中间接头与电缆本体载流量

类似的,以本体载流量为流经线芯的电流,研究了回填不同导热系数土壤时的中间接头温度分布(环境温度为 293 K、敷设深度为 1.0 m),如图 8 所示。

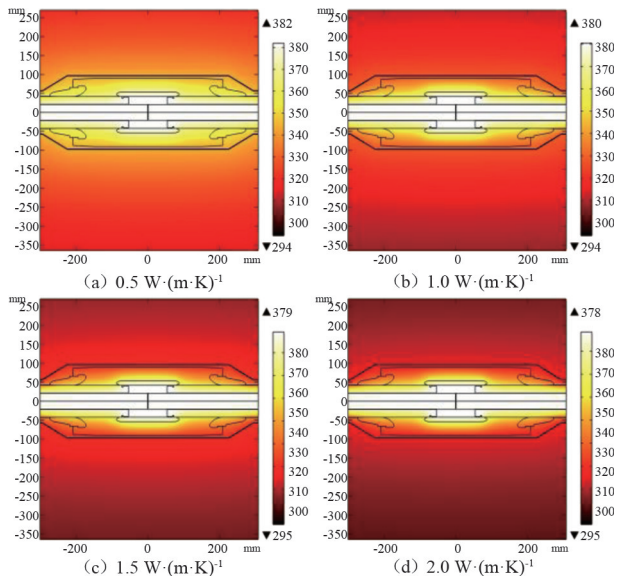


图 8 不同土壤导热系数下的中间接头温度分布

可以看出,当流经线芯的电流为本体载流量时,中间接头最高温度随土壤导热系数的增加而略有降低。土壤导热系数为 0.5 W/(m·K)、1.0 W/(m·K)、1.5 W/(m·K) 和 2.0 W/(m·K) 时的中间接头主绝缘交联聚乙烯最高温度分别为 381.87 K、380.27 K、379.00 K 和 378.19 K。

由于中间接头的复杂结构,如按照本体载流量校核电缆载流能力,将导致中间接头主绝缘处于加速热老化状态,因此为确保电缆长期稳定运行,建议以本体载流量确定电缆载流时应留有一定裕度。

2.3 敷设深度

电缆敷设深度会一定程度影响直埋电缆的散热过程,在本节中,以线芯最高运行温度 363 K 作为载流量校核标准,计算了环境温度为 293 K、土壤导热系数为 0.5 W/(m·K) 时,敷设深度对中间接头和电缆本体载流量的影响规律,如图 9 所示。可以看出,敷设深度为 1.00 m、1.25 m、1.50 m 和 1.75 m 时的中间接头载流量分别为 1295 A、1265 A、1241 A 和 1222 A,相较于对应条件下的本体载流量分别下降了 8.9%、10.2%、10.5%和 10.8%。

类似的,以本体载流量为流经线芯的电流,研究了不同敷设深度时的中间接头温度分布(环境温度为 293 K、土壤导热系数为 0.5 W/(m·K)),如图 10 所示。

可以看出,当流经线芯的电流为本体载流量时,

中间接头最高温度随敷设深度的增加而增加。敷设深度为 1.00 m、1.25 m、1.50 m 和 1.75 m 时的中间接头主绝缘交联聚乙烯最高温度分别为 381.87 K、385.20 K、386.13 K 和 386.90 K。上述研究表明,为确保电缆主绝缘长期稳定可靠,建议以本体载流量确定电缆载流时应留有一定裕度。

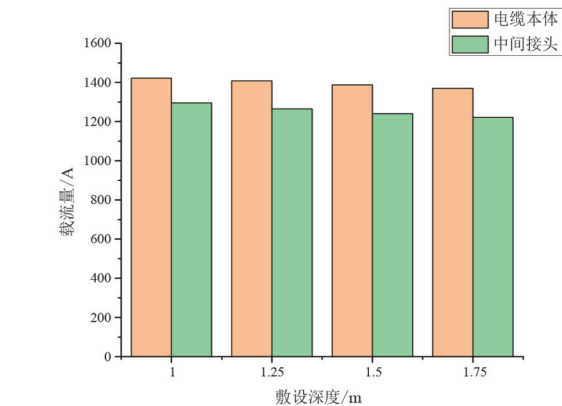


图 9 不同敷设深度下的中间接头与电缆本体载流量

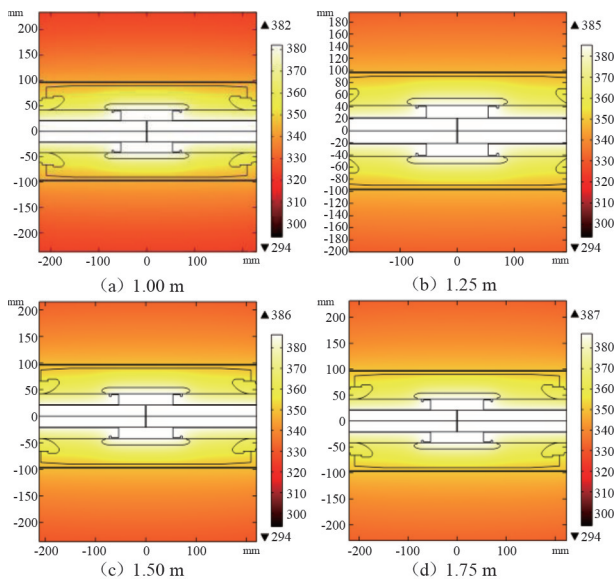


图 10 不同敷设深度下的中间接头温度分布

### 3 结 论

上面搭建了土壤直埋 110 kV 中间接头和电缆本体稳态载流量仿真模型,对比研究了环境温度、土壤导热系数和敷设深度对中间接头和电缆本体稳态载流量的影响规律,得到的主要结论如下:

1) 不同环境温度下的中间接头载流量始终小于本体载流量。环境温度为 283 K、293 K、303 K 与 313 K 时(土壤导热系数为 0.5 W/(m·K)、敷设深度为 1.0 m),中间接头载流量较相同环境温度下的

本体载流量减小了约 9%。

2) 不同土壤导热系数下的中间接头载流量小于本体载流量。土壤导热系数为 0.5 W/(m·K)、1.0 W/(m·K)、1.5 W/(m·K) 和 2.0 W/(m·K) 时(环境温度为 293 K、敷设深度为 1.0 m)的中间接头载流量相较于相同条件下的本体载流量分别下降了 8.9%、8.3%、7.8% 和 7.5%。

3) 不同敷设深度下的中间接头载流量小于本体载流量。敷设深度为 1.00 m、1.25 m、1.50 m 和 1.75 m 时(环境温度为 293 K、土壤导热系数为 0.5 W/(m·K) 的中间接头载流量相较于对应条件下的本体载流量分别下降了 8.9%、10.2%、10.5% 和 10.8%。

4) 由于中间接头的复杂结构,如按照本体载流量校核电缆载流能力,将导致中间接头主绝缘处于加速热老化状态,为确保电缆长期稳定运行,建议以本体载流量确定电缆载流时应留有一定裕度。

### 参考文献

[1] 魏艳慧,郑元浩,龙海泳,等.绝缘层厚度对高压直流电缆电场和温度场分布的影响[J].电工技术学报,2022,37(15):3932-3940.

[2] 王彦楠,李铮,杨鹏飞,等.基于电磁热多场耦合的直埋电缆导体温度与载流量计算[J].计量学报,2022,43(7):877-884.

[3] 何宏源,金妮.IEC 标准下电缆实际载流量的计算研究[J].东北电力技术,2022,43(4):1-3.

[4] Electric Cables-Calculation of the current rating-Part1-2: Current rating equations(100% load factor) and calculations of loss-sheath eddy current loss factors for two circuits in flat formation; IEC 60287-1-2; 2023[S/OL].[2022-05-13].<http://webstore.iec.ch/publication/68120>.

[5] 全国电线电缆标准化技术委员会.电缆载流量计算:JB/T 10181.11—2014[S].北京:机械工业出版社,2015.

[6] 马国栋.电线电缆载流量[M].北京:中国电力出版社,2003.

[7] HEINHOLD L, STUBBE R (Hrsg). 电力电缆及电线[M].崔国璋等,译.北京:中国电力出版社,2001.

[8] 郑元浩. 高压直流电缆主绝缘老化特性及电-热耦合仿真研究[D].青岛:青岛科技大学,2022.

[9] 赵学风,郝一帆,黄国强,等.基于有限元仿真的土壤直埋电缆中间接头稳态载流量计算[J].高压电器,2022,58(3):64-70.

# 新能源并网谐振过电压分析

邹福强<sup>1</sup>, 吴冲<sup>1</sup>, 钟帆<sup>2</sup>, 李卫兰<sup>2</sup>, 刘毅<sup>1</sup>, 张胜飞<sup>1</sup>

(1. 中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610056;

2. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 611756)

**摘要:**基于新能源发电技术的快速发展, 新能源发电所占比例呈逐年增大的趋势。新能源通过逆变装置接入后会给电力系统注入谐波, 当其大规模并网后谐波含量丰富, 可能会有谐振过电压的潜在风险。首先, 针对光伏并网系统建立谐波数学模型, 对单个新能源场站接入系统进行谐波分析, 分析逆变器参数、线路参数及电网等效阻抗对谐振后系统电压产生的影响; 然后, 对多个新能源接入系统进行谐波分析, 探究新能源不同规模接入时系统谐振变化规律及对系统电压造成的影响。

**关键词:**新能源并网; 谐振过电压; 谐波模型; 谐振变化规律

**中图分类号:** TM 46 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2023)05-0012-09

**DOI:** 10.16527/j.issn.1003-6958.20230503

## Resonant Overvoltage Analysis of Renewable Energy Grid-connected System

ZOU Fuqiang<sup>1</sup>, WU Chong<sup>1</sup>, ZHONG Fan<sup>2</sup>, LI Weilan<sup>2</sup>, LIU Yi<sup>1</sup>, ZHANG Shengfei<sup>1</sup>

(1. Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group,

Chengdu 610056, Sichuan, China; 2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong

University, Chengdu 611756, Sichuan, China)

**Abstract:** Based on the rapid development of renewable energy generation technology, the proportion of renewable energy generation is increasing year by year. And renewable energy will introduce harmonics into power system after being integrated through inverters. When renewable energy is linked to the grid on a large scale, the harmonic content is abundant and there may be a possible risk of resonant overvoltage. Firstly, a harmonic mathematical model is established for photovoltaic grid-connected system. Then, harmonic analysis on a single renewable energy site access system is carried out, and the impact of inverter parameters, line parameters, and grid equivalent impedance on system voltage after resonance is analyzed. And harmonic analysis on a variety of renewable energy access systems is also carried out to investigate the resonance variation pattern of renewable energy access at various scales and its impact on system voltage.

**Key words:** renewable energy integration; resonant overvoltage; harmonic model; resonance variation pattern

## 0 引言

随着国内大力发展新能源技术, 风力、光伏等新能源发电比例逐年增长, 目前已成为中国新能源利用的重要组成部分。光伏、风电等新能源通常通过逆变装置接入电网, 由于采用脉冲宽度调制的逆变装置会产生谐波注入电网, 特别是当新能源大规模并入电网时谐波可能会导致系统过电压威胁电网运行的安全<sup>[1-3]</sup>。

目前针对新能源并网谐波问题已有大量研究。部分文献着重探讨了模型的精确建立并且大都是针对实例进行分析。文献[4-5]均对逆变器并网系统进行了阻抗分析, 用硬件设施进行了验证, 得出了逆变器的准确模型并进行了稳定性分析; 文献[6]针对大型光伏电站建立了阻抗模型并用工程测试进行了验证; 文献[7-8]根据风电并网的控制策略建立了阻抗模型。但上述研究均针对新能源并网系统中的电力电子装置进行建模, 并没有考虑包括



变压器、电网、输电线的综合模型。也有文献在建立逆变器模型的同时考虑了输电线的模型,例如文献[9]主要针对新能源并网系统建立了输电电缆的谐波模型。

在谐振分析方法上,新能源并网逆变器系统谐振分析传统方法主要是频谱分析法和频域分析法。频谱分析法向测试节点注入幅值和频率均特定的电流,用于求解该节点对应频率输入阻抗,通过改变节点注入电流的频率可求解得到节点阻抗关于频率的变化曲线,进一步可用来判断谐振是否存在以及谐振的频率。基于并网逆变器输出阻抗等效建模的频域分析法的思想是:根据建模结果推导并网逆变器输出电流表达式,确定并网电流发生谐振的因素,每一影响因素对应一个传递函数的伯德图,可进一步求解谐振频率<sup>[10-11]</sup>。由于频域分析法需要建立高阶传递函数,计算量大,文献[12]首次提出了模态分析法,能够获得更多的谐振信息;文献[13-16]将模态分析法运用于新能源并网系统中并在建立谐波模型时考虑了控制的延时等非线性因素。但以上研究大多针对单个新能源连接到系统时的谐振问题,对于新能源接入规模对谐振的影响并没有涉及,并且上述研究虽然探究了新能源并网系统的谐振分布,但是缺少逆变器参数和电网参数对谐振的影响。

为分析多个新能源接入系统时谐振对系统电压的影响,首先,根据逆变装置控制策略建立新能源接入系统的谐波模型;然后,对单个新能源接入系统进行谐波分析,探究各种参数对系统电压的影响;最后,对多个新能源接入系统进行谐波分析,探究不同规模新能源接入及采用不同参数逆变器的新能源并网系统的谐振变化规律以及对系统电压造成的影响。

1 新能源并网系统建模

1.1 新能源并网系统结构

典型的多个新能源并网系统结构如图 1 所示,这里仅选取光伏进行分析。 $n$  个光伏阵列产生的能量通过变换器到达各逆变装置,各个逆变装置通过 LCL 滤波器并入电网。图 1 中: $L_{1n}$ 、 $L_{2n}$ 、 $C_n$ 、 $C_{den}$  分别为逆变器侧电感、网侧电感、滤波电容、直流侧电容; $Z_g$  和  $U_g$  分别为电网等效阻抗和等效电压。

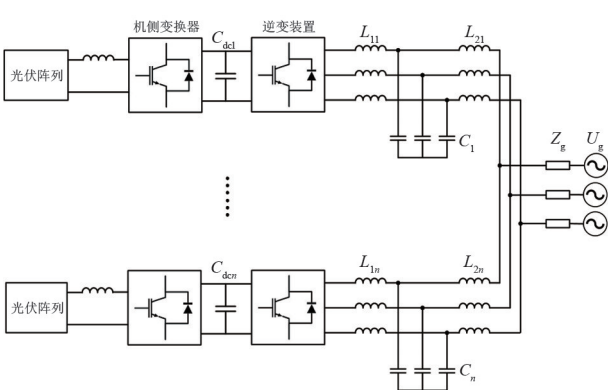


图 1 新能源并网系统结构

光伏并网系统一般由光伏阵列通过机侧变换器再通过逆变装置与电网连接。其中,机侧变换器为 DC/DC 变换器,可将光伏电池输出较宽范围的低压直流电变成电压较高的稳定直流电,同时可实现输入端与输出端的电气隔离,稳定的直流电再通过逆变装置串联 LCL 滤波器并入电网。

当新能源并网数量较大时,通过逆变装置进入电网的电流含有丰富的谐波成分。为掌握系统谐振特性,并防止注入谐波与系统谐振点重合出现过电压的情况,需要建立新能源并网系统的谐波阻抗模型对系统谐振情况进行分析。

1.2 新能源并网系统谐波模型

在对新能源并网系统建立谐波模型时,将电网等效阻抗左侧的系统进行戴维南等效。由于逆变装置主要实现对逆变侧电流的控制,并且新能源并网系统谐振主要受输出电流影响,因此仅需针对逆变装置的电流控制策略,将逆变装置交流端口左端系统等效为电压源串联阻抗的形式。以图 2 所示单个 LCL 型逆变装置作为基本单元进行建模,逆变装置的交流回路通过 LCL 滤波器接入电网。

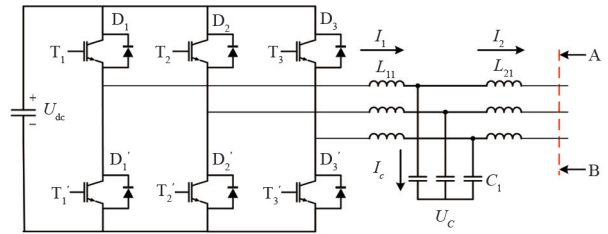


图 2 三相 LCL 型并网逆变装置结构

为保证系统稳定运行且能够以较高的功率因数向电网输送电能,并网 LCL 型逆变装置采用逆变装置侧电流  $I_1$  闭环和电容电流  $I_c$  前馈的控制策略<sup>[14]</sup>,其控制框图如图 3 所示。电流内环的指令信号由电压外环计算给出,并且由于新能源并网谐振

主要体现在输出电流上,因此只需对电流控制策略进行分析<sup>[10]</sup>。图 3 中  $G_i(s)$  为电流控制器传递函数,电流控制器采用 PI 控制,如式(1)所示,其中  $K_p$ 、 $K_i$  分别为比例、积分控制系数。

$$G_i(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (1)$$

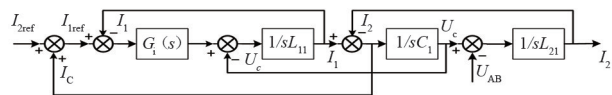


图 3 逆变装置控制

利用图 3 的控制结构框图来对图 2 AB 端进行戴维南等效,可得开路电压  $U_{oc}$ 、短路电流  $I_{sc}$  和等效阻抗  $Z_{eq}$  的表达式,如式(2)所示。由此可得基本单元的谐波模型如图 4 所示,其中  $Z_l$  和  $Z_g$  分别为线路阻抗和电网阻抗。

$$\begin{cases} U_{oc}(s) = \frac{G_i(s)}{s^2 L_{11} C_1 + 1} I_{2ref} \\ I_{sc}(s) = \frac{G_i(s)}{s^3 L_{11} L_{21} C_1 + s(L_{11} + L_{21}) + G_i(s)} I_{2ref} \\ Z_{eq}(s) = \frac{s^3 L_{11} L_{21} C_1 + s(L_{11} + L_{21}) + G_i(s)}{s^2 L_{11} C_1 + 1} \end{cases} \quad (2)$$

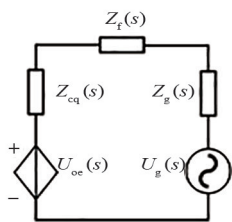


图 4 新能源并网模型

## 2 单个新能源并网谐振分析

### 2.1 模态分析法

模态分析法是将逆变器并网系统等效为一个多节点网络系统。根据图 4 可以建立单逆变器系统的 2 阶节点导纳矩阵  $Y_2$ ,如式(3)所示。

$$Y_2 = \begin{pmatrix} \frac{1}{Z_{eq1}(s)} + \frac{1}{Z_{n1}(s)} & -\frac{1}{Z_{n1}(s)} \\ -\frac{1}{Z_{n1}(s)} & \frac{1}{Z_{n1}(s)} + \frac{1}{Z_g(s)} \end{pmatrix} \quad (3)$$

系统发生谐波谐振时,网络节点导纳矩阵  $Y_2$  往

往出现极小值,  $Y_2^{-1}$  中则出现极大值,系统相应节点会产生非常高的电压,此时为并联谐振最为严重的情形<sup>[12]</sup>。

若该新能源并网系统在频率  $f$  处发生并联谐振,则节点电压矩阵  $U_f$ 、节点导纳矩阵  $Y_2$ 、节点注入电流矩阵  $I_f$  有

$$U_f = Y_2^{-1} I_f \quad (4)$$

对网络节点导纳矩阵  $Y_2$  进行特征值分解,则左特征向量矩阵  $L$ 、特征值矩阵  $\Lambda^{-1}$ 、右特征向量矩阵  $T$  有

$$U_f = L \Lambda^{-1} T I_f \quad (5)$$

将特征值矩阵  $\Lambda^{-1}$  的对角矩阵元素  $\lambda^{-1}$  定义为“系统模态阻抗  $Z$ ”。当  $\lambda = 0$  或者接近于 0 时,意味着并联谐振的发生,此时很小的注入电流  $I_f$  都将导致很大的电压,这就是谐振过电压现象。

传统谐振分析方法仅能获得谐振频率,且当新能源并网系统中逆变器数量增多、逆变器参数不同时,分析过程难度将增大。相比之下,在模态域中更易识别出谐振的位置,且模态分析法仅需围绕新能源系统网络对节点导纳矩阵进行分析,过程较为简便。

### 2.2 单逆变器谐振模态分析

在建立系统节点导纳矩阵的基础上,依据图 5 所示的模态分析流程,忽略逆变器侧、电网侧电感寄生电阻,采用表 1 中 I 类滤波电路、线路、电网参数<sup>[13-15]</sup>,利用 Matlab 编程计算得到图 6 所示的 2 节点模态阻抗曲线。

采用标么值来对谐振频率进行描述,50 Hz 为

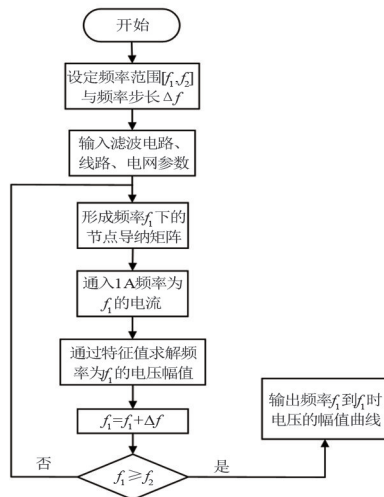


图 5 模态分析流程

| 表 1 系统参数                                      |             |
|-----------------------------------------------|-------------|
| 参数                                            | I / II 类逆变器 |
| 逆变器侧电感 $L_1/\text{mH}$                        | 4/1         |
| 滤波电容 $C/\mu\text{F}$                          | 40/20       |
| 网侧电感 $L_2/\text{mH}$                          | 0.5/0.2     |
| 线路电阻 $R_l/(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$      | 0.11        |
| 线路电感 $L_l/(\text{mH} \cdot \text{km}^{-1})$   | 1.2         |
| 线路电容 $C_l/(\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1})$ | 0.07        |
| 线路长度 $l_l/\text{km}$                          | 6           |
| 电网电阻 $R_g/\Omega$                             | 0.5         |
| 电网电感 $L_g/\text{mH}$                          | 1           |
| 电网电压 $U_g/\text{V}$                           | 220         |
| 电流控制系数 $K_p$                                  | 1           |
| 电流控制系数 $K_i$                                  | 200         |
| 电网频率 $f_g/\text{Hz}$                          | 50          |

1 pu,将图 4 中单个新能源并网模型划分为新能源和电网两个节点,即存在两种模式阻抗,分别定义这两种模式阻抗随频率变化的过程为模式 1、模式 2。由图 6 可知,在注入幅值为 1 A、频率为 2~200 pu 谐波电流后,可以看出频率为 9.6 pu 和 151.5 pu 的电压幅值有明显升高,说明系统存在两个谐振点,如果新能源并网逆变器产生这两个频率的电流,将可能导致谐振过电压。

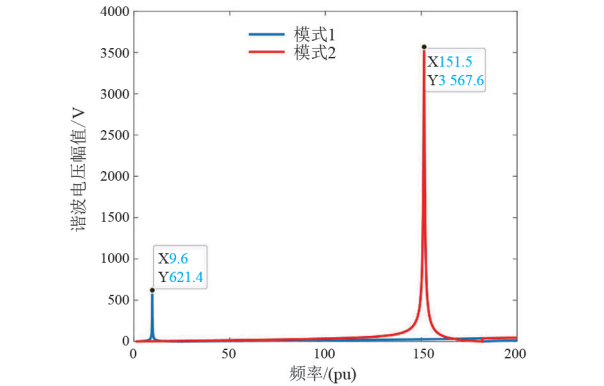


图 6 2 节点模式阻抗曲线

为防止步长  $\Delta f$  对分析结果准确性产生影响,对不同步长下系统谐振点的变化进行了分析,结果如图 7 所示。可见在 1~10 Hz 之间,步长对谐振频率的分析结果影响不大,均能满足对分析精度的要求,因此后续分析中均设置步长为 5 Hz。

2.2.1 LCL 参数的影响

在逆变装置侧电流  $I_1$  闭环和电容电流  $I_c$  前馈的控制策略下,分别改变参数逆变器电感  $L_1$ 、滤波电容  $C$ 、网侧电感  $L_2$ ,模态分析结果如图 8—图 10 所示。

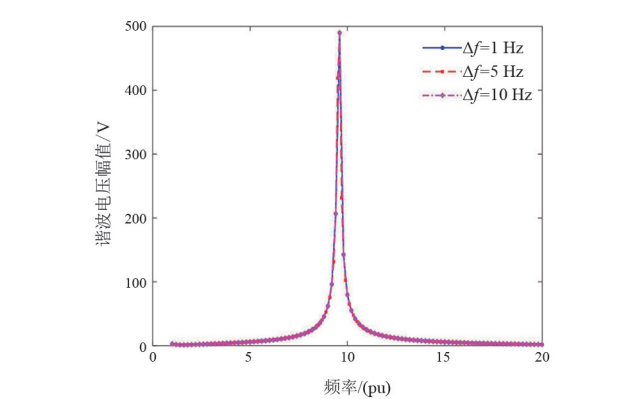


图 7 不同步长模态分析结果

由图 8(a)可知,随着逆变器侧电感  $L_1$  从 1 mH 变化到 4 mH,模式 1 谐振点的谐振频率逐渐从 16.7 pu 减小到 9.6 pu,谐波电压幅值呈现逐渐上升的趋势,而图 8(b)中模式 2 谐振点的谐振频率和引起的谐波电压幅值都无明显变化。

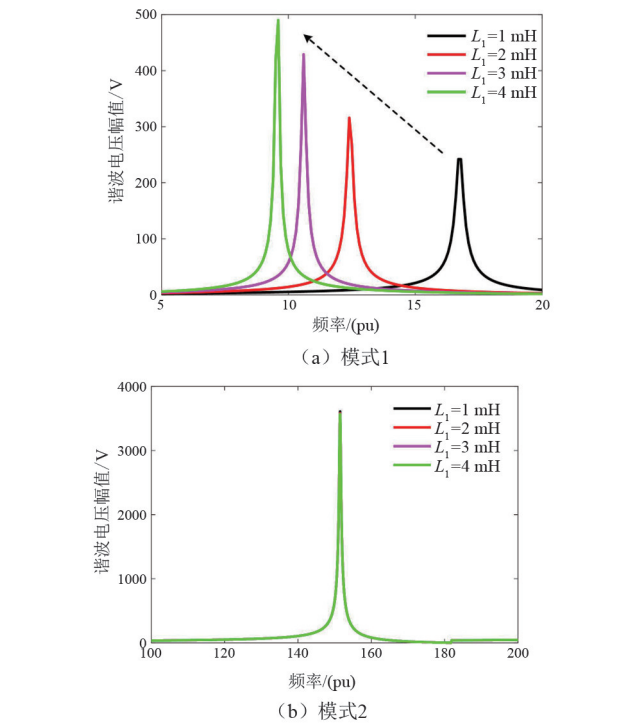


图 8  $L_1$  参数变化模态分析结果

由图 9(a)可知,当滤波电容  $C$  从 10  $\mu\text{F}$  变化到 40  $\mu\text{F}$  时,模式 1 谐振点的谐振频率逐渐从 19.1 pu 减小到 9.6 pu,谐波电压幅值大幅降低;由图 9(b)可知,电容值发生变化,模式 2 谐振点的谐振频率从 152.1 pu 减小到 151.5 pu,引起的谐波电压仅有略微影响。

由图 10(a)可知,网侧电感  $L_2$  从 0.2 mH 增大到 0.5 mH 时,模式 1 谐振点的谐振频率几乎没有变化但引起的谐波电压幅值逐渐降低;而从图10(b)



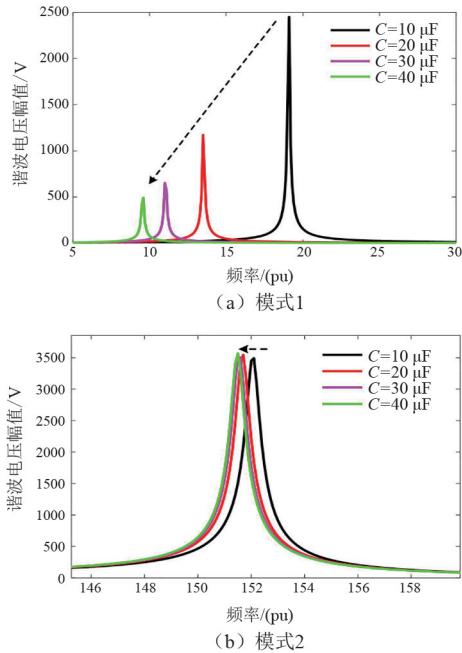


图 9 C 参数变化模态结果分析

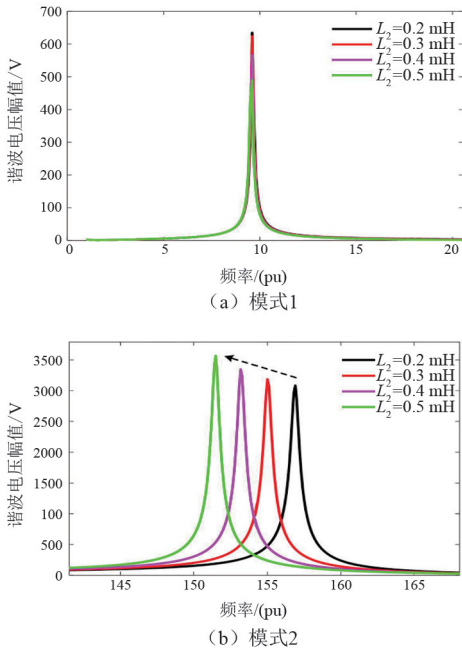


图 10  $L_2$  参数变化模态分析结果

中可以看出模式 2 谐振点的谐振频率从 156.9 pu 减小到 151.5 pu,引起的谐波电压幅值逐渐增大。

以上分析可以得出,通过对逆变器侧电感  $L_1$  和滤波电容  $C$  的适当设计,可以使模式 1 谐振点的谐振频率发生改变避免低次谐振;通过对网侧电感  $L_2$  的适当设计,可以使模式 2 谐振点的谐振频率发生偏移避免高次谐振。

2.2.2 控制参数的影响

图11为逆变器控制参数变化时的模态分析结

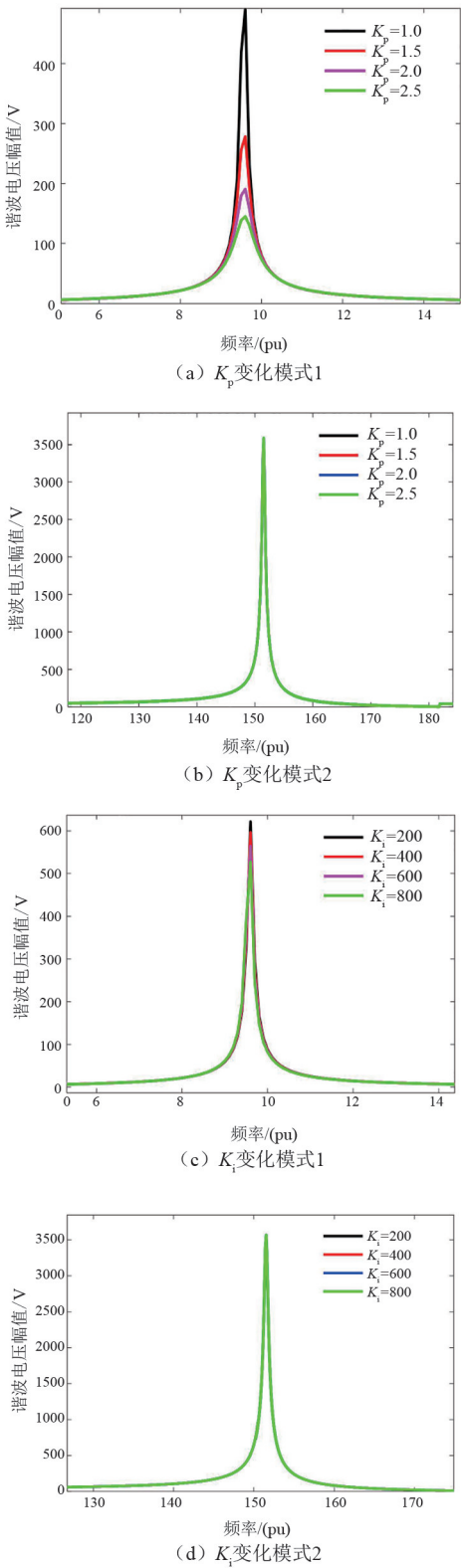


图 11 控制参数变化模态分析结果

果。由图 11(a)可知当控制器参数  $K_p$  从 1.0 变化到 2.5 时,模式 1 谐振点的谐振频率几乎没有变化,而谐振导致的谐波电压幅值大幅减小;由图 11(b)可知,  $K_p$  对模式 2 谐振点几乎没有影响;由图 11(c)、(d)可以看出,控制器参数  $K_i$  仅仅对模式 1 谐振点

引起的谐波电压有较小影响。由以上分析可知,在满足控制效果的前提下,适当增大控制器参数 $K_p$ 可使模式 1 谐振点引起的谐波电压幅值大大降低从而降低低频谐振风险。

2.2.3 线路阻抗参数的影响

忽略线路电阻和电容的变化,图 12 给出线路电抗 $L_f$ 变化时的模态分析结果。由图 12(a)可知:当线路电抗从 0.5 mH/km 变化到 2.0 mH/km 时,模式 1 谐振点的谐振频率从 10.9 pu 降低到 9.0 pu,引起的谐波电压幅值从 868.3 V 减少到 588.1 V;图 12(b)中显示的模式 2 的谐振频率从 194.7 pu 降低到 125.5 pu,引起的谐波电压幅值从 6 018.9 V 减少到 2 358.8 V,谐振点变化情况和模式 1 类似,但是变化幅度远大于模式 1,说明模式 2 谐振点受线路电抗的影响更大。

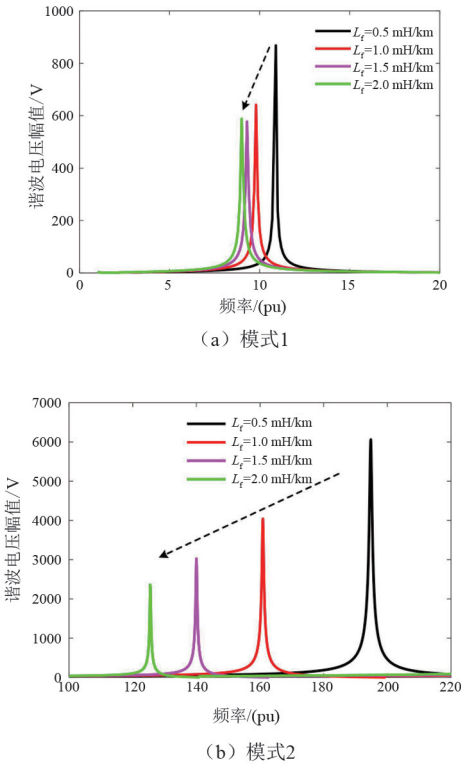


图 12  $L_f$  变化模态分析结果

2.2.4 电网阻抗参数的影响

电网电阻本身的变化并不会影响并网系统的谐振频率,因此分析谐振特性时,同样忽略电网电阻的影响。电网电抗 $L_g$ 变化时模态分析结果如图 13 所示。当 $L_g$ 从 0.5 mH 变化到 2.0 mH 时,模式 1 谐振点的谐振频率从 9.7 pu 降低到 9.4 pu,引起的谐波电压幅值从 457.2 V 增加到 600.5 V;模式 2 的谐振频率从 160.1 pu 降低到 138.6 pu,引起的谐波电压

幅值从 1 561.3 V 增加到 9 662.8 V。因此电网电抗对系统高次谐振点影响较大,新能源在接入时,对其选择也尤其重要。

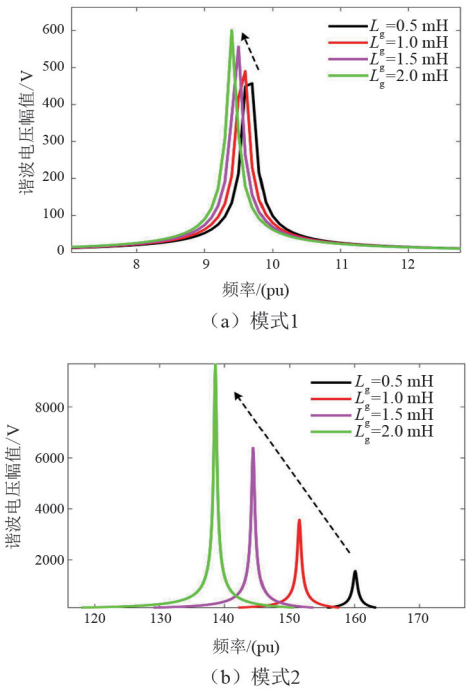


图 13  $L_g$  参数变化模态分析结果

3 不同规模新能源并网谐振分析

3.1 相同参数新能源并网谐振分析

当有多个新能源并入系统时,可得谐波模型如图 14 所示。第 $n+1$ 个节点为 $n$ 个新能源站并入系统的公共连接点,每个新能源等效模型通过线路等效阻抗 $Z_{ti}(i=1,2,\cdots,n)$ 并入公共连接点。根据式(5)可知, $n+1$ 个节点拥有 $n+1$ 个模态阻抗,系统存在 $n+1$ 个谐振模式。

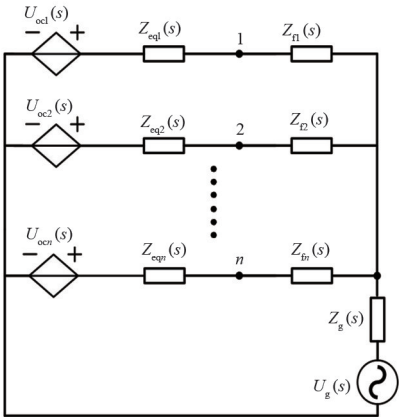


图 14 多新能源并网模型

由图 14 可列出 $n$ 台逆变器并网的节点导纳矩

阵的通用表达式  $\mathbf{Y}_{n+1}$  为

$$\mathbf{Y}_{n+1} = \begin{pmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1(n+1)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{1(n+1)} & \cdots & Y_{(n+1)(n+1)} \end{pmatrix} \quad (6)$$

其中,

$$\begin{cases} Y_{11} = \frac{1}{Z_{eq1}(s)} + 0 + \cdots + \frac{1}{Z_{f1}(s)} \\ Y_{1(n+1)} = -\frac{1}{Z_{f1}(s)} \\ Y_{(n+1)(n+1)} = \frac{1}{Z_g(s)} + \frac{1}{Z_{f1}(s)} + \frac{1}{Z_{f2}(s)} + \cdots + \frac{1}{Z_{fn}(s)} \end{cases}$$

根据式(6)可求解第 2、3、4 台逆变器并网时新能源系统的节点导纳矩阵。按照图 5 流程以及表 1 中的 I 类逆变器参数,可求得不同规模新能源并网谐振特性,如图 15 所示。图中  $n=2$  时模式 3 与模式 4 完全重合; $n=3$  时模式 3、模式 4、模式 5 也完全重合。由图 15 可见:随着新能源数量的增加,系统节点增加,谐振模式随之增加;随着新能源数量的增加,低频谐振点的谐振频率集中于 9.0 pu 左右,引起的谐波电压幅值逐渐增大;出现了两个高频谐振点,其中 170.4 pu 的谐振点在不同新能源并网数量下频率没有发生改变,但是模式 1 谐振点的谐振频率随着新能源并网数量的增加而逐渐降低。

3.2 不同参数新能源并网谐振分析

根据表 1 中 I、II 类数值,得到如表 2 所示的组合设置,并网模态分析结果如图 16 所示。相较于第 3.1 节分析的仅含 I 类逆变器的系统,当系统中同时含 I、II 类逆变器时,系统模态增加,谐振点增加,低频谐振点引起的谐波电压最大幅值降低,高频谐振点引起的谐波电压最大幅值降低。该结果表明,新能源并网系统中谐振情况不仅与新能源并网规模有关,逆变器类型以及参数也会给系统谐振带

表 2 I、II 类逆变器组合设置

| 并网逆变器规模 $n$ | 组合编号 | 逆变器类别      |
|-------------|------|------------|
| 2           | 1    | I、II       |
|             | 2    | I、I、II     |
| 3           | 3    | I、II、II    |
|             | 4    | I、I、I、II   |
| 4           | 5    | I、I、II、II  |
|             | 6    | I、II、II、II |

来较大影响。

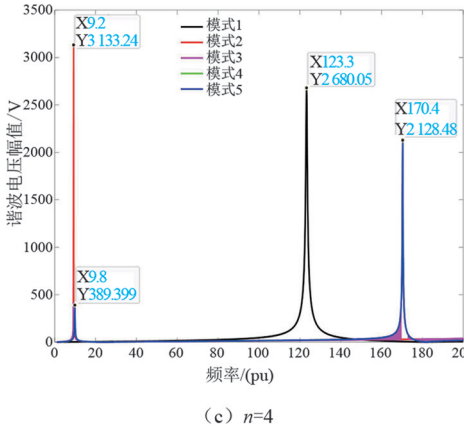
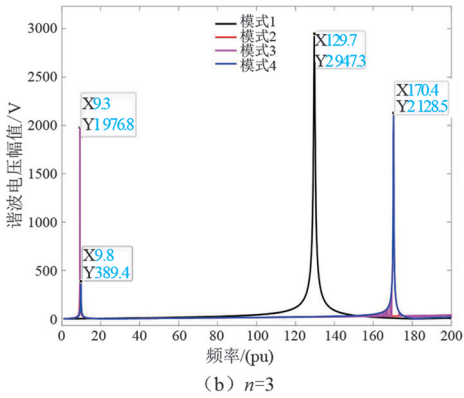
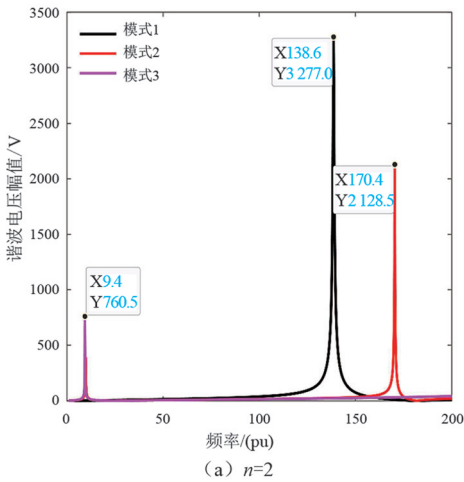
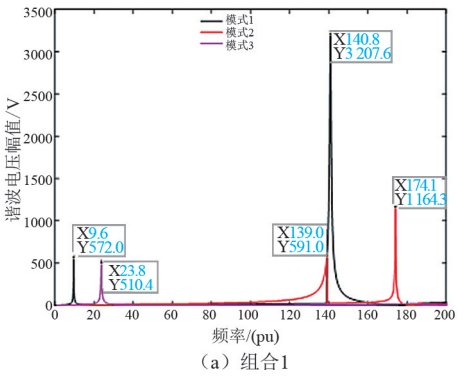


图 15 不同数量新能源并网模态分析结果





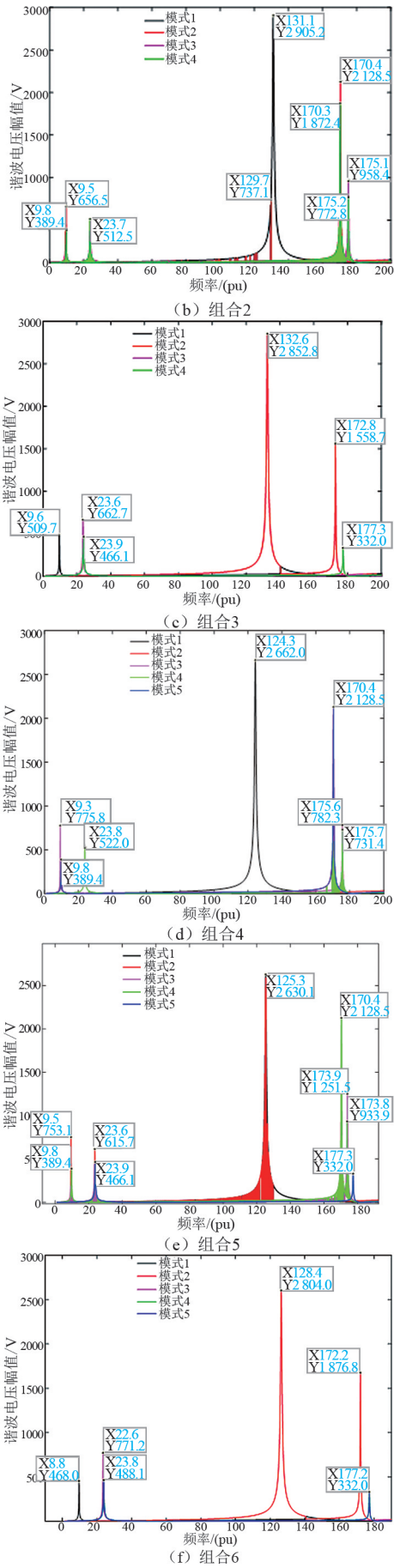


图 16 组合 1~6 新能源并网模态分析结果

4 仿真实验

为验证理论分析的正确性,以第 3.2 节中 4 个逆变器并网组合 4 为例,分别对 5 个节点进行频率扫描,将频率扫描的仿真结果与理论结果进行对比。

由所建立的模型可知,逆变器 1 为节点 1,以此类推,逆变器 4 为节点 4,逆变器与电网连接的公共连接点为节点 5,向 5 个节点分别施加频率为 2~200 pu 幅值为 1 A 的谐波电流。为了获得各个频率下的谐振情况,将时域的电压信号进行分解,得到对应的谐波电压幅值如图 17 所示,5 个节点观察到的所有谐振点与图 16(d)一致。这验证了所提理论分析的正确性,其中节点 1~3 观察到的谐振情况完全一致,公共连接点仅能观察到频率为 124 pu 的谐振

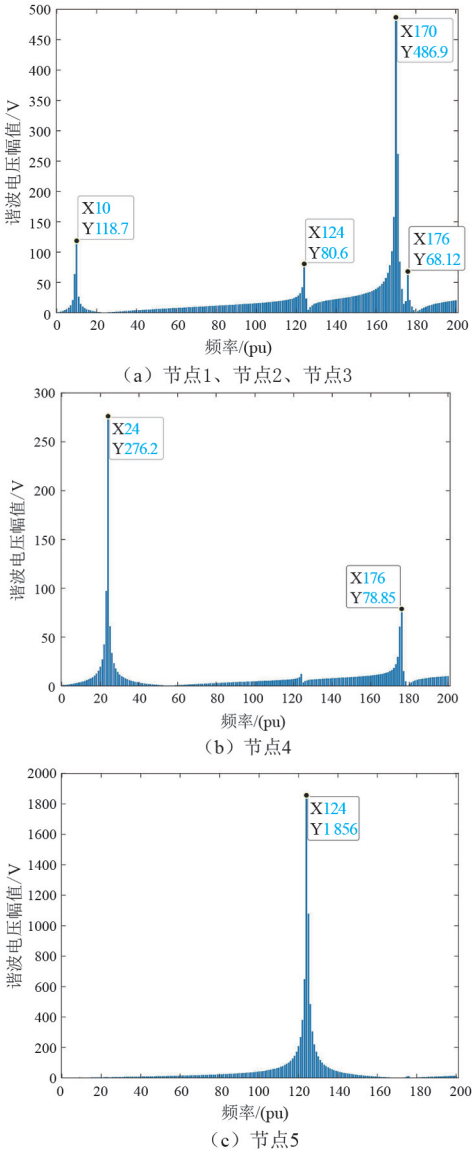


图 17 组合 4 频率扫描仿真结果

点。由频率扫描仿真结果可知,需要对多节点进行扫描才可以获得系统所有的谐振点,而所提方法更加简单,可以直接准确得到所有谐振点。

## 5 结 论

新能源并网系统,尤其是多个新能源并网系统,是复杂的高阶系统,准确有效地确定谐振频率以及谐振峰值进而解决谐振问题防止系统过电压是非常关键的一步。通过对系统的分析,得出如下结论:

1) 谐振点系统模态阻抗很大,即使电流很小也会导致很大的系统电压;建立新能源并网系统节点导纳矩阵、采用模态分析法可以快速、准确分析出并网系统存在的谐振点。

2) 单个新能源并网系统中,逆变器侧电感、网侧电感增大将导致系统谐振频率减小、谐波电压增大;滤波电容增大将导致谐振频率减小、谐波电压降低;适当增大控制参数可降低谐波电压;线路阻抗不宜过小,电网阻抗不宜过大。

3) 相同参数时,随着新能源并网数量的增加,系统节点增加,谐振模式随之增加;不同参数时,还会引起高、低频谐振电压都减小。

4) 通过对逆变器参数合理设计、对逆变器类型的合理组合,同时充分考虑接入电网的阻抗参数均可以避免谐振导致的过电压。

### 参考文献

- [1] 舒印彪,张智刚,郭剑波,等.新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J].中国电机工程学报,2017,37(1):1-9.
- [2] 朱锐,黎劲松,杨宝起,等.高比例新能源接入区域电网稳定控制技术探讨[J].电工技术,2021(12):46-49.
- [3] 王超.基于三级协调的高比例新能源并网电压控制[J].电工技术,2021(12):44-45.
- [4] PENG Yelun, SHUAI Zhikang, LIU Xuan, et al. Modeling and stability analysis of inverter-based microgrid under harmonic conditions [J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2020,11(2):1330-1342.
- [5] WEN Bo, DONG Dong, BOROYEVICH Dushan, et al. Impedance-based analysis of grid-synchronization stability for three-phase paralleled converters[J].IEEE Transactions on Power Electronics,2015,31(1):26-38.
- [6] LIU Qianyi, LIU Fang, ZOU Runming, et al. Harmonic resonance characteristic of large-scale PV plant: modelling, analysis, and engineering case[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(3):2359-2368.
- [7] LIU Bin, LI Zhen, ZHANG Xi, et al. Impedance-based analysis of control interactions in weak-grid-tied PMSG wind turbines[J]. IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems,2021,11(1):90-98.
- [8] SUN Xiaofeng, ZENG Jian, CHEN Zhe. Site selection strategy of single-frequency tuned R-APF for background harmonic voltage damping in power systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2013,28(1):135-143.
- [9] 聂程,王跃,雷万钧,等.新能源并网输电电缆谐波谐振分析及抑制方法[J].电力系统自动化,2017,41(17):128-133.
- [10] 张兴,余畅舟,刘芳,等.光伏并网多逆变器并联建模及谐振分析[J].中国电机工程学报,2014,34(3):336-345.
- [11] 解宝,周林,郝高峰,等.考虑电网阻抗影响的光伏并网逆变器稳定性与谐振分析及设计[J].中国电机工程学报,2018,38(22):6662-6671.
- [12] 徐文远,张大海.基于模态分析的谐波谐振评估方法[J].中国电机工程学报,2005,25(22):92-96.
- [13] 刘洋,帅智康,李杨,等.多逆变器并网系统谐波谐振模态分析[J].中国电机工程学报,2017,37(14):4156-4164.
- [14] 王要强,吴凤江,孙力,等.带 LCL 输出滤波器的并网逆变器控制策略研究[J].中国电机工程学报,2011,31(12):34-39.
- [15] 舒万韬,洪芦诚,刘宁波,等.多逆变器并网谐振特性分析[J].中国电机工程学报,2018,38(17):5009-5019.
- [16] 李建文,阮筱菲,李永刚,等.弱电网下多 LCL 型并网逆变器谐振模态分析[J].太阳能学报,2021,42(2):346-355.
- [17] 解绍锋,李群湛,赵丽平.谐波国家标准有关问题的探讨[J].电网技术,2006,30(13):94-97.
- [18] SAINZ Luis, CARO Manuel, CARO Eduardo. Analytical study of the series resonance in power systems with the Steinmetz circuit[J].IEEE Transactions on Power Delivery, 2009,24(4):2090-2098.
- [19] 满九方,谢小荣,唐健,等.适用于柔直系统高频谐振分析的输电线路模型[J].电网技术,2021,45(5):1782-1789.

### 作者简介:

邹福强(1991),男,硕士,工程师,研究方向为电力系统运行与控制;

吴 冲(1981),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统运行与控制;

钟 帆(1998),男,硕士研究生,研究方向为电能质量。

(收稿日期:2023-02-22)

# 基于发射光谱法的氩等离子体射流诊断研究

张大伟<sup>1</sup>, 陈晓颖<sup>1,2</sup>, 郝莎<sup>1</sup>

(1. 沈阳理工大学自动化与电气工程学院, 辽宁 沈阳 110159;

2. 华东光电集成器件研究所, 江苏 苏州 215163)

**摘要:**利用等离子体进行材料表面处理,其电子温度和电子密度会对材料表面的活性成分产生重要影响。为研究等离子体射流电子温度和电子密度,采用针-环电极结构搭建等离子体放电及光谱诊断试验平台,在大气中实现稳定等离子体射流;利用光谱仪采集氩等离子体的光谱数据,分别采用玻尔兹曼曲线斜率法和斯塔克展宽法计算,并对分析等离子体射流尖端、射流尖端有无铜箔时等离子体射流的不同轴向位置、铜箔到射流喷口不同距离时射流作用在铜箔表面的电子温度和电子密度变化规律。结果表明:输入电压升高会导致电子温度升高,电子密度降低;等离子体电子温度随轴向距离增加而降低,电子密度随轴向距离先略微升高然后降低。尖端放置铜箔会在一定范围内对电子温度电子密度数值产生影响。当铜箔到射流喷口距离增加时,铜箔表面电子温度先上升后下降,电子密度先下降后上升。且外施电压增加,电子温度达到最大值的位置和电子密度达到最小值的位置到喷口距离越来越远。

**关键词:**氩等离子体; 电子温度; 电子密度; 发射光谱法

**中图分类号:** TM 89 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2023)05-0021-06

**DOI:** 10.16527/j.issn.1003-6954.20230504

## Diagnostic Study of Argon Plasma Jet Based on Emission Spectroscopy

ZHANG Dawei<sup>1</sup>, CHEN Xiaoying<sup>1,2</sup>, HAO Sha<sup>1</sup>

(1. School of Automation and Electrical Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159,

Liaoning, China; 2. Huadong Photoelectric Integrated Device Research Institute,

Suzhou 215163, Jiangsu, China)

**Abstract:** The electron temperature and electron density of plasma for material surface treatment will have an important impact on active components of material surface. In order to study the electronic temperature and electron density of plasma jet, the needle-ring electrode structure is used to build a plasma discharge and spectral diagnosis test platform to achieve stable plasma jet in the atmosphere, and the spectral data of argon plasma are collected by spectrometer, and the Boltzmann curve slope method and Stark broadening method are used respectively to calculate, compare and analyze the electron temperature and electron density change law at the plasma jet tip, the different axial positions of plasma jet when the jet tip has copper foil or not, of the acting on the surface of copper foil, and and the different distances from copper foil to jet nozzle. The results show that the increase of input voltage will lead to an increase in electron temperature and a decrease in electron density. The plasma electron temperature decreases with the increase of axial distance, and the electron density first increases slightly and then decreases with axial distance. The placement of copper foil at the tip has an effect on the electronic temperature and the electron density value within a certain range. When the distance from copper foil to jet nozzle increases, the electron temperature on the surface of copper foil first rises and then decreases, and the electron density first decreases and then increases. And the applied voltage increases, the distance from the position where the electron temperature reaches the maximum value and the position where the electron density reaches the minimum value is getting farther and farther away.

**Key words:** argon plasma; electronic temperature; electron density; emission spectrometry



0 引 言

低温等离子体技术作为一种节能环保、高效可控的技术,具备大面积处理复杂外形试样的能力,已经在生物医学、环境治理、材料加工等领域广泛应用<sup>[1]</sup>。研究认为,其在气体绝缘金属封闭开关设备和气体绝缘金属封闭输电线路中,当绝缘材料体积电阻率与表面电阻率呈一定关系时能有效减少表面电荷积聚,改善绝缘子表面电场分布,提升沿面闪络电压。文献[2]采用介质阻挡放电的形式,对环氧树脂试样进行表面等离子体氟化处理,得到了等离子体表面改性的优化建议。大气压等离子体射流(atmospheric pressure plasma jet, APPJ),尤其是以惰性气体为工作气体的 APPJ,因为操作简便、激发电压低、活性粒子丰富、处理效率高的特性得到了较为深入的研究。在低温等离子体对材料表面改性处理过程中,高速运动的电子可使反应的分子激发、电离或断裂成自由基碎片<sup>[3]</sup>,增加材料表面活性成分,有效提升材料表面改性的效果<sup>[4]</sup>。低温等离子体在不同的应用场合,对放电状态参数如电子温度、密度以及活性粒子密度等要求不尽相同<sup>[5]</sup>。

电子温度是等离子体射流中电子能量的关键参量,电子密度是气体放电中最基本的参数之一,它们影响着等离子体射流中其他许多参数,决定了等离子体形成和演化中所涉及的解离、激发和电离等过程的强弱<sup>[6]</sup>。文献[7]采用针-板放电装置,分析讨论了等离子体放电的发展速度以及电子激发温度。文献[8]采用朗缪尔探针诊断脉冲火花放电等离子体电子温度和电子密度。文献[9]采用 PLS-800 设备和氩等离子体射流喷枪,证实了氩等离子体射流中的成分。当前,对于等离子体重要参量的测量仍是等离子体光谱诊断中的热点问题,尤其是在材料处理领域,高速运动的电子可以有效提升材料表面改性效果。因此,研究等离子体中的电子温度和电子密度是当前研究的重点。

基于此,下面搭建针-环电极结构下的等离子体发生装置,在 0.1 MPa 开放环境中产生氩等离子体射流,采用发射光谱法对射流过程中的电子温度和电子密度进行计算,并讨论其变化规律。

1 氩等离子体射流实验平台建立

实验平台如图 1 所示,可以分为三部分,分别是驱动电源<sup>[10]</sup>、针-环放电电极、光谱采集诊断系统。其中,驱动电源由 0~220 V 可调直流电源、脉宽调制驱动单元、半桥电路和谐振高压变压器组成。输出频率 15~40 kHz 可调,电压幅值 0~15 kV 可调;针-环放电电极<sup>[11]</sup>的高压电极是长度为 30 mm、直径为 1 mm 的铜棒,地电极是宽度为 6 mm 的铜环,高压电极距离地电极的长度为 6 mm。绝缘介质是质地均匀的石英玻璃管,长度为 50 mm,内径为 6 mm,外径为 8 mm。工作气体是体积分数为 99.99% 的氩气,实验采集等离子体发射光谱所用的光谱仪型号为 ULS2048-USB2。为排除外界光源对实验结果的影响,实验均在夜间关灯情况下进行。

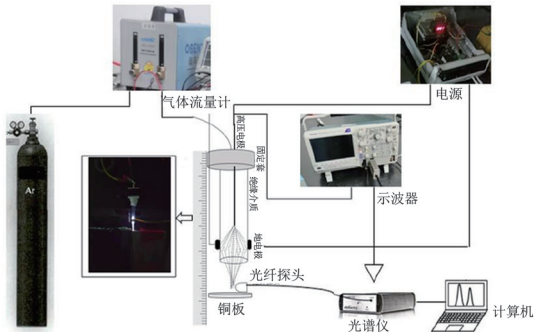


图 1 等离子体的发生及测量装置

1.1 针-环放电电极

所采用的针-环电极放电结构,与其他介质阻挡放电电极结构相比,最大区别是地电极在高压电极上方,这样在针尖处放电产生的电子在气流的带动下更容易向地电极迁移,从而形成等离子体射流。此外,针尖处电场强度比较大,容易放电产生等离子体。因此,该等离子体射流源能在较低电压下将气体击穿,从而形成放电稳定的等离子体射流。

1.2 等离子体光谱采集系统

实验中先将工作气体通入放电装置,接通电源,调整电压值,观察放电喷头是否有等离子体产生,待喷头产生较为稳定的等离子体射流时进行光谱采集。将玻璃管喷口视作起始点记为 0。观察到实验装置在不同输入电压下产生的等离子体自然射流长度不同,最大射流长度为 15 mm。所以这里采用对照实验来研究氩等离子体的电子温度和电子密度变化规律。

第一组实验为不同电压下氩等离子体射流尖端电子温度、电子密度诊断;第二组实验为氩等离子体射流不同轴向位置电子温度、电子密度诊断;第三组实验为氩等离子体射流作用在铜箔表面电子温度、电子密度诊断。实验过程中始终保证光纤探头与针-环放电装置的玻璃管管口在同一水平线上,且光纤探头和铜箔的距离始终保持 2 mm。实验至少重复做 10 次,且每个位置在相同实验条件下都保存 3 组光谱数据以保证实验结果的准确性,减小实验偶然因素对实验结果的影响。

1.3 等离子体光谱诊断系统

发射光谱是指在高能级激发态的原子或分子向低能级跃迁的过程形成的光谱<sup>[9]</sup>。当等离子体体系受到电场等外界因素影响,激发态的粒子数密度会增加。但是激发态粒子本身极不稳定,寿命也很短,它们会通过自发辐射和受激辐射向低能级跃迁并释放光子,此过程就形成了发射光谱。不同种粒子对应发射光谱谱线的波长不同,故通过发射光谱可以诊断出等离子体放电体系中的粒子种类。

此外通过对发射光谱分析还可以得到其他等离子体的参量,这里采用发射光谱法采集等离子体射流过程中的光谱。通过 Avasoft 软件可以直观地观察到等离子体中各个粒子谱线的辐照度变化,生成的 Excel 表格更是包含了等离子体各个粒子波长辐照度的准确值,通过对辐照度的分析可以得到电子温度和电子密度等重要参量。

2 氩等离子体射流电子温度诊断

电子是气体放电体系中最活跃的组成部分,它影响着等离子体的大部分物理化学过程<sup>[1]</sup>,电子温度诊断方法有很多,其中多谱线斜率法是目前等离子体电子温度测量技术中采用最为广泛的方法<sup>[12]</sup>。

从原子发射光谱原理<sup>[13]</sup>知,在热力学平衡状态或局部热力学平衡状态下,谱线强度满足:

$$\ln\left(\frac{I_{ij}\lambda_{ij}}{A_{ij}g_i}\right)=-\frac{1}{kT_e}E_i+C'$$

(1)

式中: $I_{ij}$ 为原子从高能级*i*向低能级*j*跃迁时发射光谱谱线强度; $\lambda_{ij}$ 为谱线波长,nm; $g_i$ 为处于第*i*能级上的统计权重,无量纲; $A_{ij}$ 为高能级*i*向低能级*j*自发辐射的跃迁概率, $s^{-1}$ ; $E_i$ 为处于第*i*能级上激发态的能量,eV; $k$ 为玻尔兹曼常数, $8.617\ 333\times10^{-5}\text{ eV/K}$ ;

$T_e$ 为等离子体电子温度; $C$ 为常数。

以  $\ln(I_{ij}\lambda_{ij}/A_{ij}g_i)$  为拟合纵坐标、上能级激发能为拟合横坐标画图,参数  $I_{ij}$ 、 $\lambda_{ij}$  由软件 Avasoft 测得,参数  $g_i$ 、 $E_i$  和  $A_{ij}$  取值见表 1,需要说明的是带入参数  $g_i$  和  $E_i$  的值是高能级对应的值,通过 origin 线性拟合,得出直线斜率经过计算求出电子温度。

表 1 选取谱线相关参数

| 中心波长/<br>nm | 低能级<br>$E_j/\text{eV}$ | 高能级<br>$E_i/\text{eV}$ | 统计权重<br>$g_i$ | 跃迁概率<br>$A_{ij}/(10^{-6}\text{ s}^{-1})$ |
|-------------|------------------------|------------------------|---------------|------------------------------------------|
| 810.67      | 11.72                  | 13.15                  | 3             | 25.0                                     |
| 842.79      | 11.72                  | 13.09                  | 5             | 21.5                                     |
| 852.34      | 11.55                  | 13.28                  | 3             | 13.9                                     |
| 912.79      | 11.83                  | 12.91                  | 3             | 18.9                                     |
| 922.82      | 11.55                  | 13.17                  | 5             | 5.0                                      |

实验经光谱仪采集粒子波长和辐照度数据分析得到 22 条氩原子谱线。结合谱线选取原则<sup>[9]</sup>,一是所选谱线信号应该远远大于实验干扰噪音信号;二是所选谱线应轮廓清晰,且跃迁概率必须是可以查到的准确值;三是谱线尽量选取相互靠近的,以减少系统测量误差;四是选取的谱线上能级激发能差值尽可能大且不相同,以提高测量的准确度。最终实验选取谱线波长为 810.37 nm、842.47 nm、852.14 nm、912.30 nm、922.45 nm 来计算分析电子温度。

2.1 射流尖端电子温度诊断

在保证其他因素不变的情况下,分别改变电压幅值为 5.4 kV、6.4 kV、8.2 kV、9.4 kV、10.6 kV、11.6 kV、13.0 kV,依次采集等离子体射流尖端发射光谱辐照度。文献[10]证实给放电体系施加不同电压时等离子体射流长度不同,故所做实验采集的等离子体尖端如图 2 所示。

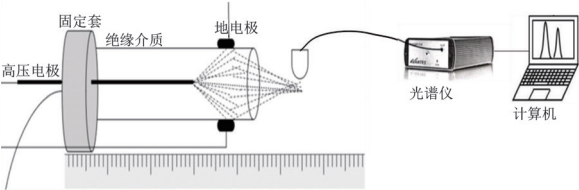


图 2 采集等离子体射流尖端

由多谱线斜率法计算不同放电电压下氩气等离子体射流电子温度,变化趋势如图 3 所示。

从图 3 可以看出,电子温度随着放电电压的升高整体呈上升趋势,当电压从 5.4 kV 增加到 13.0 kV 时,电子温度从 3106 K 增加到 3429 K。因此可以认为输入电压的升高会导致电子温度升高。因为电子温度只和电子动能有关,当等离子体放电体系中电

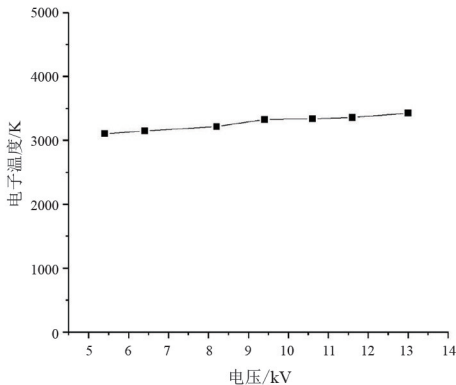


图 3 不同电压下氩等离子体射流电子温度变化趋势

压增加时,电场能量增大,放电区域内各个粒子的运动速度加快,粒子之间碰撞会更加频繁,导致电子温度升高。

### 2.2 射流不同轴向位置电子温度诊断

为探究等离子体射流不同轴向位置电子温度变化规律,实验将铜箔放在 15 mm 处不动,使光纤探头沿着等离子体射流轴向移动,距离玻璃管喷口的位置分别为 3 mm、6 mm、9 mm、12 mm、15 mm,采集等离子体光谱数据,计算得到放电电压为 11.8 kV、12.8 kV、13.0 kV 时电子温度变化趋势,如图 4 所示。由于未知铜箔材料对本装置产生的射流影响有多大,故采集一组射流尖端不放铜箔的数据与射流尖端放置铜箔对比,图 4 中红色曲线是放电电压为 11.8 kV 时 15 mm 处不加铜箔的电子温度变化趋势。

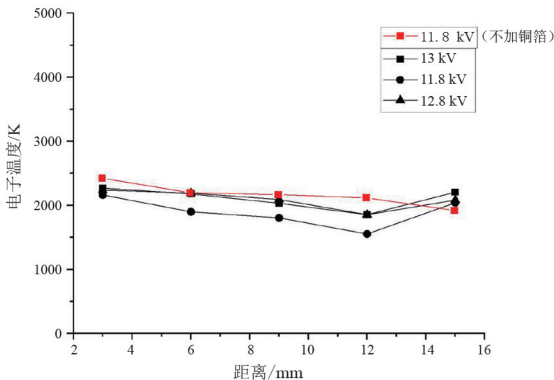


图 4 不同轴向距离电子温度变化

从图 4 可以看出,电子温度随轴向距离变化趋势较为平缓,在 3 mm 到 12 mm 的过程中整体呈现逐渐降低趋势。这是因为等离子体从产生到运动至射流尖端(15 mm)的过程中,各粒子数目减少,粒子之间碰撞减少,使得电子温度随着轴向距离的增加而呈现下降趋势。在 12 mm 到 15 mm 曲线会上升是因为射流尖端放置了铜箔,使得尖端电子运动加快,电子温度上升。

观察放置铜箔对等离子体电子温度产生影响:放置铜箔时,电子温度在不同放电电压下轴向距离从 12 mm 到 15 mm 时都会增加;但不加铜箔时,以放电电压 11.8 kV 实验时,电子温度在轴向距离 12 mm 到 15 mm 时会下降。说明铜箔会对等离子体在一定范围内产生影响,使电子运动加快电子温度升高。

根据以上分析得出:随着光纤探头到玻璃管喷口轴向距离的增加,电子温度呈现逐渐降低的趋势;铜箔对等离子体会产生影响,一定范围内会加快电子动能使得电子温度上升。

### 2.3 射流作用在铜箔表面电子温度诊断

以铜箔到玻璃管喷口的距离为自变量,考虑实验操作性选取 3 mm 为间隔,即铜箔和玻璃管喷口距离分别为 3 mm、6 mm、9 mm、12 mm、15 mm,采集等离子体射流作用在铜箔表面的光谱数据。计算得到等离子体放电体系输入电压为 10.6 kV、11.8 kV、13.0 kV 时,电子温度在不同铜箔到玻璃管喷口距离的变化趋势如图 5 所示。

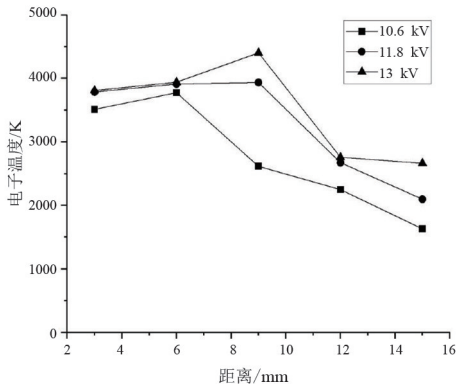


图 5 不同电压下电子温度随铜箔到喷口距离变化

从图 5 中可以看出:1)在放电电压为 10.6 kV、11.8 kV、13.0 kV 时,随着铜箔到玻璃管喷口距离的增加,电子温度呈现先上升后降低的变化趋势。这是由于电子温度只和电子动能有关,等离子体从产生到运动至射流尖端(15 mm)的过程中,各粒子数目减少,粒子之间碰撞减少,电子温度随着轴向距离的增加呈现下降的趋势。当等离子体射流作用在铜箔上时,金属铜箔会加剧电子的动能使电子碰撞更加剧烈,使得电子温度会出现短暂上升。随铜箔到玻璃管喷口距离的增加,等离子体射流作用到铜箔表面各粒子总数大大减少,虽然铜箔仍加剧粒子碰撞,但这种加剧程度远远小于等离子体粒子总数的减少,所以当铜箔到玻璃管喷口距离更远时,电子温



度会下降。

2) 在不同放电电压下,电子温度达到最大值时铜箔的位置不同,经过计算分析发现随着输入电压升高,电子温度达到最大值的位置到喷口距离越来越远。基于当输入电压升高时,发射光谱各粒子辐射度增强的事实,分析认为输入电压升高更多粒子从基态被激发至激发态,放电体系中各种粒子的碰撞会更加频繁,致使粒子的漂移运动速度加快,距离变远,从而使得电子温度达到最大值的点到喷口距离越来越远。

3) 在铜箔到玻璃管喷口距离相同时,放电电压从 10.6 kV 升高到 13.0 kV 的过程中,电子温度增加。当输入电压升高时,等离子体放电体系中电压也随之增大,导致放电体系中电流增大、电场能量增加,放电区域内的各个粒子运动会更加频繁,碰撞也更加剧烈使电子动能增加,致使电子温度升高。

### 3 氩等离子体射流电子密度诊断

发射光谱技术诊断电子密度主要采用斯塔克展宽法。这里使用中性氩原子谱线来诊断电子密度<sup>[14]</sup>,一方面氩原子谱线不容易受到分子谱线和周围谱线的影响,且容易找到辐射度很强的孤立谱线;另一方面它容易在谱线很宽的范围内被激发且比较稳定。斯塔克效应引发的谱线半峰全宽和电子密度之间存在函数关系<sup>[15]</sup>,表达式为

$$\Delta\lambda_{\text{stark}} = 2 \times 10^{-16} \omega n_e \times [1 + 1.75 \times 10^{-4} \sqrt[4]{n_e} \alpha (1 - 0.068 \sqrt[6]{n_e} / \sqrt{T_e})] \quad (2)$$

式中: $\Delta\lambda_{\text{stark}}$  为谱线斯塔克半峰全宽, nm;  $\omega$  为电子碰撞参数;  $n_e$  为电子密度,  $\text{cm}^{-3}$ ;  $\alpha$  为离子碰撞参数。

利用斯塔克展宽法选取氩原子的 696.54 nm 谱线,因为它是氩原子谱线中强而良好的孤立谱线,所以在 696.54 nm 处 4p-4s 线是诊断电子密度最佳过渡线<sup>[15]</sup>。这里利用 origin 对光谱数据进行洛伦兹单峰拟合得到谱线的半峰全宽,不同电子温度下 696.54 nm 斯塔克加宽参数从文献[16]中查阅得到。

#### 3.1 射流尖端电子密度诊断

采用第 2.1 节实验方法,由斯塔克展宽法计算不同电压下氩等离子体射流的电子密度,绘制如图 6 所示变化趋势图。

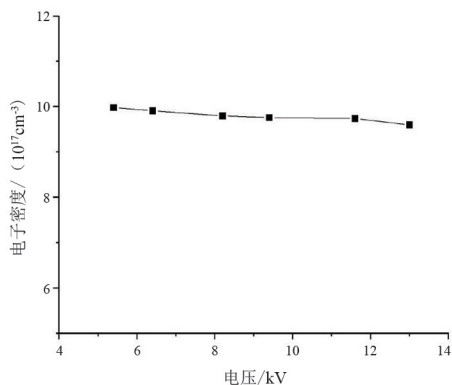


图 6 不同电压下氩等离子体射流电子密度变化趋势

从图 6 可以看出,随着放电电压的增加,电子密度总体呈现下降趋势。这是由于随着放电电压的升高,等离子体的体积增长趋势较快,而等离子体电子密度为整个体积的平均电子密度,因此电子密度下降;同时,随着放电电压增加等离子体射流长度逐渐增加,使等离子体鞘层越远离电极尖端,射流尖端电场降低,电子密度下降。综上得出,随着放电电压的增加,电子密度总体呈现下降的规律。

#### 3.2 射流不同轴向位置电子密度诊断

为探究等离子体射流不同轴向位置电子密度变化规律,采用第 2.2 节实验采集的离子体光谱数据,计算得到如图 7 所示的电子密度变化趋势图。同样,图 7 中红色曲线是 15 mm 处不加铜箔在电压为 11.8 kV 时的电子密度变化趋势。

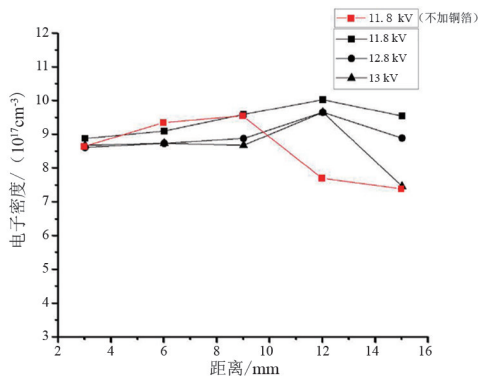


图 7 不同轴向距离电子密度变化

由图 7 可以看出,在同一电压下,从 3 mm 到 12 mm 电子密度略微上升,在 12 mm 到 15 mm 之间电子密度逐渐减小。分析可能是等离子体喷口处,电子在气流作用下,其轴向迁移速度较大,因此在 3~12 mm 之间碰撞电离反应使电子密度略微上升;而在距离喷口较远处,电子温度较小,电子动能较小,不足以支撑碰撞电离产生新的电子,因此在 12~15 mm 之间电子密度逐渐减小。

观察到在放电电压为 11.8 kV, 当不加铜箔时, 电子密度在 9~12 mm 处会下降; 而添加铜箔时, 电子密度在 9~12 mm 处会增加。说明铜箔会对等离子体在一定范围内产生影响, 使得电子密度升高。

综上, 同一放电电压下, 电子密度随着轴向距离增加略微上升, 当距离较远时电子密度逐渐降低; 相同轴向距离处, 电子密度随着放电电压的增加而降低; 铜箔会对等离子体在一定范围内产生影响, 使得电子密度增加。

### 3.3 射流作用在铜箔表面电子密度诊断

为探究等离子体射流作用在铜箔表面电子密度的变化规律, 采用第 2.3 节实验方法采集铜箔表面等离子体光谱数据, 计算得到如图 8 所示的电子密度变化趋势图。

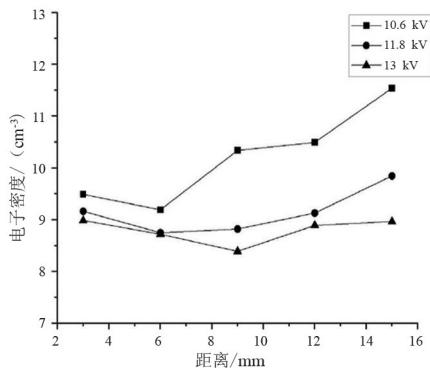


图 8 不同电压下电子密度随铜箔到喷嘴距离变化

从图 8 中可以看出: 1) 在铜箔到玻璃管喷嘴距离相同时, 放电电压升高电子密度减小。这是由于电子密度是以整个体积计算的平均电子密度, 当放电电压升高时, 放电喷嘴喷出的等离子体体积增大, 在铜箔表面形成的等离子体体积也增大, 致使电子密度下降。

2) 在同一放电电压下, 电子密度随着铜箔到玻璃管喷嘴距离的增加呈现先下降后上升的变化趋势。这是由于当铜箔到玻璃管喷嘴距离比较近时, 铜箔表面等离子体体积较大, 所以电子密度较小; 随着铜箔到玻璃管喷嘴距离的增加, 虽然等离子体射流作用到铜箔表面的各粒子总数减少, 但在铜箔表面形成的等离子体体积减少得更快, 反而使电子密度会上升。

3) 在不同放电电压下, 电子密度达到最小值的位置不同。随着放电电压升高, 电子密度达到最小值的位置到喷嘴距离越来越远。同样基于放电电压升高时, 在铜箔表面形成的等离子体体积增大的事

实, 分析认为输入电压升高, 更多粒子从基态被激发至激发态, 放电体系中各种粒子的碰撞会更加频繁, 致使粒子的漂移运动速度加快、距离变远, 从而使电子密度达到最小值的点到喷嘴距离越来越远。

## 4 结 论

上面采用针环式介质阻挡等离子体放电装置, 在大气压条件下产生稳定氩等离子体射流, 并对其光谱数据进行采集和诊断, 研究氩等离子体射流中的电子温度和电子密度变化规律, 得出结论如下:

1) 在等离子体射流的状态下, 电子温度约为 3000~3500 K、电子密度数量级在  $10^{17} \text{ cm}^{-3}$  时, 输入电压的升高会导致电子温度升高, 电子密度降低。

2) 在给放电体系施加相同电压时, 随着光纤探头到玻璃管喷嘴轴向距离的增加, 电子温度呈现逐渐降低的趋势, 电子密度呈现先略微升高然后降低的变化趋势。当射流尖端放置铜箔时, 铜箔不会对等离子体射流电子温度和电子密度随轴向距离增加的整体变化趋势产生影响, 但会对等离子体在一定范围内产生影响, 使得电子温度、电子密度数值略有增加。

3) 当等离子体作用在铜箔上, 随着铜箔到玻璃管喷嘴距离的增加, 电子温度呈现先上升后降低的变化趋势, 电子密度呈现先下降后上升的变化趋势。且随电压升高, 电子温度达到最大值和电子密度达到最小值的位置到喷嘴距离越来越远。

### 参考文献

- [1] 陈传杰, 樊永胜, 方忠庆, 等. 基于连续谱的氩气纳秒脉冲放电中电子温度的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2021, 41(8): 2337-2342.
- [2] 闫海鸥, 吴星. 等离子体表面氟化处理环氧树脂及其沿面闪络特性研究[J]. 绝缘材料, 2021, 54(12): 52-57.
- [3] ZHANG Haibao, SANG Lijun, WANG Zhengduo, et al. Recent progress on non-thermal plasma technology for high barrier layer fabrication[J]. Plasma Science and Technology, 2018, 20(6): 063001.
- [4] BARSHILIA Harish C, GUPTA Nitant. Superhydrophobic polytetrafluoroethylene surfaces with leaf-like micro-protrusions through Ar + O<sub>2</sub> plasma etching process[J]. Vacuum, 2014, 99: 42-48.

# 基于联合模型的短期电力负荷预测方法

蔡君懿,李琪林,严 平

(国网四川省电力公司计量中心,四川 成都 610045)

**摘要:**为了准确预测电力负荷并提高电力系统调节和调度的灵活性、准确性,提出了基于差分自回归滑动平均和长短期记忆神经网络的短期负荷联合模型预测方法,以避免单一预测模型可能难以满足预测准确需求的情况。首先,使用差分自回归滑动平均和长短期记忆神经网络单一模型对短期电力负荷开展预测;然后,使用改进的粒子群优化算法对联合模型权重进行寻优;最后,利用最优权重将单一模型预测结果进行合并得到最终的预测结果。验证结果表明,所建立的联合模型能够对短期电力负荷进行准确的预测,且联合模型的预测精度要优于差分自回归滑动平均、长短期记忆神经网络和 BP 神经网络等单一模型,具有一定的工程应用价值。

**关键词:**短期电力负荷预测;差分自回归滑动平均模型;长短期记忆神经网络;联合模型;混合粒子群算法

**中图分类号:**TM 715 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2023)05-0027-08

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20230505

## Short-term Load Forecasting Method Based on Combined Model

CAI Junyi, LI Qilin, YAN Ping

(State Grid Sichuan Metering Center, Chengdu 610045, Sichuan, China)

**Abstract:** In order to accurately forecast power load and improve the flexibility and accuracy of power system regulation and scheduling, a short-term load forecasting method based on combined model of auto-regressive integrated moving average (ARIMA) and long short-term memory (LSTM) neural network is proposed to avoid that a single prediction model may be difficult to meet the prediction accuracy requirement. Firstly, the two single models of ARIMA and LSTM are used to forecast the short-term load, and then the hybrid particle swarm optimization (PSO) algorithm is used to optimize the weight of combined model. Finally, the forecasting results of the single model are combined with the optimal weight to obtain the final forecasting result. The verification results show that the proposed combined model can accurately forecast the short-term load, and its forecasting accuracy is better than that of single models of ARIMA, LSTM and back propagation neural network (BPNN), which has certain engineering application value.

**Key words:** short-term load forecasting; auto-regressive integrated moving average; long short-term memory neural network; combined model; hybrid particle swarm optimization

## 0 引言

随着以新能源作为主要供给的新型电力系统不断发展,为确保多元化新能源的高效消纳利用并发挥主体电源的电力支撑作用,需提升电力系统灵活调节能力。准确的电力负荷预测可以在保障电网的

安全前提下,经济合理地安排电网内部发电机组的启停、安排机组检修计划,为电力系统灵活调节、供需平衡提供基础。因此,电力负荷预测对于整个电力系统的运营决策和控制至关重要<sup>[1]</sup>。根据时间尺度划分,电力负荷预测一般包括 3 种:1)中长期负荷预测(以年度为单位给出预测结果);2)短期负荷预测(从次日到第 8 天的预测);3)超短期负荷预测(15 min 以下的电力负荷预测)<sup>[2]</sup>。其中,短期负荷预期是电力系统运行和控制所需的,所受关注最高。

**基金项目:**国家电网有限公司总部科技项目“新型电力系统电磁测量设备及系统标准体系建设与国际化战略研究”(5700-20225225A-1-1-ZN)



短期负荷预测技术主要有统计学方法和机器学习方法两类<sup>[3]</sup>。统计学方法包括自回归滑动平均(auto-regressive moving average, ARMA)<sup>[4]</sup>、差分自回归滑动平均(auto-regressive integrated moving average, ARIMA)<sup>[5]</sup>、卡尔曼滤波<sup>[6]</sup>、多元线性回归(multiple linear regression, MLR)<sup>[7]</sup>等算法。由于基于时间序列的实际电力负荷数据存在非线性与非平稳,若单独采用统计学方法进行负荷预测,则可能会对其非线性部分或非平稳部分预测造成缺失。为了改善此情况,基于机器学习的负荷预测方法得到了发展与应用。其中,支持向量机<sup>[8-9]</sup>、神经网络<sup>[10-11]</sup>以及它们的拓展算法<sup>[12-15]</sup>是最常见的用于短期负荷预测的机器学习算法。为了优化机器学习的效果,学者们使用了一些结合方法来提高预测精度,如:使用注意力机制、引入门控循环单元和时间认知分别对神经网络进行优化<sup>[16-18]</sup>;基于小波去噪强化神经网络来提升短期负荷预测需求<sup>[19]</sup>;使用变分模态分解负荷时间序列再进行支持向量机预测<sup>[20]</sup>;使用主成分分析法对负荷序列进行降维处理,提升聚类效果<sup>[21]</sup>等。总的来说,机器学习算法的非线性拟合能力较强,其短期负荷预测准确度普遍优于统计学方法<sup>[3]</sup>。

由于电力系统中负荷数量多且短期负荷特征受天气、时间等诸多因素的影响,单一预测模型可能难以满足预测的准确性要求。因此提出了一种预测短期电力负荷的联合模型方法,该方法基于 ARIMA 模型和长短期记忆(long short-term memory, LSTM)神经网络模型的集成,以考虑两种技术的优势来提升预测精度。首先,描述了 ARIMA 和 LSTM 基础模型;然后,提出了基于混合粒子群优化算法的联合模型;最后,通过实际负荷数据对比、分析来验证所提方法。

## 1 基础模型

### 1.1 差分自回归滑动平均模型

不同于自回归滑动平均(ARMA)模型只能处理平稳序列,差分自回归滑动平均(ARIMA)模型是一种可用于非平稳时间序列的模型。ARIMA 模型最为关键的 3 个参数是自回归阶次  $n$ 、差分阶次  $d$  以及滑动平均阶次  $m$ ,因此一般表示为  $ARIMA(n, d, m)$ ,是  $ARMA(n, m)$  模型的扩展。

对于一个非平稳的时间序列  $x$ ,对第  $T$  个元素进行一阶差分的公式为

$$\nabla x_T = x_T - x_{T-1} = (1 - B)x_T \quad (1)$$

式中,  $B$  为延迟算子。

$d$  阶差分后的时间序列  $y$  为

$$y_T = \nabla^d x_T = (1 - B)^d x_T \quad (2)$$

在  $ARIMA(n, d, m)$  模型中,若差分阶次  $d$  为 0,则  $ARIMA(n, 0, m)$  就变为  $ARMA(n, m)$  模型。因此,非平稳时间序列经过若干次的差分后会变得平稳化,从而可构建相应的 ARMA 模型。 $ARMA(n, m)$  的第  $T$  个元素如式(3)所示<sup>[22]</sup>。

$$z_T = \sum_{l=1}^n \varphi_l y_{T-l} + \sum_{j=1}^m \theta_j \varepsilon_{T-j} + \varepsilon_T \quad (3)$$

式中:  $\varepsilon_T$  为服从均值为 0 正态分布的白噪声序列  $\varepsilon$  的第  $T$  个元素;  $\varphi_l$  为第  $l$  个自回归系数;  $\theta_j$  为第  $j$  个移动平均系数。

在实际运用时,由于 1 阶差分之后信号通常可变得平稳,因此差分阶次  $d$  可取 1。当信号平稳以后,对信号进行偏自相关计算,根据偏自相关函数的截断项确定自回归阶次  $n$ ;对信号进行自相关计算,根据自相关函数的截断项确定滑动平均阶次  $m$ 。

### 1.2 长短期记忆神经网络模型

长短期记忆(LSTM)神经网络模型的核心思想是通过加入遗忘门、输入门和输出门组成的高效结构,使传统循环神经网络具备了学习长期信息的能力,从而解决了传统循环神经网络存在的梯度消失或梯度爆炸的问题<sup>[23]</sup>,其细胞结构如图 1 所示。

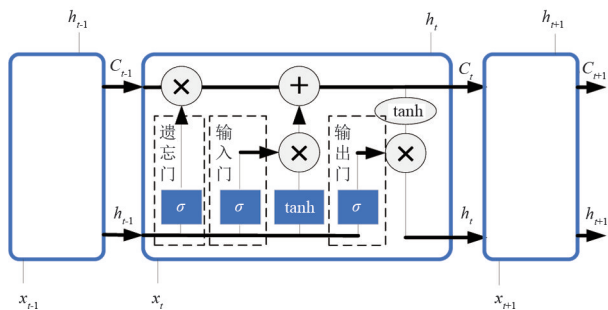


图 1 LSTM 细胞结构

3 个逻辑门中的主要功能<sup>[24]</sup>分别为:

1) 遗忘门:决定保留或删除  $t-1$  刻输出  $h_{t-1}$  的信息,并将输入门处理后得到的状态信息与当前处理结果相加,生成更新后的记忆单元状态。 $\sigma(\quad)$  为 sigmoid 函数,用于在 0~1 之间产生一个权值,其

表达式为

$$\sigma(x_{in}) = \frac{1}{1 + e^{-x_{in}}} \quad (4)$$

式中,  $x_{in}$  为函数输入。

在遗忘门中  $t$  时刻的输出为

$$f_t = \sigma[W_f(h_{t-1}, x_{in,t}) + b_f] \quad (5)$$

式中:  $x_{in,t}$  为  $t$  时刻的网络输入;  $W_f, b_f$  分别为遗忘门 sigmoid 函数的权值和偏置。

2) 输入门: 通过调整新信息的权重, 从而更新细胞状态。输入门 sigmoid 函数  $t$  时刻的输出为

$$i_t = \sigma[W_i(h_{t-1}, x_{in,t}) + b_i] \quad (6)$$

式中,  $W_i$  和  $b_i$  分别为输入门 sigmoid 函数的权值和偏置。

tanh 函数的作用是将值归一化到  $-1 \sim 1$  之间, 其表达式为

$$\tanh x_{in} = \frac{e^{x_{in}} - e^{-x_{in}}}{e^{x_{in}} + e^{-x_{in}}} \quad (7)$$

输入门 tanh 函数  $t$  时刻的输出为

$$\tilde{C}_t = \tanh[W_c(h_{t-1}, x_{in,t}) + b_c] \quad (8)$$

式中,  $W_c$  和  $b_c$  分别为输入门 tanh 函数的权值和偏置。利用遗忘门和输入门的输出即可对细胞  $t$  时刻的状态  $C_t$  进行更新, 如式(9)所示。

$$C_t = f_t C_{t-1} + i_t \tilde{C}_t \quad (9)$$

3) 输出门: 控制 LSTM 记忆模块的输出, 其依赖于上一个记忆单元的输出和当前遗忘门的状态。输出门 sigmoid 函数  $t$  时刻的输出为

$$O_t = \sigma[W_o(h_{t-1}, x_{in,t}) + b_o] \quad (10)$$

式中,  $W_o$  和  $b_o$  分别为输出门 sigmoid 函数的权值和偏置。

该 LSTM 细胞结构的最终输出为

$$h_t = O_t \tanh C_t \quad (11)$$

LSTM 模型用于预测分析时, 可有两种方式:

1) 每次预测时, 使用前一次预测结果作为函数的输入, 即使用预测值进行预测; 2) 对新序列进行预测时进行网络状态重置, 即使用观测值进行预测。

LSTM 算法最关键的参数为隐藏层神经元数量和学习率。由于 LSTM 模型中的 3 个门是全连接层, 在算法执行的过程中, 会存在用隐藏层来做矩阵相乘运算。通常, 细胞数量和各隐藏层神经元数量相同, 若隐藏层神经元太少将导致欠拟合, 而隐藏层神经元太多可能会导致过拟合并增加训

练时间。隐藏层神经元数量一般根据问题的复杂度和可用的计算资源进行经验调节确定。学习率是对 LSTM 模型进行调整的幅度。学习率越大, 模型更新的幅度也越大, 模型的训练速度也会提高使模型不稳定, 甚至无法收敛; 学习率过小则会使模型训练速度缓慢, 也会导致无法收敛。一般而言, 初始学习率可以设置为较小的值, 然后如果模型的损失函数下降缓慢, 则可以适当增大学习率; 如果模型的损失函数出现不稳定或震荡, 则可以适当减小学习率。

## 2 基于混合粒子群算法的联合预测方法

### 2.1 基于混合粒子群算法的预测模型

在模型训练中, 若 ARIMA 模型得到的负荷序列为  $\mathbf{a}$ 、LSTM 模型得到的负荷序列为  $\mathbf{b}$ 、相应的实际负荷序列为  $\mathbf{s}$ , 各有  $n$  个采样点。对 LSTM 模型负荷序列和 ARIMA 负荷序列分别赋予权重  $\omega_1$  和  $\omega_2$ , 且  $\omega_1 + \omega_2 = 1$ , 则训练过程中联合预测模型的误差为

$$\varepsilon = \mathbf{s} - \omega_1 \mathbf{a} - \omega_2 \mathbf{b} = \mathbf{s} - \omega_1 \mathbf{b} - (1 - \omega_1) \mathbf{b} \quad (12)$$

以联合预测模型误差最小化作为优化目标求解权重, 得到

$$\omega_1^* = \arg \min |\varepsilon| = \arg \min [\|\mathbf{s} - \omega_1 \mathbf{b} - (1 - \omega_1) \mathbf{b}\|] \quad (13)$$

为寻求最优联合模型权重, 通过随机优化搜索算法进行寻找。设置目标函数为

$$g(\omega_1) = \sqrt{\sum_{i=1}^n [s_i - \omega_1 a_i - (1 - \omega_1) b_i]^2} \quad (14)$$

设置权重搜索范围为

$$0 \leq \omega_1 \leq 1 \quad (15)$$

粒子群优化算法 (particle swarm optimization, PSO) 是目前常用的随机搜索算法, 具有参数少、收敛快等优点, 其迭代公式<sup>[25]</sup>为:

$$v_q(k+1) = Wv_q(k) + c_1 \text{rand}(0,1)[p_{q\text{best}}(k) - p_q(k)] + c_2 \text{rand}(0,1)[p_{g\text{best}}(k) - p_q(k)] \quad (16)$$

$$x_q(k+1) = x_q(k) + v_q(k+1) \quad (17)$$

式中:  $v_q$  和  $x_q$  分别为第  $q$  个个体的速度和位置;  $\text{rand}(0,1)$  为  $0 \sim 1$  之间的随机数;  $k$  为迭代次数;

$p_{qbest}$  为第  $q$  个粒子的最佳位置; $p_{gbest}$  为所有个体的最佳位置; $c_1$  和  $c_2$  为学习因子; $W$  为惯性权重。

由于粒子群优化算法的种群多样性易损失,导致其易发生早期收敛性。为此,使用混合粒子群优化算法增加收敛精度,该混合粒子群优化算法使用差分进化(differential evolution, DE)算法的变异、交叉操作来提高粒子群优化算法的种群多样性,从而提高搜索准确度。变异操作是基于 3 个随机个体  $A_{r1}$ 、 $A_{r2}$ 、 $A_{r3}$  进行的,第  $q$  个个体的第  $k$  次迭代表达式<sup>[26]</sup>为

$$V_q(k) = A_{r1}(k) + F \times (A_{r2}(k) - A_{r3}(k)) \quad (18)$$

式中, $F$  为缩放因子。

交叉操作是将有  $N$  维分量的第  $q$  个个体的第  $u$  分量进行交叉,其规则为

$$R_q^u(k) = \begin{cases} V_q^u(k), & \text{rand}(0,1) \leq C \text{ 或 } j = \text{rand}(1,N) \\ A_q^u(k), & \text{其他} \end{cases} \quad (19)$$

式中, $C$  为交叉率,其值在 0~1 之间。

通过寻找式(19)的最小值,即可得到最优联合模型权重。

2.2 联合模型预测方法

联合模型预测方法的流程如图 2 所示。首先,分别使用 ARIMA 模型和 LSTM 模型得到单一模型的预测结果;然后,基于混合粒子群算法求出最优的联合模型权重,从而对单一模型预测结果进行合成,得到联合模型的预测结果。

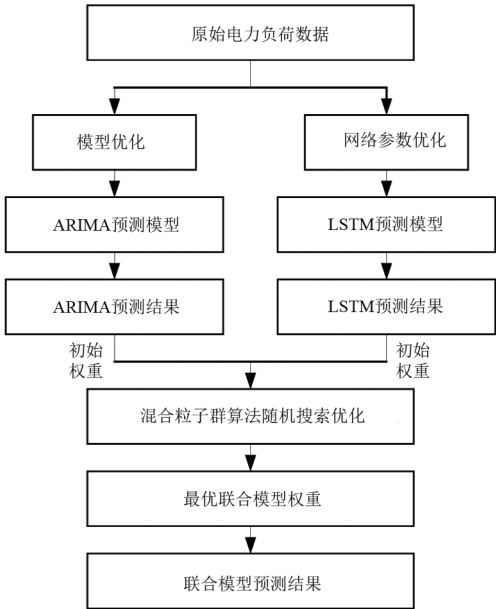


图 2 联合模型预测方法流程

3 应用验证

3.1 原始负荷数据

选用某地 2014 年 12 月份 31 天的负荷数据作为案例进行分析验证<sup>[27]</sup>。负荷数据每小时检测一次,一天共有 24 个数据,波形曲线如图 3 所示。

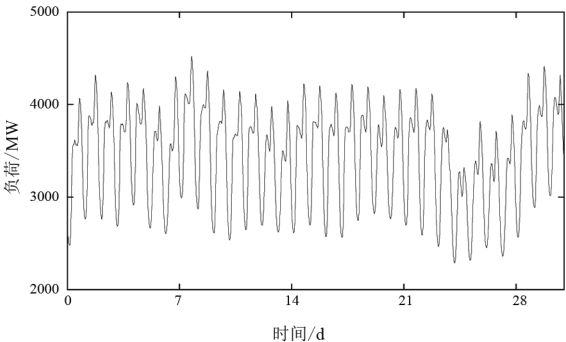


图 3 案例负荷数据波形

利用最大谱峰搜索对负荷数据序列进行周期分解<sup>[28]</sup>,得到周期分量和剩余非周期分量如图 4 所示。可以看出其中周期分量幅值较小,所占比例较少,大部分为非周期分量。因此无法直接判断下一周期内的电力负荷,须使用预测模型与算法进行预测。

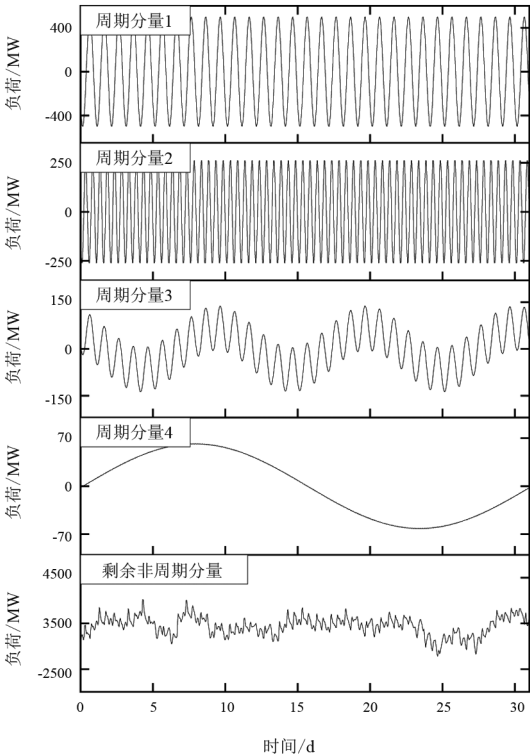


图 4 案例负荷数据周期分量

为分析不同预测模型的实际效果,分别利用前 10 天、前 20 天和前 30 天的数据预测第 11 天、第 21



天和第 31 天的负荷序列,此 3 天的日内负荷曲线如图 5 所示。

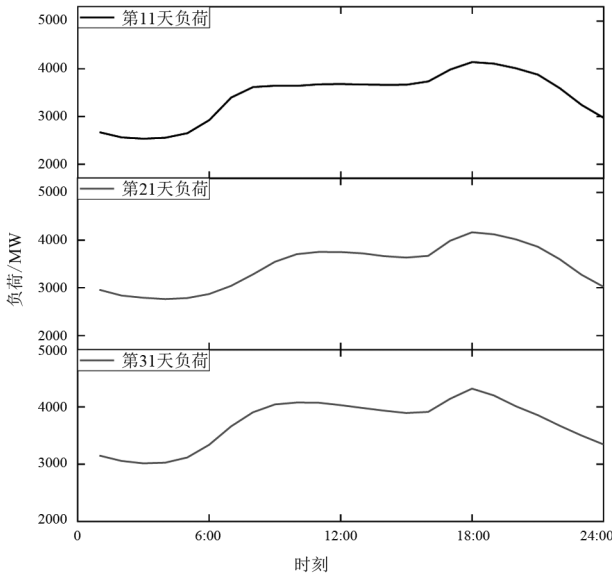


图 5 第 11 天、第 21 天和第 31 天负荷曲线

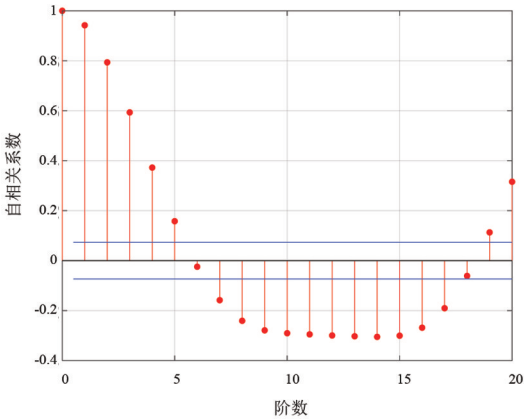
3.2 ARIMA 模型预测结果

负荷数据自相关与偏自相关在 6 阶时系数为 0 或接近于 0,且后续阶数基本落在 2 倍标准差范围,如图 6 所示,所以  $n$  与  $m$  皆取 6,从而建立模型  $ARIMA(6, 1, 6)$ 。根据模型参数进行程序编制,输入进行训练的负荷数据,得到使用 ARIMA 模型预测不同日期的电力负荷序列结果如图 7 所示。从图中可以看出 ARIMA 模型能够对电力负荷趋势进行一定的预测,但是幅值上存在明显的偏移,最大的预测误差绝对值达到了 287 MW,这是由于原始负荷数据中存在较多的非周期成分,导致 ARIMA 模型的适用性下降造成的。

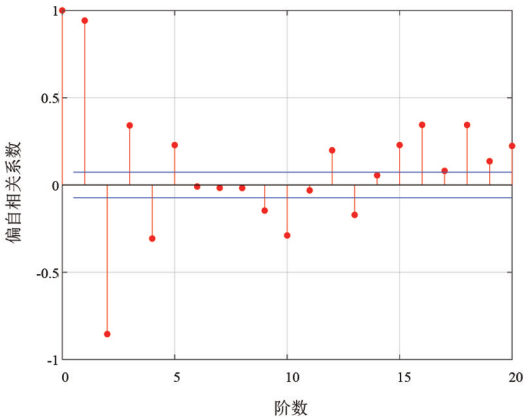
3.3 LSTM 模型预测结果

通过调节,确定所使用的 LSTM 模型的隐藏层神经元数量为 200,学习率为 0.005。使用 LSTM 模型预测不同日期的电力负荷序列结果如图 8 所示。可以看出 LSTM 模型均能对电力负荷进行一定的预测,其中有重置网络的 LSTM 模型预测结果相较于无重置网络的 LSTM 模型预测结果更贴近于实际曲线。无重置网络的 LSTM 模型预测结果的最大预测误差绝对值为 503 MW,而有重置网络的 LSTM 模型预测结果的最大预测误差绝对值仅为 159 MW。进一步以均方根误差 (root mean square error, RMSE) 作为预测评价指标,表达式为

$$E_{\text{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{l=1}^M (\hat{y}_l - y_l)^2} \quad (20)$$



(a) 自相关



(b) 偏自相关

图 6 负荷数据自相关与偏自相关分析

式中: $M$  为预测序列的数据点数量; $\hat{y}_l$  为第  $l$  个预测值; $y_l$  为第  $l$  个实际值。

有无重置网络 LSTM 模型预测性能对比结果如表 1 所示。结果显示,有重置网络的 LSTM 模型的预测结果 RMSE 比无重置网络的 LSTM 模型的预测结果 RMSE 至少减少了 50.73%,这表明当 LSTM 模型随预测结果进行重置网络后可以大幅有效地提升预测结果性能,这是因为重置网络状态可防止先前的预测影响对新数据的预测。因此,后续使用有重置网络的 LSTM 模型进行联合模型预测。

表 1 有无重置网络 LSTM 模型预测性能对比

| 预测日期   | 预测结果 RMSE/MW |       |
|--------|--------------|-------|
|        | 无重置          | 有重置   |
| 第 11 天 | 96.63        | 34.56 |
| 第 21 天 | 150.78       | 61.46 |
| 第 31 天 | 93.16        | 45.87 |

3.4 联合模型预测结果

使用混合粒子群算法,以第 11 天 ARIMA 模型和有重置网络的 LSTM 模型预测结果进行联合模型权重系数寻优,得到  $\omega_1=0.908\ 1,\omega_2=0.091\ 9$ 。进

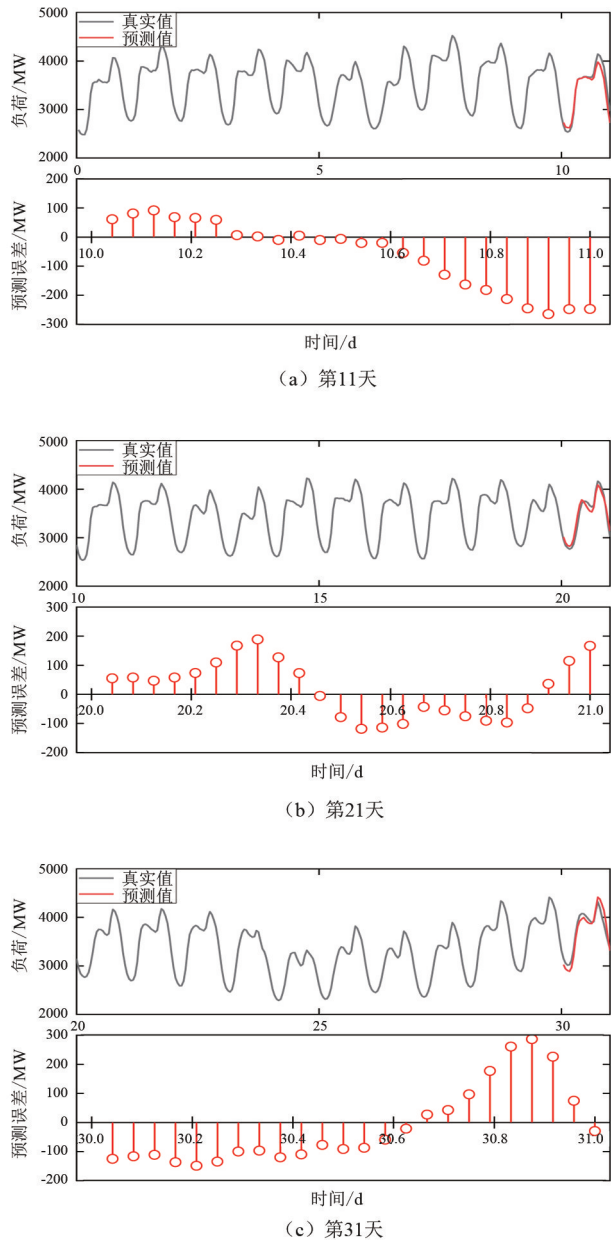


图 7 ARIMA 模型预测结果

一步得到第 11 天、第 21 天、第 31 天的联合模型预测结果,如图 9 所示。可以看出联合模型的预测结果与实际曲线非常接近,各日期下预测误差均较小。

3.5 对比分析

除了所使用的 ARIMA 和 LSTM 这两种单一模型以外,还将常用于预测分析的 BP 神经网络(back propagation neural network, BPNN)<sup>[28]</sup>与联合模型的结果进行对比,如图 10 所示。图 10 显示 ARIMA 模型的预测曲线与真实曲线的偏差较大,而 LSTM 模型、BPNN 模型和联合模型的预测曲线与真实曲线较为相似。

单一模型与联合模型预测性能对比如表 2 所示。从表中可以看出,LSTM 模型和 BPNN 模型的

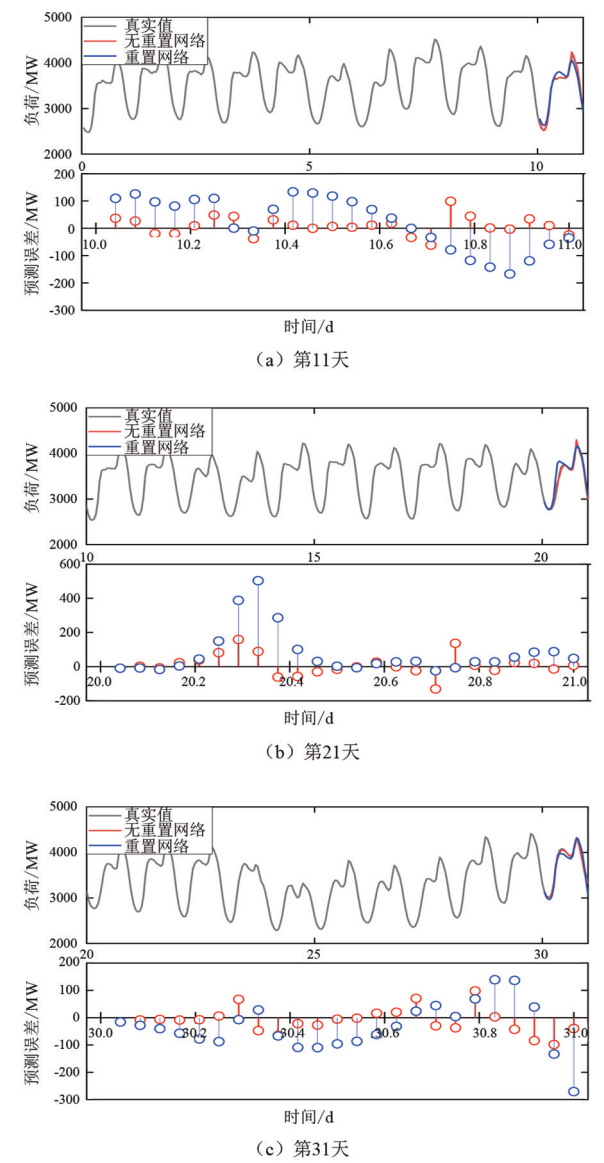


图 8 LSTM 模型预测结果

预测效果优于 ARIMA 模型预测效果,这是因此负荷序列存在非平稳、非线性部分,机器学习方法更为适用;而联合模型相较于单一模型取得了更好的预测精度,这是因为联合模型可以消除单一模型在不同方向上的误差,从而提升预测性能。综上所述,ARIMA-LSTM 联合模型的预测精度最优,可以较准确地对短期电力负荷进行预测。

表 2 单一模型与联合模型预测性能对比

| 预测日期   | 预测结果 RMSE/MW |         |         |       |
|--------|--------------|---------|---------|-------|
|        | ARIMA 模型     | LSTM 模型 | BPNN 模型 | 联合模型  |
| 第 11 天 | 131.73       | 34.56   | 44.27   | 32.05 |
| 第 21 天 | 95.03        | 61.46   | 68.36   | 58.59 |
| 第 31 天 | 132.68       | 45.87   | 45.55   | 42.79 |

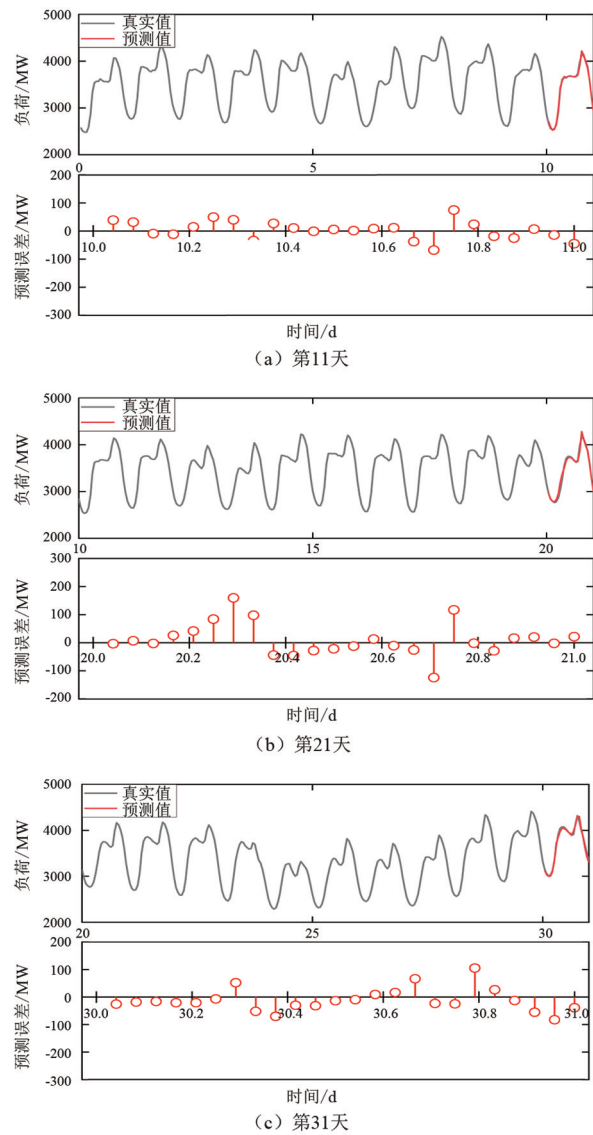


图 9 联合模型预测结果

4 结 论

为进一步提高短期电力负荷预测的准确度,上面提出了基于 ARIMA 和 LSTM 的联合模型,实现对电力系统短期负荷进行精准预测。实验验证结果表明:

- 1)混合粒子群算法可以准确计算出联合模型中各单一模型的最优权重,实现基于 ARIMA 和 LSTM 单一模型的联合优化;
  - 2)相较于单一预测模型,ARIMA-LSTM 联合模型可以消除单一模型在不同方向上的误差,使短期电力负荷预测精度提升,具有较高的工程实用价值。
- 所提方法为多种负荷预测算法的联合使用提供了一种思路,除所使用的 ARIMA 和 LSTM 算法以

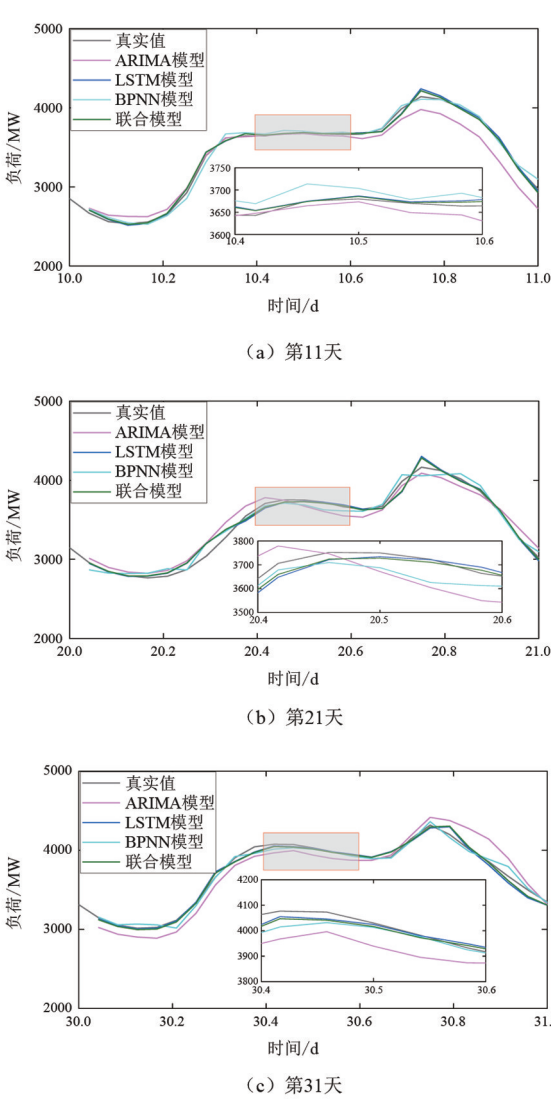


图 10 单一模型与联合模型预测结果对比

外,所提出的算法联合使用计算方法,也望应用于其他算法来提高短期电力负荷预测精度。

参考文献

[1] RAFI S H, NAHID-AL-MASOOD, DEEBA S R, et al. A short-term load forecasting method using integrated CNN and LSTM network [J]. IEEE Access, 2021, 9: 32436-32448.

[2] 全国电网运行与控制标准化技术委员会. GB/T 31464—2022 电网运行准则[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.

[3] 钟光耀, 邵能灵, 黄文焘, 等. 基于多维聚类的配变负荷注意力短期预测方法[J]. 上海交通大学学报, 2021, 55(12): 1532-1543.

[4] 于群, 张铮, 屈玉清, 等. 基于 ARMA-GABP 组合模型的电网大停电事故损失负荷预测[J]. 中国电力, 2018, 51(11): 38-44.



- [5] 麦鸿坤,肖坚红,吴熙辰,等.基于 R 语言的负荷预测 ARIMA 模型并行化研究[J].电网技术,2015,39(11):3216-3220.
- [6] 刘鑫,滕欢,宫毓斌,等.基于改进卡尔曼滤波算法的短期负荷预测[J].电测与仪表,2019,56(3):42-46.
- [7] 邓带雨,李坚,张真源,等.基于 EEMD-GRU-MLR 的短期电力负荷预测[J].电网技术,2020,44(2):593-602.
- [8] 赵佩,代业明.基于实时电价和加权灰色关联投影的 SVM 电力负荷预测[J].电网技术,2020,44(4):1325-1332.
- [9] 杨邓,杨俊杰,胡晨阳,等.基于改进 LSSVM 的短期电力负荷预测[J].电子测量技术,2021,44(18):47-53.
- [10] 马松龄,代一楠,徐军昶,等.改进人工蜂群优化神经网络的短期负荷预测[J].机械设计与制造,2021(7):50-53.
- [11] 蔡秋娜,潮铸,苏炳洪,等.基于一种新型鲁棒损失的神经网络短期负荷预测方法[J].电网技术,2020,44(11):4132-4139.
- [12] 吕海灿,王伟峰,赵兵,等.基于 Wide&Deep-LSTM 模型的短期台区负荷预测[J].电网技术,2020,44(2):428-436.
- [13] 朱凌建,荀子涵,王裕鑫,等.基于 CNN-Bi LSTM 的短期电力负荷预测[J].电网技术,2021,45(11):4532-4539.
- [14] 王保义,王冬阳,张少敏.基于 Spark 和 IPPSO\_LSSVM 的短期分布式电力负荷预测算法[J].电力自动化设备,2016,36(1):117-122.
- [15] 陈纬楠,胡志坚,岳菁鹏,等.基于长短期记忆网络和 LightGBM 组合模型的短期负荷预测[J].电力系统自动化,2021,45(4):91-97.
- [16] 赵兵,王增平,纪维佳,等.基于注意力机制的 CNN-GRU 短期电力负荷预测方法[J].电网技术,2019,43(12):4370-4376.
- [17] 王增平,赵兵,纪维佳,等.基于 GRU-NN 模型的短期负荷预测方法[J].电力系统自动化,2019,43(5):53-58.
- [18] DENG Z F, WANG B B, XU Y L, et al. Multi-scale convolutional neural network with time-cognition for multi-step short-term load forecasting[J]. IEEE Access, 2019, 7:88058-88071.
- [19] EKONOMOU L, CHRISTODOULOU C A, MLADENOV V. A Short-term load forecasting method using artificial neural networks and wavelet analysis[J]. International Journal of Power Systems, 2016, 1:64-68.
- [20] 赵凤展,郝帅,张宇,等.基于变分模态分解-BA-LSSVM 算法的配电网短期负荷预测[J].农业工程学报,2019,35(14):190-197.
- [21] MOORE B. Principal component analysis in linear systems: control lability, observability, and model reduction[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1981, 26(1):17-32.
- [22] AKAIKE H. Power spectrum estimation through autoregressive model fitting[J]. Annals of the Institute of Statistical Mathematics, 1969, 21:407-419.
- [23] 陈振宇,刘金波,李晨,等.基于 LSTM 与 XGBoost 组合模型的超短期电力负荷预测[J].电网技术,2020,44(2):614-620.
- [24] HOCHREITER S, SCHMIDHUBER J. Long short-term memory[J]. Neural Computation, 1997, 9(8):1735-1780.
- [25] KENNEDY J, EBERHART R C. Particle swarm optimization[C]. Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, 1995, 4:1942-1948.
- [26] STORN R, PRICE K. Differential evolution-A simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces[J]. Journal of Global Optimization, 1997, 11:341-359.
- [27] HONG T, PINSON P, FAN S, et al. Probabilistic energy forecasting: global energy forecasting competition 2014 and beyond[J]. International Journal of Forecasting, 2016, 32(3):896-913.
- [28] LI Q L, CAI J Y, YAN P, et al. A short-term load forecasting method based on fast periodic component extraction[C]. 2022 5th International Conference on Pattern Recognition and Artificial Intelligence (PRAI), Chengdu, China, 2022:875-879.
- [29] CHEN Y X, ZHANG J Y, LIU Y S, et al. Research on the prediction method of ultimate bearing capacity of PBL based on IAGA-BPNN algorithm[J]. IEEE Access, 2020, 8:179141-179155.

#### 作者简介:

蔡君懿(1996),女,博士,工程师,从事电能计量与电气设备检测工作;

李琪林(1973),男,博士,教授级高级工程师,从事电能计量工作;

严平(1966),男,硕士,高级工程师,从事电能计量工作。

(收稿日期:2023-03-01)

# 考虑储能峰谷价差套利的综合能源系统 策略性经济配置

蔡含虎,孙建伟,谢彦祥,蒋艾町,夏雪,肖汉

(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司,四川 成都 610056)

**摘要:**计及储能系统分时电价峰谷价差套利,提出了综合能源系统的供热/冷、供电策略,并以此作为经济配置模型的内层仿真优化内核。基于全寿命周期理论和策略性仿真优化内核,建立了综合能源系统双层规划模型;外层兼顾综合能源系统经济与环境效益,以系统年总规划成本最小为优化目标;内层优化模型采用年仿真时域(8760 h)以增强电源侧发电出力与用能侧负荷的匹配特性,提升配置结果的有效性和经济性。运用增强精英保留遗传算法调用内层仿真优化内核对双层配置模型仿真求解,算例分析验证了所提出的综合能源系统策略性经济配置方法的有效性,并探讨了适合配置储能系统能源套利的临界峰谷电价差,可为相关工程项目提供项目前期分析参考。

**关键词:**综合能源系统;策略性优化仿真;储能峰谷价差套利;经济配置;增强精英保留遗传算法

**中图分类号:**TM 715 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2023)05-0035-08

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20230506

## Strategic Economic Allocation of Integrated Energy System Considering Energy Storage Peak-Valley Price Spread Arbitrage

CAI Hanhu, SUN Jianwei, XIE Yanxiang, JIANG Aiting, XIA Xue, XIAO Han

(Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering  
Consulting Group, Chengdu 610056, Sichuan, China)

**Abstract:** The heating/cooling and power supply strategies of integrated energy system are proposed considering the peak-valley price spread arbitrage of TOU electricity price of energy storage system, which are used as the inner simulation optimization kernel of economic allocation model. A double layer programming model of integrated energy system is established based on the whole life cycle theory and strategic simulation optimization kernel. The outer layer takes into account the economic and environmental benefits of the integrated energy system and minimizes the total annual planning cost of the system as the optimization goal. The inner optimization model adopts the annual simulation time domain (8760 h) to enhance the matching characteristics between the generation output of power supply side and the load of energy consumption side, so as to improve the effectiveness and economy of the configuration results. The enhanced elite retention genetic algorithm is used to call the inner simulation optimization kernel to simulate and solve the two-layer configuration model. An example analysis verifies the effectiveness of the proposed strategic economic allocation method for integrated energy systems, and discusses the critical peak-valley price spread suitable for arbitrage of energy storage systems, which can provide reference for the related engineering projects in the early stage of project analysis.

**Key words:** integrated energy systems; strategic optimization simulation; energy storage peak-valley price spread arbitrage; economic allocation; enhanced elite retention genetic algorithm

## 0 引言

综合能源系统(integrated energy system, IES)

是当今能源发展的方向和未来能源互联网的基础,也是未来供能系统发展的重要方向之一。IES通过对能源的生产、传输与分配、转换、存储、消费等环节进行有机协调与优化,能够促进分布式电源、可再生

能源的灵活接入和高效应用。规划与设计是 IES 的核心技术之一,关系到系统的经济性、环保性和可靠性。合理的规划可以延缓传统能源供应系统的建设,提高系统能源供应的可靠性,满足用户对能源质量的要求和政府对环境保护的要求。

关于综合能源系统规划已有大量的研究。文献[1]基于不同季节典型日光伏出力和负荷特性曲线,考虑典型日系统经济运行,建立了计及投资成本与收益的经济-环境效益最大化的区域综合能源系统容量配置优化模型。文献[2]为充分利用综合能源系统潜在的可靠性价值,延缓电网投资,降低供能成本,提出了一种基于主从博弈的配电网-多 IES 协调规划模型。文献[3]兼顾综合能源系统全寿命周期的低碳性和经济性需求,提出了一种考虑外部碳交易效益的综合能源系统多阶段规划方法。此外,还有针对储能系统商业模式的研究,如文献[4]基于储能“峰谷套利”运行模式,提出最优运行策略以提高储能系统的整体收益,但并未进行储能配置研究。文献[5]考虑工业用户最大需求量的控制和管理,综合负荷响应资源与储能系统的协同作用,提出了工业用户电储能系统双层优化配置方法。文献[6]考虑碳排放因素的各种影响,构建了电/热混合储能的双层优化模型。文献[7]为充分调动用户侧资源,提出了一种考虑需求响应的电/热/气云储能优化配置策略。峰(尖峰)谷电价的大力推行为储能套利提供可观空间。企事业单位、单位用户、居民用户等对储能系统的需求亦逐渐增大,而配置储能系统参与能源套利减少运营成本,需结合用户负荷特性、电网分时电价信息以及能源系统架构等多因素评估储能系统的投资效益。

鉴于 IES 经济配置模型规划层与运行层之间的层级关系<sup>[8]</sup>,一般采用双层规划模型进行求解<sup>[9-10]</sup>。优化模型采用长仿真时域(如 8760 h)可以有效提高电源侧新能源发电与用能侧负荷的匹配特性,防止出现所选取典型日的低代表性,进而提升配置结果的经济性和有效性;但运行层增大仿真时域会导致运筹优化模型求解时间长、不收敛等问题。因此,提出可基于供能系统需要量身定制优化 IES 控制策略,并以此作为规划优化内核,实现 IES 运行层快速仿真,减少 IES 经济配置模型求解时长等问题。此外,在当前峰谷电价差下,探讨储能系统参与峰谷套利的投资边界对储能项目具有一定的指导意

义。下面以综合能源系统策略优化为基础支撑,考虑储能参与“峰谷套利”减少运营成本,提出一种以年为优化仿真时域(8760 h)的综合能源系统策略性经济配置方法,能够应用于综合能源系统工程项目前期经济配置与评估分析。

## 1 IES 框架

IES 负荷需求包括电、热、冷负荷,其中热负荷包括空调热负荷和生活热水负荷,冷负荷为空调冷负荷。拟通过配置电、热、冷综合能源系统实现负荷供能,可通过余热回收装置供应系统内部空调冷(热)负荷,燃气锅炉作为后备热源支撑。为了避免所配置燃气机组规模较大导致机组容量利用率低的问题,系统一部分空调冷负荷通过电制冷机进行供应,这部分负荷不纳入规划范围。此外,配置储能系统用于平滑光伏发电功率和燃气机组发电功率,同时根据分时电价信息参与峰谷套利,减少供能成本。系统的母线结构如图 1 所示。

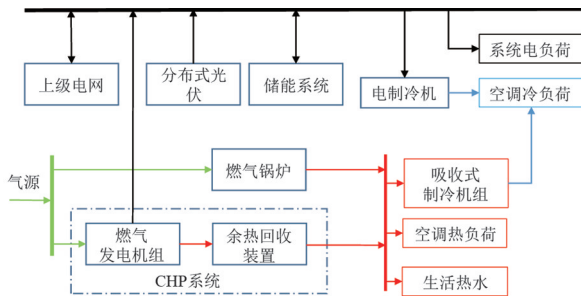


图 1 IES 母线结构

## 2 IES 元件建模

### 2.1 光伏发电

光伏(photovoltaic, PV)发电设备的运行特性与环境气候因素有关,主要由光照强度和环境温度决定,同时设备本身也受太阳能利用效率的影响。光伏组件出力特性<sup>[11]</sup>可表示为

$$P_{t,pv}^{out} = P_{pv}^{rate,STC} \frac{I_t}{I_{STC}} [1 + \alpha(T_{t,c} - T_{c,STC})] \quad (1)$$

式中:  $P_{t,pv}^{out}$  为光伏阵列  $t$  时段的输出功率, kW;  $P_{pv}^{rate,STC}$  为光伏阵列在标准测试条件下(光伏电池温度为 25 °C, 光辐照度为 1 kW/m<sup>2</sup>) 的额定输出功率, kW;  $I_t$  为  $t$  时段照射到光伏阵列上的太阳辐射, kW/m<sup>2</sup>;  $I_{STC}$  为标准测试条件下的光辐照度, kW/m<sup>2</sup>;



$\alpha$  为功率温度系数,  $\%/^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{t,e}$  为  $t$  时段光伏电池温度,  $^{\circ}\text{C}$ , 可通过经验公式计算得到;  $T_{e,\text{STC}}$  为标准测试条件温度,  $25^{\circ}\text{C}$ 。

## 2.2 热电联产系统

热电联产系统 (combined heat and power system, CHP) 采用燃气发电机组 (gas turbine, GT)、余热回收装置实现电、热、冷三联供。供热与制冷均采用余热回收热能, 能源效率可达 80% 以上。燃气型热电联产机组本质是将天然气转化为电能和热能, 其功率特性模型为:

$$P_{t,e}^{\text{CHP}} = \eta_e^{\text{CHP}} G_{t,g}^{\text{CHP}} V_{\text{gas}} / 3.6 \quad (2)$$

$$Q_{t,h}^{\text{CHP}} = \eta_h^{\text{CHP}} G_{t,g}^{\text{CHP}} V_{\text{gas}} / 3.6 \quad (3)$$

式中:  $P_{t,e}^{\text{CHP}}$ 、 $Q_{t,h}^{\text{CHP}}$  分别为  $t$  时段热电联产机组的发电功率和制热功率;  $G_{t,g}^{\text{CHP}}$  为  $t$  时段热电联产机组的天然气消耗量,  $\text{m}^3$ ;  $\eta_e^{\text{CHP}}$ 、 $\eta_h^{\text{CHP}}$  分别为热电联产机组的发电效率和制热效率,  $\%$ ;  $V_{\text{gas}}$  为天然气的低热值,  $\text{MJ}/\text{Nm}^3$ 。

吸收式制冷机组消耗热能提供空调冷负荷, 每小时消耗的热能与产生的冷能关系为

$$P_{t,AC}^{\text{out}} = C_{AC} P_{t,AC}^{\text{h,in}} \quad (4)$$

式中:  $P_{t,AC}^{\text{out}}$ 、 $P_{t,AC}^{\text{h,in}}$  分别为  $t$  时段吸收式制冷机组的输出冷功率和耗热功率;  $C_{AC}$  为吸收式制冷机组的制冷系数。

燃气锅炉 (gas boiler, GB) 作为系统的备用支撑热源, 补充 CHP 系统的供热缺口, 其天然气输入与热能输出的热转换关系为

$$Q_{t,h}^{\text{GB}} = \eta_h^{\text{GB}} G_{t,g}^{\text{GB}} V_{\text{gas}} / 3.6 \quad (5)$$

式中:  $Q_{t,h}^{\text{GB}}$  为  $t$  时段燃气锅炉的制热功率;  $G_{t,g}^{\text{GB}}$  为  $t$  时段锅炉的天然气消耗量;  $\eta_h^{\text{GB}}$  为锅炉的制热效率。

## 2.3 储能系统

电池储能系统 (battery energy storage system, BESS) 中, 电池采用磷酸铁锂电池, 储能逆变器 (power conversion systems, PCS) 是实现交流系统与储能直流电能之间能量双向传递的桥梁。PCS 的容量对系统的整体投资和运营经济性至关重要, 因此将储能系统中 PCS 容量纳入配置范畴中。储能系统典型功率特性模型为

$$E_t^{\text{BT}} = (1 - \mu_{\text{BT}}^{\text{loss}}) E_{t-1}^{\text{BT}} + (\eta_{\text{BT}}^{\text{chg}} P_{t,\text{chg}}^{\text{BT}} - P_{t,\text{dsg}}^{\text{BT}} / \eta_{\text{BT}}^{\text{dsg}}) \Delta t$$

$$S_t^{\text{BT}} = E_t^{\text{BT}} / C_{\text{BT}} \quad (6)$$

式中:  $E_t^{\text{BT}}$  为储能系统在  $t$  时段的存储电能;  $\mu_{\text{BT}}^{\text{loss}}$  为电池放电自损耗系数;  $\eta_{\text{BT}}^{\text{chg}}$ 、 $\eta_{\text{BT}}^{\text{dsg}}$  分别为充、放电效率;

$P_{t,\text{chg}}^{\text{BT}}$ 、 $P_{t,\text{dsg}}^{\text{BT}}$  分别为充、放电功率;  $S_t^{\text{BT}}$  为储能系统在  $t$  时段的荷电状态;  $C_{\text{BT}}$  为储能电池的存储总电量;  $\Delta t$  为时段长度。

## 3 IES 运行策略

CHP 机组采用“以热定电”方式运行, 系统冷/热负荷首要供应源为 CHP 系统。当系统存在冷/热负荷需求, 且满足燃机最小启动功率条件时, 则 CHP 机组启动供应冷/热负荷需求, 燃气锅炉根据冷/热负荷供应情况作为备用支撑冷/热源。IES 供冷/热策略如图 2 所示。

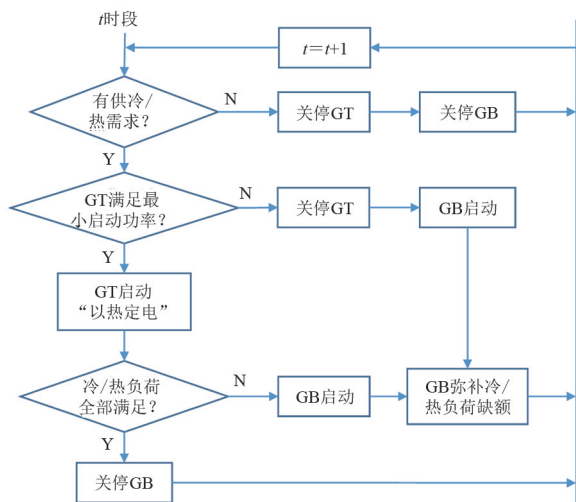


图2 IES 供冷/热策略

根据供冷/热策略确定 CHP 系统的运行。当 CHP、光伏发电功率大于系统电负荷需求时, 则系统电力富余, 富余发电功率优先存储在储能系统中, 储存不下的发电功率则上网售电; 而当 CHP、光伏发电功率小于系统电力负荷需求时, 则需结合当前分时电价信息判断电池储能系统是否放电供应电负荷。为了提高储能系统的效益, 储能仅在峰电价时段放电供应电负荷。若储能系统不放电或储能系统放电功率不足以满足负荷缺额, 则系统从电网购电弥补电负荷缺额。IES 系统供电策略如图 3 所示。

为便于说明, 定义系统净电负荷  $\Delta P_t^{\text{el}}$  为 CHP、新能源发电功率和电负荷  $P_t^{\text{el}}$  之间的差值, 计算公式为

$$\Delta P_t^{\text{el}} = P_{t,e}^{\text{CHP}} + P_{t,pv}^{\text{out}} - P_t^{\text{el}} \quad (7)$$

1) 当  $\Delta P_t^{\text{el}} > 0$ , 存在富余发电功率。若储能系统电量  $S_t^{\text{BT}}$  小于最大存储电量  $S^{\text{max}}$ , 富余电力优先为储能系统充电, 储能系统无法完全存储 ( $\Delta P_t^{\text{el}} > P_{\text{pcs}}^{\text{max,out}}$ ,



替换年份;  $T$  为时段总数,  $T=8760$  h;  $\pi_{t,\text{buy}}^{\text{electricity price}}$  为  $t$  时段的购电电价;  $P_{t,\text{buy}}^{\text{grid}}$  为  $t$  时段购电功率;  $\pi^{\text{demand}}$  为功率需求成本单价;  $P_{\text{month}}^{\text{demand,max}}$  为月最大购电功率;  $\pi_{t,\text{sale}}^{\text{electricity price}}$  为  $t$  时段的售电电价;  $P_{t,\text{sale}}^{\text{grid}}$  为  $t$  时段的售电功率;  $c^{\text{gas}}$  为天然气价格;  $c^{\text{water}}$  为水价;  $W_t^{\text{water}}$  为  $t$  时段用水量;  $\pi_i^{\text{O\&M}}$  为设备  $i$  的单位容量运维成本;  $\psi_i^{\text{cap}}$  为设备  $i$  的配置容量;  $\omega_{\text{fixed}}$  为固定成本比例系数, 一般取 5%~10%;  $\Omega^{\text{emi}}$  为污染排放物集合;  $\pi_k^{\text{emi}}$  为排放物  $k$  的单位排放治理费用;  $d_{\text{grid}}^k$ 、 $d_{\text{CHP}}^{\text{gas},k}$ 、 $d_{\text{GB}}^{\text{gas},k}$  分别为电网、CHP 系统、燃气锅炉的污染排放物  $k$  的排放系数。

## 4.2 约束条件

### 1) 设备容量约束

设备的配置容量受设备安装时的占地面积、地理情况等因素限制。此外, 限定储能系统的充放电时长为 2~4 h。设备的配置容量约束为

$$\begin{aligned} \varphi_i^{\text{cap,min}} &\leq \varphi_i^{\text{cap}} \leq \varphi_i^{\text{cap,max}} \\ \frac{1}{4} \varphi_{\text{bat}}^{\text{cap}} &\leq \varphi_{\text{pcs}}^{\text{cap}} \leq \frac{1}{2} \varphi_{\text{bat}}^{\text{cap}} \end{aligned} \quad (9)$$

式中:  $\varphi_i^{\text{cap,min}}$ 、 $\varphi_i^{\text{cap,max}}$  分别为设备  $i$  的最小、最大配置容量;  $\varphi_{\text{bat}}^{\text{cap}}$  为储能系统电池的容量;  $\varphi_{\text{pcs}}^{\text{cap}}$  为储能系统 PCS 的配置容量。

### 2) 运行约束

运行约束主要包括系统安全稳定、上网功率、储能系统运行以及系统能量平衡约束 4 个方面, 分别如式 (10)~式 (13) 所示。

$$\begin{cases} 0 \leq P_t^{\text{pv}} \leq P_{t,\text{pv}}^{\text{out}} \\ -\varphi_{\text{pcs}}^{\text{cap}} \leq P_t^{\text{pcs}} \leq \varphi_{\text{pcs}}^{\text{cap}} \\ 0 \leq Q_{t,\text{h}}^{\text{CHP}} \leq Q_{\text{h,max}}^{\text{CHP}} \\ \delta_t^{\text{chp}} \varphi_{\text{chp}}^{\text{cap}} \nu_{\text{chp}}^{\text{min}} \leq P_{t,\text{e}}^{\text{CHP}} \leq \delta_t^{\text{chp}} \varphi_{\text{chp}}^{\text{cap}} \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{t,\text{sale}}^{\text{grid}} \leq P_{\text{max}}^{\text{grid}} \\ P_{t,\text{buy}}^{\text{grid}} P_{t,\text{sale}}^{\text{grid}} = 0 \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{t,\text{chg}}^{\text{BT}} \leq \delta_t^{\text{BT}} P_{\text{pcs}}^{\text{max,in}} \\ 0 \leq P_{t,\text{dsg}}^{\text{BT}} \leq (1 - \delta_t^{\text{BT}}) P_{\text{pcs}}^{\text{max,out}} \\ P_{\text{pcs}}^{\text{max,in}} = P_{\text{pcs}}^{\text{max,out}} = \varphi_{\text{pcs}}^{\text{cap}} \\ E_{\text{min}}^{\text{BT}} \leq E_t^{\text{BT}} \leq E_{\text{max}}^{\text{BT}} \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} P_{t,\text{buy}}^{\text{grid}} + P_t^{\text{pv}} + P_{t,\text{e}}^{\text{CHP}} + P_{t,\text{dsg}}^{\text{BT}} = P_{t,\text{chg}}^{\text{BT}} + P_{t,\text{sale}}^{\text{grid}} + P_t^{\text{el}} \\ Q_{t,\text{h}}^{\text{CHP}} + Q_{t,\text{h}}^{\text{GB}} = H_t^{\text{hot water}} + H_t^{\text{air heating}} + H_t^{\text{air cool}}/C_{\text{AC}} \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $P_t^{\text{pv}}$  为  $t$  时段消耗的光伏功率;  $P_{t,\text{e}}^{\text{CHP}}$  为  $t$  时段流

过 PCS 的功率;  $Q_{\text{h,max}}^{\text{CHP}}$  为  $t$  时段 CHP 系统的最大制热功率;  $\delta_t^{\text{chp}}$  表征  $t$  时段 CHP 系统运行状态 (二进制变量, 1 表示运行, 0 表示停机);  $\nu_{\text{chp}}^{\text{min}}$  为 CHP 系统的发电最小出力系数, 取值为 0~1;  $\varphi_{\text{chp}}^{\text{cap}}$  为 CHP 系统的配置容量变量;  $P_{\text{max}}^{\text{grid}}$  为上网的最大功率限制;  $P_{\text{pcs}}^{\text{max,in}}$ 、 $P_{\text{pcs}}^{\text{max,out}}$  分别为储能电池可以通过储能 PCS 的最大充、放电功率;  $\varphi_{\text{pcs}}^{\text{cap}}$  为 PCS 的配置容量;  $\delta_t^{\text{BT}}$  表征  $t$  时段电池储能系统充放电状态 (二进制变量, 1 表示充电, 0 表示放电);  $E_{\text{min}}^{\text{BT}}$ 、 $E_{\text{max}}^{\text{BT}}$  分别为其最小、最大存储能量;  $H_t^{\text{hot water}}$  为  $t$  时段系统生活热水负荷;  $H_t^{\text{air heating}}$  为  $t$  时段系统空调热负荷;  $H_t^{\text{air cool}}$  为  $t$  时段系统通过吸收式制冷机供应的空调冷负荷。

## 4.3 优化求解

所建立的 IES 经济配置双层优化模型为复杂的非线性模型, 采用遗传算法进行求解。针对仅采用交叉、变异和选择 3 个遗传算子的标准遗传算法不能收敛到全局最优值的问题, 下面采用增强精英保留遗传算法对所建立的模型进行优化求解, 如图 4 所示。

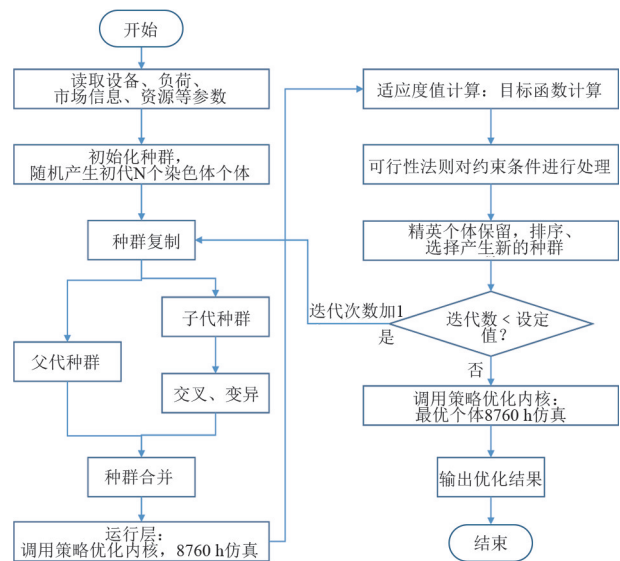


图4 增强精英保留遗传算法优化流程

## 5 算例分析

以某商业园区综合能源系统为例进行分析说明。该商业主要负荷类型为餐饮、商业以及办公为主的综合性园区, 还有少许商住房负荷, 园区内主要以低容积率、低楼层建筑为主。负荷需求包括电、热、冷负荷, 热负荷包括空调热水和生活热水负荷。



下面拟通过综合能源供能方式实现就近集中向园区内核心负荷供能,冷/热负荷可通过 CHP 系统余热回收供应园区内部空调冷/热负荷和生活热水负荷。环境治理成本仅考虑二氧化碳的排放。

5.1 资源概况

该园区与市政电力并网运行,园区电价执行一般工商业分时电价,每年 7、8、9 月份执行尖峰电价,电价信息详见表 1。为了保障上级电网的安全稳定性,禁止园区电力上网。

| 表 1 能源价格信息                         |         |                                            |
|------------------------------------|---------|--------------------------------------------|
| 价格类型                               | 价格      | 时间段                                        |
| 功率电价/<br>(元·(kW·月) <sup>-1</sup> ) | 32      | —                                          |
|                                    | 1.559 7 | 7、8、9 月<br>11:00—12:00;<br>15:00—17:00     |
| 电度电价/<br>(元·(kWh) <sup>-1</sup> )  | 1.253 3 | 10:00—12:00;<br>14:00—19:00                |
|                                    | 0.749 6 | 8:00—10:00;<br>12:00—14:00;<br>19:00—24:00 |
|                                    | 0.301 7 | 0:00—8:00                                  |
|                                    | —       | —                                          |
| 天然气/(元·m <sup>-3</sup> )           | 2       | 燃气发电机、燃气锅炉                                 |
| 水价/(元·t <sup>-1</sup> )            | 4       | —                                          |

受制于园区内场地限制,园区内可配置分布式光伏最大规模为 3 MW。基于 SolarGis 数据,该地区水平面年平均总辐射量可达 1 363.1 kWh/m<sup>2</sup>,最佳倾角年总辐射量可达 1 417.7 kWh/m<sup>2</sup>,光照资源相较一般,但白天电网购电电价较高,分布式光伏仍具有经济效益。该地区具备燃气接入条件,供气能力好,能同时提供冷、热、电 3 种能源。

5.2 输入参数

园区电、热/冷年负荷曲线如图 5、图 6 所示:生活热水负荷全年都有需求,夏季需求相对较低;5~10 月有供冷需求,8 月份达到峰值;空调热负荷在 11 月到次年 4 月。设备经济参数如表 2 所示,储能系统采用磷酸铁锂电池储能,储能电芯使用寿命为 10 年,电芯替换成本为 0.8 元/Wh。

5.3 经济配置结果

5.3.1 优化结果

模型寻优进化过程如图 7 所示,可以看出算法在进化 20 次左右收敛,总进化时长为 657 s。所提出的策略性经济配置方法可以快速有效求解复杂的非线性规划模型。

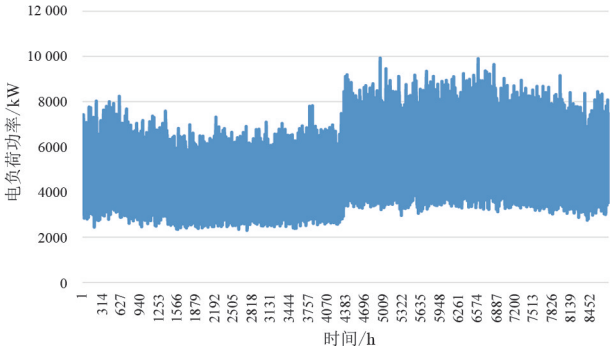


图 5 园区年电负荷曲线

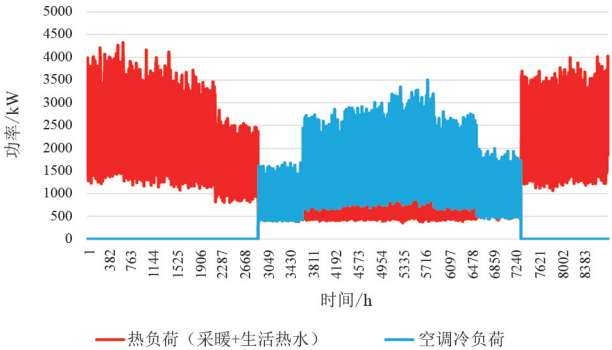


图 6 园区年冷/热负荷曲线

| 表 2 设备参数            |                                   |          |                                 |
|---------------------|-----------------------------------|----------|---------------------------------|
| 设备类型                | 初始投资/(元·(kW, kWh) <sup>-1</sup> ) | 固定运维费率/% | 可变运维成本/(元·(kWh) <sup>-1</sup> ) |
| CHP 系统(燃气发电机组、供热系统) | 10 000                            | 0        | 0.025                           |
| 燃气锅炉                | 265.86                            | 0.8      | —                               |
| 吸收式制冷机              | 1290                              | 0.3      | —                               |
| 磷酸铁锂电池              | 1800                              | 1.5      | —                               |
| 储能 PCS              | 220                               | 1.5      | —                               |
| 光伏                  | 4200                              | 1.5      | —                               |

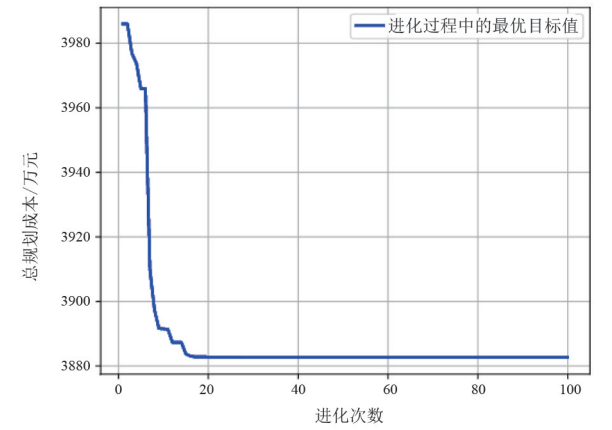


图 7 IES 配置模型求解过程

经济配置结果及投资运营成本如表 3、表 4 所示。从配置结果可以看出,分布式光伏按最大值进行配置,园区内部电网购电电价较高,光伏发电

相对直接从电网购电的效益更好。储能系统配置 1 194.81 kW/4 480.54 kWh,充放电时长接近 4 h,说明在当前分时电价峰谷电价差下,配置储能具有一定的经济效益。CHP 系统采用“以热定电”的模式运行,受制于园区商业负荷结构,为了避免燃气发电机组较低的容量利用率,其配置容量不宜过大。

表 3 经济配置结果

| 设备类型 | 光伏/<br>kW | 储能/<br>kWh | PCS/<br>kW | 燃气发电<br>机组/<br>kW | 吸收式<br>制冷机<br>组/kW | 锅炉/<br>kW |
|------|-----------|------------|------------|-------------------|--------------------|-----------|
| 设备容量 | 3000      | 4480       | 1194       | 2311              | 3502               | 1258      |

表 4 最优配置结果投资及运营成本

| 投资及运营                | 数值        | 运营成本      | 数值        |
|----------------------|-----------|-----------|-----------|
| 年化投资成本/万元            | 459.21    | 购电电费成本/万元 | 2 111.851 |
| 年运营成本/万元             | 3 423.45  | 购电需量成本/万元 | 241.742 5 |
| 年总规划成本/万元            | 3 882.66  | 购气成本/万元   | 834.996   |
| CHP 发电量/万 kWh        | 1 314.59  | 耗水成本/万元   | 4.435     |
| 电网购电量/万 kWh          | 2 784.66  | 环境治理成本/万元 | 157.406   |
| 购气量/万 m <sup>3</sup> | 417.49    | 售电收益/万元   | 0         |
| 耗水量/万 t              | 1.109     | 运维成本/万元   | 63.862    |
| 光伏发电量/万 kWh          | 378.705 2 | 碳排放量/万 t  | 3.148     |

5.3.2 运行仿真分析

分别从年仿真曲线中选取典型日进行分析,系统电、热/冷仿真运行如图 8、图 9 所示。图 8 为园区电力运行仿真,从图 8(a)可以看出每一时段都需要通过电网购电供应电力负荷,可见光伏发电功率和燃气机组发电功率无法完全满足园区电负荷;图 8(b)—(e)显示储能系统仅仅在分时电价低谷时段充电,分时电价高峰/尖峰时段放电,实现能源套利;执行尖峰电价的月份,储能系统仅在尖峰电价执行时段放电如图 8(d)—(e)所示。

从图 9 可看出,根据运行策略,CHP 机组采用“以热定电”模式运行,是主要的冷/热供应源。锅炉仅在冷/热负荷需求高峰时段运行,作为支撑冷热源。以典型日为例,夏季锅炉在 12:00—17:00 运行,冬季在 14:00—17:00 运行。

5.3.3 储能系统峰谷套利价差分析

储能系统应用于分时电价“低充高放”进行能源套利时,分时电价峰谷电价差决定了储能系统的投资效益。峰谷电价差较低时,不适合配置储能系统。在所设投资边界条件下(储能单位投资;计及其他固定投资比例为 5%,储能投资为 1.89 元/Wh,PCS 单位投资为 0.22 元/W),为了进一步分析分时

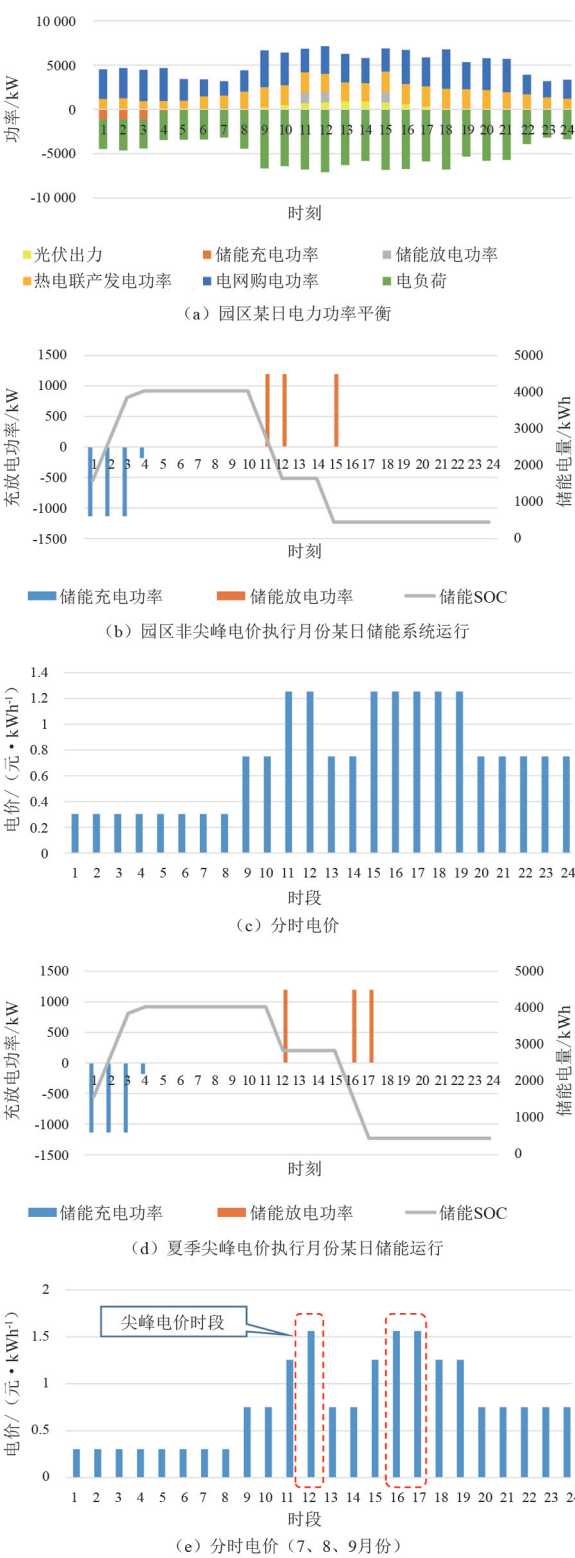


图 8 园区典型日电力负荷运行仿真

电价差对储能系统的投资效益的影响,针对所提案例,通过对分时电价差进行敏感性分析,探讨适合配置储能系统进行能源套利的临界峰谷电价差。分析结果如表 5 所示。可以看出,当峰谷分时电价差达到 0.8 元/kWh,配置储能系统才具有经济效益,且

随着分时电价差的增大,配置的储能系统规模也越大,但受制于园区负荷需求,储能系统的配置规模非线性增加。

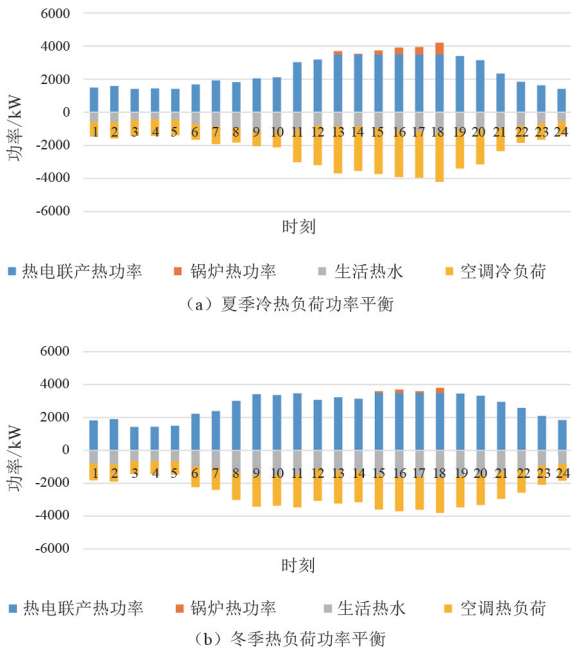


图 9 园区典型日冷热供应运行仿真

表 5 储能投资敏感性分析

| 峰谷电价差/<br>(元·(kWh) <sup>-1</sup> ) | 储能配置规模                   | 备注       |
|------------------------------------|--------------------------|----------|
| 0.75                               | —                        | 配置储能无效益  |
| 0.79                               | —                        | 配置储能无效益  |
| 0.80                               | 373.87 kW/1 401.98 kWh   | 临界峰谷电价差  |
| 0.85                               | 1 063.87 kW/3 989.52 kWh | 适合配置储能系统 |
| 0.95                               | 1 194.81 kW/4 480.54 kWh | 适合配置储能系统 |

6 结 论

考虑储能系统参与分时电价峰谷套利,提出了综合能源系统的供热/冷、供电策略,并以此作为经济配置模型的内层仿真优化内核。进而兼顾综合能源系统经济与环境效益,基于全生命周期理论和策略性优化内核,建立了综合能源系统双层规划模型。优化模型采用长仿真时域(8760 h)以提升电源侧发电出力与用能侧负荷的匹配特性,进而提升配置结果的有效性和经济性。算例结果分析验证了所提出的经济配置策略性规划方法的有效性。最后,针对所提算例参数,探讨了适合配置储能系统进行能源套利的临界峰谷电价差,结果表明当分时电价峰谷电价差达到 0.80 元/kWh,配置储能系统才具有投资效益,

可为相关工程项目提供前期分析参考。

参考文献

[1] 刘泽健,杨苹,许志荣.考虑典型日经济运行的综合能源系统容量配置[J].电力建设,2017,38(12):51-59.

[2] 刘畅,刘文霞,高雪倩,等.基于主从博弈的配电网-多综合能源系统协调规划[J].电力自动化设备,2022,42(6):45-52.

[3] 张岚,王永利,陶思艺,等.考虑外部碳交易效益的综合能源系统多阶段规划[J].云南电力技术,2022,50(1):16-23.

[4] 葛兴凯.储能系统峰谷套利运行策略最优化方法研究[J].新型工业化,2021,11(2):144-147.

[5] 张宏业,吴杰康,蔡锦健,等.考虑空调负荷和柔性热负荷响应的综合能源系统储能鲁棒优化配置[J].电网技术,2022,46(7):2733-274.

[6] 李剑锋,郝晓光,曾四鸣,等.考虑碳排放的综合能源系统储能优化配置研究[J].中国测试,2022,48(7):83-89.

[7] 丁曦,姜威,郭创新,等.考虑需求响应的电/热/气云储能优化配置策略[J].电力建设,2022,43(3):83-99.

[8] YOKOYAMA Ryohei, SHINANO Yuji. MILP approaches to optimal design and operation of distributed energy systems[M].Tokyo: Springer, 2016:157-176[2022-08-10].https://doi.org/10.1007/978-4-431-55420-2\_9.

[9] 刘书琪,顾洁,赖柏希,等.考虑负荷裕度的区域综合能源系统储能双层优化配置[J].电力自动化设备,2022,42(7):150-158.

[10] WANG Yongli, WANG Yudong, HUANG Yujing, et al. Planning and operation method of the regional integrated energy system considering economy and environment[J]. Energy, 2019, 171:731-750.

[11] MA Tengfei, WU Junyong, HAO Liangliang, et al. The optimal structure planning and energy management strategies of smart multi energy systems[J]. Energy, 2018, 160:122-141.

作者简介:

蔡含虎(1994),男,硕士,工程师,研究方向为电力系统规划设计、综合能源系统规划与优化运行;

孙建伟(1986),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统规划设计、综合能源;

谢彦祥(1995),男,硕士,工程师,研究方向为智能电网技术、综合能源。

(收稿日期:2023-01-21)



# 海上风电柔性直流送出换流站 MMC 换流阀损耗研究

李浩原,彭开军,王江天,刘 超,李文津,周思远,周国梁

(中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司,湖北 武汉 430071)

**摘 要:**海上风电柔性直流送出是目前柔性直流输电领域的研究热点,损耗是柔性直流换流站的一个重要技术指标,关系着柔性直流系统的输电效率和换流阀的设计。针对输电容量为 1000 MW 的海上风电柔性直流送出换流站 MMC 换流阀损耗特性,研究了换流阀损耗的计算方法和关键计算参数的获取方法,计算得到了换流阀损耗的组成和  $\pm 320$  kV/1000 MW 海上风电柔性直流送出工程送/受端换流站换流阀的损耗率。同时,研究了联接变压器阀侧三次谐波注入、换流器调制比和直流极线电压对换流阀损耗率的影响,结果表明:在联接变压器阀侧注入三次谐波和增大换流器调制比可减小换流阀损耗率;在相同输送容量的前提下,增大直流极线电压可减小换流阀损耗率。

**关键词:**海上风电; MMC 换流阀; 损耗

**中图分类号:**TM 721.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2023)05-0043-08

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20230507

## Study on Loss of MMC Converter Valve Applied in Converter Station of Offshore Wind Power VSC-HVDC Transmission

LI Haoyuan, PENG Kaijun, WANG Jiangtian, LIU Chao, LI Wenjin, ZHOU Siyuan, ZHOU Guoliang

(Central Southern China Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power

Engineering Consulting Group, Wuhan 430071, Hubei, China)

**Abstract:**At present, the VSC-HVDC transmission of offshore wind power is a research hotspot in the field of flexible DC transmission. Loss is an important technical index of VSC-HVDC converter station, which is related to the transmission efficiency of VSC-HVDC system and the design of converter valve. Therefore, a loss calculation study on MMC converter valve of VSC-HVDC converter station applied in offshore wind power transmission with a transmission capacity of 1000 MW is carried out. The calculation method of valve loss and the acquisition method of key calculation parameters are studied. The composition of valve loss and the loss rate of valve at the converter station at the sending/receiving end of  $\pm 320$  kV/1000 MW VSV-HVDC project applied in wind power transmission are calculated. The effects of third harmonic injection, converter modulation ratio and DC pole line voltage on the valve loss rate are studied. The results show that the valve loss rate can be reduced by injecting the third harmonic at transformer valve side and increasing the converter modulation ratio, and under the same transmission capacity, the valve loss rate can be reduced by increasing the DC pole line voltage.

**Key words:**offshore wind power; MMC converter valve; loss

### 0 引 言

近年来,中国近海海上风电开发已趋饱和,海上风电开发逐步向大容量机组、远离海岸方向发展,成为中国风电产业发展新的增长点。随着风电场容量

不断增大以及海上风电场离岸距离不断增加,柔性直流输电成为远海大容量风场电力送出的首选方案<sup>[1-5]</sup>。目前海上风电柔性直流送出在世界范围都得到了广泛的应用,在欧洲仅德国就有多个海上风电柔性直流送出工程已投入运行。中国首个海上风电柔性直流送出工程——“三峡新能源江苏如东海上风电场柔性直流输电工程”已于 2021 年 12 月投

**基金项目:**中国能源建设集团中国电力工程顾问集团有限公司科技项目(GSKJ2-D05-2021)

入运行。中国第二个海上风电柔性直流送出工程——“三峡阳江青州五、青州七海上风电场海缆集中送出工程”已在工程实施中,输电容量为 2000 MW,直流电压等级为 $\pm 500$  kV。

对于海上风电柔性直流送出工程而言,损耗率是送出系统的一个重要指标。一个 1000 MW 的风电场损耗减小 0.1%,则每年可多送出 8.76 GWh 的电能,可见降低损耗有着较为可观的经济效益。同时,对柔性直流系统损耗的准确计算,可为整个输电系统的传输效率评估提供依据。因此对柔性直流输电系统损耗的研究具有重要的工程实际意义,而柔性直流系统损耗中,模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)换流阀的损耗占主要部分,可为换流阀子模块开关器件的选择和换流阀散热设计提供参考<sup>[6-7]</sup>。在设计阶段,柔性直流系统损耗无法通过测量得到,因此需要研究一种方法对换流阀损耗和开关器件温度进行计算。

针对 MMC 换流阀损耗,国内外学者进行了一系列的研究工作。文献[8]采用分段解析公式的方法,给出了 MMC 子模块器件通态损耗和开关损耗的计算公式。文献[9]运用电路分析,给出了开关器件 IGBT 的并联模型,该模型为 MMC 换流阀损耗的近似估算提供了理论基础。文献[10]推导了开关器件的电流平均值和有效值计算方法,研究了开关器件的结温变化特点并给出了计算结温的方法。文献[11]给出了半桥子模块通态和开关损耗的计算方法,并基于其提出的换流阀子模块热模型,给出了 MMC 的可靠性分析和寿命评估的数据支撑。文献[12]采用数据拟合的方法得到了便于工程应用的 MMC 损耗计算公式,并针对厦门柔性直流输电工程计算结果进行了分析对比。文献[13]在调研电力电子设备损耗测量技术的基础上,提出了 MMC 换流阀功率模块损耗测量试验方法,为柔性直流工程中功率模块损耗测试提供了参考。文献[14]对 MMC 在正弦脉宽调制方式下子模块上下管开关器件的投入概率进行分析,推导了上下管开关器件等效电流的表达式,解析出上下管开关器件的平均电流和有效电流。文献[15]对比分析了采用 4500 V/1500 A 和 4500 V/3000 A 器件的情况下,4 种适用于 $\pm 500$  kV/3000 MW 柔性直流输电换流器的组合式 MMC 拓扑损耗特性。文献[16]在现有解析计算方法的基础上,进一步精确推导得到涵盖系统工况及

器件特性的损耗计算通用表达式。文献[17]针对控制环节中加入二次环流抑制和三倍频电压注入的半桥-全桥子模块混合型 MMC,对换流阀的损耗进行了分类并给出了计算方法。文献[18]提出了一种适用于多种子模块拓扑,能够准确计算不同均压策略、不同运行工况下的换流阀损耗的方法,尤其解决了排序算法下附加开关损耗计算困难的问题。文献[19]推导了叠加三次谐波后换流阀的损耗计算公式,详细分析了三次谐波叠加率对换流阀损耗的影响。

海上风电柔性直流送出已成为研究热点,但关于海上风电柔性直流输电系统 MMC 换流阀损耗的研究较少,且现有文献没有较为系统地分析换流阀损耗的影响因素和优化措施。因此,下面基于目前较为常见的输电容量为 1000 MW 的海上风电柔性直流送出工程及其主回路参数和常用的半桥子模块拓扑,研究了海上风电柔性直流送出工程换流阀损耗的计算方法和原理,计算了 MMC 换流阀损耗,并研究了 MMC 换流阀损耗影响因素,给出了减小损耗的优化建议。

## 1 海上风电柔性直流送出系统拓扑结构与参数

用于远距离大规模海上风电并网的柔性直流常用系统接线如图 1 所示。对于容量为 1000 MW 的海上风电柔性直流送出工程,一般均采用对称单极结构,直流极线电压多采用 $\pm 320$  kV。目前常用的海上风电柔性直流送出系统总体包含以下几个部分:海上风电场、海上升压站(若采用 66 kV 直接接入则无海上升压站)、海上换流站、直流海缆、陆上换流站、陆上交流系统。运行方式为:风电场电能汇集后,经海上升压站升压至 220 kV,由 220 kV 交流海缆送至海上柔性直流整流站;再通过高压直流海缆送至陆上柔性直流逆变站;最后,逆变为 500 kV 交流电接入陆上电网系统。

对于直流极线电压为 $\pm 320$  kV,输电容量为 1000 MW 的海上风电柔性直流输电系统,换流站主设备参数如表 1 所示。

## 2 MMC 换流阀损耗计算方法

关于 MMC 换流阀损耗计算,已有 IEC 标准予

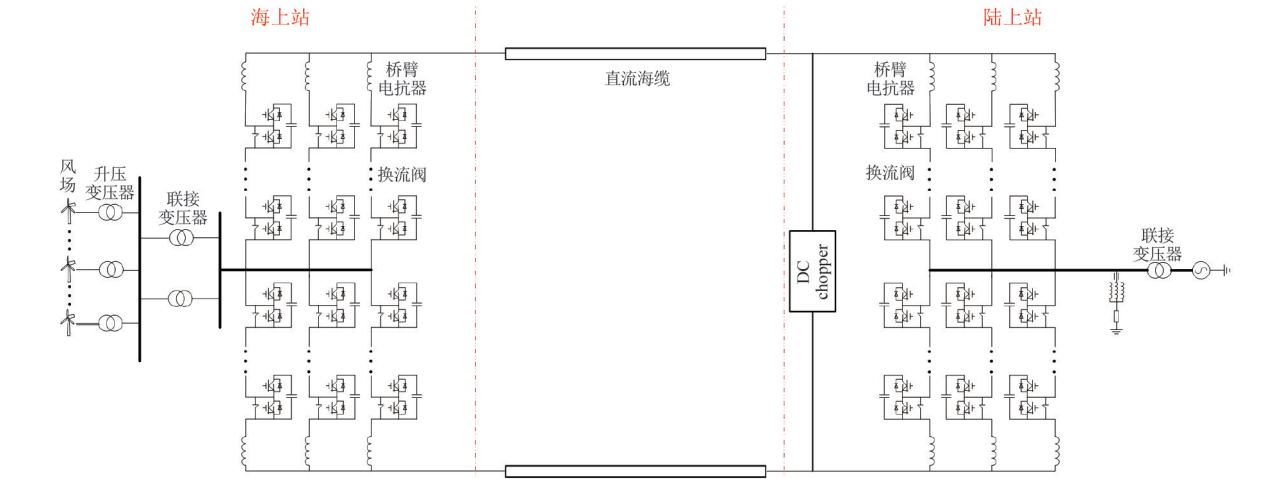


图 1 海上风电柔性直流输电系统拓扑

| 表 1 ±320 kV/1000 MW 换流站主设备参数 |         |
|------------------------------|---------|
| 参数                           | 数值      |
| 额定有功容量/MW                    | 1000    |
| 额定无功容量/Mvar                  | 300     |
| 额定直流电压/kV                    | ±320    |
| 网侧额定电压/kV                    | 525/230 |
| 阀侧额定电压/kV                    | 333     |
| 每桥臂子模块数                      | 305     |
| 子模块冗余度/%                     | 8       |
| 桥臂电抗器电感/mH                   | 100     |
| 子模块电容电压/kV                   | 2.1     |
| 模块电容/mF                      | 9       |

以规定,参考 IEC 62751-2:2014。MMC 换流阀总损耗包含 9 个部分,各部分损耗计算方法如下:

- 1) IGBT 导通损耗  $P_{V1}$
- 子模块中 IGBT 的通态损耗是其内部 T1 和 T2 两个 IGBT 通态损耗之和,如式(1)所示。

$$P_{V1} = \sum_{j=1}^{N_{tc}} (V_{OT} \cdot I_{T1av-j} + R_{OT} \cdot I_{T1rms-j}^2 + V_{OT} \cdot I_{T2av-j} + R_{OT} \cdot I_{T2rms-j}^2)$$

(1)

式中: $N_{tc}$ 为 MMC 换流阀子模块总数; $V_{OT}$ 为 IGBT 平均阈值电压; $R_{OT}$ 为 IGBT 平均斜率电阻; $I_{T1av-j}$ 为子模块  $j$  中的 T1 平均电流; $I_{T2av-j}$ 为子模块  $j$  中的 T2 平均电流; $I_{T1rms-j}$ 为子模块  $j$  中的 T1 电流有效值; $I_{T2rms-j}$ 为子模块  $j$  中的 T2 电流有效值。

从式(1)可以看出,影响 IGBT 导通损耗的两个重要器件参数是  $R_{OT}$  和  $V_{OT}$ ,可由 IGBT 的  $V_{CE}-I_C$  曲线计算而得,如图 2 所示。

- 2) 二极管导通损耗  $P_{V2}$

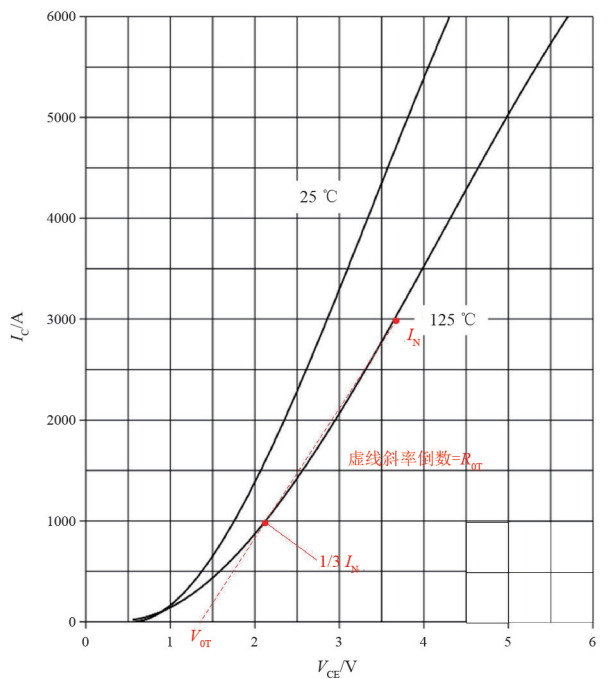


图 2  $V_{CE}-I_C$  典型关系曲线

- 反并联二极管 D1 和 D2 的导通损耗计算公式为
- $$P_{V2} = \sum_{j=1}^{N_{tc}} (V_{OD} \cdot I_{D1av-j} + R_{OD} \cdot I_{D1rms-j}^2 + V_{OD} \cdot I_{D2av-j} + R_{OD} \cdot I_{D2rms-j}^2)$$
- (2)
- 式中: $V_{OD}$ 为二极管平均阈值电压; $R_{OD}$ 为二极管平均斜率电阻; $I_{D1av-j}$ 为子模块  $j$  中的 D1 平均电流; $I_{D2av-j}$ 为子模块  $j$  中的 D2 平均电流; $I_{D1rms-j}$ 为子模块  $j$  中的 D1 电流有效值; $I_{D2rms-j}$ 为子模块  $j$  中的 D2 电流有效值。
- 与 IGBT 类似,二极管的损耗受  $R_{OD}$  和  $V_{OD}$  的影响,这两个参数可由器件的  $V_F-I_F$  曲线计算而得,计算方法与 IGBT 类似,如图 2 所示。



### 3) 其他导通损耗 $P_{V3}$

在 MMC 换流阀中,  $P_{V3}$  一般指连接铜排或导线等的电阻造成的损耗, 数值很小, 一般可以忽略不计。

### 4) 与直流电压相关的损耗 $P_{V4}$

对于 MMC 换流阀,  $P_{V4}$  一般为与子模块电容并联的均压电阻的损耗。

### 5) 直流电容损耗 $P_{V5}$

子模块内部的直流电容器的损耗由电容器内部金属化膜电极损耗、内部引线损耗和电介质损耗构成, 该部分损耗的等效电阻可由金属化膜电容器的等效串联电阻 (equivalent series resistance, ESR) 表示。

### 6) IGBT 开关损耗 $P_{V6}$ 和二极管理关断损耗 $P_{V7}$

开关损耗是器件导通和关断过程中的动态损耗。IGBT 导通和关断的过程也都是非理想的, 都分别有一个电压下降电流上升和电流上升电压下降的短暂重叠过程, 电压电流的乘积导致能量的损耗, 也就是 IGBT 的开关损耗。

IGBT 的开关总损耗为开通能量  $E_{on}$  和关断能量  $E_{off}$  之和, 如式(3)所示。

$$P_{V6} = \frac{1}{t_i} \times \sum_{j=1}^{N_{tc}} \sum_{k=1}^{N_s} (E_{on,T1,j,k} + E_{on,T2,j,k} + E_{off,T1,j,k} + E_{off,T2,j,k}) \quad (3)$$

式中:  $N_s$  为在积分时段  $t_i$  内每个 MMC 阀所经受的开关周期 (开通或关断) 次数;  $E_{on,T1,j,k}$  为子模块  $j$  中的 T1 在第  $k$  个开通事件中的开通能量损耗;  $E_{on,T2,j,k}$  为子模块  $j$  中的 T2 在第  $k$  个开通事件中的开通能量损耗;  $E_{off,T1,j,k}$  为子模块  $j$  中的 T1 在第  $k$  个关断事件中的关断能量损耗;  $E_{off,T2,j,k}$  为子模块  $j$  中的 T2 在第  $k$  个关断事件中的关断能量损耗;  $t_i$  为仿真中积分时间 (不小于 1 s)。

二极管的关断总损耗为阀中所有子模块中的 D1 和 D2 反向恢复能量  $E_{rec}$  的和, 积分时段为  $t_i$ , 如式(4)所示。

$$P_{V7} = \frac{1}{t_i} \times \sum_{j=1}^{N_{tc}} \sum_{k=1}^{N_s} (E_{rec,D1,j,k} + E_{rec,D2,j,k}) \quad (4)$$

式中:  $N_s$  为在积分时段  $t_i$  内每个 MMC 阀所经受的开关周期 (开通或关断) 次数;  $E_{rec,D1,j,k}$  为子模块  $j$  中的 D1 在第  $k$  个关断事件中的恢复能量损耗;  $E_{rec,D2,j,k}$  为子模块  $j$  中的 D2 在第  $k$  个关断事件中的恢复能量损耗。  $E_{on}$ 、 $E_{off}$  和  $E_{rec}$  的计算公式为

$$E_{on} = (a_1 + b_1 \cdot i_{on\_T} + c_1 \cdot i_{on\_T}^2) \frac{V_{SM}}{V_{CEN}} \cdot \rho_{Ton}$$

$$E_{off} = (a_2 + b_2 \cdot i_{off\_T} + c_2 \cdot i_{off\_T}^2) \frac{V_{SM}}{V_{CEN}} \cdot \rho_{Toff} \quad (5)$$

$$E_{rec} = (a_3 + b_3 \cdot i_{off\_D} + c_3 \cdot i_{off\_D}^2) \frac{V_{SM}}{V_{DN}} \cdot \rho_{Drec}$$

式中:  $V_{CEN}$ 、 $V_{DN}$  分别为 IGBT 和二极管的额定电压;  $V_{SM}$  为子模块电容电压;  $i_{on\_T}$ 、 $i_{off\_T}$  分别为 IGBT 开通和关断时刻的电流;  $i_{off\_D}$  为二极管关断时的电流;  $\rho_{Ton}$ 、 $\rho_{Toff}$ 、 $\rho_{Drec}$  为结温修正系数;  $a_1$ 、 $b_1$ 、 $c_1$ 、 $a_2$ 、 $b_2$ 、 $c_2$  可由 IGBT 器件开关能量特性曲线拟合得到;  $a_3$ 、 $b_3$ 、 $c_3$  可由二极管器件反向恢复能量特性曲线拟合得到。

图 3 为 4.5 kV/3 kA IGBT 开/关能量曲线。一般器件参数表会给出  $E_{on}-I_C$  曲线、 $E_{off}-I_C$  曲线, 但未给出  $E_{on}$  与集电极电流  $I_C$  的关系式及  $E_{off}$  与  $I_C$  的关系式。

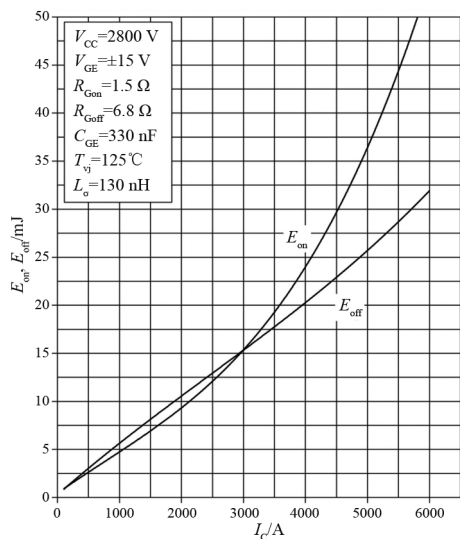


图 3 IGBT 开关能量函数曲线

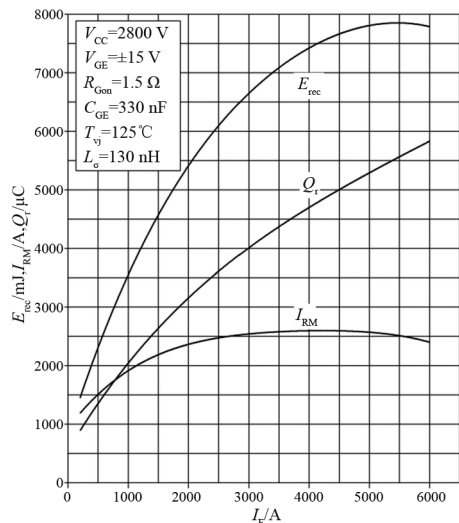


图 4 二极管反向恢复能量函数曲线

计算 IGBT 的开关损耗时, 需要利用曲线拟合得到参数  $a_1$ 、 $b_1$ 、 $c_1$  和  $a_2$ 、 $b_2$ 、 $c_2$ 。而二极管器件参数

表会给出关断能量与电流的关系曲线,如图 4 所示,故可以得到拟合系数  $a_3$ 、 $b_3$ 、 $c_3$ 。图 5 示例了对 IGBT 开通能量与关断能量拟合的结果;图 6 示例了对二极管关断能量拟合的结果。

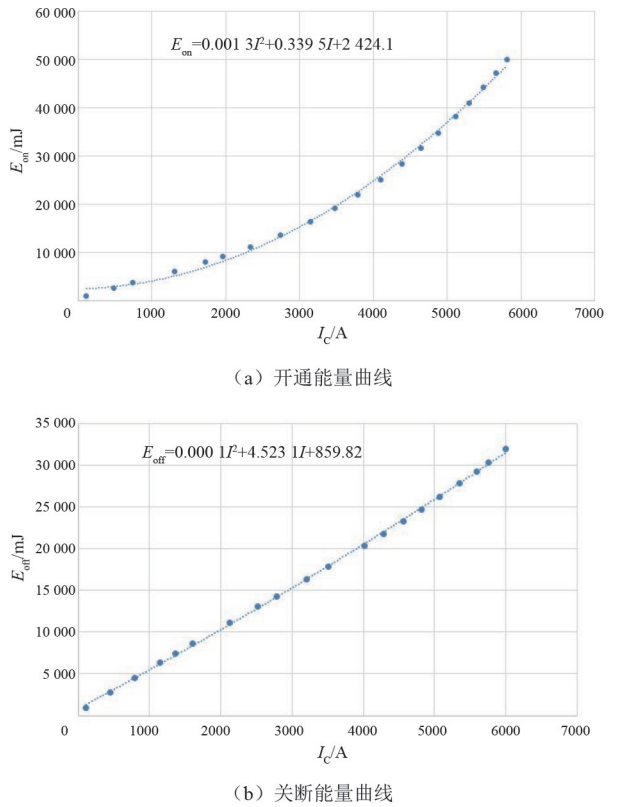
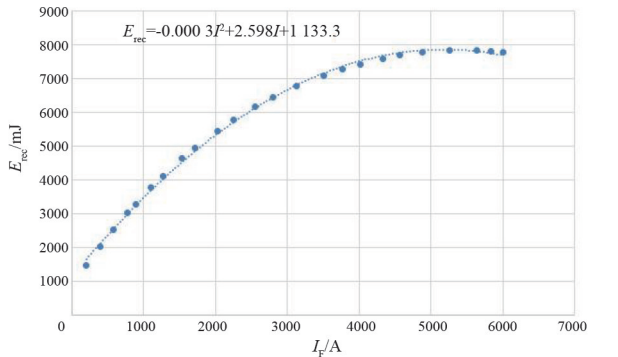


图 5 IGBT 开关能量函数曲线拟合



7) 缓冲电路损耗  $P_{V8}$  和功率模块控制板卡损耗  $P_{V9}$

目前的 MMC 换流阀通常不含缓冲电路,因此该部分损耗  $P_{V8}$  可不计。

MMC 阀功率模块控制板卡损耗包括 IGBT 驱动及其相关辅助电路电源、监测装置、测量装置等。在 MMC 换流阀中,阀电子电路统一由取能电源供电,取能电源由直流电容供电,通过测量取能电源的输出功率就可以得到  $P_{V9}$ 。

### 8) 器件结温修正

为精确评估阀损耗,需要得到阀损耗计算时刻的 PN 结温度。图 7 给出的热路图可用于推算 PN 结的温度,它将 IGBT 和二极管的损耗等值为两个热源,而 PN 结与器件外壳之间的热传递过程则用热阻  $Z_{th}(JC\_T)$  和  $Z_{th}(JC\_D)$  表示。图中: $Z_{th}(JC\_T)$ 、 $Z_{th}(CS\_T)$  分别为 IGBT 器件、底板及散热器间的热阻,可查询器件参数表获得; $Z_{th}(JC\_D)$ 、 $Z_{th}(CS\_D)$  分别为二极管器件、底板及散热器间的热阻,可查询器件参数表获得; $T_s$  为散热器温度。

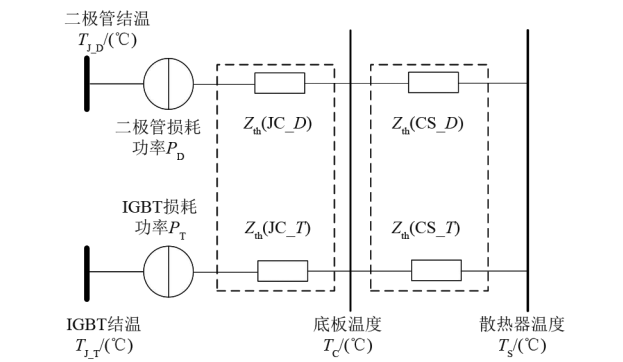


图 7 器件结温、底板和散热器间热路

由于开关器件工作温度与损耗功率存在耦合关系,因此需要采用迭代计算的方法获得。计算过程中,先给定开关器件初始结温  $T_{J,T}$ 、 $T_{J,D}$  (见图 7,初次计算设定值同底板温度),再根据图 8 步骤,得到修正温度替代初始温度,重复计算阀损耗直到两者相等,完成迭代过程确定损耗功率  $P_T$ 、 $P_D$  的终值,同时可得到开关器件的温度。

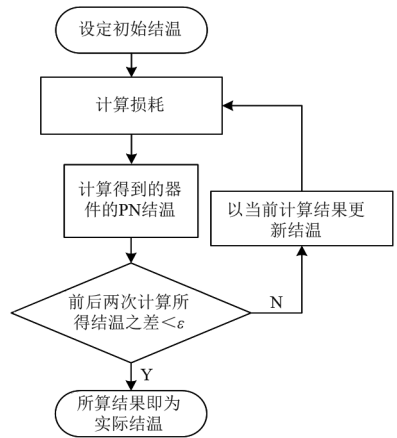


图 8 温度迭代流程

### 9) MMC 换流阀总损耗

通过上面各部分的损耗计算,最终可得到 MMC 换流阀的总损耗  $P_{MMC} = P_{V1} + P_{V2} + P_{V3} + P_{V4} + P_{V5} + P_{V6} + P_{V7} + P_{V8} + P_{V9}$ 。

### 3 MMC 换流阀损耗仿真计算

由于 MMC 换流阀的工作模式复杂,仅靠公式分析很难获得一些必要的输入参数,例如功率器件的电流和开关能量等,因此可采用仿真方法获得。仿真需要根据工程实际拓扑和主回路参数建立精确的电磁暂态仿真模型,控制策略也应与工程实际相符。

采用 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件,根据表 1 的换流站参数和图 1 的拓扑结构建立较为精确的电磁暂态仿真模型。通过仿真计算获得功率器件任意时刻的电压、电流和开关状态,作为计算的重要输入参数;同时考虑功率器件的结温,选取实际结温对应的阈值电压、斜率电阻以及开关能量等开关器件参数,参照 IEC 62751-2 标准给出的公式计算得到 MMC 换流阀的损耗。

MMC 换流阀在稳态运行时,可认为各桥臂子模块的损耗特性相同。为了准确计算子模块损耗,需对子模块投入和切除过程中的开关状态有准确的掌握,对于半桥子模块,其工作状态不同引起的不同损耗分布有 4 种情况,见图 9 和表 2 所示。

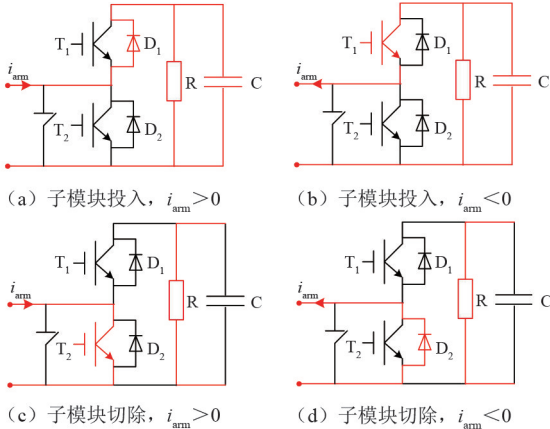


图 9 半桥子模块损耗分布

表 2 子模块开关能量

| 投切状态  | $i_{arm}>0$      | $i_{arm}<0$      |
|-------|------------------|------------------|
| 切除→投入 | $E_{off}$        | $E_{on}+E_{rec}$ |
| 投入→切除 | $E_{on}+E_{rec}$ | $E_{off}$        |

针对±320 kV/1000 MW 海上风电柔性直流送出工程换流站换流阀进行损耗计算,结果见表 3。计算中取换流器调制比为 0.85,子模块开关频率控制约为 100 Hz。

由表 3 的计算结果可见,在 MMC 换流阀子模

块损耗中,开关器件导通损耗约占 70%,开关器件开关损耗约占 22%,均压电阻和电容器损耗约占 8%,其余损耗部分基本可忽略。送受端换流站换流阀总损耗率为 1.078%。

表 3 ±320 kV/1000 MW 海上风电柔直送出工程换流站换流阀损耗

| 计算的损耗项目<br>(单个子模块损耗)    | 送端站     | 受端站     |
|-------------------------|---------|---------|
| IGBT 导通损耗( $P_{V1}$ )/W | 346.2   | 1 516.6 |
| 二极管导通损耗( $P_{V2}$ )/W   | 1 558.1 | 368.7   |
| 其他导通损耗( $P_{V3}$ )/W    | 10.3    | 10.5    |
| 直流电压产生损耗( $P_{V4}$ )/W  | 143.8   | 139.6   |
| 直流电容损耗( $P_{V5}$ )/W    | 64.2    | 73.7    |
| IGBT 开关损耗( $P_{V6}$ )/W | 435.1   | 450.6   |
| 二极管关断损耗( $P_{V7}$ )/W   | 149.3   | 143.3   |
| 模块控制板卡损耗( $P_{V9}$ )/W  | 4.0     | 4.0     |
| 阀损耗率/%                  | 0.543   | 0.534   |
| 送受端换流站阀总损耗率/%           | 1.078   |         |

同时,MMC 换流阀在整流状态时,二极管导通损耗占比较大;在逆变状态时,IGBT 导通损耗占比较大。该现象是由于整流和逆变状态下换流器桥臂电流直流偏置方向不同导致的。

### 4 MMC 换流阀损耗影响因素研究

针对海上风电柔直送出工程 MMC 换流阀,研究联接变压器阀侧三次谐波注入、换流器调制比和直流极线电压对换流阀损耗率的影响,提出降低换流阀损耗的建议。

#### 4.1 联接变压器阀侧三次谐波注入

图 10 给出了在±320 kV/1000 MW 送端换流站联接变压器阀侧注入三次谐波后,送端换流站损耗率计算值。

由图 10 计算结果可见,随着注入三次谐波幅值的增大,换流阀损耗率减小,主要体现为器件导通损耗和开关损耗的减小。与表 3 送端站损耗率 0.543%相比,注入三次谐波即可减小损耗率。因为在联接变压器阀侧投入三次电压谐波注入策略后,在直流极线电压不变的情况下,可以抬高换流器输出交流线电压有效值;在输送容量和直流电压不变的情况下,可以降低交流电流的有效值和平均值,从而可以降低子模块损耗。因此,在条件允许的情况下,应考虑在联接变压器阀侧注入三次电压谐波,从



而减小换流阀损耗率。

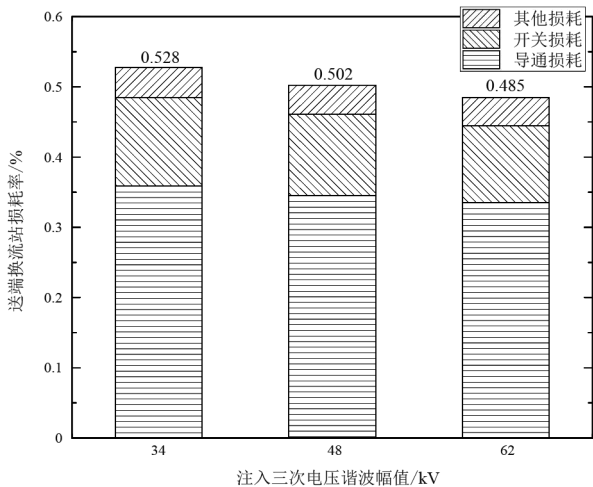


图 10 三次谐波注入对换流阀损耗的影响

4.2 改变调制比

图 11 给出了不同换流器调制比情况下,±320 kV/1000 MW 送端换流站换流阀损耗率的对比。

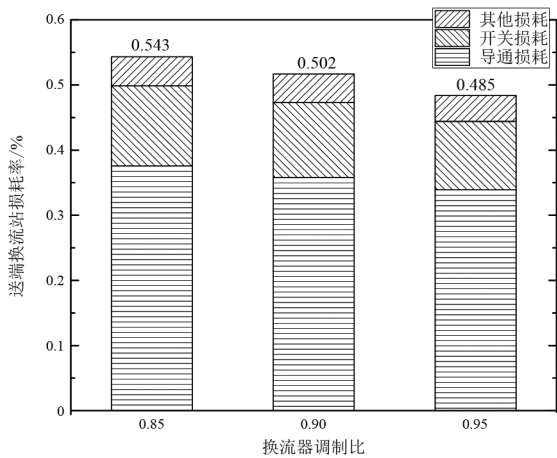


图 11 调制比对换流阀损耗的影响

由图 11 的计算结果可见,随着调制比的增大,桥臂电压升高的同时桥臂电流降低,桥臂电流减小后,流过开关器件的电流有效值和瞬时值均减小,进而通态损耗和开关损耗减小,使总损耗减小。因此,为了减小换流阀损耗,可采用较高的调制比。

4.3 直流极线电压的影响

在海上风电柔性直流送出工程的可行性研究阶段,会针对工程输电容量对直流电压等级进行选择。1000 MW 海上风电柔性直流送出可能采用的 3 个电压等级为±250 kV、±320 kV 和±400 kV。针对这 3 个电压进行换流阀损耗率计算,均采用对称单极接线和半桥子模块拓扑。±250 kV 和±400 kV 两种情况下的换流站主设备参数见表 6,±320 kV 的换流站主设备参数见表 1。

表 6 主设备参数

| 参数          | ±250 kV/1000 MW | ±400 kV/1000 MW |
|-------------|-----------------|-----------------|
|             | 换流站             | 换流站             |
| 额定有功容量/MW   | 1000            | 1000            |
| 额定无功容量/Mvar | 300             | 300             |
| 额定直流电压/kV   | ±250            | ±400            |
| 网侧额定电压/kV   | 525/230         | 525/230         |
| 阀侧额定电压/kV   | 260             | 416             |
| 每桥臂子模块数     | 238             | 381             |
| 子模块冗余度/%    | 8               | 8               |
| 桥臂电抗器电感/mH  | 65              | 165             |
| 子模块电容电压/kV  | 2.1             | 2.1             |
| 模块电容/mF     | 11.5            | 7.2             |

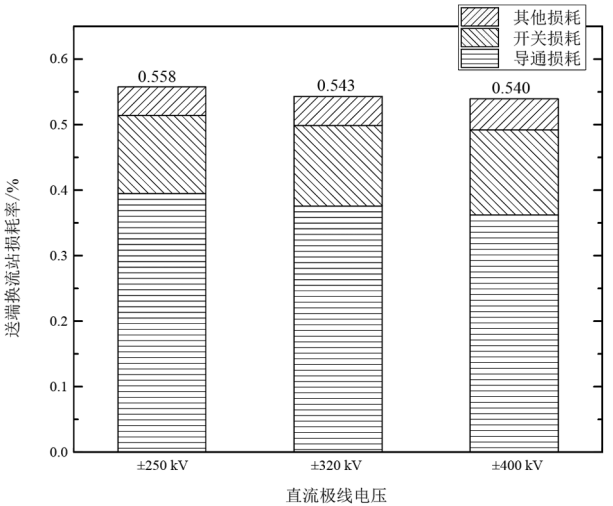


图 12 直流极线电压对换流阀损耗的影响

计算得到的送端站换流阀损耗情况如图 12 所示。3 种工况均取调制比为 0.85,不考虑三次谐波注入。

由图 12 计算结果可知,当输电容量一定时,柔性直流输电系统换流器的损耗与输电电压密切相关。当输电电压减小时,阀模块数减少,但是桥臂电流增大,单个子模块损耗增大;当输电电压增大时,模块数增大,但是桥臂电流减小,单个子模块损耗减小。在所计算的常用电压等级下,随着电压等级从±250 kV 增加至±400 kV,送端站换流阀损耗率从 0.558%减小到 0.540%。可见在给定输电容量的情况下,选择较高的直流电压等级可以降低换流阀损耗。

5 结 论

上面针对海上风电柔性直流送出工程,在 PSCAD/EMTDC 中建立电磁暂态仿真模型,进行了 MMC 换流阀损耗计算研究,主要工作和结论如下:

1)结合 IEC 62751-2,给出了 MMC 换流阀损耗计算方法和关键计算参数的获取方法。

2)针对典型直流电压和输送容量的±320 kV/1000 MW 海上风电柔性直流送出工程,建立电磁暂态仿真模型计算了送端换流站和受端换流站的损耗率,计算结果表明总损耗中器件导通损耗约占 70%,开关损耗约占 22%,均压电阻和电容器损耗约占 8%。送受端换流站换流阀总损耗率为 1.078%。

3)研究了 MMC 换流阀损耗率的影响因素,计算结果表明:联接变压器阀侧注入三次谐波电压幅值越大,换流阀损耗越小;换流器调制比越大,换流阀损耗越小;在给定量容的情况下,提高直流极线电压,可以降低换流阀损耗。

参考文献

[1] 刘卫东,李奇南,王轩,等. 大规模海上风电柔性直流输电技术应用现状和展望[J]. 中国电力,2020,53(7): 55-71.

[2] 李翔宇,ABEYNAYAKE G,姚良忠,等. 欧洲海上风电发展现状 & 前景[J]. 全球能源互联网,2019,2(2): 116-126.

[3] 时智勇,王彩霞,李琼慧. “十四五”中国海上风电发展关键问题[J]. 中国电力,2020,53(7):8-17.

[4] 彭穗,余浩,许亮,等. 海上风电场输电方式研究[J]. 电力勘测设计,2021(11):68-75.

[5] 沙志成,张丹,赵龙. 大规模海上风电并网方式的研究[J]. 电力与能源,2017,38(2):158-161.

[6] 范声芳. 模块化多电平变换器(MMC)若干关键技术研究[D]. 武汉:华中科技大学,2014.

[7] 刘建涛,王治华,王珂. 不同结构电压源换流器损耗对比分析[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(6): 105-110.

[8] 张哲任,徐政,薛英林. 基于分段解析公式的 MMC-HVDC 阀损耗计算方法[J]. 电力系统自动化,2013,34(6):109-116.

[9] ROHNER S, BERNET S, HILLER M, et al. Modulation, losses and semiconductor requirements of modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(8): 2633-2642.

[10] 李强,庞辉,贺之渊. 模块化多电平换流器损耗与结温的解析计算方法[J]. 电力系统自动化,2016,40(4): 85-91.

[11] 王希平,李志刚,姚芳. 模块化多电平换流阀 IGBT 器件功率损耗计算与结温探测[J]. 电工技术学报,2019,34(8):1636-1646.

[12] 易阳,叶荣,林章岁. 柔性直流输电系统损耗计算方法及其实测分析[J]. 电力建设,2016,37(6):125-133.

[13] 熊岩,杨柳,钟伟华,等. 柔性直流换流阀功率模块损耗测量与试验[J]. 南方电网技术,2020,14(11): 17-35.

[14] 王海田,汤广福,贺之渊,等. 模块化多电平换流器的损耗计算[J]. 电力系统自动化,2015,39(2):112-118.

[15] 杨立敏,李耀华,王平,等. 适用于±500 kV/3000 MW 柔性直流输电换流器的电路拓扑损耗特性研究[J]. 电工电能新技术,2017,36(6):1-8.

[16] 李标俊,向权舟,姚传涛,等. 柔直换流阀损耗解析计算及其误差分析[J]. 中国电力,2022,55(4):78-84.

[17] 赵宇含,王鑫,赵成勇,等. 半桥-全桥子模块混合型 MMC 的换流阀损耗分析方法[J]. 电网技术,2021,45(7):2847-2855.

[18] 罗永捷,宋勇辉,熊小伏,等. 高压大容量 MMC 换流阀损耗精确计算[J]. 中国电机工程学报,2020,40(23): 7730-7741.

[19] 荣飞,黄韬,饶宏,等. MMC 换流阀最优三次谐波注入方法研究[J]. 高压电器,2019,55(7):20-26.

作者简介:

李浩原(1987),男,博士,高级工程师,研究方向为柔性直流输电、换流站绝缘配合等;

彭开军(1970),男,教授级高级工程师,研究方向为柔性直流输电、电力工程设计及设计管理等;

王江天(1993),男,硕士,工程师,研究方向为柔性直流输电控制保护。

(收稿日期:2023-01-30)

(上接第 11 页)

[10] 郑雁翎,孙晓娟,李维新,等. 穿过不利散热区域地下电力电缆周期负荷因数的研究[J]. 高压电器,2022,58(5):128-134.

[11] 李长云,孙丰田. 计及套管内气-液介质流体特性的高压直流电缆终端优化模型研究[J]. 中国电机工程学报,2023,43(12):4871-4883.

[12] 刘英,陈佳美. 高压 XLPE 电缆阻水缓冲层电-热场分析及模拟烧蚀试验研究[J]. 中国电机工程学报,

2022,42(4):1260-1271.

[13] 邓显波,欧阳本红,孔祥海,等. 大截面高压电缆导体交流电阻的优化[J]. 高电压技术,2016,42(2): 522-527.

作者简介:

陈 莉(1985),女,硕士,研究方向为电气工程及其自动化;

邵千秋(1991),男,博士,研究方向为电缆缺陷检测。

(收稿日期:2023-02-15)

# 角钢塔连接螺栓考虑预紧力的 拉剪计算方法研究

鄢秀庆, 龚 涛, 刘翔云, 蒲 凡, 李 钟

(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610021)

**摘要:**角钢塔普通螺栓施工过程中规定了其施工紧固扭矩的下限值,但在抗剪设计时没有考虑施工紧固扭矩所产生的预紧力对其抗剪承载力的影响,计算表明目前的紧固扭矩值会使得设计偏于不安全。结合钢结构基本原理推导了输电塔普通受剪螺栓在预紧力作用下的抗剪剩余承载力比的计算方法,并结合精细化数值模拟论证了预紧力对普通螺栓抗剪承载力的影响。研究表明,预紧力越大,螺栓的抗剪承载力削弱越明显,近似呈二次抛物线关系;最终依据预紧力和抗剪承载力之间的关系,推荐了输电塔普通抗剪螺栓的紧固扭矩值,为工程设计提供了设计依据。

**关键词:**输电塔; 抗剪螺栓; 预紧力; 计算方法; 数值模拟

**中图分类号:** TM 753 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2023)05-0051-05

**DOI:** 10.16527/j.issn.1003-6954.20230508

## Research on Calculation Method of Connecting Bolts Used in Angle Steel Tower under Tension and Shear Action with Pre-tightening Force

YAN Xiuqing, GONG Tao, LIU Xiangyun, PU Fan, LI Zhong

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

**Abstract:** During the construction of angle steel towers, the lower limit value of tightening torque of bolts is specified, but the influence on its shear bearing capacity caused by tightening torque is not considered. The calculation shows that the current tightening torque value will reduce the shear bearing capacity. Combined with the basic principle of steel structure, the calculation method of residual shear bearing capacity ratio of common shearing bolts under pre-tightening force is deduced, which is proved by refined numerical simulation. The research shows that the larger the pre-tightening force is, the lower the shear bearing capacity is, which is approximate quadratic parabolic relationship. Finally, according to the relationship between pre-tightening force and shear bearing capacity, the tightening torque value of common shearing bolts for transmission towers is recommended, which provides a reference for the project design.

**Key words:** transmission tower; shearing bolts; pre-tightening force; calculation method; numerical simulation

## 0 引言

角钢塔一般采用螺栓连接,螺栓主要承受剪力作用。但 GB 50233—2014《110 kV~750 kV 架空输电线路施工及验收规范》<sup>[1]</sup> 基于拧紧及防松的目的,要求在施工时施加一定的扭矩,该扭矩将在螺杆内形成一定的拉力,在叠加剪力后使得螺栓处于拉剪受力状态。DL/T 5486—2020《架空输电线路杆

塔结构设计技术规程》<sup>[2]</sup> 未要求对螺栓进行拉剪受力的复核,仅给出了纯剪力的计算公式,导致计算结果偏于冒进。

民用钢结构领域的 JGJ 82—2011《钢结构高强度螺栓连接技术规程》<sup>[3]</sup> 仅规定了高强度螺栓的紧固扭矩值,对普通螺栓的紧固扭矩值并没有作明确规定;文献[4~7]主要针对高强度螺栓预紧力对其受剪影响进行了系统研究。计算表明,目前规范规定的紧固扭矩值会使得设计偏于不安全,主要是依



靠螺栓强度的安全系数进行抵抗。因此,很有必要研究紧固扭矩对普通螺栓受剪的影响。

下面结合钢结构设计原理<sup>[8]</sup>理论推导了输电塔普通受剪螺栓在预紧力作用下的抗剪剩余承载力比的计算方法,并结合有限元分析对该方法进行了论证。同时采用有限元精细化数值模拟分析了预紧力对普通螺栓抗剪承载力的影响,验证了理论推导结论;最终依据预紧力和抗剪承载力之间的关系,推荐了输电塔普通抗剪螺栓的紧固扭矩值,为工程设计提供了设计依据。

## 1 紧固扭矩对普通螺栓受剪的影响

### 1.1 紧固扭矩的取值

GB 50233—2014、DL/T 5486—2020 给出了受剪螺栓紧固扭矩的最小值,并注明了 M24 为 8.8 级螺栓,如表 1 所示。

表 1 常见规格螺栓的施工紧固扭矩值

| 螺栓规格 | 扭矩值/(N·m) |
|------|-----------|
| M16  | 80        |
| M20  | 100       |
| M24  | 250       |

国家电网公司企业标准 Q/GDW 10115—2022《110 kV~1000 kV 架空输电线路施工及验收规范》<sup>[8]</sup>第 9.1.7 条给出了 4.8 级、6.8 级角钢塔螺栓的最小紧固扭矩,如表 2 所示。

表 2 常见规格螺栓的施工紧固扭矩值

| 螺栓规格 | 4.8 级扭矩值/(N·m) | 6.8 级扭矩值/(N·m) |
|------|----------------|----------------|
| M16  | 80             | 80             |
| M20  | 100            | 160            |
| M24  | 250            | 280            |

特高压钢管杆塔法兰螺栓的最小紧固扭矩,如表 3 所示。

表 3 特高压工程推荐的施工紧固扭矩值

| 螺栓规格 | 6.8 级扭矩值/(N·m) | 8.8 级扭矩值/(N·m) |
|------|----------------|----------------|
| M16  | 80             | 110            |
| M20  | 160            | 220            |
| M24  | 280            | 380            |

表 1 至表 3 表明,对于 6.8 级 M16 螺栓,工程中规定的紧固扭矩值为 80 N·m;对于 6.8 级 M20 螺栓,工程中规定的紧固扭矩值为 100~160 N·m;对于 8.8 级 M24 螺栓,工程中规定的紧固扭矩值为 250~380 N·m。

### 1.2 施工预紧力的计算方法

依据《机械设计手册》<sup>[9]</sup>,普通螺栓预紧力  $P$  的计算方法为

$$P = \frac{T}{K \cdot d} \tag{1}$$

式中: $K$  为拧紧力矩系数,计算表明可近似取 0.2; $d$  为螺栓公称直径,mm; $T$  为紧固扭矩。

根据各规范紧固扭矩取值,反算预紧力如表 4 所示。

表 4 紧固扭矩的预紧力计算值

| 螺栓规格       | $T/(N \cdot m)$ | $P/kN$    | $\eta_t$  |
|------------|-----------------|-----------|-----------|
| M16(6.8 级) | 80              | 25.0      | 0.53      |
| M20(6.8 级) | 100~160         | 25.0~40.0 | 0.34~0.54 |
| M24(8.8 级) | 250~380         | 52.1~79.2 | 0.37~0.56 |

注: $\eta_t$  为预紧力与螺栓抗拉承载力设计值的比值, $\eta=P/N_t^b$ ;  $N_t^b$  为螺栓抗拉承载力设计值。

假定预紧力在输电塔普通螺栓的服役过程中一直存在,此时螺栓会承受拉剪耦合效应,这一定程度削弱了螺栓的抗剪作用,根据 GB 50014—2017《钢结构设计标准》<sup>[10]</sup>第 11.4.1 条规定,承受拉剪耦合作用时,普通螺栓的承载力应满足式(2)要求。

$$\sqrt{\left(\frac{V}{N_v^b}\right)^2 + \left(\frac{N}{N_t^b}\right)^2} \leq 1.0 \tag{2}$$

式中: $V$  为螺栓承受的剪力设计值; $N$  为螺栓承受的轴拉力设计值; $N_v^b$  为螺栓的抗剪承载力设计值; $N_t^b$  为螺栓的抗拉承载力设计值。

由式(2)可以推导出抗剪螺栓考虑预紧力后的剩余承载力比为

$$\beta_v = \frac{V}{N_v^b} \leq \sqrt{1.0 - \left(\frac{P}{N_t^b}\right)^2} \tag{3}$$

根据式(3)计算得到考虑预紧力后的抗剪剩余承载力比如表 5 所示。

表 5 考虑预紧力后的抗剪剩余承载力比

| 螺栓规格       | $P/kN$    | $\eta_t$  | $\beta_v$ |
|------------|-----------|-----------|-----------|
| M16(6.8 级) | 25.0      | 0.53      | 0.85      |
| M20(6.8 级) | 25.0~40.0 | 0.34~0.54 | 0.84~0.94 |
| M24(8.8 级) | 52.1~79.2 | 0.37~0.56 | 0.83~0.93 |

表 5 表明,由于预紧力的影响,受剪螺栓的抗剪剩余承载力比在 0.83~0.94 区间,承载力较纯剪时下降了 6%~17%,紧固扭矩越大,其抗剪剩余承载力越小。螺栓在实际受力时,由于连接板面镀锌与螺栓连接面存在摩擦。螺栓抗剪滑移时是一个缓慢

运动的过程,可以假定这种由于预紧力产生的摩擦力是一直存在,分担了一部分外部剪力,使得螺栓螺杆实际承载的剪切力减小了。镀锌连接面的摩擦系数 $\mu$ 近似取 0.15,结合 GB 50014—2017 高强度摩擦型螺栓的抗剪承载力计算形式,可以假定预紧力产生的摩擦力为

$$V_{\mu} = 0.9\mu P \tag{4}$$

考虑摩擦力后的抗剪剩余承载力比为

$$\beta_{\mu v} = \frac{V + V_{\mu}}{N_v^{rb}} = \sqrt{1.0 - \left(\frac{P}{N_t^b}\right)^2} + \frac{0.9\mu P}{N_v^{rb}} \leqslant 1.0 \tag{5}$$

考虑螺栓摩擦力后抗剪剩余承载力比如表 6 所示。

表 6 螺栓考虑摩擦力后抗剪剩余承载力比

| 螺栓规格       | $P/\text{kN}$ | $\eta_t$  | $V_{\mu}/\text{kN}$ | $\beta_{\mu v}$ |
|------------|---------------|-----------|---------------------|-----------------|
| M16(6.8 级) | 25.0          | 0.53      | 3.75                | 0.92            |
| M20(6.8 级) | 25.0~40.0     | 0.34~0.54 | 3.75~6.00           | 0.92~0.99       |
| M24(8.8 级) | 52.1~79.2     | 0.37~0.56 | 7.81~11.88          | 0.92~0.98       |

表 6 表明,考虑螺栓摩擦力后,剪切螺栓的抗剪剩余承载力比在 0.92~0.99 区间,仍小于 1.0,表明按照规范规定的紧固扭矩进行螺栓紧固后,所产生的预紧力对螺栓的抗剪承载力具有较大削减作用。而这种影响在结构设计中并没有考虑,主要是通过材料的分项系数来抵抗,从设计上来讲,这是偏于不安全的,降低了螺栓的可靠度。

2 数值模型验证

为进一步研究预紧力状态下受剪螺栓的抗剪性能,采用数值模型进行验证。采用板式双剪模型进行数值分析,为了避免螺栓的承压破坏,板件材料强度为 Q420,加载板厚度取 30 mm,固定板厚度取 15 mm,螺栓采用 8.8 级 M24,屈服强度取 640 MPa<sup>[11]</sup>,预紧力在螺杆中部截面对称施加,摩擦系数取 0.15,模型构造见图 1 所示。

2.1 数值模型

为了精确模拟螺栓的受力,螺栓与板之间采用接触约束,采用实体单元模拟;材料采用理想弹塑性本构;约束住约束板的左端,在板的右端施加拉伸荷载,进行几何非线性分析。数值模型如图 2 所示。

按照屈服强度计算出单颗螺栓的全截面塑性抗剪承载力为 289.5 kN,由此得到双剪模型的抗剪极

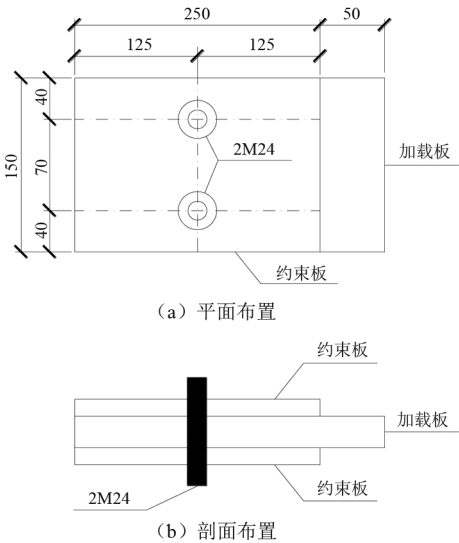


图 1 板式双剪模型构造

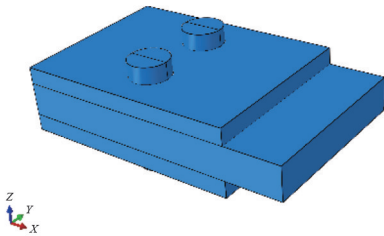


图 2 板式双剪模型

限承载力为 1158 kN,为了研究预紧力对螺栓抗剪承载力的影响,设计了 4 种加载工况,如表 7 所示。

表 7 工况信息

| 工况   | 加载工况   | 预紧力/kN | 摩擦系数 | 加载荷载/kN |
|------|--------|--------|------|---------|
| 工况 1 | 无预紧力摩擦 | 0      | 0.15 | 1500    |
| 工况 2 | 预紧力摩擦  | 10     | 0.15 | 1500    |
| 工况 3 | 预紧力摩擦  | 60     | 0.15 | 1500    |
| 工况 4 | 预紧力摩擦  | 120    | 0.15 | 1500    |

2.2 应力云图

在极限破坏状态下,双剪模型的整体应力云图如图 3 所示。

图 3 表明,极限破坏状态下,螺栓附近板的应力已经进入了塑性,螺杆大部分区域也进入了塑性,存在明显的剪切变形,螺栓最终被剪坏。

2.3 预紧力对螺栓抗剪承载力的影响

数值计算得到了所设计的 4 种加载工况下双剪模型抗剪承载力,如表 8 所示。

由表 8 可知,预紧力为 0 时,抗剪承载力为 1 005.28 kN;随着预紧力的增加,双剪模型的抗剪承载力逐渐减小,预紧力越大,这种减小趋势越明显,近似呈二次抛物线减小,如图 4 所示。

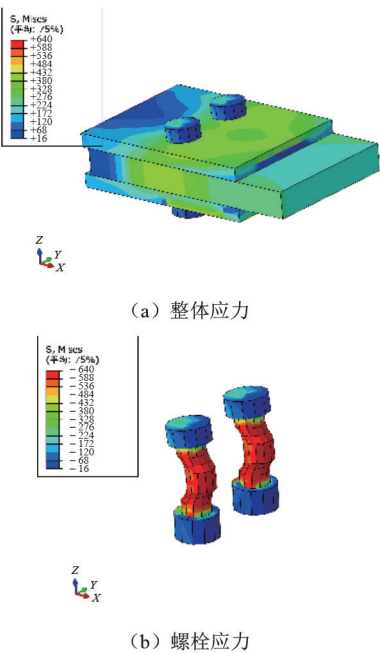


图 3 双剪模型的应力云图

表 8 各工况的极限抗剪承载力

| 工况   | 预紧力/kN | 有限元计算抗剪承载力/kN |
|------|--------|---------------|
| 工况 1 | 0      | 1 005.28      |
| 工况 2 | 10     | 985.74        |
| 工况 3 | 60     | 886.31        |
| 工况 4 | 120    | 698.71        |

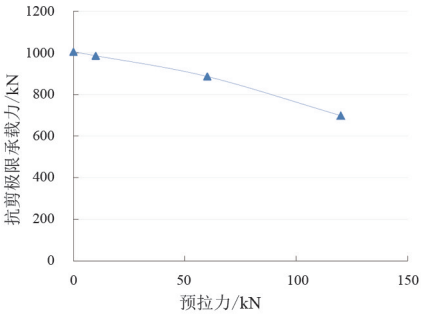


图 4 预紧力对螺栓抗剪承载力的影响

数值分析表明,随着预紧力增大,螺栓的抗剪承载力是减小的,这与第 1.2 节理论分析结论是一致的,且预紧力越大,螺栓抗剪承载力减小越明显。因此,工程设计中需要考虑预紧力对普通螺栓的抗剪承载力影响。

2.4 参数分析论证

为了综合对比理论计算公式的有效性和可靠性,进行参数分析,如表 9 所示。参数分析的变量包括螺栓型号、预紧力及摩擦系数,共计 36 组。

改变有限元模型的部分参数,进而计算 M16、M20 及 M24 螺栓在各工况下的抗剪剩余承载力比,

表 9 各工况的抗剪剩余承载力比

| 螺栓  | 摩擦系数 | 预紧力/<br>kN | 抗剪剩余承载力比 |       | $\gamma$ | 工况<br>序号 |
|-----|------|------------|----------|-------|----------|----------|
|     |      |            | 理论计算     | 有限元计算 |          |          |
| M16 | 0.1  | 0          | 1.00     | 1.00  | 1.00     | 1        |
|     |      | 10         | 1.00     | 0.99  | 1.01     | 2        |
|     |      | 20         | 0.94     | 0.96  | 0.98     | 3        |
|     |      | 30         | 0.83     | 0.86  | 0.96     | 4        |
|     | 0.15 | 0          | 1.00     | 1.00  | 1.00     | 5        |
|     |      | 10         | 1.00     | 1.00  | 1.00     | 6        |
|     |      | 20         | 0.96     | 0.97  | 0.99     | 7        |
|     |      | 30         | 0.85     | 0.89  | 0.96     | 8        |
|     | 0.2  | 0          | 1.00     | 1.00  | 1.00     | 9        |
|     |      | 10         | 1.00     | 1.00  | 1.00     | 10       |
|     |      | 20         | 0.98     | 0.98  | 1.00     | 11       |
|     |      | 30         | 0.88     | 0.91  | 0.97     | 12       |
| M20 | 0.1  | 0          | 1.00     | 1.00  | 1.00     | 13       |
|     |      | 20         | 0.99     | 0.99  | 1.00     | 14       |
|     |      | 40         | 0.89     | 0.92  | 0.96     | 15       |
|     |      | 60         | 0.65     | 0.71  | 0.91     | 16       |
|     | 0.15 | 0          | 1.00     | 1.00  | 1.00     | 17       |
|     |      | 20         | 1.00     | 1.00  | 1.00     | 18       |
|     |      | 40         | 0.91     | 0.94  | 0.97     | 19       |
|     |      | 60         | 0.69     | 0.73  | 0.94     | 20       |
|     | 0.2  | 0          | 1.00     | 1.00  | 1.00     | 21       |
|     |      | 20         | 1.00     | 1.00  | 1.00     | 22       |
|     |      | 40         | 0.93     | 0.96  | 0.97     | 23       |
|     |      | 60         | 0.72     | 0.76  | 0.95     | 24       |
| M24 | 0.1  | 0          | 1.00     | 1.00  | 1.00     | 25       |
|     |      | 40         | 0.98     | 0.99  | 0.99     | 26       |
|     |      | 80         | 0.87     | 0.92  | 0.95     | 27       |
|     |      | 120        | 0.60     | 0.66  | 0.91     | 28       |
|     | 0.15 | 0          | 1.00     | 1.00  | 1.00     | 29       |
|     |      | 40         | 1.00     | 1.00  | 1.00     | 30       |
|     |      | 80         | 0.90     | 0.95  | 0.95     | 31       |
|     |      | 120        | 0.64     | 0.72  | 0.89     | 32       |
|     | 0.2  | 0          | 1.00     | 1.00  | 1.00     | 33       |
|     |      | 40         | 1.00     | 1.00  | 1.00     | 34       |
|     |      | 80         | 0.92     | 0.97  | 0.95     | 35       |
|     |      | 120        | 0.68     | 0.75  | 0.90     | 36       |

并定义  $\gamma$  为理论计算与有限元计算抗剪剩余承载力比的比值,作出各工况下的  $\gamma$  如图 5 所示。可以看出:理论计算抗剪剩余承载力比略大于有限元计算抗剪剩余承载力比,且保证率约为 97%,整体吻合良好。

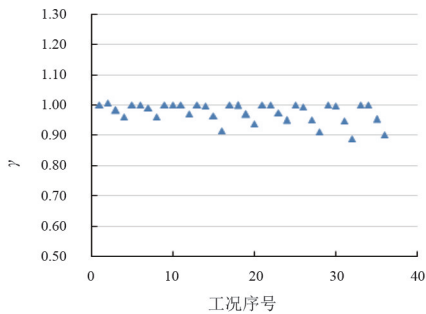


图 5 各工况的理论计算与有限元计算抗剪剩余承载力比的比值

3 普通螺栓紧固扭矩取值推荐

理论推导和数值研究结论表明,预紧力对普通螺栓抗剪承载力存在一定的影响,预紧力越大,其抗剪承载力削弱越明显。目前输电塔普通螺栓在抗剪设计时,并没有考虑紧固扭矩所产生的预紧力影响。计算表明,按照现有标准规定的紧固扭矩进行螺栓拧紧,其产生的预紧力对设计来说是偏于不安全的,因此有必要重新推荐普通螺栓的紧固扭矩值,保证设计的可靠性。

按照式(5)计算 6.8 级 M16、6.8 级 M20 和 8.8 级 M24 螺栓在不同预紧力下的螺栓抗剪剩余承载力比,如图 6 所示。

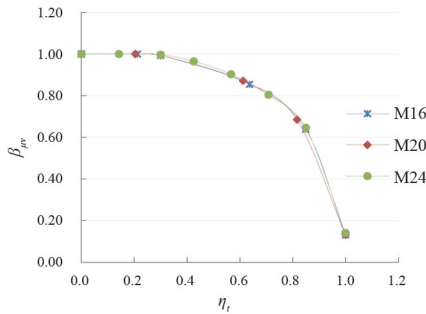


图 6 预紧力对螺栓抗剪剩余承载力比的影响

图 6 表明,预紧力越大,螺栓抗剪剩余承载力比越低,近似呈二次抛物线关系。 $\eta_t$  不大于 0.3 时,可不考虑预紧力对螺栓受剪力的影响。同时,文献[3]中关于承压型螺栓,将其分为适度拧紧型和完全预紧型,适度拧紧型为采用扳手拧紧达到连接面紧密结合的目的,主要用于受拉或拉剪组合螺栓,与输电塔受剪普通螺栓受力一致。因此,对于输电塔受剪普通螺栓,建议结合文献[3]的规定,以观察为主,同时施加扭矩时的预紧力不超过设计抗拉承载力的 30%。推荐施工紧固扭矩如表 10 所示,施工过程中

紧固扭矩值应不大于表 10 中的值。

表 10 输电塔普通螺栓紧固扭矩推荐值

| 螺栓规格       | 扭矩/<br>(N · m) | 预紧力/<br>kN | 预紧力/抗<br>拉强度 | 剪力/螺栓<br>抗剪力 |
|------------|----------------|------------|--------------|--------------|
| M16(6.8 级) | 35             | 10.9       | 0.23         | 1.00         |
| M20(6.8 级) | 70             | 17.5       | 0.24         | 1.00         |
| M24(8.8 级) | 180            | 37.5       | 0.27         | 1.00         |

4 结 论

上面结合钢结构基本原理推导了输电塔普通受剪螺栓在预紧力作用下的抗剪剩余承载力比计算方法,并结合有限元分析对该方法进行了论证;结合精细化数值模拟论证了预紧力对普通螺栓抗剪承载力的影响,验证了理论分析的结果;最终依据预紧力和抗剪承载力之间的关系,推荐了输电塔普通抗剪螺栓的紧固扭矩值,为工程设计提供了设计依据,具有一定的工程价值。主要研究结论如下:

1)总结了目前各标准对于普通螺栓紧固扭矩的相关规定。各标准对于 M20、M24 要求差异较大,产生的预紧力占螺栓抗拉承载力比例较高。分析并提出了预紧力对普通螺栓抗剪承载力的影响。

2)结合钢结构设计原理推导了普通螺栓在预紧力作用下的抗剪剩余承载力比计算方法。结果表明,考虑预紧力及板件表面摩擦力后,剪切螺栓的抗剪剩余承载力比在 0.92~0.99 区间,采用有限元参数分析,论证了这一分析结论。

3)结合精细数值模拟分析论证了预紧力对普通螺栓抗剪承载力的影响。研究表明,预紧力会影响普通螺栓的抗剪承载力,预紧力越大,抗剪承载力减小越明显,近似呈二次抛物线关系。

4)计算表明, $\eta_t$  不大于 0.3 时,可不考虑预紧力对螺栓抗剪承载力的影响。

5)基于研究结论和文献[3]关于螺栓的相关紧固要求,推荐了输电塔施工过程中普通螺栓紧固扭矩值。

参考文献

[1] 中国电力企业联合会.110 kV~750 kV 架空输电线路施工及验收规范:GB 50233—2014[S].北京:中国计划出版社,2015.

[2] 能源行业电网设计标准化技术委员会.架空输电线路杆塔结构设计技术规程:DL/T 5486—2020[S].北京:中国计划出版社,2021.

(下转第 67 页)



# 基于 LSTM 模型的四川省建筑业电气化率预测研究

魏 阳<sup>1</sup>, 胡彭超<sup>2</sup>, 刘洪利<sup>1</sup>, 陈玉敏<sup>1</sup>, 刘雪原<sup>1</sup>, 刘 畅<sup>3</sup>

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;

2. 四川省建设工程消防和勘察设计技术中心, 四川 成都 610042;

3. 四川省新型电力系统研究院有限公司, 四川 成都 610095)

**摘 要:**伴随着建筑总量的不断攀升,建筑电气化已经成为中国建筑业实现“双碳”目标的关键所在。针对现有文献较少关注建筑电气化率测算和预测的不足,结合建筑电气化率的定义,从建筑业终端电气化率和建筑业终端运行电气化率两个方面构建了测算公式。在完成 2010—2020 年四川省建筑电气化率测算的基础上,运用长短期记忆模型,对 2021—2030 年四川省建筑电气化率进行了预测。研究结果可为四川省建筑业电气化水平的评估及其“双碳”方案的实现提供有益参考。

**关键词:**“双碳”目标; 建筑业; 电气化率; LSTM 模型

**中图分类号:** TU 831 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2023)05-0056-06

**DOI:** 10.16527/j.issn.1003-6954.20230509

## Prediction on Electrification Rate of Construction Industry in Sichuan Province Based on LSTM Model

WEI Yang<sup>1</sup>, HU Pengchao<sup>2</sup>, LIU Hongli<sup>1</sup>, CHEN Yumin<sup>1</sup>, LIU Xueyuan<sup>1</sup>, LIU Chang<sup>3</sup>

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

2. Sichuan Construction Engineering Fire Protection and Survey Design Technology

Center, Chengdu 610042, Sichuan, China; 3. Sichuan New Power System

Research Institute Co., Ltd., Chengdu 610095, Sichuan, China)

**Abstract:** With the continuous increase in the total number of buildings, electrification has become the key to achieving the "dual carbon" goal for construction industry in China. In view of less attention paid to the calculation and prediction of electrification rate of construction industry in the existing literature, the calculation formulas based on the definition of building electrification rate is constructed from two aspects: the terminal electrification rate of construction industry and the terminal operation electrification rate of construction industry. Based on the calculation of electrification rate of construction industry from 2010 to 2020 in Sichuan province, the long short-term memory (LSTM) model is used to predict its electrification rate from 2021 to 2030. The above research can provide useful references for the evaluation of electrification level of construction industry in Sichuan province and the implementation of "dual carbon" plan.

**Key words:** "dual carbon" goal; construction industry; electrification rate; long short-term memory model

## 0 引 言

自工业革命以来,受益于煤炭、石油等化石能源的广泛开采和利用,人类文明取得了长足的进步。

**基金项目:**四川省科技计划资助项目(2023NSFSC1987)

但与此同时,化石能源的大量消费也造成了二氧化碳排放量的持续增加,进而导致了全球气候变暖,这已经成为威胁人类生存与社会发展的首要环境问题。为应对上述问题带来的严峻挑战,近年来各国政府大力倡导“低碳经济”,并积极开展碳中和行动方案,推进节能减排降碳工作<sup>[1-2]</sup>。

中国作为负责任的大国,始终高度重视应对气候变化,在积极参与应对气候变化全球治理的同时,不断提高国家自主贡献力度。2020年9月,习近平主席向全世界庄严宣布了中国的“双碳”目标,更是彰显了中国坚持绿色低碳发展的决心和雄心<sup>[3]</sup>。随着国家和地方各项“双碳”政策的陆续出台,关于“双碳”目标的研究,逐渐成为了各界关注的焦点<sup>[4-5]</sup>。

“双碳”目标的实现离不开各行各业的共同努力,而建筑领域无疑是其中最为重要的产业部门之一。中国建筑节能协会建筑能耗与碳排放数据专业委员会的研究数据显示:2020年全国建筑全过程碳排放总量高达50.8亿吨CO<sub>2</sub>,占全国碳排放的50.9%。其中,建筑运行阶段碳排放为21.6亿吨CO<sub>2</sub>,占全国的21.7%<sup>[6]</sup>。显然,建筑业已成为中国碳排放大户。可以预见,未来随着中国城镇化进程的进一步加速,建筑业的碳排放也势必面临更大的压力。在此背景下,建筑业的绿色低碳发展已成为亟待解决的重要课题<sup>[7]</sup>。

从中国发布的《2030年前碳达峰行动方案》<sup>[8]</sup>来看,改善建筑用能结构和用能效率,提升建筑终端电气化水平,无疑是实现建筑行业碳中和目标的重要举措之一。文献[9-11]基于不同的数量分析模型,分维度考察了中国建筑业碳排放驱动因素。研究结果显示:用能结构和用能效率对建筑业碳排放具有重要影响。上述结论为中国建筑业电气化水平提升的必要性提供了有力的理论依据。随后,中国电力企业联合会研究显示,建筑电气化对建筑业实现碳中和贡献可达到30%<sup>[12]</sup>。进一步,文献[13]剖析了中国再电气化的内涵,并在此基础上结合中国现实基础,给出了工业、建筑、交通三大重点领域提升电气化水平的路径及建议。文献[14]在揭示电力对国家能源安全新战略重要性的基础上,围绕2035年和2050年两个时间点,给出了建筑电气化率提升的技术路径。文献[15]探讨了新形势下建筑等部门所面临的挑战,在此基础上评估了不同电气化方案的技术实现路径及其应用前景,并给出了针对性的发展措施与建议。

上述的理论研究,较好地揭示了中国建筑业电气化水平提升的动因、内涵与路径等,这为“双碳”目标下中国建筑业电气化提升策略的设计、路径与方案选择等提供了有益的参考。但同时应当看到,

现有文献较少关注于建筑业的电气化率测算与预测,这一定程度上也影响了建筑业电气化水平提升策略的针对性和差异性。事实上,一个区域的建筑业电气化率的测算与预测结果反映了该区域建筑业的整体电气化水平,而不同水平的建筑业电气化率往往亟需差异化的提升路径。目前,已有学者基于多元线性回归模型<sup>[16]</sup>、自回归移动平均模型<sup>[17]</sup>、神经网络模型<sup>[18]</sup>、长短期记忆(long short-term memory, LSTM)模型<sup>[19]</sup>等对特定情境下的建筑能耗进行了测算和预测,其中LSTM法更是在长序列问题预测上表现出强适用性而被广泛使用。因此,若能结合建筑电气化率指标公式完成测算,并利用LSTM模型对其未来趋势进行预测,那势必将更好地助力建筑业的绿色低碳发展。

综合分析,下面以四川省为对象,对其建筑电气化率测算与预测展开研究。研究结果将有助于更好地了解四川乃至西部地区建筑电气化发展现状及其趋势,进而可以为四川乃至西部地区城乡建设领域“双碳”方案的实现提供辅助决策参考。

## 1 LSTM 模型

### 1.1 基本介绍

在传统的神经网络(neural network, NN)模型中,层与层的节点之间保持着完全连通性,但每层内部的节点之间却没有任何连接,这导致传统的NN模型无法有效处理时间序列问题。在此背景下,循环神经网络(recurrent neural network, RNN)模型应运而生。与NN模型相比,RNN模型在隐藏层内部增加了节点之间的连接,因而在时间序列的演进方向上可以展现出递归性<sup>[20]</sup>。受益于其递归性特点,RNN模型表现出强大的短期记忆能力,在很长一段时间被视为是处理时间序列问题的有效方法。

但与此同时,随着所需处理时间序列长度的增加,过多的历史信息会导致RNN模型在训练时出现梯度消失、爆炸等问题,进而影响其预测的精准性<sup>[21]</sup>。LSTM模型对RNN模型进行了完善,除增加“细胞”状态外,还添加了一些“门”用以解决存储和遗忘时间序列信息,因而被认为是目前处理时间序列预测问题最适合的方法之一<sup>[22]</sup>。

### 1.2 结构与原理

从模型的结构来看,LSTM模型的关键是“细胞

状态”,它类似于传输带,可以让信息在序列连中实现有效的传递,如图 1 所示。具体而言,LSTM 模型的每个时间序列点,都存在一个记忆细胞,作用是赋予 LSTM 模型记忆选择的功能,使得 LSTM 模型可以在每个时间序列点自由选择相应的记忆。为实现上述功能,LSTM 模型在结构上增加了 4 个关键部分:1)输入门,决定哪些信息将被输入到记忆细胞中;2)遗忘门,决定哪些信息将被遗忘和忽略;3)细胞状态,决定记忆细胞保留哪些信息;4)输出门,决定哪些信息将会被输出到下一个时间序列点。

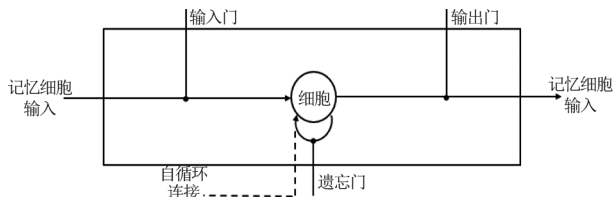


图 1 LSTM 基础结构

从模型运行流程来看,当利用 LSTM 模型开展建筑业电气化率预测时,首先,需要对原始的时间序列数据进行相应的处理,如时间序列数据异常值的辨识与处理、时间序列数据的归一化处理等;其次,在完成时间序列数据的处理后,进一步将时间序列数据转化为监督学习型数据,对于时间序列  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  而言,  $\{x_n\}$  为预测的目标值。为实现对时间序列数据的多步预测,在操作时,可采取逐点迭代的预测方式,将建筑业电气化率观测数据的滑动时间窗口宽度固定为  $m$ ,那对于  $\{x_n\}$  而言,时间序列  $\{x_{n-m}, x_{n-m+1}, \dots, x_{n-1}\}$  则是滑动时间窗口包含的所有观测数据。基于前述分析,当滑动时间窗口宽度为  $m$  时,对应的  $(n-m) \times m$  维输入矩阵  $X$  和  $(n-m)$  维输出矩阵  $Y$  可表示为:

$$X = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_m \\ x_2 & x_3 & \dots & x_{m+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{n-m} & x_{n-m+1} & \dots & x_{n-1} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$Y = \begin{bmatrix} x_{m+1} \\ x_{m+2} \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

最后,结合式(1)、式(2),将建筑业电气化率的历史测算数据代入 LSTM 模型进行数据训练。通过

训练结果比较,挑选出误差最小的值作为建筑业电气化率预测的参数。进一步,利用 LSTM 模型开展建筑业电气化率最终预测,即可得未来各时点的建筑业电气化率的数值预测结果。

## 2 四川省建筑业电气化率测算与预测

### 2.1 建筑业电气化率指标测算公式

参考 GB/T 4754—2017《国民经济行业分类》<sup>[23]</sup>以及前期理论研究成果,可将建筑电气化率分为建筑业终端电气化率和建筑业终端运行电气化率。

#### 2.1.1 建筑业终端电气化率

建筑业终端电气化率是指整个建筑业中终端电能消费在终端能源消费中所占比例。根据 GB/T 4754—2017 可知,建筑业主要分为房屋建筑业、土木工程建筑业、建筑安装业、建筑装饰、装修和其他建筑业。基于建筑电气化率定义,建筑业终端电气化率的测算公式为:

$$\text{建筑业终端电气化率} = \frac{\text{建筑业终端电能消费量}}{\text{建筑业终端能源消费量}} \quad (3)$$

#### 2.1.2 建筑业终端运行电气化率

建筑业终端运行电气化率是指各类建筑业终端运行中电能消费在终端能源消费中所占比重。按照建筑类型的不同,建筑业终端运行能源消费分为公共建筑终端能耗(批发、零售业和住宿、餐饮业和其他行业)、居住建筑终端能耗(居民生活消费)。基于建筑电气化率定义,建筑业终端运行电气化率的测算公式为:

$$\text{建筑业终端运行电气化率} = \frac{\text{建筑业终端运行电能消费量}}{\text{建筑业终端运行能源消费量}} \quad (4)$$

借鉴文献[24—25]的前期研究成果,可得建筑业终端运行电能消费量和建筑业终端运行能源消费量的测算公式为:

$$\text{建筑业终端运行电能消费量} = \text{批发、零售业和住宿、餐饮业终端运行电能消费量} + \text{其他行业终端运行电能消费量} + \text{居住建筑业终端运行电能消费量} \quad (5)$$

建筑业终端运行能源消费量 = 批发、零售业和住宿、餐饮业终端运行能源消费量(扣除 95%的汽油消费和 35%的柴油消费) + 其他行业终端运行能源消费量(扣除 95%的汽油消费和 35%的柴油消

费)+居住建筑业终端运行能源消费量(扣除汽油消费和 95%的柴油消费) (6)

2.2 2010—2020 年四川省建筑业电气化率测算

2.2.1 2010—2020 年四川省建筑业终端电气化率

查阅《中国能源统计年鉴》<sup>[26]</sup>数据,并根据折算标准煤系数,将四川省建筑业终端能源消费量折算为标准煤的实际消耗量,可得 2010—2020 年间四川省建筑业终端电能消费量(折算标准煤)和四川省建筑业终端能源消费量(折算标准煤)的测算结果,见图 2 所示。



图 2 2010—2020 年四川省建筑业终端电能和终端能源消费量(折算标准煤)

基于图 2 的数据结果,利用式(3)可得 2010—2020 年四川省建筑业终端电气化率的测算结果,如图 3 所示。从测算结果来看,2010—2020 年期间,四川省建筑业终端电气化率呈现出先下降后上升的 U 型发展态势,从 2010 年的 20.57%下降至 2017 年的 10.31%,再上升至 2020 年的 13.17%。2020 年四川省建筑业终端电气化率低于 2010 年 7.40 个百分点。

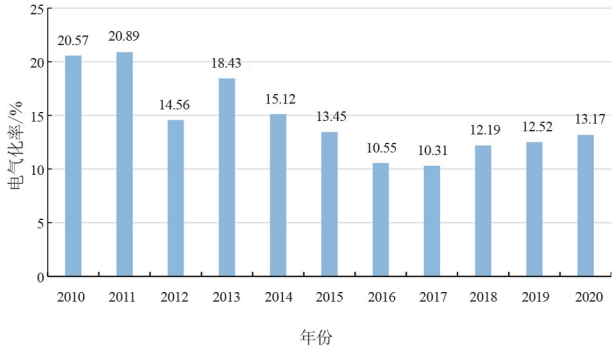


图 3 2010—2020 年四川省建筑业终端电气化率测算值

2.2.2 2010—2020 年四川省建筑业终端运行电气化率

查阅《中国能源统计年鉴》数据,并根据折算标准煤系数,将建筑业终端运行能源消费量折算为标准煤的实际消耗量,可得 2010—2020 年期间四川省建筑业终端运行电能消费量(折算标准煤)和四川

省建筑业终端运行能源消费量(折算标准煤)的测算结果,见图 4 所示。

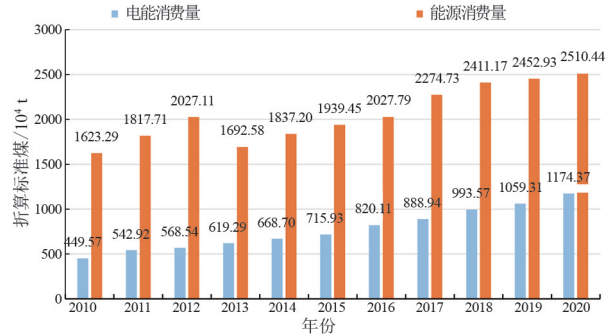


图 4 2010—2020 年四川省建筑业终端运行电能消费量和终端运行能源消费量(折算标准煤)

基于图 4 的数据结果,利用式(4)可得 2010—2020 年四川省建筑业终端运行电气化率测算结果,如图 5 所示。从测算结果来看,2010—2020 年期间,四川省建筑业终端运行电气化率逐年攀升,从 2010 年的 27.69%已提升至 2020 年 46.78%,累计提升 19.08 个百分点。从 2016 年开始,四川省建筑业终端运行电气化率突破 40%,进入新的上升阶段,2016—2020 年平均增速达 3.71%,表现出稳中有进的发展态势。

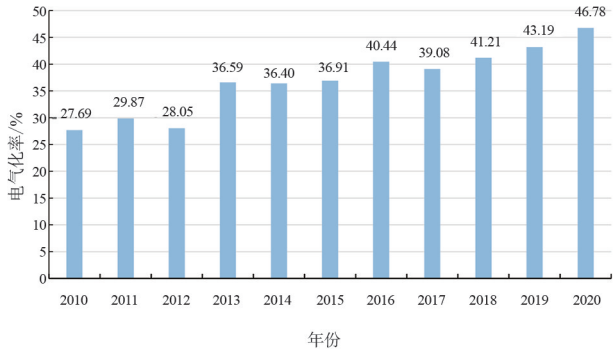


图 5 2010—2020 年四川省建筑业终端运行电气化率测算值

2.3 2021—2030 年四川省建筑业电气化率预测

将 2010—2020 年四川省建筑业终端电气化率和建筑业终端运行电气化率作为学习样本,各自代入 LSTM 模型进行训练。通过训练结果比较,挑选出各自误差最小的值作为其预测的参数。进一步,利用 LSTM 模型开展 2010—2020 年四川省建筑业终端电气化率和建筑业终端运行电气化率的预测,可得 2021—2030 年四川省建筑业终端电气化率和建筑业终端运行电气化率的预测数据,详见图 6。

由 LSTM 模型的预测结果来看,2021—2030 年期间,四川省建筑业终端电气化率和终端运行电气



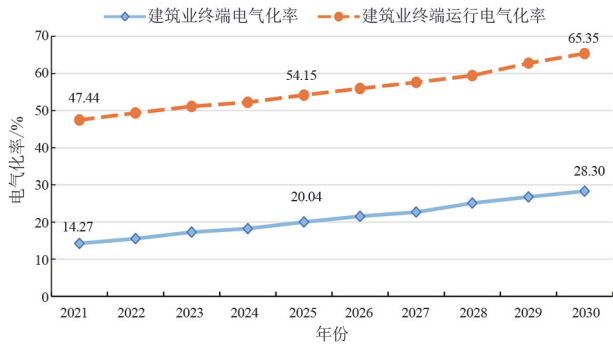


图 6 2021—2030 年四川省建筑业终端电气化率和终端运行电气化率预测值

化率均将呈稳步攀升的发展趋势。其中,四川省建筑业终端电气化率的年均增速约为 7.91%,四川省建筑业终端运行电气化率的年均增速约为 3.62%。基于上述增速,LSTM 模型预测:到 2025 年,四川省建筑业终端运行电气化率将达到 54.15%,接近完成住建部提出的“2025 年全国电能占建筑业终端运行能耗比例超过 55%”的目标;到 2030 年,四川省建筑业终端运行电气化率将达到 65.35%,顺利完成住建部提出的“2030 年全国电能占建筑业终端运行能耗比例超过 65%”的目标。

### 3 结 论

在“双碳”战略背景下,建筑电气化已经成为建筑业绿色低碳发展的重要抓手。上面针对现有文献较少关注建筑电气化率测算与预测,结合建筑电气化率的定义,从建筑业终端电气化率和建筑业终端运行电气化率两个方面构建了测算公式。在此基础上,运用《中国能源统计年鉴》中四川能源平衡表(实物量)数据,完成了 2010—2020 年四川省建筑电气化率的测算。并基于前述四川建筑业电气化率测算数据,运用 LSTM 模型,对四川省建筑电气化率的未来发展趋势进行了预测。结果显示:2021—2030 年期间,四川省建筑业终端电气化率和终端运行电气化率均将呈稳步攀升的发展态势;到 2025 年,四川省建筑业终端运行电气化率将达到 54.15%,接近完成住建部提出的 55% 的建筑业终端电气化率目标;到 2030 年,四川省建筑业终端运行电气化率将达到 65.35%,顺利完成住建部提出的 65% 的建筑业电气化率目标。

总体而言,所做研究为四川省建筑业电气化率的结果测算与趋势预测提供了一种工具和方法。从

结果来看,四川省建筑业在实现 2025 年短期电气化率目标方面还存在一定的压力,亟需加大政策和措施的推行力度,以确保全省建筑业“双碳”目标的顺利实现。

应当指出,虽然相比于传统的 NN 模型和 RNN 模型,LSTM 模型在适用性和预测精度上有独特的优势,但当前“双碳”环境的快速变化一定程度上会影响到时间序列数据的走势,进而会削弱基于 LSTM 模型的四川省建筑业电气化率预测结果的精准性。因此,在未来的研究中还需要更长的时间序列数据用以训练,以最大可能地减少预测误差。

### 参考文献

[1] MAHONE A, SUBIN Z, MANTEGNA G, et al. Achieving carbon neutrality in California[R]. New York: Energy and Environmental Economics, 2020.

[2] Natural Capital Partners. The carbon neutral protocol[R]. Europe: Natural Capital Partners, 2020.

[3] 习近平.在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[EB/OL].(2020-09-22)[2023-02-09].[http://www.xinhuanet.com/politics/leaders/2020-09/22/c\\_1126527647.htm](http://www.xinhuanet.com/politics/leaders/2020-09/22/c_1126527647.htm).

[4] 郭楷模,孙玉玲,裴惠娟,等.趋势观察:国际碳中和行动关键技术前沿热点与发展趋势[J].中国科学院院刊,2021,36(9):1111-1115.

[5] 于贵瑞,郝天象,朱剑兴.中国碳达峰、碳中和行动方略之探讨[J].中国科学院院刊,2022,37(4):423-434.

[6] 中国建筑节能协会建筑能耗与碳排放数据专业委员会.2022 中国建筑能耗与碳排放研究报告[R].重庆,2022.

[7] 刘俊伶,项启昕,王克,等.中国建筑部门中长期低碳发展路径[J].资源科学.2019,41(3):509-520.

[8] 国务院.国务院关于印发 2030 年前碳达峰行动方案的通知[EB/OL].(2021-10-24)[2023-02-09].[http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content\\_5644984.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2021-10/26/content_5644984.htm).

[9] 金柏辉,李玮,张荣霞,等.中国建筑业碳排放影响因素空间效应分析[J].科技管理研究,2018(4):238-245.

[10] HUO T F, CAO R J, DU H Y, et al. Nonlinear influence of urbanization on China's urban residential building carbon emissions: New evidence from panel threshold model[J]. Science of The Total Environment, 2021, 772: 145058.

[11] 袁润松,丰超.基于共同前沿生产理论的中国建筑业

碳排放驱动因素分解:2000—2020 年[J]. 中国人口·资源与环境, 2023, 33(1): 161-170.

[12] 中国电力企业联合会. 中国电气化年度发展报告 2021[R]. 北京, 2021.

[13] 舒印彪, 谢典, 赵良, 等. 碳中和目标下我国再电气化研究[J]. 中国工程科学, 2022, 24(3): 195-204.

[14] 洪博文, MIKETA Asami, GIELEN Dolf 等. 基于可再生能源的全球电气化路径与远景分析 [J]. 中国电力, 2020, 53(3): 159-166.

[15] 张运洲, 鲁刚, 王芃, 等. 能源安全新战略下能源清洁化率和终端电气化率提升路径分析 [J]. 中国电力, 2020, 53(2): 1-8.

[16] GUO Q, TIAN Z, DING Y, et al. An improved office building cooling load prediction model based on multivariable linear regression [J]. Energy and Buildings, 2015, 107: 445-455.

[17] SINGH S N, MOHAPATRA A. Repeated wavelet transform based ARIMA model for very short-term wind speed forecasting [J]. Renewable Energy, 2019, 136: 758-768.

[18] 于军琪, 杨思远, 赵安军, 等. 基于神经网络的建筑能耗混合预测模型[J]. 浙江大学学报(工学版), 2022, 56(6): 1220-1231.

[19] 魏光普, 康瑜, 范浩文, 等. 重工业城市建筑业碳

排放核算与预测研究[J]. 生态经济, 2022, 38(9): 43-48.

[20] ELMAN J L. Finding Time in Structure[J]. Cognitive Science, 1990, 14(2): 179-211.

[21] PASCANU R, MIKOLOV T, BENGIO Y. On the difficulty of training recurrent neural networks [C]. Proceedings of the 30th International Conference on Machine Learning, Atlanta: ICML, 2013: 1310-1318.

[22] HOCHREITER S, SCHMIDHUBER J. Long Short-term Memory [J]. Neural Computation, 1997, 9(8): 1735-1780.

[23] 中国标准化研究院.国民经济行业分类:GB/T 4754—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.

[24] 王庆一. 中国建筑能耗统计和计算研究[J]. 节能与环保, 2007(8): 9-10.

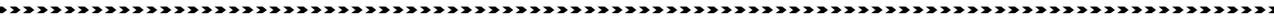
[25] 尹伟华, 李继峰, 高亚锋, 等. 中国近年来终端能源需求特征研究——基于能源平衡表数据[J]. 中国能源, 2019, 41(6): 27-31.

[26] 国家统计局能源统计司.中国能源统计年鉴 2021[M]. 北京:中国统计出版社,2021.

作者简介:

魏 阳(1987),女,硕士,高级经济师,主要从事双碳技术创新、大数据应用研究。

(收稿日期:2023-04-27)



(上接第 26 页)

[5] 段江伟. 大气压非平衡等离子体射流产生的活性氮氧化物( RONS)穿透生物组织的研究[D].武汉:华中科技大学,2020.

[6] 杨文斌,周江宁,李斌成,等.激光诱导氮气等离子体时间分辨光谱研究及温度和电子密度测量[J].物理学报,2017,66(9):267-274.

[7] 董丽芳,冉俊霞,尹增谦,等.大气压氩气介质阻挡放电中的电子激发温度[J].光谱学与光谱分析,2005(8): 1184-1186.

[8] 姜梦琦,杨勃行,郝胜智,等.朗缪尔三探针方法脉冲火花放电等离子体诊断[J].真空科学与技术学报,2022, 42(6):411-416.

[9] 杨晨.氩气等离子体射流光谱空间分布分析[J].中国设备工程,2022(3):16-18.

[10] 李作召.用于创面缝合的冷等离子体射流技术研究[D].沈阳:沈阳理工大学,2016.

[11] 迟钧文. 氮等离子体发生系统建模与优化控制[D]. 沈阳:沈阳理工大学,2022.

[12] 屠昕,陆胜勇,严建华,等.大气压直流氩等离子体光谱诊断研究[J].光谱学与光谱分析,2006(10):

1785-1789.

[13] 吴蓉,李燕,朱顺官,等.等离子体电子温度的发射光谱法诊断[J].光谱学与光谱分析,2008(4):731-735.

[14] 李磊,陈晓东,袁承勋,等.Ar 等离子体射流发射光谱诊断研究[J].发光学报,2019,40(8):1049-1054.

[15] CHRISTOVA M, DIMITRIJEVI M S, SAHAL-BRÉCHOT S. Stark broadening of Ar I spectral lines emitted in surface wave sustained discharges[J]. Memorie Della Societa Astronomica Italiana Supplementi, 2005, 7(238): 145-146.

[16] DONG L F, RAN J X, MAO Z G. Direct measurement of electron density in microdischarge at atmospheric pressure by Stark broadening [J]. Applied Physics Letters, 2005,86(16):161501.

作者简介:

张大伟(1975),男,硕士,副教授,研究方向为高压技术、等离子体技术;

陈晓颖(1996),女,硕士研究生,研究方向为先进仪器和网络化测控技术;

郝 莎(1989),女,博士,讲师,研究方向为气体放电、高电压绝缘技术。(收稿日期:2023-02-14)

# 强震区电网降雨型地质灾害暴发 识别模型研究

卜祥航, 刘 凡, 曹永兴, 范松海, 陈 凌, 吴 驰, 朱 轲, 薛志航

(国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

**摘 要:**以汶川地震强震区岷江干流及渔子溪沿岸的 42 个泥石流为研究对象,提取泥石流流域中物源存储量、暴发频率、流域面积等 7 个重要因子,运用 CRITIC 法建立电网降雨诱发泥石流灾害识别模型,将识别结果划分三级:15 条泥石流流域属于高易发性泥石流灾害;11 条泥石流流域属于中易发性泥石流灾害;16 条泥石流流域属于低易发性泥石流灾害。然后,选取研究区内 26 条泥石流曾经一次冲出物源量来验证电网泥石流灾害识别模型的可行性。最后,通过 ARCGIS 平台生成电网泥石流灾害易发生分区图。

**关键词:**降雨型泥石流; 识别模型; 电网

**中图分类号:**P 694 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2023)05-0062-06

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20230510

## Research on Identification Model of Rainfall Induced Geological Hazard Outbreak for Power Grid in Strong Earthquake Area

BU Xianghang, LIU Fan, CAO Yongxing, FAN Songhai, CHEN Ling, WU Chi, ZHU Ke, XUE Zhihang  
(State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:** Taking 42 debris flows along the main stream of Minjiang River and Yuzixi catchment in strong earthquake area of Wenchuan as research objects, seven specific characteristics, such as storage capacity of material sources, occurrence frequency, catchment area etc., are selected for the evaluation of debris flow scale. Critic method is adopted to set up the identification model of rainfall induced debris flow for power grid. And the identification results are divided into three levels: high, medium and low prone areas of debris flow are 15 catchment basins, 11 catchment basins and 16 catchment basins respectively. Then the once outflow volume of 26 debris flows in the study area is selected to verify the feasibility of the proposed identification model of rainfall induced debris flow for power grid. Finally, the zone map where debris flows are prone to occurrence are generated through ArcGIS platform.

**Key words:** rainfall induced debris flow; identification model; power grid

## 0 引 言

电网具有距离传输性和电流的高速性。电网一旦遭遇灾害事故,瞬间就可以造成大面积的停电损失,如汶川震区某 110 kV 输电线路 46 号塔处于大型灾害体上且塔体出现严重变形,一旦倒塌将会造成线路停运,使马尔康、金川等地全面失去供电。汶川地震诱发了至少 56 000 处崩塌、滑坡<sup>[1]</sup>,为泥石流的暴发提供了大量物源<sup>[2-3]</sup>。在震后多年的雨季

中,泥石流灾害频繁发生、表现活跃<sup>[4-5]</sup>,因此震后强降雨过程诱发的泥石流灾害已经成为震区最主要的地质灾害之一<sup>[6]</sup>。文献[7]分析地震灾区地质灾害已从震后的崩塌、滑坡为主转为了以泥石流为主。2010 年 8 月 14 日强降雨诱发岷江干流沿岸产生至少 22 条群发性泥石流,都汶高速被摧毁、阻断,其中映秀镇附近红椿沟暴发的泥石流灾害,使新建的映秀镇遭受特大洪涝灾害<sup>[7-8]</sup>;渔子溪沿岸肖家沟暴发大型泥石流,冲毁 303 省道、堵塞河流,下游的映秀镇遭受洪灾。2013 年 7 月 10 日岷江干流沿岸张家坪沟暴发大型泥石流,直接经济损失约 980 万元。可见,震区泥石流灾害对社会影响越来越大。

**基金项目:**国家重点研发计划“国家质量基础设施体系”专项项目(2022YFF0610603)



国内对泥石流敏感性的分析早在谭炳炎对泥石流严重程度的分析中体现出来<sup>[10]</sup>,国外学者早在1988年分析泥石流堆积厚度中,亦探讨了泥石流敏感性<sup>[11]</sup>。汶川地震之后,学者们对泥石流的活动特征及敏感性评价研究工作逐渐增多。文献[12-13]通过野外调查建立了震区泥石流冲出模型,并预测泥石流的相对活跃期至少5~10 a,影响时间可能更长;文献[14]通过层次分析法和信息熵的因子权重重组,对乌东德地区26条泥石流的敏感性进行分区;文献[15]利用地理信息系统GIS提取Catalan Pyrenees地区泥石流的地形地貌参数,并验证了逻辑回归法运用到敏感性评价中效果较好;文献[16]利用概率数学方法,建立了龙溪河流域48条泥石流的敏感性评价模型;文献[17]通过层次分析法,对四川苏保河流域泥石流进行敏感性分析。

随着交叉学科的发展,学者们也在尝试将不同数学方法引入到泥石流敏感性评价中,寻求效果更好的评价模型,同时促进了学者从不同角度对泥石流危险性研究的深入<sup>[18-20]</sup>。国内外对电网泥石流灾害研究较少,下面选取汶川强震区电网泥石流为研究对象,探索适合类似该地质环境的简捷、快速的电网降雨型地质灾害暴发识别评价模型。

## 1 研究区概况

研究区位于中国四川省汶川县映秀镇附近,面积约460 km<sup>2</sup>,地处四川盆地和青藏高原的过渡地带,主要为深切峡谷,高程约860~3950 m。研究区属起源于西北山区的岷江水系,区内的渔子溪为岷江一级支流。岷江干流沿岸基岩以花岗岩、震旦纪火成碎屑岩、石炭纪石灰岩和三叠纪砂岩为主<sup>[21]</sup>;渔子溪沿岸基岩以晋宁—澄江期岩浆岩、古生界志留系茂县群板岩夹千枚岩为主。构造上属于NE-SW走向的龙门山断层带<sup>[22]</sup>,其中造成汶川“5·12”地震的“映秀—北川”断裂带贯穿研究区东南部<sup>[23]</sup>,倾向北西,倾角60°~70°,最大垂直错距约5 m,最大水平错距约4.8 m。解译2011年高精度Worldview-2卫星影像获得映秀地区崩塌体数量共6684处(其中滑坡5290处,崩塌1394处),为岷江干流、渔子溪沿岸42条泥石流的发展提供了大量的物源,如图1所示。泥石流物源数量随距断层的距离逐渐减少,经统计约90%的泥石流物源分布在距断层12 km

范围内。

研究区属于典型的亚热带湿润季风气候,年平均温度约12.9℃。在过去的30年内年平均降雨量约1253.1 mm,最大年降雨量为1964年的1688 mm,最大降雨强度为1964年的269.8 mm/d。每年的降雨周期主要集中在6~9月,占了近全年降雨量的70%。

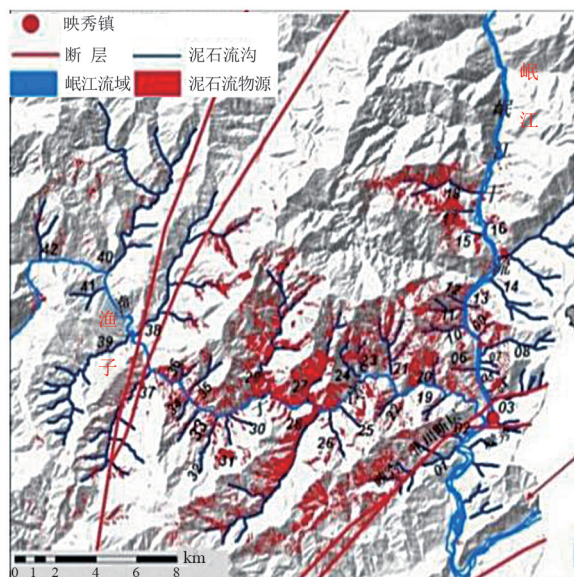


图1 研究区泥石流物源分布

## 2 评价方法—CRITIC 法原理

CRITIC (criteria importance though intercriteria correlation) 法<sup>[24]</sup>考虑各指标包含的信息量的同时,又以指标的对比强度和指标间的冲突性为基础,客观评价指标的权重。对比强度以标准差来表示,即相同指标不同类别间取值的差距;冲突性以各指标间的相关性来表示,两指标正相关性越强,冲突性越低。对比强度一定时,指标间冲突性与权重呈正相关关系。

1) 为得到标准化矩阵,通过式(1)对原始数据进行无量纲化处理。

$$x_{aj} = \frac{f_j(a) - f_j^*}{f_j^* - f_j^*} \quad (1)$$

式中: $x_{aj}$ 为处理后的标准化值; $f_j(a)$ 为第 $j$ 个指标变量 $a$ 的原始值; $f_j^*$ 为指标 $j$ 的最小值; $f_j^*$ 为指标 $j$ 的最大值。

2) 第 $j$ 个指标生成的向量 $\mathbf{x}_j = \{(x_j(1), x_j(2), x_j(3), \dots, x_j(n))\}$ 均有标准差的特点 $\sigma_j$ ,可以用来反映指标间的对比强度。



3) 计算第  $j$  和  $x$  个指标向量  $\mathbf{x}_j$  和  $\mathbf{x}_k$  间的线性相关系数  $r_{jk}$ 。

4) 通过式(2)计算出第  $j$  个指标所包含的信息量大小  $C_j$ 。

$$C_j = \sigma_j * \sum_{k=1}^m (1 - r_{jk})$$

(2)

式中,  $m$  为泥石流沟编号。

5) 将  $C_j$  归一化后, 计算各指标的权重。

$$w_j = \frac{C_j}{\sum_{k=1}^m C_k}$$

(3)

式中:  $w_j$  为第  $j$  个指标的权重;  $C_j$  为第  $j$  个指标的信息量。

3 降雨型泥石流发生规模识别评价

3.1 因子选取及权重

震区泥石流活动较震前频繁、规模大, 考虑震后流域物源储备的丰富性、临界雨量的降低现象、震后山地地形的改变等, 结合野外调查及前人的研究成

果<sup>[15-20, 25-26]</sup>, 选取松散固体物质储量  $F_1$ 、泥石流暴发频率  $F_2$ 、流域面积  $F_3$ 、流域相对高差  $F_4$ 、流域切割密度  $F_5$ 、主沟长度  $F_6$ 、激发雨强  $F_7$  等 7 个评价因子, 来划分 42 条泥石流发生的规模。例如  $F_1$  决定了流域物源的丰富程度,  $F_3$  决定了流域的汇水能力,  $F_4$  决定了流体携带固体物质的能量大小。因数据量较多, 仅列出 20 条典型泥石流沟参数, 如表 1 所示。

根据式(1)对研究区 42 条泥石流沟的影响因子进行无量纲化处理, 如图 2 所示; 并利用 spess 处理数据得到各因子的标准差及因子间相关系数矩阵, 进而通过式(2)求得各因子包含的信息量; 再利用式(3)得出各个因子的权重, 如表 2 所示。

根据空间几何分析学, 研究区内的泥石流敏感性组成 7 维空间内的一条直线, 不同泥石流的相同因子的一系列数据组合即为该因子在 7 维空间内的一个点, 点到直线的距离在 CRITIC 法中即表示为该因子的对比强度。由表 2 可知, 各个因子的对比强度不等, 说明各因子对泥石流的发生规模有不同程

表 1 研究区典型泥石流沟参数

| 流域   | 编号   | 沟名    | 评价因子                     |          |                     |                 |                                        |                 |                 |
|------|------|-------|--------------------------|----------|---------------------|-----------------|----------------------------------------|-----------------|-----------------|
|      |      |       | $F_1/(10^4 \text{ m}^3)$ | $F_2/\%$ | $F_3/(\text{km})^2$ | $F_4/\text{km}$ | $F_5/(\text{km} \cdot \text{km}^{-2})$ | $F_6/\text{km}$ | $F_7/\text{mm}$ |
| 岷江干流 | DF01 | 牛圈    | 763.41                   | 5.00     | 10.66               | 1.83            | 1.43                                   | 6.37            | 56.50           |
|      | DF02 | 张家坪   | 124.41                   | 1.00     | 1.71                | 1.15            | 3.23                                   | 2.10            | 56.50           |
|      | DF03 | 红椿    | 384.00                   | 1.00     | 5.35                | 1.26            | 1.82                                   | 3.55            | 56.50           |
|      | DF04 | 烧房    | 238.00                   | 1.00     | 0.71                | 1.04            | 5.47                                   | 1.74            | 56.50           |
|      | DF08 | 磨子    | 690.00                   | 5.00     | 5.33                | 1.60            | 1.96                                   | 4.23            | 56.50           |
|      | DF09 | 老虎嘴   | 75.00                    | 35.67    | 0.36                | 0.94            | 9.54                                   | 1.15            | 56.50           |
|      | DF10 | 吴家河坝  | 346.00                   | 49.25    | 2.73                | 1.74            | 2.63                                   | 2.57            | 56.50           |
|      | DF11 | 麻羊店   | 463.00                   | 37.11    | 2.02                | 1.82            | 3.26                                   | 2.59            | 56.50           |
|      | DF17 | 兴文坪   | 253.00                   | 35.45    | 1.71                | 2.02            | 3.69                                   | 2.44            | 66.00           |
|      | DF18 | 一碗水   | 1 633.00                 | 46.67    | 7.18                | 2.48            | 1.66                                   | 4.82            | 66.00           |
| 渔子溪  | DF19 | 干沟    | 66.70                    | 39.77    | 1.43                | 0.54            | 3.59                                   | 1.04            | 66.00           |
|      | DF20 | 瓦司    | 528.00                   | 31.52    | 1.52                | 0.42            | 3.49                                   | 0.73            | 56.50           |
|      | DF21 | 肖家 02 | 1 326.53                 | 1.00     | 7.89                | 0.73            | 1.50                                   | 1.75            | 56.50           |
|      | DF22 | 大水 01 | 151.60                   | 30.56    | 1.32                | 0.77            | 4.17                                   | 1.05            | 66.00           |
|      | DF26 | 羊香儿   | 254.34                   | 58.49    | 3.89                | 0.62            | 2.3                                    | 1.42            | 56.50           |
|      | DF29 | 大阴    | 4 525.50                 | 41.49    | 23.44               | 0.84            | 0.9                                    | 4.38            | 56.50           |
|      | DF30 | 下盐水   | 95.88                    | 34.67    | 1.28                | 0.30            | 3.92                                   | 0.40            | 56.50           |
|      | DF31 | 上盐水   | 181.91                   | 48.93    | 2.50                | 0.59            | 2.88                                   | 0.96            | 56.50           |
|      | DF33 | 青岡坪   | 668.55                   | 43.50    | 3.36                | 1.00            | 2.69                                   | 1.75            | 56.50           |
|      | DF42 | 油桌坪   | 201.63                   | 31.00    | 1.17                | 0.04            | 4.02                                   | 0.38            | 56.50           |

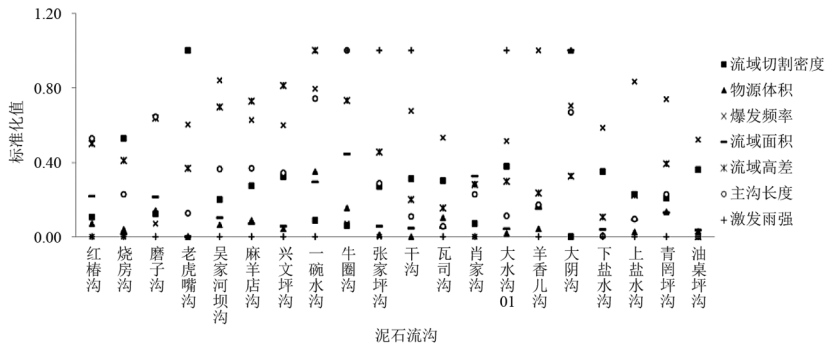


图 2 典型泥石流沟参数标准化值

表 2 因子间相关系数矩阵

| 编号         | $F_1$ | $F_2$ | $F_3$ | $F_4$  | $F_5$  | $F_6$  | $F_7$  |
|------------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|
| $F_1$      | 1.000 | 0.251 | 0.702 | 0.114  | -0.439 | 0.612  | -0.115 |
| $F_2$      |       | 1.000 | 0.272 | -0.203 | -0.359 | 0.085  | -0.265 |
| $F_3$      |       |       | 1.000 | -0.069 | -0.594 | 0.841  | -0.224 |
| $F_4$      |       |       |       | 1.000  | -0.021 | 0.362  | 0.165  |
| $F_5$      |       |       |       |        | 1.000  | -0.568 | 0.085  |
| $F_6$      |       |       |       |        |        | 1.000  | -0.070 |
| $F_7$      |       |       |       |        |        |        | 1.000  |
| $\sigma_j$ | 0.233 | 0.278 | 0.258 | 0.219  | 0.245  | 0.270  | 0.248  |
| $C_j$      | 1.838 | 1.726 | 1.306 | 1.236  | 1.194  | 1.278  | 1.591  |
| $W_j$      | 0.181 | 0.170 | 0.128 | 0.122  | 0.117  | 0.126  | 0.156  |

度的影响,因子的选取具有一定的合理性。

采用因子信息量综合反映因子的对比强度和冲突性, $C_j$ 决定着因子权重的大小。因此  $F_1$  权重最大, $F_5$  最小,各因子权重排序从大到小为  $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_7$ 、 $F_3$ 、 $F_6$ 、 $F_4$ 、 $F_5$ 。

由于研究区的局限性,降雨量变化不大,因此泥石流的暴发受控于流域内物源情况;同时泥石流发生频率越高,则累计造成的危害性越大,因此  $F_1$  和  $F_2$  两个因子所占权重较高。

3.2 敏感性评价模型建立及验证

将研究区内泥石流的参数无纲量化处理,根据无纲量值计算出研究区泥石流 7 个评价因子的权重,从而根据式(1)建立研究区泥石流发生规模评价模型为

$$R = \sum_{i=1}^7 x_i(k) w_i \tag{4}$$

式中: $i$  为评价因子数量, $i=1, 2, \cdots, 7$ ;  $R$  为泥石流发生规模评价值; $x_i(k)$  为图 2 中的无纲量值; $w_i$  为表 2 中 7 个评价因子权重值。

结合野外调查和前人的相关研究,将研究区中 42 条泥石流的敏感性划分为 3 类: $R \leq 0.27$  为高敏感性泥石流(红色); $0.27 < R < 0.35$  为中敏感性泥石流(黄色); $R \geq 0.35$  为低敏感性泥石流(绿色)。根

据以上划区标准,通过 ARCGIS 平台,绘制研究区泥石流敏感性的分区图,如图 3 所示。研究区内都汶高速岷江干流沿岸的 DF01、DF02、DF03、DF04、DF08 区域泥石流敏感性高,距映秀镇较近,特别是 DF03 和 DF04,一旦暴发泥石流冲毁道路、堵塞岷江干流,对映秀镇造成的危害无法想象。2010 年 8 月 14 日暴雨之后,DF01、DF02、DF03、DF04、DF08、DF21 区域均暴发大规模泥石流,并作为重点治理对象,这与所划分的高敏感性泥石流是相对应的。

以泥石流的形成、运动、堆积等特征可以建立不

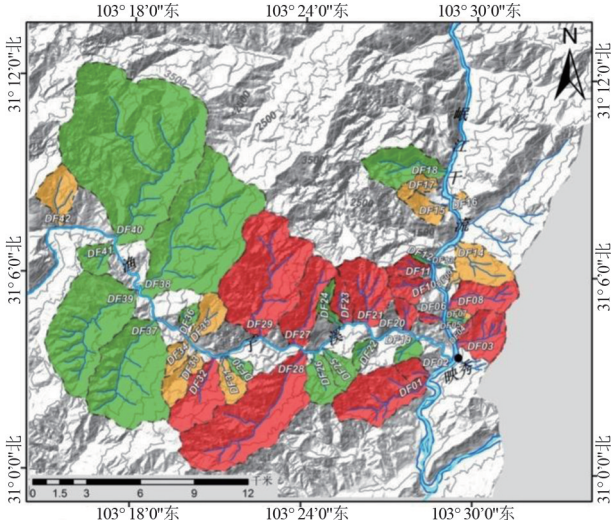


图 3 强震区公路泥石流敏感性分区

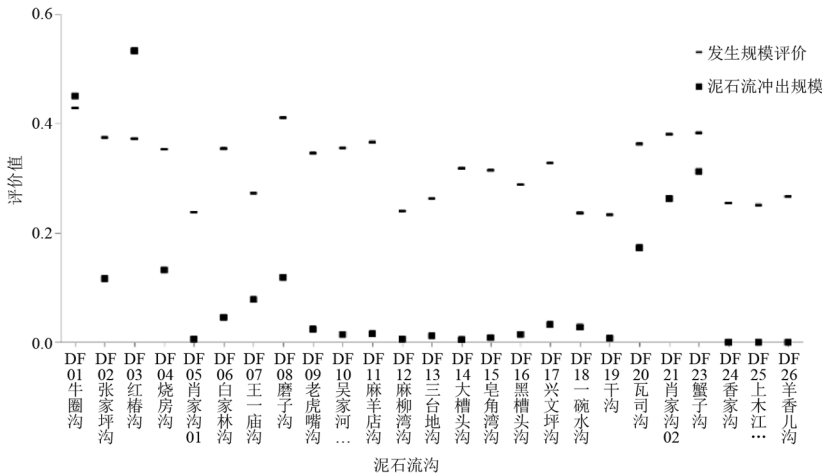


图 4 重点泥石流敏感性评价与泥石流冲出规模验证

同的泥石流分类系统。从泥石流的运动特征出发,通过野外现场调查和遥感解译,计算研究区内重点 26 条泥石流沟的一次泥石流冲出总量,将其作为验证泥石流敏感性评价模型的依据,建立重点沟的敏感性评价与泥石流冲出规模验证图,如图 4 所示。

由图 4 可知,泥石流敏感性评价模型计算结果与验证方法结果对比可知,研究区泥石流冲出流规模与灾害暴发识别模型计算的泥石流敏感性吻合率达到了 81%,从而证明了降雨型泥石流暴发识别模型的可行性。

综上所述,震区映秀地区 42 条泥石流有高敏感性泥石流 15 条、中敏感性泥石流 11 条、低敏感性泥石流 16 条。渔子溪沿岸地质条件都是泥石流暴发的有利因素:岩性以花岗岩为主,沟谷切割较深、狭窄;斜陡的山坡不易植被生长,易于沟内汇集雨水;特别是汶川地震之后,泥石流流域物源条件丰富,沟道地貌突变,高差加大。

## 4 结 论

上面以汶川地震强震区岷江干流及渔子溪沿岸的 42 个泥石流为研究对象,提取泥石流流域中物源存储量、暴发频率、流域面积等 7 个重要因子,运用 CRITIC 法建立电网降雨诱发泥石流灾害识别模型:

- 1) 电网降雨型泥石流灾害暴发识别因子中松散固体物质储量和泥石流暴发频率最为主要。
- 2) 将研究区泥石流敏感性分为高敏感性、中敏感性、低敏感性三级,并绘制分区图。42 条泥石流分为高敏感性泥石流 15 条、中敏感性泥石流 11 条、低敏感性泥石流 16 条。2010 年 8 月 14 日暴雨诱发

DF01、DF02、DF03、DF04、DF08、DF21,均为大规模泥石流,与所划分其属于高敏感性泥石流是一致的。

3) 由于研究区内降雨量差别不大,绘制的泥石流敏感性分区图可为将来该区泥石流的危险性分区提供数据支撑。由于研究区地域的局限性,关键因素降雨条件未能体现出来,因此评价模型的广泛适用性还需进一步研究。

## 参考文献

- [1] DAI F C, XU C, YAO X, et al. Spatial distribution of landslides triggered by the 2008 Ms 8.0 Wenchuan earthquakes, China[J]. Journal of Asian Earth Science, 2011, 40 (4): 883-895.
- [2] ALEXANDER D. Urban landslides[J]. Progress in Physical Geography: Earth and Environment, 1989, 13 (2): 157-191.
- [3] HÜRLIMANN M, COPONS R, ALTIMIR J. Detailed debris onhazard assessment in Andorra: A multidisciplinary approach[J]. Geomorphology, 2006, 78(3-4): 359-372.
- [4] ZHOU W, TANG C. Rainfall thresholds for debris flow initiation in the Wenchuan earthquake-stricken area, southwestern China[J]. Landslides. DOI: 10.1007/s10346-013-0421-5.
- [5] 黄润秋,李为乐.汶川地震触发崩塌滑坡数量及其密度特征分析[J].地质灾害与环境,2009,20(3):1-7.
- [6] 刘清华,唐川,常鸣.汶川地震强震区映秀地区泥石流的危险性[J].山地学报,2012,30(5):592-598..
- [7] 黄润秋.汶川地震地质灾害后效应分析[J].工程地质学报,2011,19(2):145-151.
- [8] 唐川,李为乐,丁军.汶川震区映秀镇“8·14”特大泥石流灾害调查[J].地球科学(中国地质大学学报), 2011,36(1):172-180.

- [9] 许强. 四川省8·13特大泥石流灾害特点、成因与启示[J]. 工程地质学报, 2010, 18(5): 596-608.
- [10] 谭炳炎. 泥石流沟严重程度的数量化综合评判[J]. 水土保持通报, 1986, 6(1): 51-57.
- [11] 高桥保, 中川一, 佐藤宏章. 扇状地における土砂泛滥灾害危険度の评价[J]. 京都大学防災研究所年報, 1988, 31(B-2): 655-676.
- [12] 唐川. 汶川地震区暴雨滑坡泥石流活动趋势预测[J]. 山地学报, 2010, 28(3): 341-349.
- [13] TANG C, ZHU J, CHANG M, et al. An empirical-statistical model for predicting debris-flow runout zones in the Wenchuan earthquake area[J]. Quaternary International, 2012(250): 63-73.
- [14] ZHANG Wen, CHEN Jian-ping, WANG Qing, et al. Susceptibility analysis of large-scale debris flows based on combination weighting and extension methods[J]. Nat Hazards, 2013, 66: 1073-1100.
- [15] CHEVALIER G G, MEDINA V, HÜRLIMANN M, et al. Debris-flow susceptibility analysis using fluvio-morphological parameters and data mining: application to the Central-Eastern Pyrenees[J]. Nat Hazards, 2013, 67: 213-238.
- [16] CHANG Ming, TANG Chuan, ZHANG Dan-dan, et al. Debris Flow Susceptibility Assessment Using a Probabilistic Approach: A Case Study in the Longchi Area, Sichuan Province, China[J]. Journal of Mountain Science, 2014, 11(4): 1001-1014.
- [17] CHEN Xingzhang, CHEN Hui, YOU Yong, et al. Susceptibility assessment of debris flows using the analytic hierarchy process method-A case study in Subao river valley, China[J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2015(4): 1-7.
- [18] JAKOB M, FRIELE P. Frequency and magnitude of debris flows on Cheekye River, British Columbia [J]. Geomorphology, 2010, 114(3): 382-395.
- [19] 匡乐红, 刘宝琛. 基于模糊可拓方法的泥石流危险度区划研究[J]. 灾害学, 2006, 21(1): 68-72.
- [20] 孟凡奇, 李广杰, 李明, 等. 逐步判别分析法在筛选泥石流评价因子中的应用[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2925-2929.
- [21] LI H B, FU X F, VAN DER WOERD J, et al. Co-seismic surface rupture and dextral-slip oblique thrusting of the Ms 8.0 Wenchuan earthquake [J]. Acta Geol Sin, 2008, 82(1): 1623-1643.
- [22] BURCHFIEL B C, CHEN Z L, LIU Y P, et al. Tectonics of the Longmen Shan and adjacent regions central China [J]. International Geology Review, 1995, 37(8): 661-735.
- [23] TANG Chuan, ZHU Jing, DING Jun. Catastrophic debris flows triggered by a 14 August 2010 rainfall at the epicenter of the Wenchuan earthquake [J]. Landslides, 2011, 8: 485-497.
- [24] DIAKOULAKI D, MAVROTAS G, PAPAYANNAKIS L. Determining objective weights in multiple criteria problems: The critic method [J]. Computers & operations Research, 1995, 22(7): 763-770.
- [25] LIN P S, LIN J Y, HUANG J C, et al. Assessing debris-flow hazard in a watershed in Taiwan [J]. Engineering Geology, 2002, 66(3-4): 295-313.
- [26] 郭晓军, 苏鹏程, 崔鹏. 7月3日茂县棉簇沟特大泥石流成因和特征分析[J]. 水利学报, 2012, 43(2): 140-146.
- 作者简介:  
卜祥航(1987), 男, 高级工程师, 研究电网地震及地质灾害防御工作.
- (收稿日期: 2023-01-31)
- (上接第55页)
- [3] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构高强度螺栓连接技术规程: JGJ 82—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [4] 徐建设, 陈以一, 韩琳, 等. 普通螺栓和承压型高强螺栓抗剪连接滑移过程[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2003, 31(5): 510-514.
- [5] 杜运兴, 欧阳卿. 高强螺栓承压型连接抗剪承载力计算[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2013, 40(3): 21-25.
- [6] 刘素丽, 陈传新, 魏文辉, 等. 承压型高强螺栓受力性能试验研究[J]. 安徽建筑, 2013, 20(2): 211-212.
- [7] 陈绍蕃. 钢结构设计原理[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [8] 国家电网有限公司科技创新部. 110 kV~1000 kV 架空输电线路施工及验收规范: Q/GDW 10115—2022[S]. 北京: 中国电力出版社, 2022.
- [9] 汝元功, 唐照民. 机械设计手册[M]. 北京: 高等教育出版社, 1995.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准: GB 50017—2017[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018.
- [11] 全国架空线路标准化技术委员会. 输电线路杆塔及电力金具用热浸镀锌螺栓与螺母: DL/T 284—2021[S]. 北京: 中国电力出版社, 2021.
- 作者简介:  
鄯秀庆(1984), 男, 硕士, 高级工程师, 从事输电线路工程设计及管理工作.
- (收稿日期: 2023-02-05)



# 自主可控新一代变电站辅助系统 联控策略研究与发展

马驰奔<sup>1</sup>, 吴杰<sup>2</sup>, 常政威<sup>2</sup>, 熊兴中<sup>1</sup>, 刘骏<sup>1</sup>

(1.四川轻化工大学, 四川 自贡 643000; 2.国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

**摘要:**为了从根本上解决电网二次设备核心芯片“卡脖子”问题,全面支撑变电站“无人值守+集中监控”业务需求,新一代自主可控变电站采用“自主可控、安全可靠、先进适用、集约高效”的原则,从设备软硬件方面全面自主设计可控。为更好建立新一代自主可控变电站,研究分析了二次系统的联动控制策略。首先,从联动控制所需基础技术分析,介绍自主可控新一代变电站辅助设备联控策略的总体框架,分析变电站辅助设备联动控制的总体功能;然后,通过梳理辅助设备联控类型,将联控策略分为主辅联动、子系统间联动和子系统内部联动三大策略,并结合具体案例对联动控制进行阐述;最后,对变电站辅助设备联动控制策略进行总结和展望。

**关键词:**新一代变电站; 联动控制; 辅助设备; 视频联动

**中图分类号:** TM 63 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2023)05-0068-07

**DOI:** 10.16527/j.issn.1003-6954.20230511

## Research and Development of Auxiliary System Joint Control Strategy in New Generation Substation with Autonomous and Controllable Technology

MA Chiyi<sup>1</sup>, WU Jie<sup>2</sup>, CHANG Zhengwei<sup>2</sup>, XIONG Xingzhong<sup>1</sup>, LIU Jun<sup>1</sup>

(1. Sichuan University of Science & Engineering, Zigong 643000, Sichuan, China;

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

**Abstract:** In order to fundamentally solve the problem of "stuck neck" in core chip of secondary equipment in power grid and fully support the business needs of "unattended and centralized monitoring" of substations, a new generation substation with autonomous and controllable technology adopts the principles of "autonomous and controllable, safe and reliable, advanced and applicable, intensive and efficient", and is designed and controlled independently in terms of equipment hardware and software. In order to have a better construction to new generation substations with autonomous and controllable technology, it focuses on the analysis of joint control strategy of secondary system. Firstly, the basic technologies needed by joint control are analyzed. The overall framework of joint control for auxiliary equipment of new generation substations with autonomous and controllable technology is introduced, and its overall functions are analyzed. And then by sorting out the types of auxiliary equipment joint control, the joint control strategies are divided into main and auxiliary linkage, inter-subsystem linkage and intra-subsystem linkage, and the joint control is described with specific cases. Finally, the joint control strategies of auxiliary equipment in substations are summarized and prospected.

**Key words:** new generation substation; joint control; auxiliary equipment; video linkage

## 0 引言

为解决电网二次设备核心芯片“卡脖子”问题,中国正加快推进自主可控新一代变电站二次系统技

术研发和试点建设。面对基于国产化设备的新一代变电站二次系统新架构、新功能和通信协议的变电站辅助设备检测平台,联动控制有着重要的作用,同时联动控制策略也是“无人值守+集中监控”业务需求的重要支撑。下面收集整理了各变电站辅助系

统的联动控制策略,分为主辅联控、子系统间联控和子系统内部联动,可为自主可控新一代变电站的建设提供参考内容。

1 新一代变电站辅助系统联动策略相关技术

1.1 传感器采集技术

1.1.1 图像采集技术

高质量的图片是图像检测技术的基础,在图像采集的过程中会使用到多种摄像机,确保获取高清图像。其中高动态范围成像 (high dynamic range imaging, HDRI) 技术拓展了图像的曝光范围,改进了图像曝光不足或过大的问题,使图片能呈现更多信息。在联动控制策略中,图像采集技术是整个联动过程的起始操作,为联动控制策略提供基础技术支持。

1.1.2 红外测温采集技术

利用红外测温原理设计的红外测量电子设备获取设备表面发出的红外辐射,进而获取设备温度用于设备状况检测。变电站中的设备,如变压器、隔离开关、线夹等,在运行过程中需要有效的检测,才能发现安全隐患。在联动控制策略中,设备的有效检测对联动措施起着重要作用。

1.2 图像技术

图像检测技术在联动策略中起着重要作用,在收集完成图像后,图像技术对图片进行处理使图片中的信息更明显。图 1 为目标检测示例<sup>[1]</sup>。

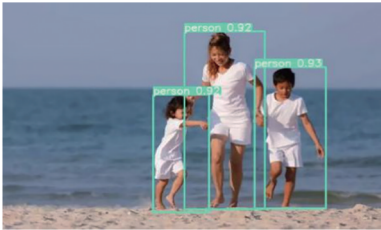


图 1 图像检测示例

在传统的图像检测中,基于滑动窗口和人工提取特征的方法是主流的检测手段,但是传统方法计算量巨大且鲁棒性低<sup>[1]</sup>。随着深度学习的发展,基于卷积神经网络的图像检测技术日趋成熟,相比于传统检测方法,能够提供基于数据驱动的特征表示,在特征提取和分割识别等方面表现良好<sup>[2]</sup>。目标检测算法按照是否有区域生成网络 (region proposal network, RPN) 可划分为二阶段检测算法和一阶段检测算法。在二阶段检测算法中会使用 RPN 用于

检测,其中 R-CNN<sup>[3]</sup>、Fast R-CNN<sup>[4]</sup>、Faster R-CNN<sup>[5]</sup> 等是该类算法的代表算法。一阶段检测算法不使用 RPN,就不生成感兴趣区域,而是将整幅图像用回归方法来实现检测任务,其中 YOLO<sup>[6-11]</sup> 系列、SSD<sup>[12-16]</sup> 系列等代表性算法比较优秀。图 2 描述了两类算法的框架。

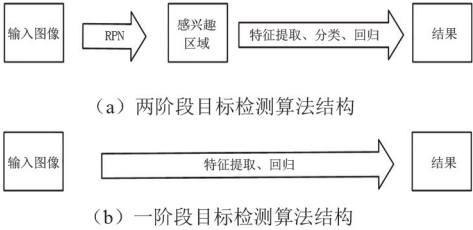


图 2 目标检测算法结构

1.3 联动技术

电力二次系统分为生产控制大区和管理信息大区,其中 I 区、II 区为控制区和非控制器,都在生产控制大区;而 III 区生产管理区和 IV 区管理信息区在管理信息大区。在获取 I 区的检测数据后,II 区辅助设备和 IV 区巡视主机接收到综合应用主机传送的主辅设备联动信号,根据联动策略,对 III 区辅助设备传感器或 IV 区视频摄像头设备进行控制操作;最后,对 IV 区视频摄像头联动的操作需要返回操作结果,如对变电站设备操作的自动获取、隔离开关开合变化时系统自动反馈图像信息,保证操作的安全性和准确性。

2 新一代变电站辅助系统总体架构

2.1 辅助系统架构

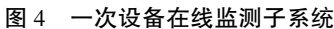
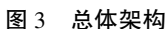
系统结构常见的有单体架构、分布式应用、微服务架构、Serverless 架构。自主可控新一代变电站辅助系统架构采用分层、分布式网络架构,单网组网方式,由站控层、汇聚层和传感层构成,部署在安全 II 区和安全 IV 区。该架构为整个二次系统的总体架构,能处理电力二次系统复杂的网络结构。总体架构如图 3 所示。安全 II 区由一次设备在线监测、火灾消防、安全防卫、智能锁控、动环系统组成;安全 IV 区由在线智能巡视系统组成。

安全 II 区与安全 IV 区之间通过正、反向隔离装置互联。站控层设备主要包括主辅一体化监控主机、综合应用主机、服务网关机和在线智能巡视主机,完成数据采集、数据处理、状态监视、设备控制、智能应用、运行管理和主站支撑等功能。汇聚层设

一次设备在线监测、火灾消防、安全防护、智能锁控、动环等子系统数据存储至安全Ⅱ区的综合应用主机,各子系统与后台之间应采用 DL/T 860 通信报文进行互联。在线智能巡视子系统数据存储至安全Ⅳ区的在线智能巡视主机,在线智能巡视主机与上级系统之间采用 TCP/UDP 协议互联。

主辅一体化监控系统主要对站内一次设备的在线监测、火灾消防、安全防护、智能锁控、动环以及在线智能巡视等子系统信息进行分类存储、智能联动及综合展示。系统能接收来自集控站的控制指令,实现对受控设备进行远程控制的功能。各子系统能够脱网运行,在系统后台故障的情况下各子系统能够继续正常工作并实现报警、记录及存储等功能。

系统如图 4 所示,主要对油中溶解气体、铁芯夹件接地电流、套管绝缘状态、变压器特高频的局部放电及高频电流的局部放电等状态参量进行在线监测,实现变压器类设备运行状态的在线采集、分析和上传。具备对 SF<sub>6</sub> 气体压力、机械特性、组合电器局





部放电等状态参量在线监测的功能,实现开关类设备运行状态的在线采集、分析和上传;具备容性设备及避雷器设备全电流、母线电压等状态参量在线监测的功能,实现容性设备及避雷器设备运行状态的在线采集、分析和上传。

2) 火灾消防子系统

火灾消防系统如图 5 所示。该系统具备接入火灾自动报警系统、固定式灭火系统、其他受控消防设备以及模拟量变送器等设备的功能,实现站内火灾报警信息的采集、传输和灭火控制;具备声光报警功能,当火灾发生时,及时发出声光报警信号;具备消防联动控制功能,当发生火灾时,能自动停止送、排风系统和空调系统的运行,并联动启动消防水泵和其他自动消防设备。

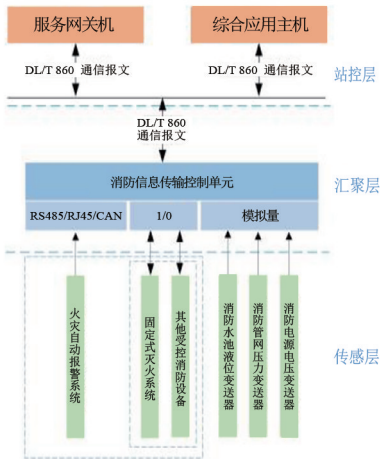


图 5 火灾消防架构

3) 安全防卫子系统

安全防卫系统如图 6 所示。该系统具备接入红外双鉴探测器、红外对射探测器、门禁控制器以及脉冲电子围栏等设备的功能,实现站内周界入侵告警信息的采集和传输;具备布防和撤防功能,满足现场多种运行方式,并对读卡器、开门按钮、电磁锁等门禁设备有控制和管理功能,实现站内人员出入信息的采集、存储和上送;能够采用多种开门方式,满足人脸识别开门等多种需求。

4) 智能锁控子系统

智能锁控系统如图 7 所示。该系统具备对变电站内各类锁具(不含防止电气误操作的锁具)和电子钥匙的控制和管理功能,实现开锁权限、开锁记录 and 开锁流程的智能化管控;具备身份认证功能,包括刷卡、密码等多种认证方式;具备上送开锁任务、人员、锁具配置信息以及下发开锁任务到电子钥匙等功能;具备网络故障情况下,可通过锁控监控

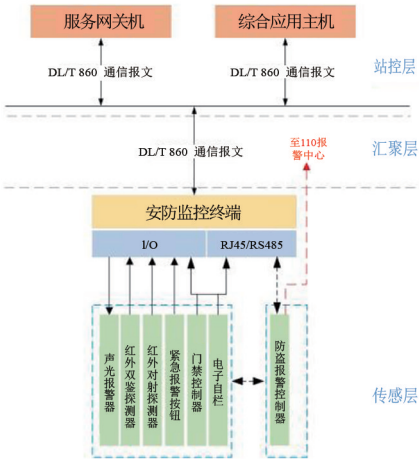


图 6 安全防卫子系统

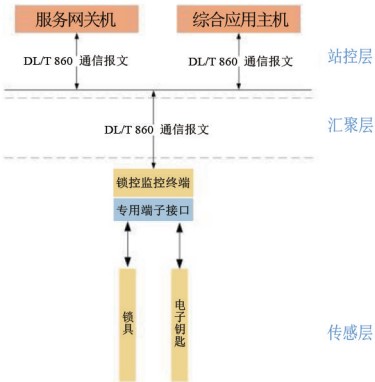


图 7 智能锁控子系统

终端直接对钥匙进行授权操作功能,并对授权信息和开锁信息进行记录。

5) 动环子系统

动环子系统如图 8 所示。该系统具有微气象、温湿度、水位、SF<sub>6</sub>(O<sub>2</sub>含量)、水浸、漏水、水位等传感器接入功能,实现站内环境数据的实时采集、处理和上送;具有对空调、除湿机、采暖、风机、水泵以及照明等设备的控制功能,能对环境异常及时告警,可对各种环境信息告警值进行设定。环境监测传感器具有正常工作指示功能及异常告警功能。

6) 无线接入设备

无线接入设备如图 9 所示。无线汇聚节点具备计算、自组网功能,能与无线传感器实现双向通信,将传感器数据转换为 E 语言文件格式并实现上送等功能。动环系统无线传感器具备分别采集室外风速、风向、水浸、水位以及温湿度等信息的功能。无线姿态传感器具备准确检测隔离开关的分合闸位置变化,可靠、有效地判断隔离开关本体所处的分合闸位置状态功能。开关柜无线温度传感器具备在线监测开关柜带电触点及母排温度功能。



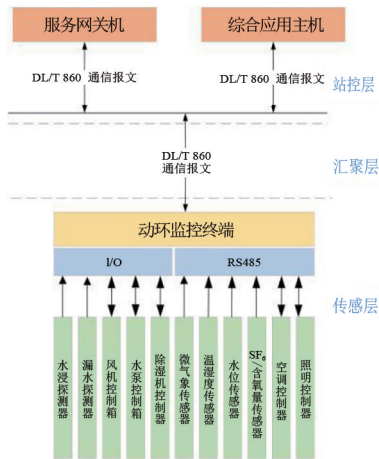


图 8 动环子系统

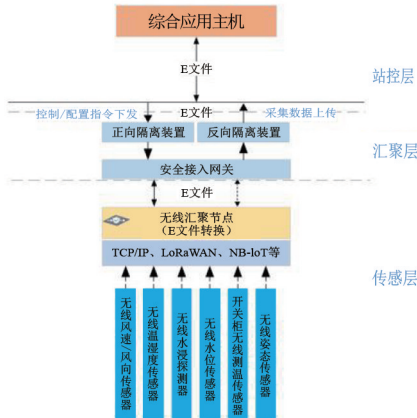


图 9 无线接入设备

7) 在线智能巡视子系统

在线智能巡视子系统如图 10 所示。该系统具备接入巡检机器人、高清视频、红外热成像摄像机以及声纹监测装置等设备的功能,实现变电站巡视数据的集中采集和智能分析。巡检机器人配备可见光摄像机、热红外成像仪以及音频采集设备,具备可见光检测、红外检测和噪声监测功能。摄像机布置满足变电站安全防范、设备运行状态监视以及设备在

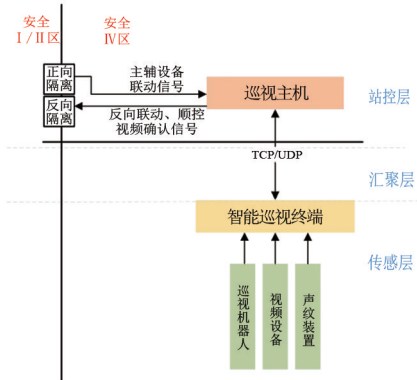


图 10 在线智能巡视子系统

线智能巡视的要求。红外热成像摄像机支持多种测温方法,并具备测温校正功能。该系统还具备采集主变压器、高压并联电抗器等重要一次设备声音数据的声纹采集功能,实现声纹数据的实时监测,并对设备运行状态进行分析判断。

3 新一代变电站联动控制功能

联动控制功能是指,当联动控制触发信号触发,如主设备警告信号、SF<sub>6</sub> 浓度超标信号、水浸报警信号,系统相应地做出自动反应,如视频预置位、巡检机器人对相应区域进行采集、一次设备在线系统的记录。可将新一代变电站联动控制分为主辅系统之间联动、辅助子系统间联动和辅助子系统内部联动。

3.1 主辅联动

3.1.1 主设备与巡视系统联动

1) 一键顺控“双确认”联动

一键顺控操作的倒闸顺序会因为变电站不同作业要求而改变,通过序列控制减轻人员操作,提高变电站倒闸效率<sup>[17]</sup>。在变电站一键顺控操作中可采取多种方式来确认隔离开关分合闸情况,文献[18]将倒闸任务“双确定”的技术路线分为基于微动开关、压力传感器、姿态传感器、敏态传感器和图像视频联动这几类。文献[19]以某 500 kV 智能变电站为例,设置了一套以视频联动的顺控系统实现顺控“双确认”,该方法融入人工智能中目标检测技术,有效提高“双确认”效率。

2) 主变压器告警联动

主变压器是变电站的心脏,其正常运行对变电站起着至关重要的作用,因此对于主变压器各项物理信号的检测显得尤为重要。文献[20]提出主变压器信号联动策略,当主变压器物理数值异常时,联动巡视系统对变压器表计进行识别检测,帮助运维人员研判。

3.1.2 监控主机与巡视系统联动

根据新一代变电站设计,主辅一体化监控主机(监控主机)是按照统一模型、统一平台的基本要求,通过主辅设备信息在功能、界面等方面深度融合,实现全站主辅设备运行监视、操作与控制、智能应用、主站支撑服务等四大类 12 项功能。

在巡视主机进行巡视期间,向综合应用主机发送联动任务功能。文献[21]设计的一套巡检系统结合

机器视觉、云台一体化控制和 YOLOv3 目标检测算法,有效地提升了变电站“无人值守”巡检任务的效率。文献[22]将新一代自主可控变电在线智能巡视系统做了详细介绍,其中对监控主机的联动方式也进行了分析,包括监控主机向巡视主机发送联动信号和巡视主机向监控主机发送复核反馈信号功能。

### 3.2 子系统间联动

#### 3.2.1 火灾消防系统与其他辅助系统间联动

发生火灾时,火灾消防系统与各辅助系统之间的联动能有效阻止火灾蔓延。文献[23]提出一种基于泛在电力物联网的变电站消防系统,将火灾预警功能分为3级:当火灾探测器检测到火灾信息,火灾消防系统将联动监控主机发出报警信息;进一步向内部管理人员发送预警定位;最后,联动巡视系统调用巡视机器人进行视频检测。文献[20]提出联动安全防卫系统开启相关逃生门禁,并且联动动环系统开启照明,关闭风机、电暖气、空调和除湿机防止火势蔓延。并且为更好了解火情状况,联动巡视系统调用火灾区域摄像机对火灾进行跟踪拍摄。

#### 3.2.2 智能巡视系统与其他辅助系统联动

##### 1) 与动环系统联动

智能巡检机器人巡检过程中所检测的局部区域亮度不足时,可联动动环系统照明控制器。文献[24]提到动环系统中的照明控制器能对灯进行远程操控,与其他系统实现联动能够有效改善其他辅助系统存在的照明不足问题。

##### 2) 与安全防卫联动

智能巡视系统利用深度神经网络对监控视频进行行为识别检测。当检测到工作站内员工安全帽佩戴不规范、有非法闯入和有工作人员遗留物品在工作区时,将联动安全防卫系统进行声光报警,提醒站内人员进行相应的处理<sup>[20]</sup>。

### 3.3 子系统内联动

#### 3.3.1 火灾消防系统内部联动

火灾消防系统具备火灾自动报警系统、固定式灭火系统、其他受控消防设备以及模拟量变送器等设备,能实现站内火灾报警信息的采集、传输和灭火控制。文献[25]提出火灾发生时,火灾消防系统发出报警并联动该系统的相关消防功能,对火源进行自动灭火。

#### 3.3.2 动环子系统内联动

动环子系统中的各项传感器感应到相应检测数值超出警告阈值时,将联动系统内的风机、空调、水

泵等设备进行及时调整。

##### 1) 水浸联动

当发生水浸时,动环系统内的传感器将及时检测到数据值,并按设置好的联动策略联动相应的水泵进行排水。

##### 2) 温湿度控制联动

通过动环系统中的温湿度传感器收集环境中的温湿度信息后,联动系统内的风机、空调等设备进行调整。

##### 3) SF<sub>6</sub> 浓度超标联动

SF<sub>6</sub> 气体在 GIS 室的含量根据 DL/T 5035—2016《发电厂供暖通网与空气调节设计规范》不能超过 6000 mg/m<sup>3</sup>,因此对 SF<sub>6</sub> 气体浓度的管控很重要。文献[26]提出了一套变电站动环系统通风系统设计原则,并提出了当检测到 SF<sub>6</sub> 气体浓度超标时,会自动联动动环系统中的风机控制箱,实现节能安全运行。

#### 3.3.3 智能巡检系统内联动

在线智能巡检系统中的巡检机器人收到巡检任务后按预定路线进行巡检,当巡检到相应点位时联动系统内的摄像头进行确认,实现对巡检机器人的有效检测,并将所有巡检的内容上传到系统的后台进行保存、分析、研判,为在线智能巡检系统的正常运行提供充分的数据支撑。

### 3.4 应用成效

联动控制策略在电力二次系统中的运用能有效地提高辅助系统的工作效率。联动策略的运用能让变电站的管理更为高效、智能,并且减少了人力成本,对变电站的运维管理有着积极的作用<sup>[27]</sup>。联动功能分类也有助于联动控制策略的研发,为新一代变电的建设提供有效的帮助。

## 4 结 论

自主可控新一代变电站的建设离不开联动技术。上面梳理了联动策略会使用到的相关技术,介绍了自主可控新一代变电站辅助系统的总体架构及其包含的子系统。根据联动策略方式将联动功能分为主辅联动、子系统间联动和子系统内部联动,并且根据分类给出了具体的联动形式:主辅联动中“双确认”操作、子系统间联动的火灾消防联动、安全穿戴检测联动以及子系统间的动环联动。为自主可控新一代变电站的建设提供了联动控制方面的研究内容。

## 参考文献

- [1] 李柯泉, 陈燕, 刘佳晨, 等. 基于深度学习的目标检测算法综述[J]. 计算机工程, 2022, 48(7): 1-12.
- [2] 张春晓, 陆志浩, 刘相财. 智慧变电站联合巡检技术及其应用[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(9): 158-164.
- [3] GIRSHICK R, DONABUC J, DARRELL T, et al. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation[EB/OL]. [2022-10-11]. <http://doi.org/10.48550/arXiv.1311.2524>.
- [4] GIRSHICK R. Fast R-CNN[C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, 2015: 1440-1448.
- [5] REN S Q, He K M, GIRSHICK R, et al. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2017, 39(6): 1137-1149.
- [6] REDMON J, DIVVALA S, GIRSHICK R, et al. You only look once: Unified, real-time object detection[C]. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016: 779-788.
- [7] REDMON J, FARHADI A. YOLOv3: An incremental improvement[EB/OL]. [2022-10-11]. <https://arXiv.org/pdf/1804.02767.pdf>.
- [8] BOCHKOUSKIY A, WANG C-Y, LIAO H-Y M. YOLOv4: Optimal speed and accuracy of object detection[EB/OL]. [2022-10-11]. <https://arXiv.org/abs/2004.10934>.
- [9] REDMON J, FARHADI A. YOLO9000: Better, faster, stronger[C] // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2017: 7263-7271.
- [10] LI C Y, LI L L, JIANG H L, et al. YOLOv6: A single-stage object detection framework for industrial applications[EB/OL]. [2022-10-11]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2209.02976>.
- [11] WANG C-Y, BOCHKOVSKIY A, LIAO H-Y M. YOLOv7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors[EB/OL]. [2022-10-11]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2207.02696>.
- [12] LIU W, ANGUELOV D, ERHAN D, et al. SSD: single shot multibox detector[EB/OL]. [2022-10-11]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1512.02325>.
- [13] FU C-Y, LIU W, RANGA A, et al. DSSD: Deconvolutional single shot detector[EB/OL]. [2022-10-11]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1701.06659>.
- [14] JEONG J, PARK H, KWAK N. Enhancement of SSD by concatenating feature maps for object detection[EB/OL]. [2022-10-11]. <https://arXiv.org/pdf/1702.09587.pdf>.
- [15] SHEN Z Q, LIU Z, LI J G, et al. DSOD: Learning deeply supervised object detectors from scratch[EB/OL]. [2022-10-11]. <https://arXiv.org/pdf/1708.01241.pdf>.
- [16] LI Z X, ZHOU F Q. FSSD: Feature fusion single shot multibox detector[EB/OL]. [2022-10-11]. <https://arXiv.org/pdf/1712.00960.pdf>.
- [17] 游鑫, 田维文, 范富江, 等. 基于视频监控智能识别的变电站一键顺控技术研究[J]. 电气自动化, 2022, 44(3): 85-87.
- [18] 谢青洋, 程鹏, 白翠芝, 等. 隔离开关位置辅助判断技术比较研究[J]. 云南电力技术, 2022, 50(2): 35-38.
- [19] 郭小江, 李广渊, 王强. 基于视频联动的 500 kV 智能变电站一键顺控系统改造及验收[J]. 电工技术, 2022(9): 154-156.
- [20] 严亚兵, 黎刚, 李辉, 等. 智慧变电站监控系统智能联动技术浅析[J]. 湖南电力, 2020, 40(3): 77-81.
- [21] 梁松伟. 基于多源异构视觉的变电站机器人巡检技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- [22] 何源, 明家辉, 胡磊, 等. 变电站智能巡视技术研究[C]. 中国电力设备管理协会第二届第一次会员代表大会论文集. 北京: 中国电力设备管理协会, 2022: 24-28.
- [23] 郑宝强, 张健, 曹飞, 等. 基于泛在电力物联网的无人值守变电站消防策略研究[J]. 南方能源建设, 2020, 7(4): 75-80.
- [24] 沈显庆, 朱彦磊, 王昌奎. 变电站智能辅助系统的分析[J]. 黑龙江电力, 2015, 37(5): 381-384.
- [25] 肖冰. 变电站火灾自动报警及消防联动系统的设计优化[J]. 内蒙古石油化工, 2012, 38(24): 72-74.
- [26] 肖艳紫. 变电站通风系统设计及联动控制优化[J]. 江西建材, 2017(11): 23-24.
- [27] 宋涛, 冯承超. 变电站智能辅助系统的应用[J]. 电子技术与软件工程, 2018(19): 239-240.

## 作者简介:

马驰弈(1998), 男, 硕士研究生, 研究方向为人工智能;

吴杰(1986), 男, 硕士, 研究方向为厂站端自动化及智能变电站技术;

常政威(1981), 男, 博士, 正高级工程师, 研究方向为人工智能;

熊兴中(1971), 男, 博士, 教授, 研究方向为人工智能;

刘骏(1994), 男, 硕士, 研究方向为人工智能。

(收稿日期: 2023-02-01)

# 电力作业现场智能安全监督研究与应用

权 杰<sup>1</sup>, 李富祥<sup>2</sup>, 常政威<sup>2</sup>, 丁宣文<sup>2</sup>, 杜春忠<sup>3</sup>

(1. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041; 2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041; 3. 华能西藏雅鲁藏布江水电开发投资有限公司, 西藏 拉萨 850000)

**摘要:**针对目前电力作业现场安全监督过度依赖于人工、自动化智能化程度低,从智能安全监督的监督内容、方法以及监督算法上展开研究,并基于深度感知摄像头、图像识别、机器学习等技术,实现了对作业现场人员安全生产行为的实时监视和智能预警,能大幅提高作业现场安全管控的自动化与智能化水平以及对作业现场行为违章的威慑力,其研究成果在多个变电站、换流站以及实验室等典型作业场景下得到成功应用,显著提升了作业现场安全生产水平。

**关键词:**智能安全监督; 图像识别; 检测算法

**中图分类号:**TM 08 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2023)05-0075-06

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20230512

## Research and Application of Intelligent Safety Supervision in Power Operation Sites

QUAN Jie<sup>1</sup>, LI Fuxiang<sup>2</sup>, CHANG Zhengwei<sup>2</sup>, DING Xuanwen<sup>2</sup>, DU Chunzhong<sup>3</sup>

(1. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China; 3. Huaneng Tibet Yarlung Zangbo River Hydropower Development and Investment Co., Ltd., Lhasa 850000, Tibet, China)

**Abstract:** At present, the safety supervision of power operation sites is overly dependent on manual work, with a low degree of automation and intelligence. So the contents, methods and algorithms of intelligent safety supervision are studied, and based on depth perception camera, image recognition, machine learning and other technologies, real-time monitoring and intelligent early warning for safety production behaviour of the personnel in the site are achieved, which can significantly improve the automation and intelligence level of safety control as well as the deterrent effect of violation of rules in the site. And the research results have been successfully applied to typical operation scenarios in several substations, converter stations and laboratories, which significantly improves the safety level in the sites.

**Key words:** intelligent safety supervision; image recognition; detection algorithm

## 0 引言

在电力生产过程中,安全监督对于保证作业人员的安全具有重要意义<sup>[1]</sup>。电力作业现场现有的安全监督主要包括作业班组监护人监护、领导或管

**基金项目:**四川省自然科学基金资助项目(2023NSFSC1987)

理人员到岗到位检查、安监专业人员安全督查以及相关“四不两直”安全巡查等形式,均受到人员主观能动性、业务水平及监督检查覆盖率等限制。近年来,借助基建和生产作业现场便携式视频终端、变电站站内视频监控以及移动互联网系统开展远程监督,可实现远程实时监控、远程资料查阅以及全程录像备查,提高了监督检查覆盖率和威慑力,但也存



在着不能近距离和多角度准确监督、难以长时间集中精力专注监督以及无法在线实时智能分析、风险预警等不足,安全监督手段仍然需要进一步创新。

相比完全靠人进行安全监督的传统方式,依靠智能化的机器人开展安全监督能充分展现“机器代人”的优势,与人容易出现疏忽、监督水平参差不齐以及固定摄像头受局限相比,智能安全监督机器人可实现移动、智能、一丝不苟的全过程监督,弥补仅靠人监督人的不足,切实提高监督质效。

经统计,电力作业现场的违章大部分都属于行为违章,其次是管理违章,再次是装置违章;同时行为违章也是最容易引发人身伤亡的一类违章。因此,下面针对电力作业现场的安全生产行为提出了以机器人为载体的智能监督方法,智能监督技术是研究的重点。

### 1 智能安全监督内容及方法

电力作业现场智能安全监督主要是指以机器人为载体,通过高分辨率可见光摄像机传感设备,采用基于图像处理分析算法提取视频源的结构特征,实现安全生产行为实时监控;同时,通过建立多层次的特征标准库,利用基于特征库的机器学习系统,提高机器人的识别成功率,从而提高安全监督的有效性。

结合电力作业现场特点,不安全生产行为为一般有不挂接地线、不系安全带、不戴安全帽、误入试验(带电)区域、吊臂下站人、监护不到位等。针对这些典型违章,展开安全生产行为智能监督研究。

#### 1.1 设备接地操作监督

主要监督在变压器耐压、局部放电等高压试验结束后,工作人员是否用接地棒对高压被试设备表面进行接地操作。系统判定流程如图 1 所示。智能安全监督系统获取摄像头图像,同时获取标准特征库特征,使用单目标模板匹配算法,获取标定区域,以此获得接地棒区域以及接地操作区域。再利用基于混合高斯背景建模技术的背景差分减除算法,实时监督接地棒是否拿起以及接地操作是否完成。

#### 1.2 安全带(帽)穿戴监督

主要监督在现场作业过程中,高处作业人员是否穿戴安全带以及现场作业人员是否佩戴安全帽。系统判定流程如图 2 所示。智能安全监督系统获取摄像头图像,利用基于方向梯度直方图(histogram of

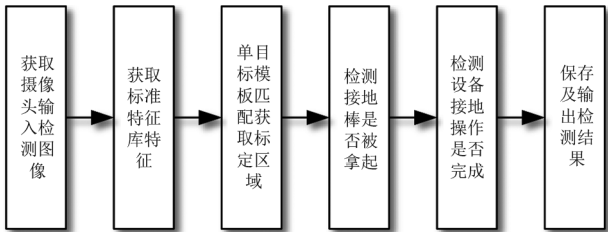


图 1 设备接地操作监督流程

oriented gradient,HOG)特征的支持向量机(support vector machine,SVM)分类器,检测画面中的工作人员,再提取感兴趣区域(region of interest,ROI)作为新的检测对象并利用混合高斯背景模型建立背景图。预先提取安全带(帽)颜色,获得 ROI 区域与安全带(帽)同颜色范围 A;然后获得 ROI 区域运动区域范围 B。系统将 A 和 B 做交集运算,得到检测结果,实现安全带(帽)穿戴实时监督。

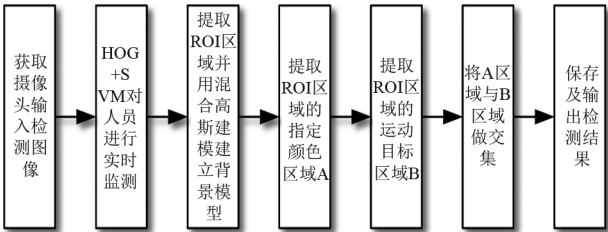


图 2 安全带(帽)穿戴监督流程

#### 1.3 目标入侵监督

主要监督在现场作业过程中,是否有目标入侵到根据真实围栏所划分的虚拟围栏内。系统判定流程如图 3 所示。智能安全监督系统获取摄像头图像,同时获取标准特征库特征,使用单目标模板匹配算法,获取标定区域;然后,用漫水填充算法获得具体虚拟围栏区域,再利用三帧差分法检测到运动目标;最后,用人员闯入检测算法判断运动目标是否闯入虚拟围栏区域。

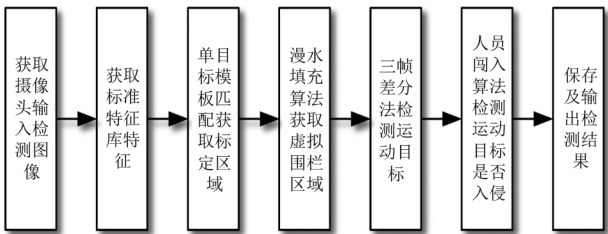


图 3 目标入侵监督流程

#### 1.4 吊臂下危险源监督

主要监督在变电站现场作业过程中,高空作业车的吊臂等危险源下方是否有工作人员。系统判定流程如图 4 所示。智能安全监督系统获取摄像头图像,同时获取标准特征库特征,使用单目标模板匹配

算法,获取标定区域;通过标定区域以及漫水填充算法就可以获得吊臂下方危险区域;再利用 HOG + SVM 进行危险区域周围的人员检测并利用人员闯入算法判断人员是否在危险区域。

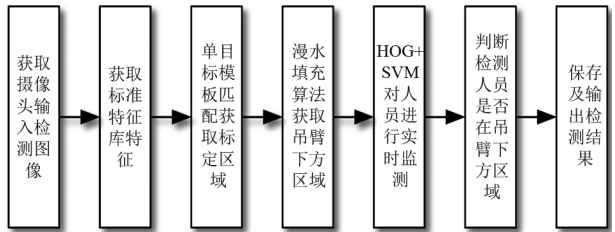


图 4 吊臂下危险源监督流程

1.5 叉车人员协助监督

主要监督在现场作业过程中,是否有工作人员在装载电力设备的叉车边进行协助工作。系统判定流程如图 5 所示。智能安全监督系统获取摄像头图像,同时获取标准特征库特征,使用单目标模板匹配算法获取叉车位置;然后使用 Meanshift 算法实现对叉车的实时跟踪;再利用基于 HOG 特征的 SVM 分类器,检测画面中的人;最后,根据安全距离,判断画面中检测得到的人是否为叉车协助人员。

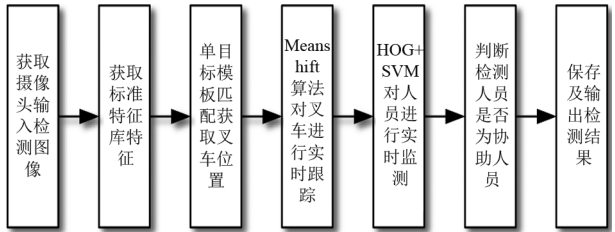


图 5 叉车人员协助监督流程

2 智能安全监督算法

为实现第 1 章中提到的智能安全监督功能,采用了以下检测分析处理算法。

2.1 人员检测算法

基于统计学习的人员检测算法流程如图 6 所示。首先,进行图像特征提取,需要将大量含有识别目标和不含识别目标的图片所组成的样本集特征进行提取;再使用分类算法对这些特征加以机器学习训练并得到分类器;然后,利用训练好的分类器进行判别和检测,即可确认是否包含目标<sup>[2]</sup>。

人员外观的特征算子和特征分类器使用的是 HOG 算子和 SVM 分类器。HOG 是一种经典的对形状特征(尤其是人体形状特征)进行描述的方法,与其他特征算子相比较,HOG 有很多适合做人员检测

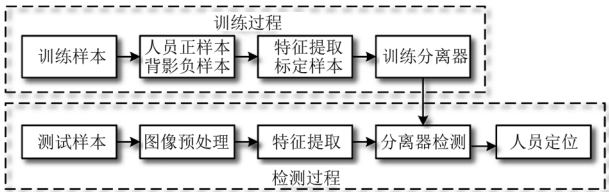


图 6 人员检测算法流程

的优点,例如 HOG 特征提取是在输入图像的局部单元格上进行操作,而不是对整体或者大面积图像进行操作,所以 HOG 特征具有良好的光学不变性和几何不变性<sup>[1]</sup>。SVM 是一种二分类算法,可以理解为是分离两类样本的分类函数。SVM 分类器原理就是取超平面,令不同类别间的特征距离最大化从而实现图像快速分类<sup>[3]</sup>,进而实现二分类以达到人员识别、检测的目的。HOG 特征结合 SVM 分类器已经被广泛应用于图像识别中,尤其在人员检测中获得了极大的成功。

2.2 漫水填充算法

漫水填充算法的主要功能是把一片连通区域填满,就是在图像处理中给定一个种子点作为起始点,向附近相邻的像素点扩散,把颜色相同或者相近的所有点都找出来,并填充上新的颜色使这些点形成一个连通的区域<sup>[4]</sup>。具体算法步骤如下:

- 1) 标记种子点  $M(x,y)$  的像素点;
- 2) 检测该点的颜色,若它与边界色和填充色均不同,就用填充色填充该点,否则不填充;
- 3) 检测相邻位置,继续步骤 2,这个过程持续到已遍历区域边界范围内的所有像素为止。

图 7 为实验室演示实例,图中四边形 ABCD 中取一点  $M(x,y)$ ,记为种子点,向四周填充为白色直到到达极值点即四边形 ABCD 的边,停止填充。此时,形成如图 8 所示的掩膜图,掩膜图在后期检测人员闯入时将发挥关键作用。

2.3 运动目标跟踪与运动目标检测算法

2.3.1 运动目标跟踪算法

运动目标跟踪算法基于均值漂移 (Mean Shift)

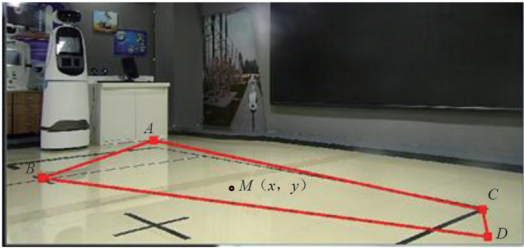


图 7 漫水填充算法实验室演示实例



图 8 漫水填充算法形成的掩膜图

算法,其实质是一种梯度下降算法,通过不断迭代直到收敛到相似性函数的局部极大值点<sup>[5]</sup>。Mean Shift 基本思想为,假如在  $d$  维空间中存在  $n$  个样本点,那么在任意点  $x$  处的 Mean Shift 向量基本可定义为

$$M_h(x) = \frac{1}{k} \sum_{x_i \in S_h} (x_i - x) \quad (1)$$

式中: $S_h$  是一个区域半径为  $h$  的高维球; $k$  为落入高维球区域  $S_h$  中的  $i$  个样本点  $x_i$  的个数。从式(1)可以得出,样本点  $x_i$  到  $x$  的偏移量为  $(x_i - x)$ ,对  $k$  个  $S_h$  中  $(x_i - x)$  的值求和,取得均值后赋值给 Mean Shift 向量  $M_h(x)$ 。由于不同的采样点到  $x$  的距离对于  $M_h(x)$  的最终结果影响很大,因此用核函数来表示样本点距离对均值漂移计算的影响<sup>[5]</sup>。那么,Mean Shift 形式就可以扩展为

$$M(x) = \sum_{i=1}^n \frac{G(x_i - x)w(x_i)(x_i - x)}{\sum_{i=1}^n G(x_i - x)w(x_i)} \quad (2)$$

式中: $G(x)$  为一个单位核函数; $w(x_i)$  为采样点  $x_i$  的权值, $w(x_i) > 0$ 。

Mean Shift 迭代步骤是以  $(x_i - x) < \varepsilon$  时结束。假设给定  $x$  和核函数  $G(x)$ ,首先计算  $M_h(x)$ ,然后把  $M_h(x)$  赋值给  $x$ ,直到不等式  $\|M_h(x) - x\| < \varepsilon$  成立才结束循环,否则继续执行  $M_h(x)$  的计算<sup>[5]</sup>。

图 9 为 Mean Shift 算法具体流程。以事先存储的运动目标区域作为输入,将运动目标区域确立为目标搜索窗口的初始大小;在当前帧中对目标进行建模,在下一帧图像中,采用相似度量函数计算出目标模型与候选模型的相似性;当满足收敛条件时即确定目标在当前帧的位置,依此循环计算就可实现对目标的跟踪<sup>[6]</sup>。

### 2.3.2 运动目标检测算法

图像识别中运动目标检测运用三帧差分法,将相邻的三帧图像作为一组进行差分,这样能较好地检测出运动目标轮廓。三帧差分流程如图 10 所示。

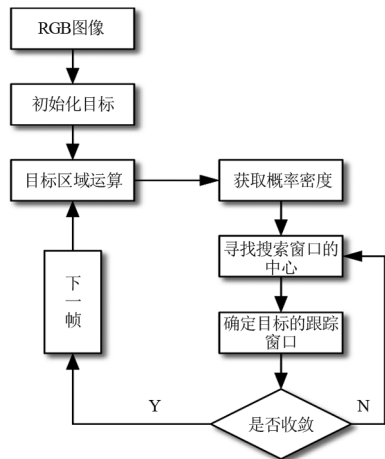


图 9 Mean Shift 算法流程

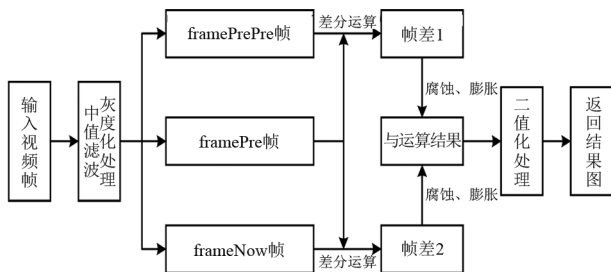


图 10 三帧差分法流程

选取视频流序列中的连续三帧图像  $I_{j-1}(x, y)$ 、 $I_j(x, y)$ 、 $I_{j+1}(x, y)$ , 分别计算相邻两帧的差值。

$$d_{(j,j-1)}(x, y) = |I_j(x, y) - I_{j-1}(x, y)| \quad (3)$$

$$d_{(j+1,j)}(x, y) = |I_{j+1}(x, y) - I_j(x, y)| \quad (4)$$

对得到的差值图通过选择合适的阈值  $T$  进行二值化。

$$b_{(j,j-1)}(x, y) = \begin{cases} 1 & d_{(j,j-1)}(x, y) \geq T \\ 0 & d_{(j,j-1)}(x, y) < T \end{cases} \quad (5)$$

$$b_{(j+1,j)}(x, y) = \begin{cases} 1 & d_{(j+1,j)}(x, y) \geq T \\ 0 & d_{(j+1,j)}(x, y) < T \end{cases} \quad (6)$$

在每个像素点  $(x, y)$  将得到的二值图像进行逻辑“与”运算,进而得到三帧图像中的中间帧的二值图像。

$$B_j(x, y) = \begin{cases} 1 & b_{(j,j-1)}(x, y) \cap b_{(j+1,j)}(x, y) = 1 \\ 0 & b_{(j,j-1)}(x, y) \cap b_{(j+1,j)}(x, y) \neq 1 \end{cases} \quad (7)$$

### 2.4 人员闯入检测算法

该算法主要利用基于 OpenCV 的图像处理技术。首先,通过程序划分警戒区域;然后,利用漫水填充算法获取同原视频帧相同像素尺寸参数的掩膜图像,将警戒区域部分填充为白色,非警戒区域则为



黑色,以该掩膜图像作为是否闯入的判断依据<sup>[2]</sup>。综合考虑人员进入情况,通过判断识别点在掩膜图像中同坐标点的像素取值,判断人员矩形框是否闯入警戒区域。如果该识别点的像素值为(0,0,0),则表示该点不在警戒区内;如果该识别点的像素值为(255,255,255),则表示该点闯入警戒区<sup>[2]</sup>。警戒区则是通过漫水填充算法得到。图 11 为检测人员闯入示意图;图 12 为人员闯入实例图。

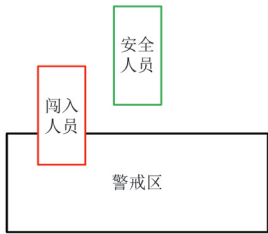


图 11 人员闯入检测

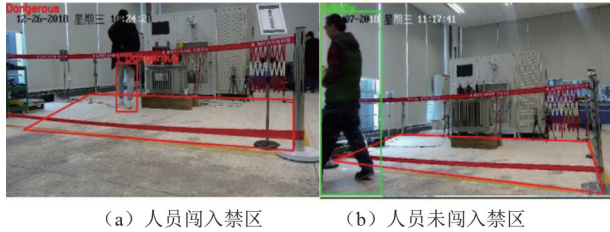


图 12 人员闯入实例

图中不规则红色四边形为虚拟围栏。图 12(a)中人员的脚闯入禁区,为危险状态,用红色矩形框表示;图 12(b)中人员的脚未闯入禁区,为安全状态,用绿色矩形框表示。

2.5 模板匹配算法

模板匹配是一种高级的计算机视觉技术,可识别图像上与预定义模板匹配的部分。模板匹配算法从待识别图像中提取若干特征向量与模板对应的特征向量进行比较,计算图像与模板特征向量之间的距离,用最小距离法判定所属类别进而在图像中找到目标。

模板匹配通过二维卷积实现。在卷积中,输出像素的值通过将两个矩阵的元素相乘并对结果求和,其中一个矩阵代表图像本身;另一个矩阵是模板,为卷积核。

将原始图像和模板设定为 $f(x,y)$ 和 $t(x,y)$ ,卷积后的增强图像为 $g(x,y)$ ,离散卷积结果为

$$g(x,y) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N t(x,y) \cdot f(x-m,y-n) \tag{8}$$

式中, $M,N$ 为模板的尺寸。

模板匹配通常事先建立好标准模板库,但是如果进行暴力匹配,算法的效率会很低。故使用归一化相关系数匹配法,先建立金字塔从顶层粗略计算大概范围,再使用傅里叶变换来进行比较,经过一系列的预处理,可以大大提高匹配速率。模板匹配算法流程如图 13 所示。

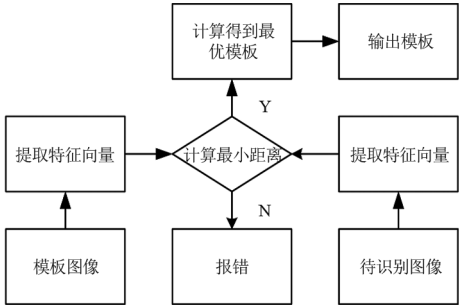


图 13 单目标模板匹配算法流程

3 现场应用

所提以机器人为载体的智能安全监督方法已在多个变电站、换流站成功应用,可以实现对典型作业场景的安全监督。下面着重对 6 个作业场景的安全监督应用情况进行展示。

安全监督机器人监视设备接地操作时,需要在此环节监测试验人员是否做放电接地操作;同时试验人员是否按顺序先拿起接地棒,然后做接地放电操作,以此保证试验人员的安全。操作人员未做接地操作时机器人会一直报警,软件弹出告警提示信息提示操作人员进行接地操作,如图 14 所示,在完成接地操作后会提示接地操作已完成。



图 14 设备接地操作告警

在登高作业时,安全监督机器人实时监测试验人员是否按要求穿戴安全带进行规范作业,当检测到有人员未正确穿戴安全带时会发出告警提示信息,如图 15 所示。

安全监督机器人监视目标入侵时,当有人员闯



入警戒区后机器人能够立刻发出告警,并且在界面弹出告警提示信息,如图 16 所示。

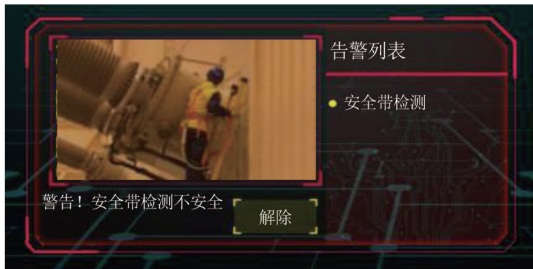


图 15 未按要求穿戴安全带告警



图 16 人员闯入警戒区告警

在设备吊装过程中,安全监督机器人能够在较远的距离对吊臂及吊起的设备下方进行实时监控,避免吊臂或者其他危险源下方发生砸伤人员的安全事故,并在界面弹出告警提示信息,如图 17 所示。

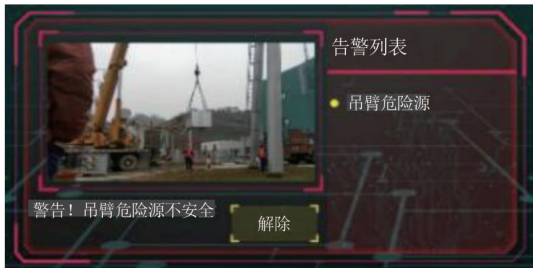


图 17 吊臂下站人风险告警

当设备叉装过程中无人监护或者监护人员距叉车较远时均会发出告警,能够 100% 无死角识别监护人员的到位情况,并在界面弹出告警提示信息,如图 18—图 19 所示。



图 18 叉装过程无人协助告警



图 19 协助人员距离叉车较远告警

## 4 结 论

上面通过对基于机器深度学习的电力作业现场安全生产行为辨识技术的研究,提出了以机器人作为载体的智能安全监督方法。该方法适用于典型作业场景的智能安全监督,成功实现了典型场景下的作业安全风险智能识别和告警,弥补人工安全监督存在的方式单一、长时工作易疲劳、易出现疏忽、水平参差不齐等不足。所提方法在多个变电站、换流站得到成功运用,具备较为广阔的工程应用前景,对智能安全监督相关技术的向前发展具有一定借鉴意义。

### 参考文献

[1] 常政威,彭倩,陈纓. 基于机器学习和图像识别的电力作业现场安全监督方法[J]. 中国电力, 2020, 53(4): 156-157.

[2] 侯杰. 巡逻机器人中的行人检测技术研究[D]. 重庆: 重庆邮电大学, 2017.

[3] 宋敏敏,周泽亚,邱燕,等. 基于 HOG 特征和 SVM 分类器的红外图像智能检测与分类方法[J]. 红外, 2020, 43(4): 25-32.

[4] 王言,卢军. 基于 X 射线图像的 LED 芯片邦定线断裂缺陷的自动检测方法研究[J]. 计算机时代, 2021(1): 21-24.

[5] 石雪楠. 基于 Mean Shift 的运动目标跟踪方法研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2018.

[6] 周记生. 安全敏感区域的入侵检测算法研究与实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2012.

### 作者简介:

权 杰(1988),男,工程师,从事电力安全生产管理工作。

(收稿日期:2023-06-09)

# 电力企业安全风险控制能力评价模型构建与应用

周 林<sup>1</sup>, 徐昌前<sup>1</sup>, 李富祥<sup>2</sup>, 邓元实<sup>2</sup>, 刘 涛<sup>2</sup>, 杨 琳<sup>2</sup>

(1. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041; 2. 国网四川省电力公司

电力科学研究院, 四川 成都 610041)

**摘要:** 电力企业的安全管理是一项极端复杂的系统工程, 人身、设备、电网和信息安全等多方面因素都决定着电力企业安全稳定运行。各电力企业相继开展了安全风险管控工作, 但主要针对单一风险进行识别、评估与控制, 无法评价电力企业面临的综合安全风险。为此, 提出以安全风险控制能力为聚焦点, 采用模糊结果集方法构建电力企业综合安全风险管控评价模型, 全面反映出电力企业在人身、电网、设备、信息等各方面安全风险综合控制能力, 清晰指出了电力企业安全管理薄弱点。控制能力评价模型可为电力企业综合安全风险防控管理提供参考。

**关键词:** 安全风险; 控制能力; 量化排序

**中图分类号:** TM 08 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2023)05-0081-05

**DOI:** 10.16527/j.issn.1003-6954.20230513

## Construction and Application of Assessment Model for Safety Risk Control Capability of Electric Power Enterprises

ZHOU Lin<sup>1</sup>, XU Changqian<sup>1</sup>, LI Fuxiang<sup>2</sup>, DENG Yuanshi<sup>2</sup>, LIU Tao<sup>2</sup>, YANG Lin<sup>2</sup>

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

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

**Abstract:** The security management of electric power enterprises is an extremely complex system engineering, and many factors such as personal, equipment, power grid and information security all determine the safe and stable operation of electric power enterprises. All electric power enterprises have carried out safety risk management and control work, but, they just identify, evaluate and control the single risk, the combine safety risk can not be evaluated. Therefore, focusing on "control capability", a "inherent+control" and "whole process multi-objective" dynamic assessment model of safety risk is proposed, which accurately reflect the comprehensive control capability of electric power enterprises in terms of personal, power grid, equipment, information and other aspects of safety risk. It can provide a reference for safety risk prevention and control management of electric power enterprises.

**Key words:** safety risk; control capability; quantitative priorities

## 0 引言

安全管理的实质是风险管理。为科学合理评估各类行业面临的风险, 安全风险管理专家已相继提出了基于层次分析、逻辑关系理论和概率统计理论的安全风险控制评价方法<sup>[1-2]</sup>, 相关研究应用成果已在国家社会安全、公共信息安全、食品卫生安全、

石油气田安全、铁路安全、核电发电机组安全、危险化学品储存安全等领域进行了广泛应用。

2003年美加大停电、2012年印度大面积停电等事故充分说明, 电网安全是确保国家安全的支点, 事关国计民生和社会稳定大局, 是电力企业必须牢牢守住的生命线。自然环境、人身安全、电网运行、设备安全、网络安全等各类复杂运行条件导致电力企业面对的不安全风险显著提升。现有电力企业风险

管控主要以风险清单和定性分析为主要方法,针对某一项风险点进行风险单链条、单业务识别。评估结果虽然可以反映单项风险评估和控制成效,但无法定量表征电力企业综合安全风险水平且不能对风险控制能力进行综合评价。

下面以电力企业综合安全风险“控制能力”为聚焦点,采用模糊结果集构建了电力企业风险指标体系和管控评价模型,实现了电力企业安全风险水平及风险控制能力量化表征。该评价模型清晰指出了电力企业安全风险薄弱环节及其控制能力,通过及时加强薄弱指标管控,补齐短板,可显著提升电力企业安全风险防范能力,避免不安全事件发生。

## 1 安全风险控制能力评价模型

### 1.1 评价思路

常用的风险控制评价方法有德尔菲法、风险矩阵法、Borda 排序法,上述方法通常是基于对失效事件发生的概率和后果严重程度的二维影响因子来确定。电力安全是国家安全的重要组成,任何一起安全事件都有可能产生连锁反应,影响经济社会发展大局。因此,电力企业安全风险控制不仅需要考量风险影响的大小和风险出现的可能性,还需依据风险类型和特征的差异识别其他主观需求下的管理因子,如图 1 所示。基于《国家电网有限公司安全事故调查规程》,构建的安全风险管控综合控制能力体系将安全生产事故分为人身、电网、设备和信息系统 4 类,重点考察这 4 类风险管控力度,同时聚焦长期以来反复出现、反复治理的重大风险,对频繁发生、后果严重的违章、电网设备事件(故)、网络安全事件加强评价力度。

### 1.2 评价指标

以量化电力企业安全风险控制能力为目的,构建了人身、电网、设备、信息 4 个方面的安全风险指标。指标计算内容及计算方法参照现有统计方法,指标的来源多采用信息系统采集数据,以减少人为主观因素的影响,实现客观公正的评价。

电力企业安全风险主要来源于受自然环境影响、管理权限制约但无法采取措施,或采取了措施但有效性极差的风险,将这类风险称为固有风险。固有风险指标共包含了 3 个指标类型、5 项一级指标和

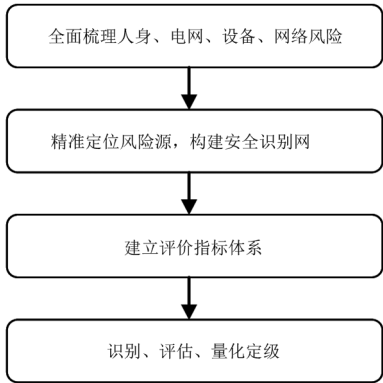


图 1 风险控制能力评价思路

12 项二级指标。对应的,将该固有风险的控制能力称为风险控制状态,设立控制状态风险指标,共包含了 3 个指标类型、9 项一级指标和 11 项二级指标。

#### 1.2.1 固有风险指标体系

固有风险量化指标主要包括人身类、电网设备类和网络信息类,如表 1 所示。

人身类固有风险指标包含了电力企业电网运维建设风险、外部环境风险两类一级指标。电网运维建设风险反映了人员工作面临的风险强度指标;外部环境风险指标包含了车辆平均服役年限、道路交通行使风险等两类能反映人员出行面临的交通风险强度指标。

电网设备类固有风险指标包含了设备因素、环境因素两类一级指标。设备因素表征了电网设备隐患、故障出现率及其对电网运行的风险;环境因素表征了电力企业地理环境条件对电网安全运行带来的风险。

网络信息类指标包含了调度数据网外部接入数量等一类一级指标,主要表征了生产控制大区等网络边界扩大后的数据网络安全。

#### 1.2.2 控制状态风险

控制状态风险量化指标对应固有风险分为 3 类。第一类是人身类指标,该指标依据海因里希事故概率法则构建了作业风险管控等人身安全风险因素;第二类是电网设备类和网络信息类指标,主要从电网运行风险、设备非正常运行率、停电户数、设备故障系数等方面,通过调度自动化、用电采集系统等直接获取数据,对主配电网设备非正常运行率、停电时户数、故障停运率等指标进行采集及评价,建立风险控制状态指标评价体系;第三类是网络信息指标,如表 2 所示。



| 表 1 固有风险量化指标 |            |                                                          |
|--------------|------------|----------------------------------------------------------|
| 一级指标         | 二级指标       | 三级指标                                                     |
| 人身类          | 电网运维建设风险   | 人均设备资产维护量、人均供电用户量、人均工程建设量                                |
|              | 外部环境风险     | 车辆平均服役年限、道路交通安全风险                                        |
| 电网设备类        | 设备因素       | 110 kV 以上主变压器、断路器、GIS 运行年限,110 kV 以上变电站二次设备运行年限、电缆线路运维风险 |
|              | 环境因素       | 雷电强度、冰雪强度、山火强度、地质灾害隐患数量                                  |
| 网络信息类        | 调度数据外部接入数量 | —                                                        |

| 表 2 控制状态风险量化指标 |              |                                                                  |
|----------------|--------------|------------------------------------------------------------------|
| 一级指标           | 二级指标         | 三级指标                                                             |
| 人身类            | 违章管控         | 违章率、车辆违章扣分                                                       |
|                | 作业风险管控       | 风控平台视频终端使用率、作业风险管控成效                                             |
|                | 消防风险管控       | 消防设备设施缺陷率                                                        |
| 电网设备类          | 主网因素         | 110 kV 以上设备非正常运行率、110 kV 以上设备告警频次、110 kV 以上变电站失去远方监视数量、电运行风险管控成效 |
|                | 配电网因素        | 配电网故障停运率                                                         |
|                | 营销因素         | 停电时户数                                                            |
|                | 电力监控系统风险控制率  | —                                                                |
| 网络信息类          | 信息安全风险控制率    | —                                                                |
|                | 电力通信系统设备故障系数 | —                                                                |

1.3 评价模型

1.3.1 指标模糊关系矩阵

模糊数学的基本思想是隶属度的思想,根据各类指标社会属性,结合已经获取的各电力企业指标数据结构,应用模糊数学的方法建立了符合实际的指标隶属函数。

1) 阶梯型隶属函数

提取电力企业 110 kV 以上主变压器、断路器、GIS、二次设备运行年限以及电缆线路运维风险等指标,该类指标主要表征了电网设备隐患、故障出现率等电网运行风险、冰雪强度、山火强度、地址灾害隐患点数据分布,满足阶梯型隶属函数分布特征,运用偏小型计算指标量化值,如式(1)所示。

$$\alpha = \begin{cases} 1, x < a \\ \frac{b-x}{b-a}, a \leqslant x \leqslant b \\ 0, x > b \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\alpha$  为隶属函数为阶梯型的量化指标计算值; $a$ 、 $b$  分别为指标基础数据阈值。

2) 二次抛物型隶属函数

提取作业风险管控、消防管控、违章管控、电网运行风险管控成效、输电线路防雷成效、电力设施森林草原防火工作成效等指标,该类指标满足二次抛物型隶属函数分布特征,运用偏小型计算指标量化值,如式(2)所示。

$$\alpha = \begin{cases} 1, x < a \\ (\frac{b-x}{b-a})^2, a \leqslant x \leqslant b \\ 0, x > b \end{cases} \quad (2)$$

3) 矩阵型隶属函数

提取电力监控系统风险控制率、信息安全风险控制率和电力通信系统设备故障系数指标,该类指标满足矩阵型隶属函数分布特征,运用偏小型计算指标量化值,如式(3)所示。

$$\alpha = \begin{cases} 1, x \leqslant a \\ 0, x > b \end{cases} \quad (3)$$

对隶属函数进行模糊变化,得到模糊评判矩阵中针对某一指标的模糊集合。以 110 kV 以上主变压器、断路器、GIS 运行年限指标为例,特定电力企业主设备运行年限指标可变更为  $R_k = [r_{11}r_{12}r_{13}r_{14}\cdots r_{1k}]$ ,其中  $k$  为主设备种类数。最终可得三级电力企业主设备运行年限模糊矩阵  $\tilde{R}$ 。

$$\tilde{R} = \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11}r_{12}r_{13}r_{14}\cdots r_{1k} \\ r_{21}r_{22}r_{23}r_{24}\cdots r_{2k} \\ r_{31}r_{32}r_{33}r_{34}\cdots r_{3k} \end{bmatrix} \quad (4)$$

1.3.2 指标权重

指标权重体现了各评价指标对最终综合评价指标的贡献程度。这里采用模糊综合评价法,分别计算了固有风险和控制状态风险中人身、电网、网络信息三大类指标权重。

建立确定模糊权重向量  $\tilde{\delta}, \tilde{\delta} = (\delta_1, \delta_2, \delta_3)$ 。其中  $\delta_i \geqslant 0$ ,且  $\sum_{i=1}^3 \delta_i = 1$ 。人身风险管控直接反映了不同基础条件下的电力企业安全风险管控成效。供电稳定性作为电力企业面临的最根本任务,比概率统计



中的状态概率更接近对故障风险的实际描述。网络信息安全表征了各电力企业数字化转型遇到的实际风险。依据专家评议法,结合电力企业监督管理专家数据评议意见统计分析,可得 3 种指标权重分别为 0.5、0.4 与 0.1。

### 1.3.3 模糊结果集

按照上面确定的模糊关系矩阵和指标权重,将权重向量与模糊关系矩阵通过施加合成算子可得到固有风险指标和控制状态风险指标的模糊结果集。

$$\tilde{B} = \tilde{\delta} \times \tilde{R} = [0.5, 0.4, 0.1] \cdot \begin{bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \end{bmatrix} = [b_1, b_2, b_3] \quad (5)$$

模糊结果集体现了电力企业电网运行风险对各等级模糊子集的隶属度,以向量形式方法评价分析电力企业固有安全风险高低和风险控制状态成效。为进一步明确各电力企业综合安全风险控制能力评价,还需对固有风险和控制状态风险模糊结果集进一步处理。

设  $F_{Ri}$  为综合体系模糊系统风险控制指标,有

$$F_{Ri} = \tilde{B}_{\text{固有}} - \tilde{B}_{\text{控制}} \quad (6)$$

由式(6)可知  $F_{Ri}$  为电力企业安全风险控制能力评价结果的定值结果,可用于量化评估各电力企业风险控制情况。当  $F_{Ri}$  数值越大时,表明电力企业安全风险控制能力较强;相反,则表明电力企业安全风险控制能力较弱。

### 1.4 评价修正

针对固有风险高和控制状态风险低的“两端企业”, $F_{Ri}$  评价结果尚不能完全真实反映电力企业对风险控制的努力程度和风险控制成效。为切实打破基础条件好即风险控制能力好的传统风险控制评价思想禁锢,对控制状态排序量化结果进行补偿。

采用四象限修正法则,将电力企业  $F_{Ri}$  安全风险控制分布分为 4 类,如图 2 所示。

$F_{Ri}$  指标排序位于第一象限的企业,固有风险指标值大,控制状态风险值大,说明该类企业面临的安全风险大,风险控制能力差。

$F_{Ri}$  指标排序位于第二象限的企业,固有风险指标值大,控制状态风险值小,说明该类企业面临的安全风险大,风险控制能力好。

$F_{Ri}$  指标排序位于第三象限的企业,固有风险指

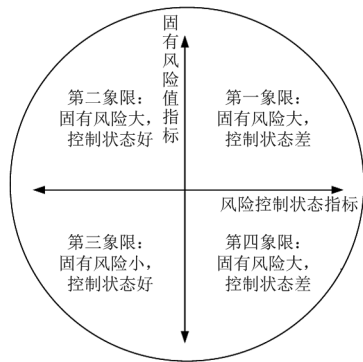
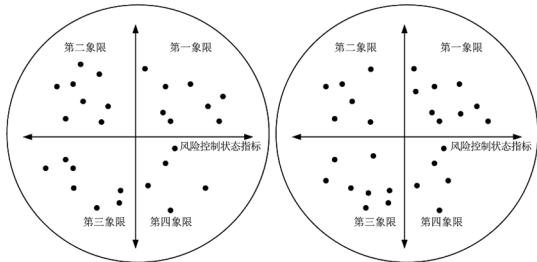


图 2 四象限修正法则

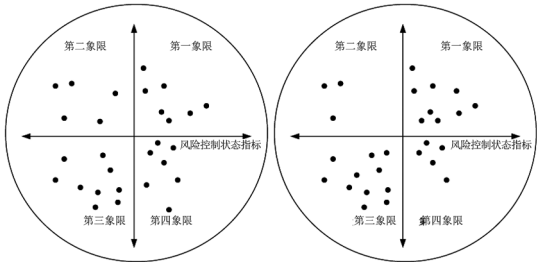
标值小,控制状态风险值小,说明该类企业面临的安全风险小,风险控制能力好。

$F_{Ri}$  指标排序位于第四象限的企业,固有风险指标值小,控制状态风险值大,说明该类企业面临的安全风险小,风险控制能力差。

可以看出,位于第一、第三象限的“两端企业”安全风险控制能力评价结果较为极端,不符合实际评价规律。由于固有风险指标  $\tilde{B}_{\text{固有}}$  是电力企业面临的客观风险,无法改变,因此需对  $\tilde{B}_{\text{控制}}$  进行线性插值修正,对“两端企业”的  $F_{Ri}$  值进行线性插值处理。对  $\tilde{B}_{\text{控制}}$  分别为  $[-4, 4]$ 、 $[-3, 3]$ 、 $[-2, 2]$  和  $[-1, 1]$  的受控状态排序补偿,结果如图 3 所示。



(a)  $[-4, 4]$ 修正后风控排序分布 (b)  $[-3, 3]$ 修正后风控排序分布



(c)  $[-2, 2]$ 修正后风控排序分布 (d)  $[-1, 1]$ 修正后风控排序分布

图 3 综合安全风险量化排序分布

从图 3 得知,对各电力企业的固有风险和控制状态风险指标值分布象限按名次进行分组,对“两端企业” $\tilde{B}_{\text{控制}}$  给予  $[-3, 3]$  的受控状态排序补偿时,

满足隶属函数要求,能够体现电力企业安全风险控制能力真实性与公平性。

2 应用成效

安全风险控制能力评价结果向电力企业安全决策者提供了风险控制状态的量化结果反馈。该评价体系自 2021 年在某省级电力企业全面运行以来,所辖地市级电力企业近 2 年设备平均事故率下降 38.8%,人身不安全事件发生率平均下降 67.4%,网络不安全事件发生率平均下降 29.5%,地市级电力企业本质安全水平得以有效提升。

同时,辅以“对在连续两个评价周期内均排序最后一名电力企业实施警示约谈”等安全管理手段,促使了安全基础条件好的电力企业不能高枕无忧而条件薄弱的电力企业不再安于现状。各电力企业通过风险控制措施,最终实现安全风险全面在控、可控、能控。

3 结 论

针对电力企业面临的安全风险,以风险控制能力为聚焦点,构建了基于隶属函数和模糊结果集的综合安全风险控制能力模型并开展了评价应用,得到以下结论:

- 1)建立的固有风险和控制状态风险指标体系综合全面地涵盖了电力企业在人身、电网、设备、信息等方面的安全风险水平;
- 2)固有风险和控制状态风险指标体系数据均采自各专业数字化信息系统,排除了人工指标干预,确保了电力企业风险基础数据的真实性和客观性;
- 3)安全风险控制能力评价指出了电力企业单个风险指标控制薄弱环节,激发了各电力企业安全

管控内生动力,扭转了以结果为导向的风险控制目标,降低了不安全事件发生概率。

参考文献

[1] 安昊,谢萍,李成儒,等. 国家社会安全风险量化等级评估模型构建研究[J].中国安全生产科学技术,2019(15):35-39.

[2] 赖显光.直流通道检修的安全风险量化评价指标与算法研究[D].广州:华南理工大学,2014.

[3] 陈钊,夏天,贺洲,等. 电力生产作业人身安全风险量化评价体系建设[J].电力设备管理,2022(43):35-37.

[4] 叶刚进.供电企业安全风险辨识与管控体系研究[D].北京:华北电力大学,2014.

[5] 何艳丽.对电力安全实行风险管理的探讨[J].电力安全技术,2013(1).48-49.

[6] 贾树杰.加强检修作业现场安全管理[J].电力安全技术,2008(3).58-59.

[7] 鲍晓慧,侯慧.电力系统可靠性评估述评[J].武汉大学学报(工学版),2008,41(4):96-101.

[8] 谭忠富,李晓军,王成文,等. 电力企业风险管理理论与方法 [M].北京:中国电力出版社,2006.

[9] 文家朝,杨鸿章.基于数值模拟的网络安全风险量化参数优化分析[J].科学技术与工程,2019(7):183-188.

作者简介:

周 林(1966),男,正高级工程师,主要从事安全生产管理工作;

徐昌前(1978),男,高级工程师,主要从事电网运维检修工作;

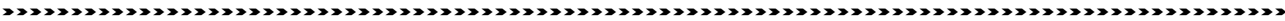
李富祥(1973),男,教授级高级工程师,主要从事安全生产管理工作;

邓元实(1985),男,高级工程师,主要从事安全监察管理工作;

刘 涛(1986),女,高级工程师,主要从事电网环保检测工作;

杨 琳(1982),男,正高级工程师,主要从事安全生产管理工作。

(收稿日期:2023-06-09)



欢迎投稿

欢迎订阅

# 某 110 kV GIS 盆式绝缘子局部放电检测与解体分析

高 竣,邱 炜,蔡 川,刘 鑫,郭 超,石凯萌,陈星宇,何 凯,陈 佳  
(国网四川电力公司成都供电公司,四川 成都 610041)

**摘 要:**对一起 110 kV GIS 盆式绝缘子局部放电的异常信号,综合利用特高频、超声波、气体成分分析以及 GIS 重症监护系统等多手段进行了检测和分析,并通过时差定位精确锁定了放电源位于隔离开关气室。结合特高频图谱特征以及放电源的定位位置,判断该气室盆式绝缘子附近存在绝缘类放电。经开罐检查,该气室内盆式绝缘子与隔离开关导电杆之间的胶合处存在烧蚀痕迹,胶合处的装配工艺不良使得该部位出现毛刺以及气隙,形成不均匀强电场导致局部放电。该起盆式绝缘子放电是一起较为典型的绝缘类放电案例,可以为今后类似异常情况的分析处理提供了借鉴与参考。

**关键词:**GIS; 隔离开关气室; 盆式绝缘子; 特高频; 绝缘类放电

**中图分类号:**TM 855 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2023)05-0086-05

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20230514

## Partial Discharge Detection and Disassembly Analysis of A 110 kV GIS Basin-type Insulator

GAO Jun, QIU Wei, CAI Chuan, LIU Xin, GUO Chao, SHI Kaimeng,  
CHEN Xingyu, HE Kai, CHEN Jia

(State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:**The abnormal signals of partial discharge of 110 kV GIS basin-type insulator are detected and analyzed by UHF, ultrasonic, gas composition analysis and GIS intensive care system etc, and the discharge source is accurately locked in disconnector gas chamber through time difference positioning. Combining the characteristics of UHF spectrum and the location of discharge source, it is determined that there is an insulation discharge near the basin-type insulator in the gas chamber. After the gas chamber is opened, there are traces of ablation at the bonding between the basin-type insulator and the conductive rod of disconnector in the gas chamber. The poor assembly process of bonding causes burrs and air gaps in this part so as to form an uneven strong electric field and cause partial discharge. The discharge of basin-type insulator is a typical case of insulation discharge, which can provide a reference for the analysis and treatment of similar abnormal situations in the future.

**Key words:**GIS; disconnector gas chamber; basin-type insulator; UHF; insulation discharge

## 0 引 言

气体绝缘金属封闭开关设备(gas insulated switchger, GIS)因占地面积小、可靠性高、安装方便、检修周期长、维护工作量小等优点,自 20 世纪 60 年代实用化以来,迅速在世界各国的电网中得到了广泛应用<sup>[1-5]</sup>。仅以国网成都供电公司为例,目前 GIS 变电站数量占 60%以上,并且每年新投变电站基本

以 GIS 为主。但是 GIS 紧凑的结构也带来一些问题,由于其内部空间狭小,内部的电场相对集中,一旦因安装工艺不良出现毛刺、金属颗粒或者接触不良等情况,容易造成局部放电,进而引发设备事故<sup>[6-9]</sup>。而对于 GIS 设备,母线、断路器、隔离开关、互感器、接地开关、避雷器等设备全部密封在封闭罐体中,一旦出现故障,通常导致的停电范围较大且检修流程复杂、平均停电检修时间较长<sup>[10-13]</sup>。

GIS 局部放电会在内部以及周围空间中产生声、

光、电磁波等一系列物理或化学变化,通过检测这些信号,可以及时发现 GIS 内部缺陷<sup>[14-17]</sup>。研究表明,大约有 60% 的局部放电在发展成故障之前是可以通过局部放电检测提前发现的<sup>[18]</sup>。因此,开展局部放电检测对保证 GIS 设备安全稳定运行具有重要意义。

下面介绍一起利用特高频检测技术在某变电站成功发现 110 kV GIS 盆式绝缘子局部放电的案例。首先,详细阐述了放电的发现以及精准定位的过程,并利用 GIS 重症系统实时跟踪监测;最后,结合现场开罐检查验证了 GIS 设备放电的存在和放电点的位置,有效避免了一起电力事故的发生。

## 1 带电检测异常情况

### 1.1 设备基本概况

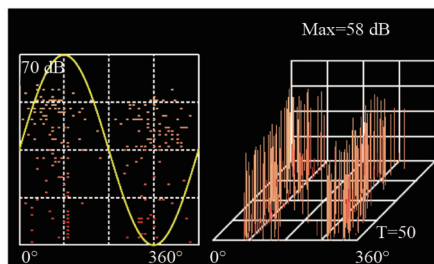
带电检测异常设备为某 220 kV 变电站 110 kV GIS 设备。该设备为三相共箱式结构,即 A、B、C 三相设备在同一个罐体中,型号为 ZF12-126(L),额定电压为 126 kV,额定电流为 3150 A,生产厂家为河南平高电气股份有限公司,投运日期为 2018 年。

### 1.2 带电检测数据分析

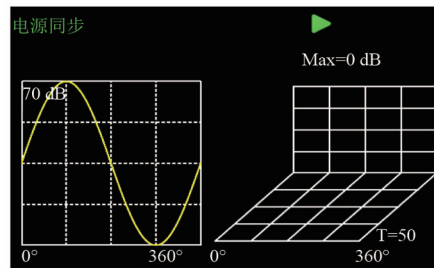
#### 1.2.1 缺陷发现经过

在对某 220 kV 变电站 110 kV GIS 设备进行带电检测时,发现 1 号主变压器 101 间隔几乎所有盆式绝缘子处均检测到异常特高频信号,图谱特征基本保持一致,如图 1 所示,仅幅值略有不同,各部位幅值如图 2 所示。检测当日环境温度为 15 ℃,空气湿度为 65%,天气晴。

从图 1(a)可以看出,各盆式绝缘子处检测的特高频信号图谱在整个工频周期内集中表现为两簇放电信号,放电幅值较大,但是幅值分散。而悬浮类放电相位分布的脉冲序列(phase resolve piuse sequence, PRPS)谱图一般具有“内八字”或“外八字”分布特征,因此初步判断疑似为绝缘类(沿面或者气隙)放电特征。此外,在空气背景中未检测到异常特高频信号,如图 1(b)所示,因此可以判断该放电信号来自于 GIS 设备内部。同时,从 1013 隔离开关气室侧分别往两侧移动传感器时,盆式绝缘子处上检测到的信号幅值呈现减小的趋势,根据幅值定位初步可以判断该放电信号可能位于 1013 隔离开关气室。对该间隔各气室进行超声波检测,未发现异常信号。



(a) 异常信号图谱



(b) 空气背景信号图谱

图 1 异常特高频信号



图 2 各盆式绝缘子处异常特高频信号幅值分布

#### 1.2.2 放电源定位

为了进一步确定放电源在 GIS 中的准确位置,采用时差法来进行定位,定位原理如图 3 所示。通过测量两个传感器之间距离  $L$ ,在示波器上读取两个通道信号的时差  $\Delta t$ ,并设放电源到较近的传感器的距离为  $x$ ,则可通过式(1)计算出放电源位置<sup>[19-20]</sup>。

$$\begin{cases} \Delta t = t_2 - t_1 = \frac{(L - 2x)}{c} \\ x = \frac{L - c\Delta t}{2} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $c$  为电磁波在 GIS 内部传播速度,  $3 \times 10^8$  m/s;  $t_1$  和  $t_2$  分别为两个传感器接收到电磁波信号的时间。

现场时差定位的传感器布置如所图 4 所示,考虑特高频检测幅值较大的位置在 1 号至 4 号盆式绝



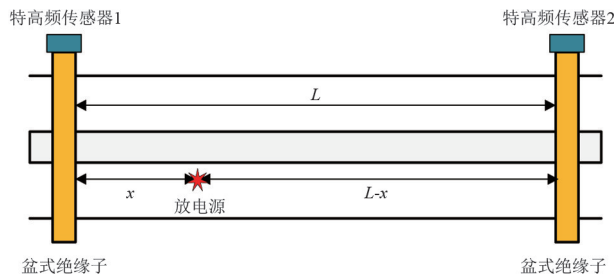


图 3 时差定位原理



图 4 时差定位传感器布置

缘子之间,因此将一个特高频传感器放置于 1 号盆式绝缘子处,另一个传感器放置于 4 号盆式绝缘子处。通过示波器捕捉两个位置检测到信号的时间差,如所图 5 所示,再根据式(1)计算出放电源位置。此外,为了提高时差定位的准确性,反复多次调整改变传感器的位置对放电源进行时差定位,最终定位放电源位于 1013 隔离开关气室,并且距离 2 号盆式绝缘子大约 5 cm 处。由于特征图谱显示放电为绝缘类,推测可能 1013 隔离开关气室靠近 2 号盆式绝缘子处存在绝缘类缺陷。

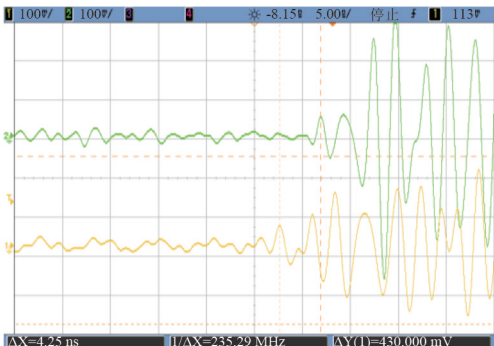


图 5 时差关系

1.2.3 SF<sub>6</sub>分解产物分析

放电源定位后,对 1013 隔离开关气室气体进行 SF<sub>6</sub>分解产物测试与分析,同时检测了其他正常隔离开关气室并进行了对比。检测结果显示,1013 隔离开关气室与正常气室均未检测到 SO<sub>2</sub>及 H<sub>2</sub>S 产物,

主要原因可能是局部放电的能量较低,未使 SF<sub>6</sub>气体发生分解。

2 异常信号跟踪监测

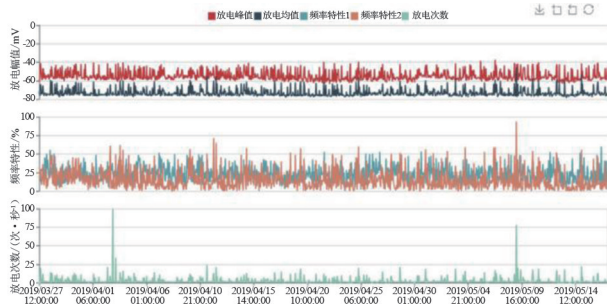
由于该站的负荷较重,处理该缺陷涉及用户停电,因此采取暂不处理继续监视运行。但是,为了实时跟踪该异常信号的发展情况,避免缺陷持续发展导致设备击穿引发停电事故,在该间隔装设了用于 GIS 设备特高频实时检测的重症监护系统,如图 6 所示。该系统可实时采集间隔内各盆式绝缘子处的特高频信号,一旦幅值达到设置的报警阈值,即可发送报警信号至监控人的手机进行短信提醒。



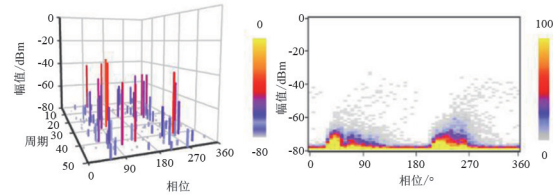
图 6 GIS 重症监护系统

GIS 重症监护系统检测数据如图 7 所示。经过长期的跟踪监测分析比较发现:该间隔特高频异常信号保持稳定,幅值虽然存在一定波动,但是未出现明显增大的情况;放电特征也和前期的检测结果保持一致。这说明该放电未进一步发展处于平稳状态,因此仍继续监视运行,在后续负荷较轻时再申请停电进行开罐解体检修。

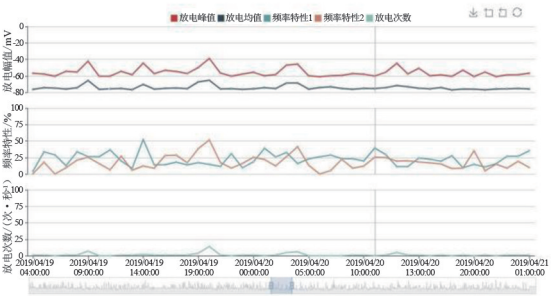
此外,根据重症监护系统长期监测数据,还可以发现频率特性 1 (50 Hz 频率相关性) 和频率特性 2 (100 Hz 频率相关性) 交替领先现象,说明可能存在两种类型的放电,比如尖端放电 (对应 50 Hz 频率相关性) 和绝缘类放电 (对应 100 Hz 频率相关性)。每次频率特性 2 领先频率特性 1 的时候,均出现在在放电次数较多的情况下,也是放电幅值突然变大的地方,并且持续时间不长;而在大多数情况放电次



(a) 连续检测数据图例



(b) 某一时刻典型特征图谱



(c) 某一时刻时域特征图谱

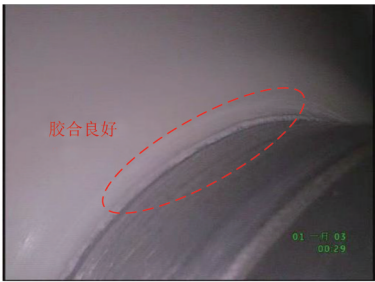
图 7 GIS 重症监护系统检测图谱

数少的时候,则是频率特性 1 领先频率特性 2,放电的幅值也一直保持稳定。因此可推测其中对应频率特性 2 的放电存在间歇性且幅值相对较大,而对应频率特性 1 的放电一直持续存在,但是幅值相对较小。综合判断该放电类型可能为持续尖端和间隙性的绝缘类两种放电形态的叠加。

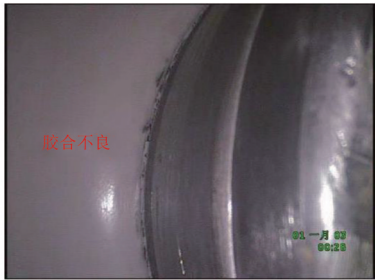
3 开罐解体检查以及原因分析

两年后,由于该站的负荷部分转移到了其他站,遂申请停电对 1013 隔离开关气室进行开罐解体检查。打开该隔离开关气室下部的吸附剂盖板,检查整个气室内均未发现内部金属部件松动或其他放电痕迹,仅发现了 B 相盆式绝缘子与高压导体的交界处存在胶合不良(A、C 相均未发现)有表面剥离的现象,如图 8(b)所示,而且缝隙处存在明显的黑色的放电痕迹,如图 8(c)所示。

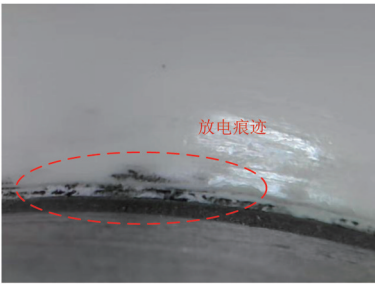
分析造成这些现象的原因:首先,由于 B 相盆式绝缘子与高压导体胶合不好,可能在交界面处造



(a) 正常相胶合处



(b) B相胶合处



(c) 放大后的B相放电痕迹

图 8 1013 隔离开关气室放电痕迹

成一些微小的毛刺凸起,这些毛刺在电场作用下会发生尖端放电;其次,如果中心导体与绝缘体之间结合不良或者发生剥离,在交界面还会形成一些微小气隙,当电场达到一定程度时造成气隙放电。根据前期的重症监护系统的图谱分析,该缺陷类型可能为尖端和绝缘类放电的综合,与开罐的检查结果一致。

此外,文献[21-22]也发现了上述类型的放电缺陷,放电特征图谱和放电位置均和所述案例基本一致。这也说明该类型故障不是个例,根本原因是制造工艺控制不良,这要加强入网设备验收以及在运设备的隐患排查工作。

将 1013 隔离开关气室的缺陷盆式绝缘子更换后,又对该 GIS 间隔进行了交流耐压试验,试验电压为 184 kV,试验过程中对该间隔 GIS 设备进行了局部放电信号监测,未发现异常信号。在该 GIS 间隔再次带电投运后,依旧定期进行局部放电信号跟踪检测,但是始终未检测到异常信号。这表明该气室放电缺陷已被成功消除。

4 结 论

上面通过特高频局部放电检测技术,成功发现并定位了一起 110 kV GIS 盆式绝缘子局部放电缺陷,通过解体检查和处理,得到如下结论和建议:

1)基于巡检发现的盆式绝缘子处的异常特高频信号,利用特征图谱分析、时差定位等手段确定了 GIS 内部存在绝缘类放电,并通过开罐解体检查验证了带电检测分析的结论。这证明了带电检测可以准确发现 GIS 内部存在局部放电的潜伏性缺陷。

2)盆式绝缘子放电原因为盆式绝缘子与隔离开关导电杆之间胶合处的装配工艺不良,使得该部位出现毛刺和气隙,形成不均匀强电场导致局部放电。建议设备运维单位对同厂家、同类型、同批次的 GIS 设备逐一开展带电检测排查,及时发现类似缺陷隐患,防止事故发生。

3)GIS 的安装工艺不良会对 GIS 设备的运行埋下极大的安全隐患,应加强 GIS 设备安装阶段的技术监督,尤其是在运维阶段容易出现问题的部位或者部件应该重点加强验收和把关。

参考文献

[1] 周波,高竣,杨红权,等.一起 220 kV GIS 刀闸悬浮放电缺陷案例分析[J].高压电器,2020,56(12):308-312.

[2] 郭超,周波,谭学敏,等.GIS 隔离开关内悬浮放电缺陷带电检测与解体分析[J].高压电器,2021,57(5):168-174.

[3] 丁登伟,高文胜,刘卫东.采用特高频法的 GIS 典型缺陷特性分析[J].高电压技术,2011,37(3):706-710.

[4] 李军浩,韩旭涛,刘泽辉,等.电气设备局部放电检测技术述评[J].高电压技术,2015,41(8):2583-2601.

[5] 何金,鄱晓光,李旭,等.基于多种检测手段的组合电器悬浮放电诊断及定位分析[J].高压电器,2018,54(3):25-31.

[6] 李晓峰,刘振,庞先海,等.特高频局部放电检测技术在 GIS 设备上的典型应用[J].高压电器,2013,49(7):100-103.

[7] 李德军,沈威,郭志强.GIS 局部放电常规检测和超声波检测方法的应用比较[J].高压电器,2009,45(3):99-103.

[8] 牛勃,马飞越,丁培,等.GIS 局部放电智能巡检定位技术及应用[J].高压电器,2020,56(1):188-196.

[9] 邵先军,何文林,刘浩军,等.基于数值仿真与多源聚类的 GIS 局部放电诊断与回归分析[J].高电压技术,2017,43(10):3163-3172.

[10] 宋方超,梁雯,张春旭,等.磁致伸缩效应对 GIS 超声波局部放电检测的影响及实例分析[J].高压电器,2019,55(3):234-238.

[11] 宋辉,代杰杰,李喆,等.运行条件下 GIS 局部放电严重程度评估方法[J].中国电机工程学报,2019,39(4):1231-1240.

[12] 张欣,李高扬,黄荣辉,等.不同运行年限的 GIS 缺陷率统计分析与运维建议[J].高压电器,2016,52(3):184-188.

[13] 刘君华,姚明,黄成军,等.采用声电联合法的 GIS 局部放电定位试验研究[J].高电压技术,2009,35(10):2458-2463.

[14] 芦竹茂,刘庆,王天正,等.多种带电检测方法在 GIS 局部放电诊断中的综合应用与研究[J].高压电器,2017,53(10):222-226.

[15] 宋东波,秦少瑞,陈凡,等.几起 GIS 绝缘件局部放电缺陷的检测与分析[J].高压电器,2018,54(11):153-159.

[16] 王国利,高超,杨芸,等. GIS 绝缘缺陷局部放电检测的有效性研究[J].高压电器,2018,54(11):62-72.

[17] JUDD M D, FARISH O, HAMPTON B F. The excitation of UHF signals by partial discharges in GIS[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1996,3(2):213-228.

[18] 陈江添.一起 220 kV GIS 设备局部放电的案例分 析[J].高电压技术,2016,42(2):225-229

[19] 尤德锋,李兴旺,庞小峰.GIS 局部放电特高频时差定位法应用案例分析[J].广东电力,2014,27(8):98-101.

[20] 马建涛,冯新岩,崔勇,等.特高频时差定位法在 GIS 局部放电检测中的应用[J].山东电力技术,2018,45(10):49-52.

[21] 周电波,许本茂,张劲,等.GIS 固体绝缘缺陷所激发特高频信号时频特征研究[J].高压电器,2021,57(2):33-41.

[22] 王浩然,郭子豪,张丝钰,等.缺陷对特高压交流盆式绝缘子电场分布的影响[J].高电压技术,2018,44(3):982-992.

作者简介:

高 竣(1989),男,博士,高级工程师,主要研究方向为电气设备状态监测与故障诊断。

(收稿日期:2023-04-01)



# 一起变压器绕组变形故障的检测及分析

李 林<sup>1</sup>, 谢 茜<sup>2</sup>

(1. 国网四川省电力公司德阳供电公司, 四川 德阳 618000;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

**摘要:**针对一起在运 110 kV 变压器的绕组变形故障进行检测与分析。首先,通过电容量、短路阻抗、频响曲线检测初步分析变压器绕组变形情况;然后,通过变压器解体检查及绕组材质检测分析了造成事故的原因;最后,针对该故障提出了针对性的整改措施。

**关键词:**变压器;绕组变形;电容量;短路阻抗;频率响应;屈服强度

**中图分类号:**TM 406 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2023)05-0091-04

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20230515

## Detection and Analysis of Winding Deformation of A Transformer

LI Lin<sup>1</sup>, XIE Qian<sup>2</sup>

(1. State Grid Deyang Electric Power Supply Company, Deyang 618000, Sichuan, China;

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

**Abstract:**A winding deformation of 110 kV transformer in operation is detected and analyzed. Firstly, the situation of winding deformation are preliminary analyzed through capacitance, short circuit impedance and frequency response detection, and then the causes of the accident are analyzed through transformer disassembly inspection and winding material detection. Finally, the corresponding rectification measures are proposed.

**Key words:**transformer; winding deformation; capacitance; short circuit impedance; frequency response; yield strength

## 0 引 言

变压器是电力系统中重要的电气设备,对电网安全稳定运行起着重大的作用。变压器在运行过程中,遭受到近区短路故障时,绕组内会流过很大的短路电流,在最严重时通过的短路电流可达额定数值的 15~20 倍<sup>[1]</sup>。由于绕组承受的电力与电流平方成正比,如果绕组自身强度不高、压紧结构不良、绕制工艺不佳,则可能造成变压器绕组发生机械变形甚至损坏。因此,对变压器绕组状态进行评价具有重要意义。绕组变形诊断检测通常是在出厂前或现场安装后对绕组进行检测,运行期间也会进行一系列常规检测,通过对相关特征量的测量分析判断绕组是否有变形、位移等异常现象发生。

目前,诊断变压器绕组变形比较成熟的检测

方法有短路阻抗法、电容量法和频响法。在实际工作中需要结合这 3 种方法进行综合分析。下面介绍了一起 110 kV 主变压器绕组变形的故障案例,通过电气试验综合分析、绕组材质检测以及解体检查,分析了造成事故的原因,提出了相应的整改措施。

## 1 故障简述

2019 年 7 月,某 110 kV 变电站 10 kV 母联断路器开关柜内相间绝缘挡板放电,发生相间短路,因 10 kV 母线分列运行,1.30 s 后过流 II 段保护动作,切断故障电流,试验诊断为主变压器绕组变形。之后该主变压器返厂检修,发现中低压 B、C 相绕组变形。按照原设计方案重新绕制中低压 B、C 相绕组,经出厂试验后重新投入运行。



2021 年 3 月,该主变压器停电进行例行试验,发现主变压器中压侧 A 相试验数据异常。该变电站负荷较轻,最大负载率为 50%,无冲击性负荷。在 2020 年 11 月,由于 35 kV 用户变电站进线柜穿柜套管故障,导致该站 35 kV 供用户变电站的出线跳闸,故障电流为 423 A,该主变压器遭受短路电流冲击后色谱试验仍正常。该变压器型号为 SSZ11-50000/110,于 2011 年 5 月出厂,于 2012 年 8 月首次投入运行。

## 2 检测情况

对该变压器进行电气试验和油色谱试验,其中主变压器电容量、短路阻抗、绕组频响曲线均异常,其余试验正常。

### 2.1 电容量测试

设高压绕组对中、低压绕组及地的电容为  $C_{x1}$ ,中压绕组对高、低压绕组及地的电容为  $C_{x2}$ ,低压绕组对高、中压绕组及地的电容为  $C_{x3}$ ,高、中、低压绕组对地的电容为  $C_{x4}$ ,高、中压绕组对低压绕组及地的电容为  $C_{x5}$ 。2019 年主变压器返厂大修后电容量交接试验值、2021 年主变压器例行试验的电容量测试值如表 1 所示。

| 表 1 电容量测试值 |                  |                  |        |
|------------|------------------|------------------|--------|
| 测试项目       | 2019 年<br>电容量/nF | 2021 年<br>电容量/nF | 偏差/%   |
| $C_{x1}$   | 14.64            | 14.05            | -4.199 |
| $C_{x2}$   | 22.60            | 25.86            | 14.425 |
| $C_{x3}$   | 20.06            | 23.97            | 19.492 |
| $C_{x4}$   | 14.47            | 14.58            | 0.760  |
| $C_{x5}$   | 14.92            | 18.73            | 25.536 |

使用集中参数建模的方法对变压器各部分电容量进行简化计算:令高压绕组对地电容为  $C_1$ ,中压绕组对地电容为  $C_2$ ,低压绕组对地(铁芯)电容为  $C_3$ ,高压绕组与中压绕组间电容为  $C_{12}$ ,中压绕组与低压绕组间电容为  $C_{23}$ ,高压绕组与低压绕组间电容为  $C_{13}$ 。由于  $C_{13}$  数值较小,常被忽略。

通过电容量实测值的 5 组数据简化建模,计算得到的电容量如表 2 所示。

$$\begin{cases} C_{x1} = C_1 + C_{12} \\ C_{x2} = C_2 + C_{12} + C_{23} \\ C_{x3} = C_3 + C_{23} \\ C_{x4} = C_1 + C_2 + C_3 \\ C_{x5} = C_1 + C_2 + C_{23} \end{cases}$$

表 2 电容量计算值

| 项目       | 2019 年<br>电容量/nF | 2021 年<br>电容量/nF | 偏差/%   |
|----------|------------------|------------------|--------|
| $C_1$    | 3.480            | 3.460            | -0.578 |
| $C_2$    | 1.185            | 1.210            | 2.110  |
| $C_3$    | 9.805            | 9.910            | 1.071  |
| $C_{12}$ | 11.160           | 10.590           | -5.382 |
| $C_{23}$ | 10.255           | 14.060           | 37.104 |

从表 1 可以看出,两次测量值发生明显变化,偏差最大达到 25.536%,远远超过了《输变电设备状态检修试验规程》中 3% 的警示值<sup>[2]</sup>。

从表 2 可以看出,中压绕组与低压绕组之间的电容量,增加了 37.104%,高压绕组与中压绕组之间电容量减小了 5.382%,中压绕组对地的电容量增加了 2.110%。分析认为中压绕组在电力作用下向铁芯收缩,导致中压绕组与低压绕组间的距离大幅度减小,高、中压绕组之间的距离小幅度增大,导致电容量测试值出现明显异常。

### 2.2 短路阻抗测试

2019 年主变压器返厂大修后短路阻抗交接试验值、2021 年主变压器例行试验的短路阻抗测试值如表 3 所示。两次均采用三相法进行测量。

表 3 主变压器短路阻抗值

| 测试<br>部位      | 变压器<br>档位       | 短路阻抗/% |        | 偏差/%   |
|---------------|-----------------|--------|--------|--------|
|               |                 | 2019 年 | 2021 年 |        |
| 高压绕组对<br>中压绕组 | 极限正分接<br>(1 挡)  | 10.347 | 10.573 | 2.184  |
|               | 主分接<br>(9 挡)    | 9.844  | 10.181 | 3.423  |
|               | 极限负分接<br>(17 挡) | 9.828  | 10.149 | 3.266  |
| 高压绕组对<br>低压绕组 | 极限正分接<br>(1 挡)  | 18.480 | 18.475 | -0.027 |
|               | 主分接<br>(9 挡)    | 18.010 | 18.008 | -0.011 |
|               | 极限负分接<br>(17 挡) | 18.020 | 18.005 | -0.083 |
| 中压绕组对<br>低压绕组 | 主分接<br>(9 挡)    | 6.499  | 6.161  | -5.486 |

从表 3 可以看出:1)2021 年的测试值与 2019 年的测试值最大偏差达到 5.486%,不满足《电力变压器绕组变形的电抗法检测判断导则》相对变化不超过±2% 的要求<sup>[3]</sup>;2)高压绕组对低压绕组短路阻抗值的偏差很小;3)高压绕组对中压绕组短路阻抗值增加了约 3%,认为高压对中压的漏电抗增加了,即高压与中压的漏磁通增加,高、中压绕组之间的距离增大;4)中压绕组对低压绕组短路阻抗值减小

了 5.486%,认为中压对低压的漏电抗减小了,即中压与低压的漏磁通减小,中低压绕组之间的距离减小。

之后,对主变压器采用单相法进行短路阻抗值测量,得到的结果如表 4 所示。

| 表 4 短路阻抗单相测试值 |             |        |        |        |        |
|---------------|-------------|--------|--------|--------|--------|
| 测试部位          | 变压器挡位       | 短路阻抗/% |        |        | 相间偏差/% |
|               |             | A 相    | B 相    | C 相    |        |
| 高压绕组对中压绕组     | 极限正分接(1 挡)  | 11.510 | 10.310 | 9.890  | 16.380 |
|               | 主分接(9 挡)    | 10.990 | 9.775  | 9.774  | 12.441 |
|               | 极限负分接(17 挡) | 10.960 | 9.735  | 9.753  | 12.583 |
| 高压绕组对低压绕组     | 极限正分接(1 挡)  | 18.410 | 18.540 | 18.470 | 0.706  |
|               | 主分接(9 挡)    | 17.990 | 18.030 | 17.990 | 0.222  |
|               | 极限负分接(17 挡) | 18.000 | 18.010 | 17.990 | 0.111  |
| 中压绕组对低压绕组     | 主分接(9 挡)    | 5.454  | 6.487  | 6.540  | 19.912 |

从表 4 可以看出,中压绕组对低压绕组短路阻抗值相间偏差最大,其中 A 相的短路阻抗值与其余两相偏差最大,分析认为 A 相绕组可能发生了严重变形。

2.3 频响法绕组变形测试

利用频响法对变压器进行测试,发现高压、低压绕组三相频响曲线相似度较高,中压绕组三相频响曲线差异较大,其频响曲线如图 1 所示。黄色曲线为 A 相,绿色曲线为 B 相,红色曲线为 C 相。相关系数分析结果如表 5 所示,表中  $R_{21}$  表示 A、B 两相的相关系数, $R_{31}$  表示 A、C 两相的相关系数, $R_{32}$  表示 B、C 两相的相关系数。

根据《电力变压器绕组变形的频率响应分析法》中相关系数与变压器绕组变形程度的关系,低频段相关系数  $R_{LF}<0.6$ ,为严重变形;低频段相关系数  $0.6\leq R_{LF}<1.0$  或中频段相关系数  $R_{MF}<0.6$ ,为明显变形;低频段相关系数  $1.0\leq R_{LF}<2.0$  或中频段相关系数  $0.6\leq R_{MF}<1.0$ ,为轻度变形。从图 1 和表 5 可以看出,在低频段(1~100 kHz)3 条曲线重合性较好,相关系数  $1.0\leq R_{LF}<2.0$ ;在中频段(100~600 kHz)3 条曲线一致性很差,峰值和频率变化较大,A 相曲线的谐振峰值点向低频方向偏移,相关系数  $R_{21}<0.6,R_{31}<0.6,R_{32}\geq 1.0$ ;在高频段(600~1000 kHz)

3 条曲线的走向基本一致,三相曲线间的相关系数  $R_{HF}\geq 0.6$ 。分析认为变压器 A 相绕组的分布电感、电容发生变化导致绕组发生局部变形现象。

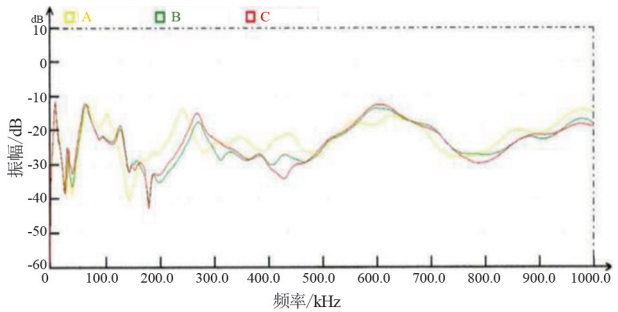


图 1 中压绕组频响曲线

| 表 5 中压绕组相关系数分析结果 |                    |                      |                       |
|------------------|--------------------|----------------------|-----------------------|
| 相关系数             | 低频段<br>(1~100 kHz) | 中频段<br>(100~600 kHz) | 高频段<br>(600~1000 kHz) |
| $R_{21}$         | 1.24               | 0.27                 | 0.81                  |
| $R_{31}$         | 1.20               | 0.28                 | 0.75                  |
| $R_{32}$         | 1.37               | 1.19                 | 1.77                  |

电容量和短路阻抗分析的结果一致性较高,认为中、低压绕组之间的电气距离缩小了。从频响曲线和短路阻抗测试分析认为 A 相绕组变形可能性极大。综合电容量、短路阻抗、频响曲线测试结果,认为变压器中压 A 相绕组在电动力作用下向铁芯收缩,发生严重变形。

3 解体检查及电磁线材质检测

该主变压器再次返厂后进行解体检查,发现:主变压器中压 A 相绕组向铁芯收缩严重变形;低压绕组受挤压无法吊出;中压 B 相绕组其中一匝稍微变形凹陷。各绕组解体检查情况如图 2 所示。

随机截取了变压器中、低压侧 A、B、C 三相若干段绕组进行屈服强度检测,检测结果见表 6。中压侧三相绕组屈服强度检测值均小于设计值 180~200 MPa,低压侧三相绕组屈服强度检测值均小于设计值 220~240 MPa。根据测试结果,判定中、低压线圈电磁线为软态铜。

| 表 6 中低压绕组屈服强度检测结果 |               |               |
|-------------------|---------------|---------------|
| 相别                | 低压电磁线屈服强度/MPa | 中压电磁线屈服强度/MPa |
| A                 | 90            | 88            |
| B                 | 93            | 89            |
| C                 | 91            | 89            |



(a) 中压A相绕组



(b) 中压B相绕组

图 2 主变压器解体检查情况

4 结 论

综上所述,变压器发生绕组变形故障的主要原

(上接第 6 页)

[14] 黄华,陈璐,吴天逸,等.城市轨道交通动态运行对交流电网变压器偏磁直流的影响[J]. 电网技术,2022,46(11):4524-4533.

[15] 王爱民,林圣,李俊逸,等.城市轨道交通长线路杂散电流仿真模型[J]. 高电压技术,2020,46(4):1379-1386.

[16] LIN Sheng, WANG Aimin, LIU Mingjie, et al. A multiple section model of stray current of DC metro systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery 2021, 36(3): 1582-1593.

[17] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地铁设计规范: GB 50157—2013[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2014.

[18] 谷应科,李俊龙,方毅平,等. 220 kV 变压器高压侧直流电阻超标原因分析及处理[J]. 变压器,2020,57(1):84-87.

[19] WANG Aimin, LIN Sheng, HU Ziheng, et al. Evaluation model of DC current distribution in AC power systems caused by stray current of DC metro systems[J]. IEEE

因是变压器承受短路冲击后绕组变形。返厂大修重绕绕组后,在遭受较小的短路电流的情况下,由于变压器电磁线屈服强度不满足要求而再次发生变形。

为了保证变压器安全运行,提出以下措施:1)在变压器生产阶段,严格按照取样要求对绕组线进行抽检;2)实时监测变压器遭受近区短路情况,当短路次数超过标准要求后,对变压器停电进行诊断性试验;3)通过在主变压器中、低压侧增加快速保护,减少短路冲击时间,同时完善主变压器中低压侧绝缘化改造,做好防近区短路措施。

参考文献

[1] 梁振光. 大型电力变压器绕组的短路强度问题[J]. 变压器,2003,40(8):9-12.

[2] 全国电力设备状态维修与在线监测标准化技术委员会. 输变电设备状态检修试验规程: DL/T 393—2021[S]. 北京:中国电力出版社,2022.

[3] 电力行业电力变压器标准化技术委员会. 电力变压器绕组变形的电抗法检测判断导则: DL/T 1093—2018[S]. 北京:中国电力出版社,2018.

作者简介:

李 林(1984),男,硕士,高级工程师,主要从事变电检修管理工作。  
(收稿日期:2023-06-28)

Transactions on Power Delivery, 2021, 36(1): 114-123.

[20] 中国电力企业联合会标准化管理中心. 交流电气装置的接地设计规范: GB/T 50065—2011[S]. 北京:中国计划出版社,2012.

[21] 李欢,傅闯,辛清明,等. 高压直流输电系统直流谐波阻抗的解析计算及谐振分析研究[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(19):67-79.

[22] 俞翔,鲁江,董云龙,等. 适用于特高压多端混合直流输电系统的稳态电压控制方法[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(1):174-180.

作者简介:

李小鹏(1987),男,博士,高级工程师,研究方向为交直流混联电网控制保护技术;

张华杰(1990),男,硕士,工程师,从事电力系统保护与控制工作;

吴嘉煜(2000),男,硕士研究生,研究方向为电力系统保护与控制;

周文越(1989),男,硕士,工程师,从事电力系统继电保护运行、检修、研发相关工作。

(收稿日期:2023-04-13)



# 四川省新型电力系统研究院

SICHUAN NEW ELECTRIC  
POWER SYSTEM RESEARCH INSTITUTE

四川省新型电力系统研究院有限公司（以下简称“四川新研院”）于2022年1月由时任四川省副省长曹立军授牌成立，是全国首个省级新型电力系统研究平台。四川新研院定位于能源行业新型智库，始终坚持理论引领、科技驱动的发展方式，以服务经济社会和能源电力高质量发展为主要任务，近期依托国网四川经研院、国网四川电科院和国网四川信通公司，远期汇集行业“产学研”和“网源荷储”多方力量，打造新一代水、风、光消纳和配置的研究平台，构建新型电力系统四川样板和全国标杆。

当前，四川新研院已入围“十四五”第一批国家“赛马争先”创新平台，参与共建天府永兴实验室新型电力系统研究中心，并与高校、科研院所、行业领军企业开展交流研讨，稳步推进四川新型电力系统建设的创新研究与科研实践。

期待与各界专家学者的交流合作！





# 天府永兴实验室

TIANFU YONGXING LABORATORY

## 新型电力系统研究中心



面向国家战略

紧扣四川特色

助力新型电力系统从图景到现实

研究中心围绕能源电力碳中和主战场开展新型电力系统的理论研究、技术创新、平台建设、人才培养。探索低碳绿色新型电力系统的四川解决方案。

交流合作  
加入我们

028-60667707  
office@tfyxlabs.cn

刊号: ISSN1003-6954  
CN51-1315/TM

广告发布登记编号: 川广登字【2021】0005号 公开发行 国内定价12.00元/期