

# 山东电力技术

## SHANDONG ELECTRIC POWER



山东能源互联网仿真防御实验室

广告

国网山东省电力公司主办

ISSN 1007-9904



# 2025.3

第52卷  
2025年3月

收录情况

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

山东电力技术  
SHANDONG DIANLI JISHU  
(月刊)

1974 年创刊 2025 年第 3 期  
第 52 卷（总第 328 期）  
2025 年 3 月 25 日出版

主管单位：国网山东省电力公司  
主办单位：国网山东省电力公司  
编辑出版：《山东电力技术》编辑部  
地址：济南市市中区望岳路 2000 号  
邮政编码：250003  
电话：(0531) 67982997  
电子信箱：sddljs@sina.com  
网址：sddljs.cbpt.cnki.net  
印刷：济南浪宇印刷有限公司  
发行：公开发行 自办征订  
定价：18.00 元/册

《山东电力技术》编辑委员会

顾问：陈维江 郑建华 侯保荣 雷清泉 王成山

主任：孙岗

副主任：王伟胜 吴文传 刘玉田 陈志勇 梁作宾  
田健

委员：（按姓氏笔画为序）

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

青年编委主任委员：姚伟 李正烁

青年委员：（按姓氏笔画为序）

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

主编：吴文传 孟瑜

执行主编：马艳

责任编辑：王学厚

编辑：郑天茹 娄婷婷 张丹丹 车永强

中国标准连续出版物号：

ISSN 1007-9904

CN 37-1258/TM

期刊基本参数：

CN 37-1258/TM\*1974\*m\*A4\*96\*zh\*P\* ¥18.00\*8000\*10\*2025-3\*n

# 《山东电力技术》入选 中国科技核心期刊



# “储能支撑低碳高品质新型配电系统构建 关键技术研究”

## 专题征稿

受中国科协委托，中国能源研究会主办、中国能源研究会电能专委会承办“配微储协同的低碳高品质新型配电系统”专题论坛。根据科协统一安排，我刊参与组织征集与论坛主题相关的论文工作。

该论坛旨在响应国家“双碳”战略目标，推动新型电力系统建设，助力能源结构绿色低碳转型。本刊据此策划“储能支撑低碳高品质新型配电系统构建关键技术研究”专题，**特约主编为华北电力大学（保定）余洋教授、青年教师华北电力大学王玉翠博士 / 讲师**，面向国内外专家学者、科研机构及产业界公开征稿。

重点探讨储能助力新型配电系统构建的关键技术，聚焦绿色低碳发展、高质供电保障、强韧系统支撑、高效运行调控等前沿方向，为行业提供理论支撑与实践参考。

### 一、内容包括但不限于：

- (1) 移动储能参与配电网协同运行技术
- (2) 储能系统优化配置与控制
- (3) 储能协同的配电网碳足迹追踪与低碳演进技术
- (4) 面向新型配电系统的多类型储能协同规划与动态配置技术
- (5) 分布式储能统一调度管理
- (6) 市场环境下数据与模型驱动的配微系统储能优化运行技术
- (7) 储能提升新型配电系统电能质量与供电保障技术
- (8) 储能参与配电系统实时功率平衡控制策略
- (9) 储能支撑配电系统故障恢复与供电可靠性技术
- (10) 储能赋能配电系统韧性的多源协同规划技术
- (11) 绿色低碳下储能参与配电需求侧响应调控机制
- (12) 基于大数据与 AI 的储能配电高效调控应用技术
- (13) 储能提升配电系统供电品质的多目标优化控制技术

### 二、发表计划

征文截止日期：**2025 年 4 月 15 日**；

刊登时间：**2025 年 6 月、7 月**，以专题形式刊登。

本专题稿件享有本刊审查绿色通道待遇，一经录用，尽快开具录用通知。

### 三、投稿要求

详见本刊官网投稿指南。

### 四、投稿方式

登陆网站 <https://sddj.cbpt.cnki.net/portal>，并选择“储能支撑低碳高品质新型配电系统构建关键技术研究”栏目在线投稿，我刊将组织专家进行评审，评审结果将以邮件形式告知。

## 目次

## 能源互联网

- 含光-储-充的微电网日前经济调度方法研究 ..... 郭 杉,郭 洋,刘小恺,董文娟(1)
- 考虑需求响应和碳交易的水泥企业生产调度方法研究 ..... 刘鹏龙,王平欣,夏晓东,杨 剑,王 清(12)
- 计及阶梯碳交易机制的热电氢联供型综合能源系统多目标优化调度  
..... 邢家维,赵 帅,杨 颂,王玥娇,孙立群(21)

## 配电网

- 智能配电网全方位一键转供技术 ..... 宋圣兰,张 超,刘晓亮,李 琰,张乃刚(32)
- 考虑不确定性分布式电源的电能质量概率性选址定容策略 ... 李建杰,钟文涛,穆明亮,李 平,王 志(40)
- 台风灾害中配电网故障抢修策略 ..... 吴龙腾,郭 乾,吴杰康,陈冠熹(49)

## 电网运行与控制

- 基于时频域多特征和优化KELM的电能质量扰动检测..... 徐 琳,范松海,赵 淳,隗 震,刘 畅(59)
- 一种快速动态响应同步调相机低励限制定值整定方法 ..... 解笑苏,朱应峰,李 明,孙福春,许金阳(68)

## 发电技术

- 基于CiteSpace的核电机组故障诊断发展趋势分析 ..... 李 蔚,李 翱,方兴煜,卢韩斌,林小杰,尚宪和(75)
- 局部配水对高位收水冷却塔防冻节能特性影响的数值研究  
..... 杨 利,李 旋,李禹江,韩 强,张智慧,赵元宾(86)

# CONTENTS

## •Energy Internet•

Research On The Day-ahead Economic Dispatch Method of Microgrid Including Solar-ESS-EV

..... GUO Shan, GUO Yang, LIU Xiaokai, DONG Wenjuan(1)

Research on Production Scheduling Method of Cement Enterprise Considering Demand Response and Carbon Trading

..... LIU Penglong, WANG Pingxin, XIA Xiaodong, YANG Jian, WANG Qing(12)

Multi-objective Optimal Scheduling of Combined Heat, Power, and Hydrogen Integrated Energy System

Considering the Stepped Carbon Trading Mechanism

..... XING Jiawei, ZHAO Shuai, YANG Song, WANG Yuejiao, SUN Liqun(21)

## •Distribution Network•

Intelligent Distribution Network All-around One Click Transfer Supply Technology

..... SONG Shenglan, ZHANG Chao, LIU Xiaoliang, LI Yan, ZHANG Naigang(32)

Probabilistic Site Selection and Capacity Determination Strategy for Power Quality Considering Uncertain Distributed

Power Sources ..... LI Jianjie, ZHONG Wentao, MU Mingliang, LI Ping, WANG Zhi(40)

Fault Repair Strategy for Distribution Network in Typhoon Disaster

..... WU Longteng, GUO Qian, WU Jiekang, CHEN Guanxi(49)

## •Power Grid Operation and Control•

Power Quality Disturbance Detection Based on Time-frequency Domain Multi-features and Optimized KELM

..... XU Lin, FAN Songhai, ZHAO Chun, WEI Zhen, LIU Chang(59)

A Setting Method of Low Excitation Limit of Fast Dynamic Response Synchronous Condenser

..... XIE Xiaosu, ZHU Yingfeng, LI Ming, SUN Fuchun, XU Jinyang(68)

## •Power Generation Technology•

Analysis of Development Trends in Fault Diagnosis of Nuclear Power Units Based on CiteSpace

..... LI Wei, LI Ao, FANG Xingyu, LU Hanbin, LIN Xiaojie, SHANG Xianhe(75)

Numerical Study on the Effect of Local Water Distribution on the Anti-freezing and Energy-saving Characteristics of

High Cooling Tower ..... YANG Li, LI Xuan, LI Yujiang, HAN Qiang, ZHANG Zhihui, ZHAO Yuanbin(86)

## SHANDONG ELECTRIC POWER

(Monthly, Started in 1974)

**Administration** State Grid Shandong Electric Power Company

**Sponsor** State Grid Shandong Electric Power Company

**Edited by** Editorial Department of Shandong Electric Power

**Chief Editor** WU Wenchuan MENG Yu

**Address** No.2000, Wangyue Road, Jinan, China 250003

# 含光-储-充的微电网日前经济调度方法研究

郭 杉\*, 郭 洋, 刘小恺, 董文娟

(内蒙古电力科学研究院, 内蒙古 呼和浩特 010020)

**摘要:**为提高微电网的供电可靠率和能源利用率,提出一种计及分时电价的日前经济优化调度方法。首先建立光伏、储能(energy storage system, ESS)、电动汽车(electric vehicles, EV)等主体的功率或能量模型,然后分别采用光伏功率模型及双向长短期记忆(bidirectional long short term memory, Bi-LSTM)模型预测日内光伏及常规负荷功率。结合EV的柔性负荷特性,以最小化系统运维总成本(包括设备运维成本、外网取电成本、储能电池衰减成本等)及EV充电成本建立目标函数。考虑优化问题的多目标、高维特性,选用线性规划求解器求解目标函数。最后选取含光-储-充的某工业园区微电网2021年全年的历史运行数据,首先测试了本文提出的常规负荷及光伏功率预测模型,进而根据光伏出力与常规负荷的匹配差异,选取4种典型日场景测试本文提出的调控算法。结果证明所提功率预测模型及经济调度算法的有效性。

**关键词:**微电网;分时电价;经济调度;柔性负荷;线性规划

中图分类号:TM74

文献标志码:A

文章编号:1007-9904(2025)03-0001-11

## Research On The Day-ahead Economic Dispatch Method of Microgrid Including Solar-ESS-EV

GUO Shan\*, GUO Yang, LIU Xiaokai, DONG Wenjuan

(Inner Mongolia Power Research Institute, Hohhot 010020, China)

**Abstract:** In order to improve the power supply reliability and energy utilization rate of microgrids, a day-ahead economic optimization scheduling method considering time-of-use electricity prices is proposed. First, the power or energy model of photovoltaic, energy storage system (ESS), electric vehicles (EV) and other entities is established, and then the photovoltaic power model and Bi-LSTM model are used to predict the photovoltaic and conventional load power during the day, respectively. Combined with the flexible load characteristics of electric vehicles, the objective function is established to minimize the total system operation and maintenance cost (including equipment operation and maintenance cost, external network power cost, energy storage battery attenuation cost, etc.) and the charging cost of electric vehicles. Considering the multi-objective and high-dimensional characteristics of the optimization problem, a linear programming solver is used to solve the objective function. Finally, the historical operational data of a microgrid in an industrial park with solar-ESS-EV for the whole year of 2021 is selected, and the conventional load and photovoltaic power prediction model proposed in this paper is first tested. Then, according to the matching difference between photovoltaic output and conventional load, four typical daily scenarios are selected to test the control algorithm proposed in this paper. The results prove the effectiveness of the power prediction model and economic scheduling algorithm in this paper.

**Keywords:** microgrid; time-of-use electricity prices; economic scheduling; flexible load; linear programming

## 0 引言

微电网是指由分布式电源、储能装置、负荷、能量转换装置和保护装置等组成的自治系统<sup>[1]</sup>。相比

基金项目:内蒙古“双碳”科技创新重大示范工程“揭榜挂帅”项目(2022JBG0043)

Inner Mongolia Science and Technology Innovation Major Demonstration Project “Unveiling the List and Taking the Lead” (2022JBG0043)。

传统电网,微电网供电方式更加灵活,且能提升新能源消纳<sup>[2]</sup>,是提升我国新能源装机规模和分布式能源利用率的有效方式。但微电网内多能源主体紧密耦合、源荷不确定性等特点以及环保和碳减排的要求,为微电网优化运行带来了巨大挑战<sup>[3-4]</sup>。如何协调各主体的行为,使主体间能够彼此互济,促进微电网需求侧响应及能源利用率,是微电网规划及运行

的核心问题之一<sup>[5-6]</sup>。基于模型预测控制(model predictive control, MPC)的经济调控方法被认为是解决上述问题的有效途径之一。此外,微电网与综合能源系统(integrated energy system, IES)在建模方法、调控目标及调控算法均有较高的一致性,故可借鉴 IES 的相关研究成果。

文献[7]选取冷-热-电联产的工业园区能源互联系统,将运维成本最小作为调控目标,并通过分支定界法求解。文献[8]建立了园区-区域互联的功率模型,以最大化能源利用率为调控目标,并通过合作博弈方法求解。文献[9]则选取了风、光、储、电动汽车(electric vehicles, EV)、常规负荷及温控负荷的社区级微电网系统,以运营收益最大和需求响应补偿成本最小为调控目标。文献[10]提出一种基于改进粒子群优化的经济调度模型,并在优化目标中加入弃风损失及污染物排放指标。文献[11]提出一种考虑大规模 EV 接入的双层优化模型。上下层分别为输电层和配电层。上层优化目标为运维成本及 PM2.5,下层目标为最小化有功网损。为了提升可再生能源利用率,文献[12]以可再生能源的足额使用作为强约束,优化目标包括环境排放指标及运行成本。以环境因素作为优化目标的研究还包括文献[13-19]。文献[20-21]则主要关注需求侧响应,并将负荷波动方差作为需求侧响应评价指标。此外优化目标还包括最小化储能全寿命周期费用<sup>[22-23]</sup>、提升能效综合利用率<sup>[24-25]</sup>等。

已有研究主要存在两方面问题。一是求解优化目标主要使用改进的种群类算法,经济调控是一个多目标、高维优化问题,具有搜索空间大,优化变量多等特点,尽管上述研究对种群类算法进行了改进,但仍面临寻优效率低、陷入局部最优概率大的问题。二是已有研究普遍将 EV 作为虚拟储能资源接受系统调控,而忽略了车主参与需求响应的意愿,导致仿真结果与实际偏差较大。本文与已有研究的差异主要体现在调控目标及求解算法,选取微电网运维成本及 EV 充电成本作为优化目标,针对目标函数的多变量、高维度特性,选用线性规划方法求解。首先给出光-储-充微电网的拓扑结构,建立光伏、储能、EV 等主体的功率或能量模型。进而提出基于 MPC 的潮流优化调控方法。该方法分别利用光伏功率模型

及 Bi-LSTM 实现光伏输出功率及常规负荷序列预测,建立经济调控目标并进行求解,并利用某实际运行的微电网算例完成功率预测及调控算法测试。结果证明了本文功率预测模型的准确性及经济调控方法的实用性。

## 1 微电网建模

### 1.1 系统拓扑

所研究的光-储-充交流微电网系统结构如图 1 所示,其中实线为配电网络,虚线为通信网络,电压等级为 10 kV。主体包括光伏(photovoltaic, PV)、储能(energy storage system, ESS)、常规负荷及柔性负荷,各主体的功率控制通过潮流控制器实现。常规负荷主要包括办公及工业用电,为不可控负荷。柔性负荷为 EV 充电负荷。需要说明,本文所研究的微电网仅支持电能从外部电网流入,不允许反向流动。潮流控制器将 PV 作为主电源,且为 ESS 的唯一充电源。当 PV 产生电能无法被消纳时,过剩电能将被削减。另外,本文不考虑电动汽车放电的场景。运行约束主要为保障常规负荷的不间断供电,而经济调控目标包括降低总运维成本、降低 EV 充电成本等。

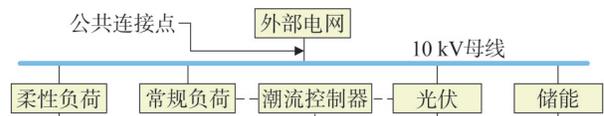


图1 光-储-充交流微电网系统拓扑  
Fig.1 System topology of the microgrid including solar-ESS-EV

### 1.2 各主体功率或能量模型

#### 1.2.1 PV 功率模型

PV 输出功率主要受光照强度、环境温度及转换效率等因素影响,可表示为

$$P_{AC} = \eta_{DC/AC} \frac{G_L}{G_{STC}} P_{DC0} [1 + \gamma(T_L - T_{REF})] \quad (1)$$

式中: $P_{AC}$ 为交流测输出功率,kW; $\eta_{DC/AC}$ 为DC-AC转换效率,%; $G_L$ 、 $G_{STC}$ 分别为太阳辐照度及标准辐照度, $W/m^2$ , $G_{STC}$ 取 $1\ 000\ W/m^2$ ; $P_{DC0}$ 为光伏板额定功率,kW; $\gamma$ 为温度系数,取 $-0.005/^\circ C$ ; $T_L$ 、 $T_{REF}$ 分别为环境温度及参考温度, $^\circ C$ ,其中 $T_{REF}$ 取 $25^\circ C$ 。

### 1.2.2 ESS 能量模型

由于 ESS 在  $t$  时刻的能量取决于上一时段充放电情况。故 ESS 在  $t$  时刻的能量为

$$E_{\text{ESS}}(t) = E_{\text{ESS}}(t-1) + \Delta t [P_{\text{ESS}}(t-1)] \eta_{\text{ESS}}(t-1) \quad (2)$$

式中:  $E_{\text{ESS}}(t)$ 、 $E_{\text{ESS}}(t-1)$  分别为  $t$  时刻、 $t-1$  时刻 ESS 的能量, kWh;  $\Delta t$  为充/放电周期, min;  $P_{\text{ESS}}(t-1)$ 、 $\eta_{\text{ESS}}(t-1)$  分别为  $t-1$  时刻的充/放电功率和效率, %。为简化计算, 本文假设 ESS 充/放电过程效率相等,  $P_{\text{ESS}}(t-1)$  可表示为

$$P_{\text{ESS}}(t-1) = P_{\text{ESS\_CH}}(t-1) + P_{\text{ESS\_DIS}}(t-1) \quad (3)$$

式中:  $P_{\text{ESS\_CH}}(t-1)$ 、 $P_{\text{ESS\_DIS}}(t-1)$  分别为  $t-1$  时刻 ESS 的充/放电功率, kW。ESS 不允许同时充电及放电, 故对任一时刻  $t$  均有

$$P_{\text{ESS\_CH}}(t) P_{\text{ESS\_DIS}}(t) = 0 \quad (4)$$

### 1.2.3 EV 充电模型

EV 充电主要有快速充电及柔性充电二种方式。快速充电是指 EV 接入微电网后, 即以充电桩最大功率进行充电, 直至所充电能达到车主期望值。柔性充电则是指车主为了获得更低的充电成本, 车主允许潮流控制器对充电桩“锁定调用”, 即潮流控制器可对充电过程的启动时间及充电功率进行自由调节。需要说明本文研究的柔性充电负荷是指经过聚合商聚合后的充电负荷, 而非 EV 单车负荷。EV 聚合负荷可通过聚合负荷起始、终止时刻及期望充电量等 3 个参数表示, 数学定义为

$$L_{\text{EV}} = (t_{\text{ST}}, t_{\text{EN}}, E_{\text{EV}}) \quad (5)$$

式中:  $t_{\text{ST}}$ 、 $t_{\text{EN}}$  分别为柔性聚合负荷起始及终止时刻;  $E_{\text{EV}}$  为期望电能, kWh。充电聚合负荷求解流程如图 2 所示。充电预约单  $o_i$  为

$$o_i = (t_{\text{is}}, t_{\text{ie}}, S_i, E_{\text{in}}) \quad (6)$$

式中:  $t_{\text{is}}$ 、 $t_{\text{ie}}$  分别为  $o_i$  计划到达和离开充电站时刻;  $S_i$  为计划充电量, %;  $E_{\text{in}}$  为电池额定容量, kWh。负荷聚合商比较  $t_{\text{ST}}$ 、 $t_{\text{is}}$ 、 $t_{\text{ie}}$ 、 $t_{\text{EN}}$ , 若同时满足  $t_{\text{ST}} > t_{\text{is}}$  及  $t_{\text{EN}} > t_{\text{ie}}$ , 即  $o_i$  预约开始时间晚于聚合负荷起始时间,  $o_i$  计划结束时间早于聚合负荷终止时间, 则  $o_i$  具备负荷聚合条件, 将  $o_i$  的充电电量  $e_i$  累加至  $E_{\text{EV}}$ ,  $e_i$  通过式 (7) 计算。

$$e_i = S_i E_{\text{in}} \quad (7)$$

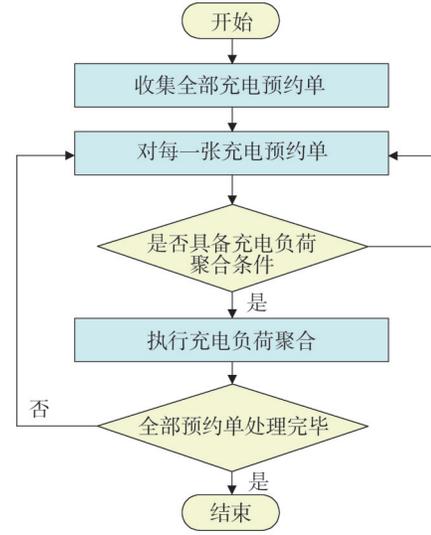


图2 电动汽车柔性充电负荷聚合流程

Fig.2 Electric vehicles flexible charging load aggregation process

### 1.3 基于Bi-LSTM的负荷预测模型

双向长短期记忆模型 (bidirectional long short term model, Bi-LSTM) 是一种循环神经网络。所谓循环神经网络是指神经元上轮的输出向量将在本轮迭代时作为输入重新馈入神经元。时间序列预测模型的输入通常为高维向量, 若采用传统的反向传播神经网络 (back propagation neural network, BPNN), 不仅可能导致神经网络规模过大, 还可能产生梯度消失的问题。单向长短期记忆模型 (unidirectional long short term memory, Uni-LSTM) 通过建立一套长短期信息处理机制很好地解决了上述问题, 且 Bi-LSTM 是 LSTM 模型的扩展版本。相较 LSTM 在模型训练时仅使用先序数据, Bi-LSTM 同时使用了先序及后序数据, 相应地在网络拓扑上将 LSTM 的单神经元层扩展为正-反双神经元层。Bi-LSTM 优势在于可同时学习时间序列正、反双向趋势, 增强了模型对趋势突变及扰动的适应性, 其模型如图 2 所示。

图 3 中, 输入向量序列  $(\dots, \mathbf{x}_{i-1}, \mathbf{x}_i, \mathbf{x}_{i+1}, \dots)$  构成 Bi-LSTM 神经网络的输入层, 神经元序列  $(\dots, f_{i-1}, f_i, f_{i+1}, \dots)$ 、 $(\dots, g_{i-1}, g_i, g_{i+1}, \dots)$  构成正向及反向 LSTM 神经元层。输出向量序列  $(\dots, \mathbf{y}_{i-1}, \mathbf{y}_i, \mathbf{y}_{i+1}, \dots)$  构成输出层。  $f_i$  为正向 LSTM 层神经元  $i$  (下文简称神经元  $i$ ) 的关联函数, 其数学形式为

$$(F_i, c_i) = f_i(c_{i-1}, \mathbf{x}_i, \mathbf{W}_i, \mathbf{b}_i) \quad (8)$$

式中:  $F_i$  神经元  $i$  的输出向量;  $c_i, c_{i-1}$  分别为神经元  $i$  及神经元  $i-1$  长期状态向量;  $x_i$  为神经元  $i$  的输入向量;  $W_i, b_i$  分别为神经元  $i$  与  $x_i$  的连接权重矩阵及偏置向量。同理可通过反向 LSTM 层得出输出向量  $B_i$ , 通过式(9)得到输出向量  $y_i$ 。

$$y_i = F_i \oplus B_i \quad (9)$$

式中:  $\oplus$  为向量间按位加法。

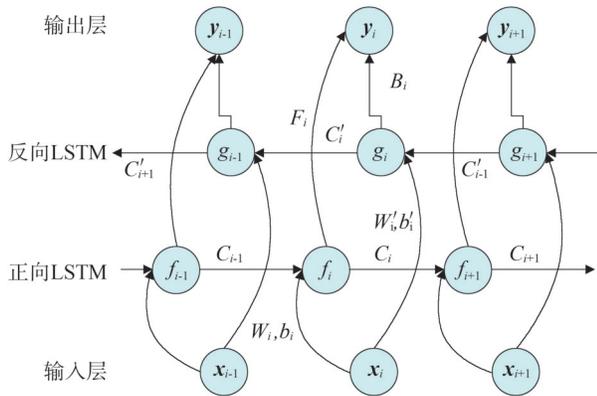


图3 Bi-LSTM神经网络模型  
Fig.3 Bi-LSTM neural network model

基于 Bi-LSTM 的负荷预测流程如图 4 所示, 主要包括模型训练、负荷预测及预测精度评估等模型预测 3 个步骤。

1) 模型训练。

给定负荷历史序列  $H = [h_1, h_2, \dots, h_N]$ , 其中  $N$  为序列长度。首先对 Bi-LSTM 模型初始化, 即随机为模型的连接权重及偏置赋值。假设 Bi-LSTM 模型输入及输出序列的长度分别为  $n$  及  $m$ , 则将序列分解为  $X, Y$  二个矩阵。

$$X = \begin{bmatrix} h_1 & h_2 & \dots & h_n \\ h_2 & h_3 & \dots & h_{n+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{N-m-(n-1)} & h_{N-m-(n-2)} & \dots & h_{N-m} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$Y = \begin{bmatrix} h_{n+1} & h_{n+2} & \dots & h_{n+m} \\ h_{n+2} & h_{n+3} & \dots & h_{n+m+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ h_{N-m+1} & h_{N-m+2} & \dots & h_N \end{bmatrix} \quad (11)$$

用  $a_j, b_j$  分别表示  $X, Y$  的第  $j$  行, 即  $a_j = [h_j, h_{j+1}, \dots, h_{n+j-1}]$ ,  $b_j = [h_{n+j}, h_{n+j+1}, \dots, h_{n+m+j-1}]$

将  $a_j$  输入 Bi-LSTM 模型有

$$f_{\text{Bi-LSTM}}(a_j) = \hat{b}_j \quad (12)$$

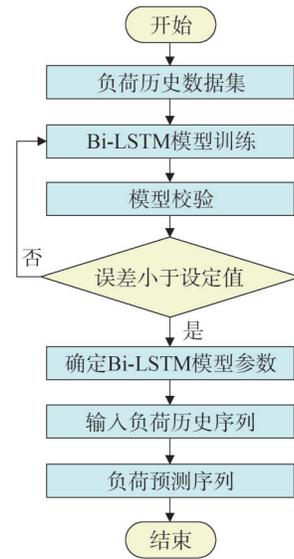


图4 基于Bi-LSTM的负荷预测模型  
Fig.4 Bi-LSTM based load forecasting model

式中:  $f_{\text{Bi-LSTM}}$  为 Bi-LSTM 模型的函数形式;  $\hat{b}_j$  为  $b_j$  的预测向量。计算  $b_j, \hat{b}_j$  的误差为

$$e_j = g(b_j, \hat{b}_j) \quad (13)$$

式中:  $g$  代表特定的误差指标。对  $X, Y$  的每一行均执行上述操作, 得到误差向量  $E = [e_1, e_2, \dots, e_{N-m-(n-1)}]$ ,  $\bar{e}$  为误差向量  $E$  的均值。若  $\bar{e}$  小于设定值, 则训练结束。否则将  $E$  视为连接权重及偏置的函数, 通过寻优技术, 以获取更小的  $\bar{e}$  为寻优目标更新连接权重及偏置, 并重新计算误差向量, 直到  $\bar{e}$  小于设定值, 训练结束。

2) 负荷预测。

用历史序列  $H$  的最后  $n$  个数据  $[h_{N-(n-1)}, h_{N-(n-2)}, \dots, h_N]$  作为输入向量输入 Bi-LSTM 模型。

$$f'_{\text{Bi-LSTM}}([h_{N-(n-1)}, h_{N-(n-2)}, \dots, h_N]) = [\hat{h}_{N+1}, \hat{h}_{N+2}, \dots, \hat{h}_{N+m}] \quad (14)$$

式中:  $f'_{\text{Bi-LSTM}}$  表示完成训练的 Bi-LSTM 模型。将输入向量更新为  $[h_{N-(n-1)+m}, \dots, h_N, \hat{h}_{N+1}, \dots, \hat{h}_{N+m}]$  继续带入  $f'_{\text{Bi-LSTM}}$ , 并将输出向量连接至  $[\hat{h}_{N+1}, \hat{h}_{N+2}, \dots, \hat{h}_{N+m}]$  尾部, 重复上述过程直至所得向量达到预测目标长度, 预测过程结束。

3) 预测精度评估。

使用均方根误差 (root mean square error, RMSE) 和对称平均绝对百分比误差 (symmetric mean

absolute percentage error, SMAPE) 评估模型预测性能。二者定义为

$$\delta_{\text{RMSE}}(Y, \hat{Y}) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (15)$$

$$\delta_{\text{SMAPE}}(Y, \hat{Y}) = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{(|y_i| + |\hat{y}_i|)/2} \quad (16)$$

式中:  $Y = [y_1, y_2, \dots, y_n]$ ,  $\hat{Y} = [\hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_n]$  分别为真实矩阵及预测矩阵;  $n$  为矩阵列数。  $\delta_{\text{RMSE}}$  主要反映了各数据点误差的波动情况, 其量纲与数据点一致;  $\delta_{\text{SMAPE}}$  无量纲, 反映了预测的平均水平。  $\delta_{\text{RMSE}}$ 、 $\delta_{\text{SMAPE}}$  越小, 说明预测性能越高, 反之亦然。

## 2 优化调控算法

### 2.1 目标函数

根据 1.1 分析可知, 微电网经济调控的目标是在保障负荷可靠供电前提下, 最小化系统运维总成本及 EV 充电成本。系统运维成本主要包括系统从外部电网购置电能费用、PV 削减的有功电能折算成本、各主体运维成本、ESS 衰减折算成本 4 个部分。得出系统优化调控目标函数为

$$\begin{cases} \min \sum_{p=1}^{N_t} C_{\text{TOTAL}}(t_p) \\ C_{\text{TOTAL}}(t_p) = C_{\text{EXT}}(t_p) + C_{\text{PV\_CUR}}(t_p) + C_{\text{MA}}(t_p) + C_{\text{ESS\_DE}}(t_p) + C_{\text{EV}}(t_p) \\ C_{\text{EXT}}(t_p) = P_{\text{EXT}}(t_p) \Delta T e_{\text{EXT}}(t_p) \\ C_{\text{PV\_CUR}}(t_p) = P_{\text{PV\_CUR}}(t_p) \Delta T e_{\text{EXT}}(t_p) \\ C_{\text{MA}}(t_p) = \alpha_{\text{PV}} P_{\text{PV}}(t_p) \Delta T + \alpha_{\text{ESS}} P_{\text{ESS}}(t_p) \Delta T + \alpha_{\text{EV}} P_{\text{EV}}(t_p) \Delta T \\ C_{\text{ESS\_DE}}(t_p) = \gamma_{\text{ESS}} P_{\text{ESS}}(t_p) \Delta T \\ C_{\text{EV}}(t_p) = \Delta T (P_{\text{PV\_EV}}(t_p) e_{\text{PV\_EV}}(t_p) + P_{\text{EXT\_EV}}(t_p) e_{\text{EXT\_EV}}(t_p) + \\ P_{\text{ESS\_EV}}(t_p) e_{\text{ESS\_EV}}(t_p)) \\ e_{\text{PV\_EV}}(t_p) = \omega_{\text{PV\_EV}} e_{\text{EXT\_EV}}(t_p) \\ e_{\text{ESS\_EV}}(t_p) = \omega_{\text{ESS\_EV}} e_{\text{EXT\_EV}}(t_p) \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $C_{\text{TOTAL}}(t_p)$  为  $t_p$  时段系统总成本;  $C_{\text{EXT}}(t_p)$ 、 $C_{\text{PV\_CUR}}(t_p)$ 、 $C_{\text{MA}}(t_p)$ 、 $C_{\text{ESS\_DE}}(t_p)$ 、 $C_{\text{EV}}(t_p)$  分别为  $t_p$  时段外部购电成本、PV 弃光成本、系统运维成本、ESS 衰减成本及 EV 充电成本, 元;  $P_{\text{EXT}}(t_p)$ 、 $P_{\text{PV\_CUR}}(t_p)$ 、 $P_{\text{PV}}(t_p)$ 、 $P_{\text{ESS}}(t_p)$ 、 $P_{\text{EV}}(t_p)$  分别为  $t_p$  时段系统外网取电功率、弃光功率、PV 输出功率、ESS 功率及 EV 充电功率, kW;  $\Delta T$  为调控周期, min;  $e_{\text{EXT}}(t_p)$  为  $t_p$  时段外网电价, 元/kWh;  $\alpha_{\text{PV}}$ 、 $\alpha_{\text{ESS}}$ 、 $\alpha_{\text{EV}}$  分别为 PV、ESS 和充电桩的运维系数, 元/kWh;  $\gamma_{\text{ESS}}$  为 ESS 系统蓄电池衰减系数, 元/kWh;  $e_{\text{PV\_EV}}(t_p)$ 、 $e_{\text{ESS\_EV}}(t_p)$ 、 $e_{\text{EXT\_EV}}(t_p)$  分别为使用 PV、ESS、外部电能的充电电价, 且三者遵循  $e_{\text{PV\_EV}}(t_p) < e_{\text{ESS\_EV}}(t_p) < P_{\text{EXT\_EV}}$ ;  $P_{\text{PV\_EV}}$  为光伏充电功率,

EV 充电过程可被视为参与了系统需求响应, 相应充电电价  $e_{\text{PV\_EV}}(t_p)$  最低。  $P_{\text{EXT\_EV}}$  为外网取电充电功率, 充电价格为外网电价, 有  $e_{\text{EXT\_EV}}(t_p) = e_{\text{EXT}}(t_p)$ , 而通过储能子系统向 EV 充电, 避免了微电网从外网取电, 电价  $e_{\text{ESS\_EV}}(t_p)$  介于  $e_{\text{PV\_EV}}(t_p)$  和  $e_{\text{EXT}}(t_p)$  之间;  $\omega_{\text{PV\_EV}}$ 、 $\omega_{\text{ESS\_EV}}$  分别为  $e_{\text{PV\_EV}}(t_p)$ 、 $e_{\text{ESS\_EV}}(t_p)$  相对  $e_{\text{EXT\_EV}}(t_p)$  的价格系数, 取值范围为 (0, 1)。为简化分析, 不考虑充电服务费。

在求解目标函数式 (17) 前, 须明确约束条件。约束条件主要包括潮流平衡、各主体功率及能量约束等, 分别以等式及不等式形式列出。

1) 等式约束。等式约束主要为功率平衡约束, 如式 (18) 所示, 包括光伏功率平衡约束、常规负荷功率平衡约束、EV 充电功率平衡约束。注意 EV 充电功率来自 PV、ESS 及外部电网。ESS 仅允许 PV 对其充电; ESS 放电功率仅流向常规负荷及 EV, 不能与外部电网进行能量交互。同一时段, ESS 不允许同时处于充电及放电状态。

$$\begin{cases} P_{\text{PV\_OUT}}(t_p) = P_{\text{PV\_ESS}}(t_p) + P_{\text{PV\_LD}}(t_p) + P_{\text{PV\_CUR}}(t_p) + P_{\text{PV\_EV}}(t_p) \\ P_{\text{LD}}(t_p) = P_{\text{PV\_LD}}(t_p) + P_{\text{ESS\_LD}}(t_p) + P_{\text{EXT\_LD}}(t_p) \\ P_{\text{EV}}(t_p) = P_{\text{PV\_EV}}(t_p) + P_{\text{ESS\_EV}}(t_p) + P_{\text{EXT\_EV}}(t_p) \\ P_{\text{ESS\_CH}}(t_p) = P_{\text{PV\_ESS}}(t_p) \\ P_{\text{ESS\_DIS}}(t_p) = P_{\text{ESS\_LD}}(t_p) + P_{\text{ESS\_EV}}(t_p) \\ P_{\text{ess\_ch}}(t_p) P_{\text{ess\_dis}}(t_p) = 0 \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $P_{\text{PV\_ESS}}(t_p)$ 、 $P_{\text{PV\_LD}}(t_p)$ 、 $P_{\text{PV\_EV}}(t_p)$  分别为  $t_p$  时段 PV 向 ESS、常规负荷和 EV 输入的有功功率;  $P_{\text{LD}}(t_p)$  为  $t_p$  时段总常规负荷;  $P_{\text{ESS\_LD}}(t_p)$ 、 $P_{\text{EXT\_LD}}(t_p)$  分别为  $t_p$  时段 ESS 及外部电网向常规负荷输入的有功功率;  $P_{\text{ESS\_CH}}(t_p)$ 、 $P_{\text{ESS\_DIS}}(t_p)$  分别为  $t_p$  时段 ESS 的充/放电功率。

2) 不等式约束。不等式约束主要包括各主体功率及能量约束, 如式 (19) 所示, 包括 ESS 充/放电功率约束及能量约束、ESS 过充电及过放电约束、EV 的充电功率约束及过充电约束。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{ESS\_CH}}(t_p) \leq P_{\text{ESS\_max}} \\ 0 \leq P_{\text{ESS\_DIS}}(t_p) \leq P_{\text{ESS\_max}} \\ E_{\text{ESS\_min}} \leq E_{\text{ESS}}(t_p) \leq E_{\text{ESS\_max}} \\ E_{\text{ESS}}(t_p) - P_{\text{ESS\_DIS}}(t_p) \Delta T \geq E_{\text{ESS\_min}} \\ E_{\text{ESS}}(t_p) + P_{\text{ESS\_CH}}(t_p) \Delta T \leq E_{\text{ESS\_max}} \\ 0 \leq P_{\text{EV}}(t_p) \leq P_{\text{EV\_max}} \\ E_{\text{EV}}(t_p) + P_{\text{EV}}(t_p) \Delta T \leq E_{\text{EV\_max}} \end{cases} \quad (19)$$

式中:  $E_{\text{ESS\_min}}$ 、 $E_{\text{ESS\_max}}$  分别为 ESS 最高及最低能量状态, kWh;  $P_{\text{ESS\_max}}$  为 ESS 最大充/放电功率, kW;  $P_{\text{EV\_max}}$  为 EV 充电的最大功率, kW;  $E_{\text{EV\_max}}$  为 EV 额定容量, kWh。

除约束条件外,进行经济调度还需要 ESS 和 EV 等主体的初始及结束 SOC 等参数。

### 2.2 经济调控算法

提出的微电网日前经济调控算法主要流程如图 5 所示。其中,数据准备包括基础参数及预测所需数据,基础数据主要为各主体的电气参数,预测所需数据为气象预报及常规负荷历史数据。利用 PV 功率模型及气象预报数据得出 PV 有功功率预测序列,利用 Bi-LSTM 模型及常规负荷历史数据得出负荷预测序列。将基础数据及预测序列输入潮流控制器,潮流控制器首先生成目标函数及约束条件,再调用 Gurobi 优化器的线性规划求解功能求得各主体的最优功率序列。

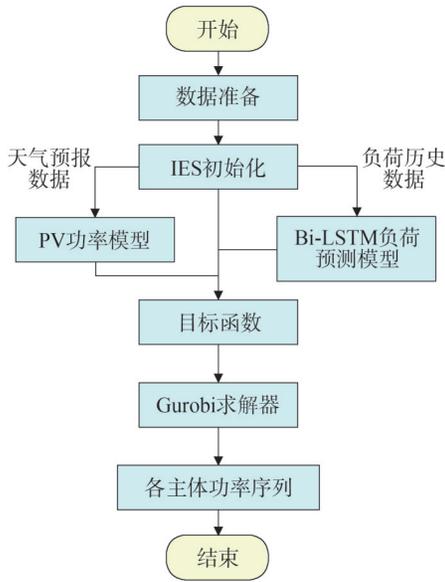


图5 含柔性负荷的微电网经济调控算法

Fig.5 Economic control algorithm for microgrid with flexible loads

## 3 算例测试

### 3.1 测试模型

选取国内某工业园区含光-储-充的微电网,收集该系统 2021 年(测试年)全年运行数据。基础参数如表 1 所示。其中  $S_{OC\_S}$ 、 $S_{OC\_E}$  分别为 ESS 日内起始及终止 SOC。常规负荷主要包括写字楼办公负荷及工业负荷。电价模型参考了微电网所在城市的工商业日内分时电价,由低至高依次可被分为深谷、低谷、平段、高峰及尖峰等 5 个价格区段。

表1 微电网算例参数

Table 1 Microgrid test case parameters

参数	取值	参数	取值
$E_{ESS\_max}/kWh$	1000	$E_{ESS\_min}/kWh$	100
$P_{EV1\_max}/kW$	200	$P_{PV\_max}/kW$	2000
$P_{EV2\_max}/kW$	200	$\omega_{PV\_EV}$	0.6
$P_{ESS\_max}/kW$	300	$\omega_{ESS\_EV}$	0.8
$\gamma_{ESS}/(元/kWh)$	0.007	$\Delta T/min$	15
$\alpha_{PV}/(元/kWh)$	0.02	$\alpha_{ESS}/(元/kWh)$	0.08
$\alpha_{EV}/(元/kWh)$	0.06	$S_{OC\_S}$	0.3
$S_{OC\_E}$	0.8		

为验证 1.2 中的负荷预测模型,构建了包含输入层、双向 LSTM 层及输出层等 3 层的 Bi-LSTM 模型。其中双向 LSTM 层共包含 100 个 Bi-LSTM 神经元。设置输入序列长度为 24,输出序列长度为 4,时间周期为 15 min,即为了获取未来 1 h 的负荷,需要输入前 6 h 的历史负荷数据。

所选日内 EV 充电预约单如图 6 所示,选取 08:00—12:00,14:00—18:00 作为负荷聚合区间,使用图 2 的柔性负荷聚合流程,得出柔性充电聚合负荷分别为 350.02 kWh、287.55 kWh。

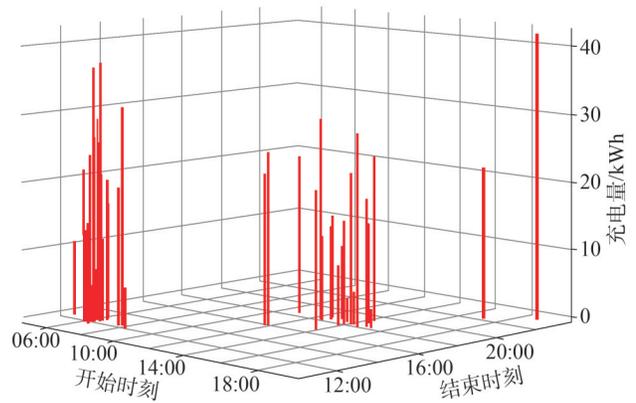


图6 日内 EV 充电预约单分布

Fig.6 Distribution of EV charging reservations within the specific day

### 3.2 算例测试

首先比较 Bi-LSTM 与 LSTM 模型对常规负荷的预测性能。图 7—图 10 列出了测试年第 91 天、181 天、271 天和 361 天的常规负荷预测功率与真实功率的对比情况,采样时间间隔均为 15 min。预测误差如表 2 所示。

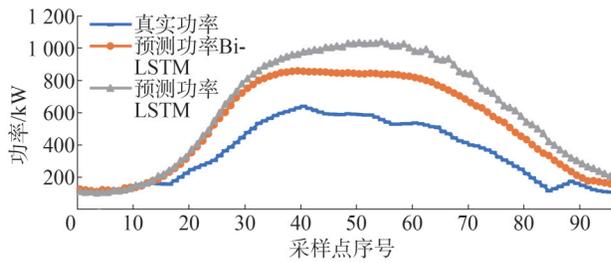


图7 测试年第91天常规负荷预测情况  
Fig.7 Conventional load forecast on the 91st day of the test year

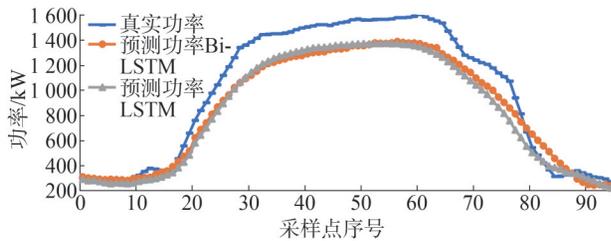


图8 测试年第181天常规负荷预测情况  
Fig.8 Conventional load forecast on the 181st day of the test year

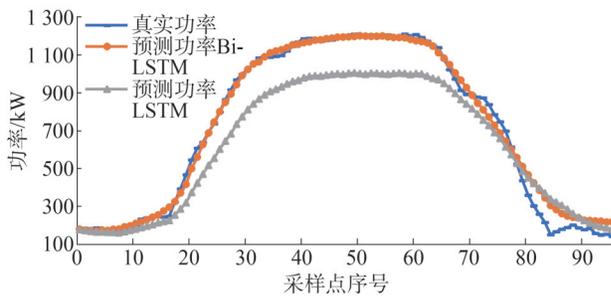


图9 测试年第271天常规负荷预测情况  
Fig.9 Conventional load forecast on the 271st day of the test year

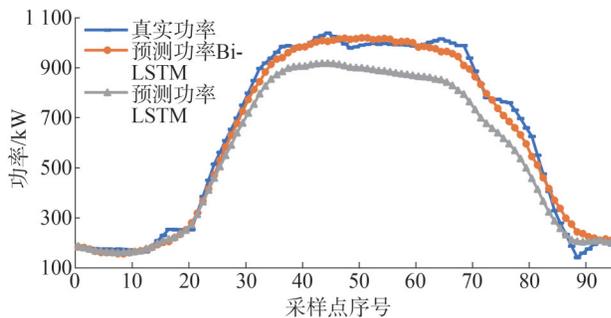


图10 测试年第361天常规负荷预测情况  
Fig.10 Conventional load forecast on the 361st day of the test year

表2 常规负荷预测误差  
Table 2 Conventional load prediction error

时间	Bi-LSTM		LSTM	
	RMSE/kW	SMAPE/%	RMSE/kW	SMAPE/%
第91天	206.93	9.48	318.32	12.93
第181天	164.77	3.68	176.33	3.98
第271天	44.22	2.17	151.77	5.42
第361天	35.59	1.66	101.36	3.68

图11—图14列出了第91天、181天、271天和361天的PV输出功率预测值与真实值的对比情况,采样时间间隔均为15 min。预测误差如表3所示。

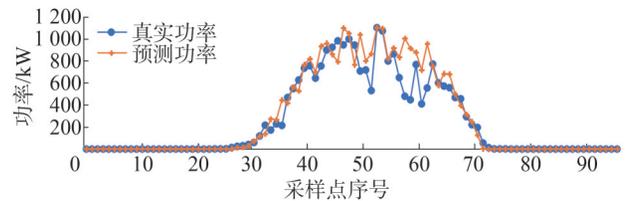


图11 测试年第91天PV输出功率预测情况  
Fig.11 PV output power forecast on the 91st day of the test year

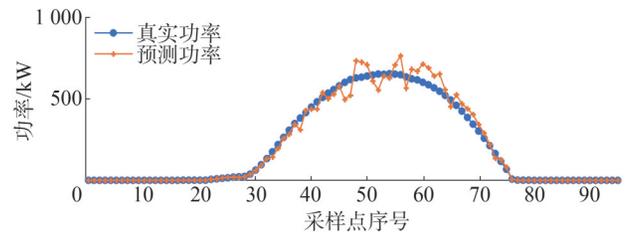


图12 测试年第181天PV输出功率预测情况  
Fig.12 PV output power forecast on the 181st day of the test year

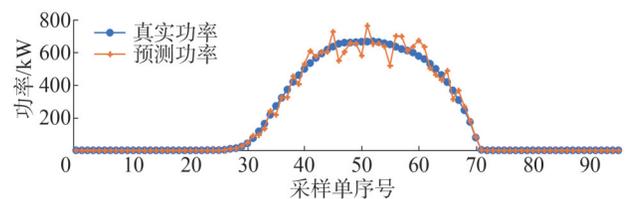


图13 测试年第271天PV输出功率预测情况  
Fig.13 PV output power forecast on the 271st day of the test year

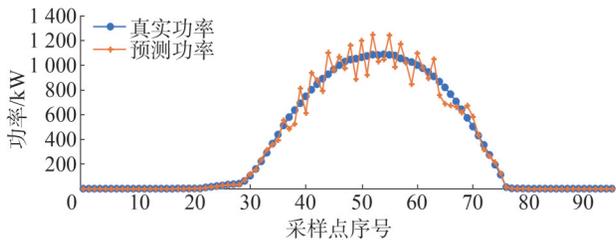


图14 测试年第361天PV输出功率预测情况  
Fig.14 PV output power forecast on the 361st day of the test year

表3 PV输出功率预测误差

Table 3 PV output power prediction error

时间	RMSE/kW	SMAPE/%
第91天	129.06	5.85
第181天	40.34	1.73
第271天	34.86	1.21
第361天	65.32	1.68

可以发现,随着训练样本集规模的增大,常规负荷第91天—第361天的预测精度基本呈现上升趋势,第361天预测精度最高。主要原因在于第361天的常规负荷预测模型在训练时使用了前360天的数据进行训练,样本集规模最大。说明样本集规模越大,Bi-LSTM预测精度可能越高。而PV模型预测则精度保持稳定,第91天的精度低于其他日。主要原因为该日的PV真实功率波动较其他日更为剧烈,说明PV功率预测模型对功率波动较为敏感。

### 3.3 调控算法测试

依据PV与常规负荷的匹配情况,分别选取小出力大负荷、小出力小负荷、大出力小负荷及大出力大负荷等4种典型日场景。调控算法仿真时长设置为24h,调控指令下发周期设为15min。得出各场景功率调控柱状曲线如图15—图18所示。

场景I:小出力大负荷场景中,PV出力始终小于常规负荷,需要通过ESS放电及外网取电平衡常规负荷。调控算法安排ESS充电是为了满足 $S_{oc,E}$ 大于0.8的约束,且ESS充电过程基本位于电价深谷时段(11:00—13:45)。

场景II:小出力小负荷场景中,PV未发生出力削减,主要通过ESS与外网结合为负荷供电。

场景III:大出力小负荷场景中,在10:00—15:45时段,PV出力大于常规负荷,且PV最大有功功率达到459.55kW,部分PV产生电能被削减。ESS以充电为主,在深谷电价时段有小功率充电,以降低PV功率削减成本。

场景IV:大出力大负荷场景中,PV有部分出力被削减,二组EV同样被置于低谷电价时段。

针对上述场景,比较两种充电模式下的用户充电成本,模式1为本文提出的EV柔性充电,模式2为EV快速补电(EV接入IES即以最大功率充电)。得出充电成本对比情况如表4所示。

表4 不同充电模式充电成本比较

Table 4 Comparison of charging costs under different EV

场景	模式	charging models			单位:元
		EV1成本	EV2成本	总成本	
I	1	12.60	22.40	35.00	
	2	156.84	10.05	166.89	
II	1	12.60	10.08	22.68	
	2	162.08	10.08	172.16	
III	1	20.35	13.79	34.14	
	2	162.15	15.54	177.69	
IV	1	25.21	97.81	123.02	
	2	155.38	10.08	165.46	

可以看出,采用柔性充电方式,用户充电成本均显著降低,且除大出力大负荷场景,其余场景下柔性充电成本均显著低于快速补电。主要原因是柔性充电优先采用光伏及储能子系统的电能,同时充分利用了电价的分时特性。

## 4 结束语

构建了含柔性负荷的光-储-充微电网系统,提出一种同时考虑系统总运行成本及电动汽车充电成本的日前经济调度方法,分别采用光伏有功功率模型及Bi-LSTM模型,预测光伏及负荷功率序列,使用线性规划工具求解目标函数,确定各主体的最优调控功率。选取4种典型日场景对算法进行测试,试验结果表明所述调控算法不仅促进了各主体的协同互济,有效提升了能源利用率,还显著降低了EV

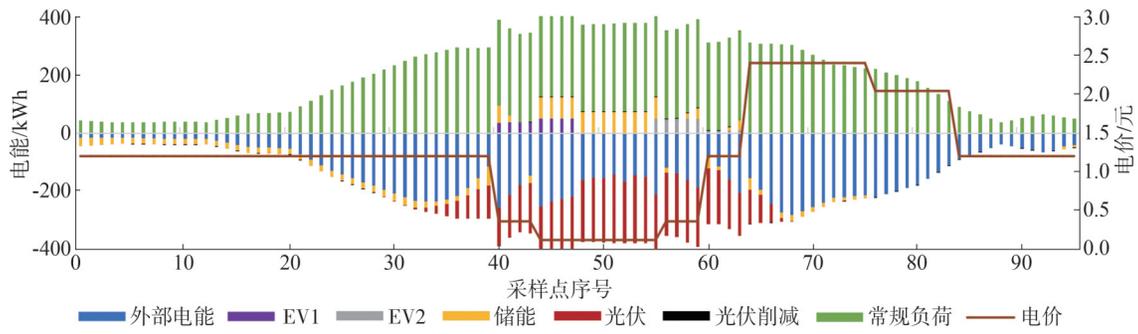


图 15 小出力大负荷场景日内各主体能量调度曲线

Fig.15 Daily energy dispatch curve of each entity in the scenario of small PV output and large normal load

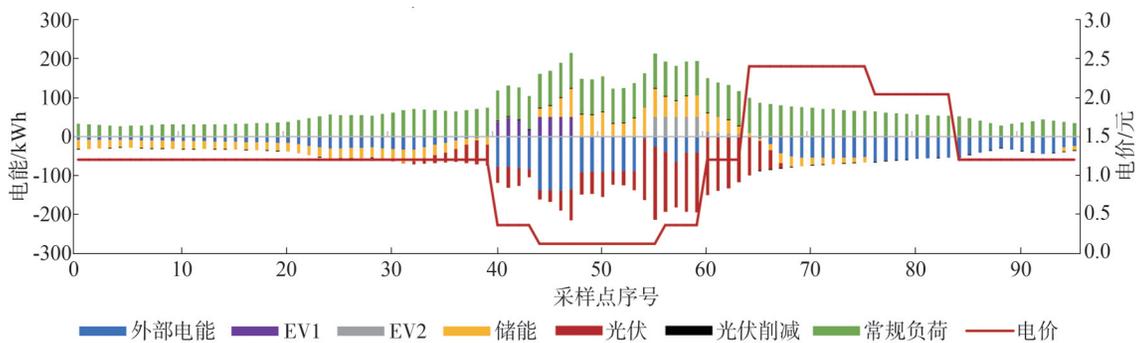


图 16 小出力小负荷场景日内各主体能量调度曲线

Fig.16 Daily energy dispatch curve of each entity in the scenario of small PV output and small normal load

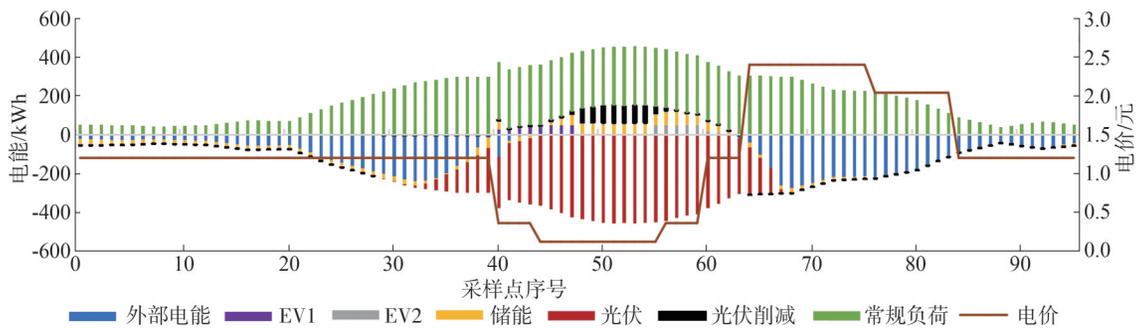


图 17 大出力小负荷场景日内各主体能量调度曲线

Fig.17 Daily energy dispatch curve of each entity in the scenario of large PV output and small normal load

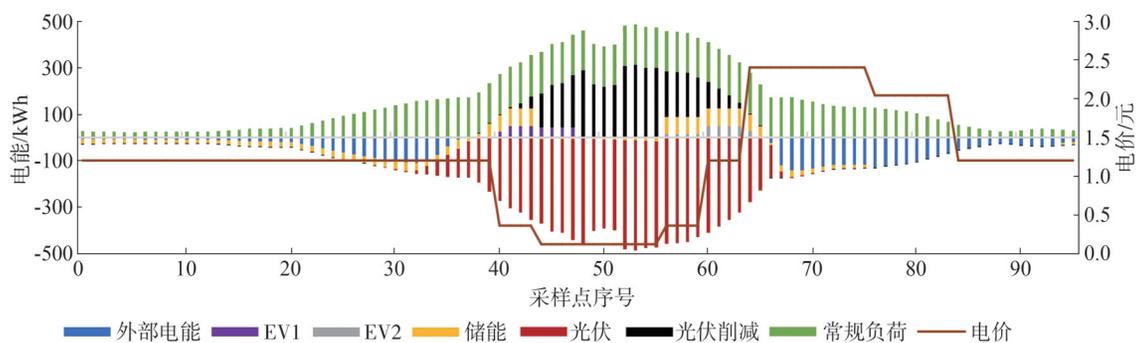


图 18 大出力大负荷场景日内各主体能量调度曲线

Fig.18 Daily energy dispatch curve of each entity in the scenario of large PV output and large normal load

车主的充电成本,从而大幅提升了EV车主参与微电网需求侧响应的积极性,具有较强的实用价值。后续将对本文模型及场景进行扩展,引入制氢、热力流及天然气等多种能流类型,并逐步引入V2G的场景。

## 参考文献

- [1] 张有兵,林一航,黄冠弘,等.深度强化学习在微电网系统调控中的应用综述[J].电网技术,2023,47(7):2774-2788.  
ZHANG Youbing, LIN Yihang, HUANG Guanhong, et al. Review on applications of deep reinforcement learning in regulation of microgrid systems [J]. Power System Technology, 2023, 47(7): 2774-2788.
- [2] 葛磊蛟,范延赫,来金钢,等.面向低碳经济的人工智能赋能微电网优化运行技术[J].高电压技术,2023,49(6):2219-2238.  
GE Leijiao, FAN Yanhe, LAI Jingang, et al. Artificial intelligence enabled microgrid optimization technology for low carbon economy [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(6): 2219-2238.
- [3] 杨新法,苏剑,吕志鹏,等.微电网技术综述[J].中国电机工程学报,2014,34(1):57-70.  
YANG Xinfu, SU Jian, LÜ Zhipeng, et al. Overview on micro-grid technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.
- [4] 肖斐,艾芊.基于模型预测控制的微电网多时间尺度需求响应资源优化调度[J].电力自动化设备,2018,38(5):184-190.  
XIAO Fei, AI Qian. Multiple time-scale optimal dispatch of demand response resource for microgrid based on model predictive control [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5): 184-190.
- [5] 王奖,邓丰强,张勇军,等.园区能源互联网的规划与运行研究综述[J].电力自动化设备,2021,41(2):24-32.  
WANG Jiang, DENG Fengqiang, ZHANG Yongjun, et al. Review on planning and operation research of park energy Internet [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(2): 24-32.
- [6] 贾宏杰,王丹,徐宪东,等.区域综合能源系统若干问题研究[J].电力系统自动化,2015,39(7):198-207.  
JIA Hongjie, WANG Dan, XU Xiandong, et al. Research on some key problems related to integrated energy systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 198-207.
- [7] 盛万兴,刘科研,李昭,等.新型配电系统形态演化与安全高效运行方法综述[J].高电压技术,2024,50(1):1-18.  
SHENG Wanxing, LIU Keyan, LI Zhao, et al. Review of basic theory and methods of morphological evolution and safe & efficient operation of new distribution system [J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 1-18.
- [8] 丁涛,牟晨璐,别朝红,等.能源互联网及其优化运行研究现状综述[J].中国电机工程学报,2018,38(15):4318-4328.  
DING Tao, MU Chenlu, BIE Zhaohong, et al. Review of energy Internet and its operation [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15): 4318-4328.
- [9] 张淑婷,陆海,林小杰,等.考虑储能的工业园区综合能源系统日前优化调度[J].高电压技术,2021,47(1):93-103.  
ZHANG Shuting, LU Hai, LIN Xiaojie, et al. Operation scheduling optimization of integrated-energy system in industrial park in consideration of energy storage [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 93-103.
- [10] 刘洪,陈星屹,李吉峰,等.基于改进CPSO算法的区域电热综合能源系统经济调度[J].电力自动化设备,2017,37(6):193-200.  
LIU Hong, CHEN Xingyi, LI Jifeng, et al. Economic dispatch based on improved CPSO algorithm for regional power-heat integrated energy system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 193-200.
- [11] 钟永洁,李玉平,胡兵,等.基于合作博弈的能源互联网经济能效分层协同优化调度[J].电力自动化设备,2022,42(1):55-64.  
ZHONG Yongjie, LI Yuping, HU Bing, et al. Hierarchical collaborative optimal scheduling of economy energy efficiency in energy internet based on cooperative game [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(1): 55-64.
- [12] 刘宝林,周少雄,陈耀圣,等.计及多时间尺度需求响应资源的微电网能量优化调度策略[J].电力建设,2018,39(8):9-17.  
LIU Baolin, ZHOU Shaoxiong, CHEN Yaosheng, et al. Optimal energy dispatching strategy for microgrid considering multi-scale demand response resources [J]. Electric Power Construction, 2018, 39(8): 9-17.
- [13] 胡文平,何立夫,陈杰军,等.考虑大规模电动汽车接入电网的双层优化调度策略[J].电力系统保护与控制,2016,44(21):22-28.  
HU Wenping, HE Lifu, CHEN Jiejun, et al. A bi-layer optimization based schedule considering large-scale electric vehicles [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 22-28.
- [14] 张涛,刘伉,陶然,等.计及热惯性及光热电站的综合能源系统优化[J].电力建设,2023,44(1):109-117.  
ZHANG Tao, LIU Kang, TAO Ran, et al. Integrated energy system optimization considering thermal inertia and CSP station [J]. Electric Power Construction, 2023, 44(1): 109-117.
- [15] 黄涛,许志鹏,葛乐.考虑风电出力随机特性的氢储能综合能源系统优化调度[J].电器与能效管理技术,2020(5):72-77.  
HUANG Tao, XU Zhipeng, GE Le. Optimal scheduling of hydrogen energy storage system considering random characteristics of wind power output [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2020(5): 72-77.
- [16] 熊文,刘育权,苏万煌,等.考虑多能互补的区域综合能源系统多种储能优化配置[J].电力自动化设备,2019,39(1):118-126.  
XIONG Wen, LIU Yuquan, SU Wanhuang, et al. Optimal configuration of multi-energy storage in regional integrated energy system considering multi-energy complementation [J]. Electric

- Power Automation Equipment, 2019, 39(1): 118-126.
- [17] 郝然, 艾芊, 朱宇超, 等. 基于能源集线器的区域综合能源系统分层优化调度[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 171-178.  
HAO Ran, AI Qian, ZHU Yuchao, et al. Hierarchical optimal dispatch based on energy hub for regional integrated energy system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 171-178.
- [18] 张静, 张鹏, 林晶怡, 等. 考虑用户综合需求响应的区域综合能源系统多目标优化调度[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(6): 2314-2320.  
ZHANG Jing, ZHANG Peng, LIN Jingyi, et al. Multi-objective dispatching of regional integrated energy system considering the integrated demand response [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(6): 2314-2320.
- [19] 岳文全, 姚方, 文福拴. 考虑光热电站的电热氢综合能源系统协调优化策略[J]. 分布式能源, 2023, 8(4): 29-39.  
YUE Wenquan, YAO Fang, WEN Fushuan. Coordinated optimization strategy for electric-heat-hydrogen integrated energy system considering concentrating solar power [J]. Distributed Energy, 2023, 8(4): 29-39.
- [20] 吴宣儒, 李萍. 考虑电动汽车及需求侧响应的综合能源系统优化调度[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(9): 3585-3593.  
WU Xuanru, LI Ping. Optimal dispatch of integrated energy system including electric vehicles and electric and heat demand-side response [J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(9): 3585-3593.
- [21] 李振坤, 黄滢, 李凉, 等. 计及需求侧响应的主动配电网多时间尺度优化调度[J]. 电力建设, 2023, 44(3): 36-48.  
LI Zhenkun, HUANG Ying, LI Liang, et al. Multi-time scale optimal dispatching of active distribution network considering demand-side response [J]. Electric Power Construction, 2023, 44(3): 36-48.
- [22] 龙涛, 别朝红. 面向终端能源互联网的能效优化调度[J]. 中国电力, 2019, 52(6): 2-10.  
LONG Tao, BIE Zhaohong. Energy efficiency optimal dispatch for terminal energy Internet [J]. Electric Power, 2019, 52(6): 2-10.
- [23] 林威, 靳小龙, 穆云飞, 等. 区域综合能源系统多目标最优混合潮流算法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(20): 5829-5839.  
LIN Wei, JIN Xiaolong, MU Yunfei, et al. Multi-objective optimal hybrid power flow algorithm for integrated local area energy system [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(20): 5829-5839.
- [24] 徐宪东, 贾宏杰, 靳小龙, 等. 区域综合能源系统电/气/热混合潮流算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3634-3642.  
XU Xiandong, JIA Hongjie, JIN Xiaolong, et al. Study on hybrid heat-gas-power flow algorithm for integrated community energy system [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3634-3642.
- [25] STEPHENS E R, SMITH D B, MAHANTI A. Game theoretic model predictive control for distributed energy demand-side management [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(3): 1394-1402.
- 收稿日期: 2024-04-16  
修回日期: 2024-09-20
- 作者简介:  
郭 杉(1984), 通信作者(turkey013@163.com), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为智能配电网;  
郭 洋(1982), 女, 硕士, 高级工程师, 从事综合能源系统研究工作;  
刘小恺(1992), 女, 硕士, 工程师, 从事电网规划及科技项目管理  
工作;  
董文娟(1987), 女, 硕士, 高级工程师, 从事电力可靠性研究工作。
- (责任编辑 郑天茹)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2025.03.002

# 考虑需求响应和碳交易的水泥企业生产调度方法研究

刘鹏龙, 王平欣\*, 夏晓东, 杨剑, 王清

(国网山东省电力公司营销服务中心(计量中心), 山东 济南 250013)

**摘要:**水泥行业是典型高耗能、高排放行业,在电力市场和碳市场的共同作用下,水泥企业必须合理调整生产计划,努力做到节能减排。为此,提出了一种考虑需求响应和碳交易的水泥企业生产调度方法。首先,分析水泥企业生产流程,考虑生产环节主要负荷的运行特点,建立水泥企业负荷需求响应模型;其次,分析水泥企业的碳排放机理,建立碳排放与生产安排的量化表达,并以阶梯型碳交易模型描述碳交易成本;最后,建立综合考虑需求响应和碳交易的水泥企业生产调度模型,通过优化电网购电和各环节生产计划,实现购电成本和碳交易成本最小的生产目标。算例分析表明所提方法能够实现水泥企业在电力市场和碳市场下的电-碳协同优化,有助于水泥企业进行节能减排,促进碳达峰、碳中和的实现。

**关键词:**水泥企业;碳交易;需求响应;生产调度

中图分类号:TM715

文献标志码:A

文章编号:1007-9904(2025)03-0012-09

## Research on Production Scheduling Method of Cement Enterprise Considering Demand Response and Carbon Trading

LIU Penglong, WANG Pingxin\*, XIA Xiaodong, YANG Jian, WANG Qing

(Marketing Service Center (Metering Center), State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250013, China)

**Abstract:** Cement industry is a typical high-energy consumption and high-emission industry, in the power market and carbon market, cement enterprises must reasonably adjust their production plan, and strive to achieve energy savings and emission reductions. Therefore, a production scheduling method for cement enterprises considering demand response and carbon trading is proposed. Firstly, the production process of cement enterprises is analyzed, and a load demand response model for cement enterprises is established, taking into account the operational characteristics of the main loads in the production process. Secondly, the carbon emission mechanism of cement enterprises is analyzed, and a quantitative expression of carbon emissions and production arrangements is established. Furthermore, the carbon trading cost is described using the stepped carbon trading model. Finally, a production scheduling model for cement enterprises is established, which takes into account both demand response and carbon trading. By optimizing the power purchase and production plan for each stage/link, the objective of minimizing both power purchase costs and carbon transaction costs is achieved. The example analysis shows that the proposed method can realize the electric-carbon collaborative optimization for cement enterprises within the power market and carbon market framework. This is beneficial for cement enterprises to implement energy-saving and emission-reduction measures, thereby facilitating the attainment of carbon peaking and carbon neutrality.

**Keywords:** cement enterprise; carbon trading; demand response; production scheduling

## 0 引言

水泥行业是二氧化碳排放的主要行业,国际能源署2018年发表的报告显示,其排放量占全球二氧

化碳总排放量的7%<sup>[1]</sup>。中国是世界上水泥产量最大的国家,生产并使用全球60%左右的水泥。根据测算,在高需求情景下,我国水泥需求量将在2030年达峰,达峰值为 $2.488 \times 10^6 \text{ t}$ <sup>[2]</sup>。随着“3060”目标的提出,水泥行业面临着加强管理、降低能耗、减少排放的迫切需求。

2013年,我国先后在北京、天津、上海、重庆、湖北、广东、深圳开展了碳排放权交易地方试点工作。

**基金项目:**国网山东省电力公司科技项目“用户侧碳足迹测度及监测技术研究”(520633220020)。

Science and Technology Project of State Grid Shandong Electric Power Company “Research on Measurement and Monitoring Technology of User-side Carbon Footprint”(520633220020)。

2021年7月,全国碳市场上线交易正式启动,地方试点碳市场与全国碳市场并行<sup>[3-4]</sup>。发电行业成为首个纳入全国碳市场的行业,钢铁、建材、化工等重点排放行业后续将有序纳入全国碳市场。碳市场的交易标的为碳排放配额,因此企业在生产过程中,必须要考虑由碳排放带来的交易成本。

水泥企业的生产成本主要包括原材料成本、电力成本和人力成本。从短期来看,生产单位产品的原材料成本和人力成本可认为是不变的。在电力市场改革之后,电能价格普遍执行分时电价或市场定价。市场条件下,日内电价的峰谷差不断拉大,部分省份日内电价峰谷差已超过1元/kWh。因此企业在安排生产时,必须考虑电价因素的影响,在生产允许的范围内适度进行负荷调整,以降低企业的生产成本<sup>[5-6]</sup>。企业主动的负荷调整行为,也称需求响应,在电力市场交易规则的框架下,通过需求响应可以显著降低企业购电成本<sup>[7-9]</sup>。文献[10]在分时电价下通过调整水泥厂主要负荷运行时间,在保证产量的前提下实现了购电成本的优化。

企业在生产过程中,由于用电所产生的间接碳排放与使用一次能源所产生的直接碳排放之间存在替代关系,碳价和电价的变动将改变用户侧的用能决策,进而影响用户在电力市场中的电量需求<sup>[11-13]</sup>。现有研究多关于水泥企业碳排放测算和减排方法<sup>[14-15]</sup>,较少针对水泥企业开展电碳关联生产调度的研究。文献[16]开展了考虑虚拟机组参与需求响应和碳交易的电力系统经济调度研究,实现了电力系统的低碳经济调度。文献[17]以水泥厂参与需求响应,构建了考虑火电机组和水泥厂排放特性的电力系统环境经济调度模型,但是水泥厂碳排放计算模型过于粗放。

提出一种考虑需求响应和碳交易的水泥企业生产调度方法,通过分析水泥企业主要负荷需求响应潜力,建立水泥企业需求响应模型;通过分析水泥企业的碳排放机理,建立碳排放与生产安排的量化表达,并以阶梯型碳交易模型描述碳交易成本;建立考虑需求响应和碳交易的水泥企业生产调度模型,实现碳交易成本和购电成本最小的生产目标。

## 1 水泥企业的工艺流程

水泥生产的工艺流程主要分为3个环节,即生

料制备、熟料煅烧、水泥粉磨<sup>[18]</sup>。如图1所示。

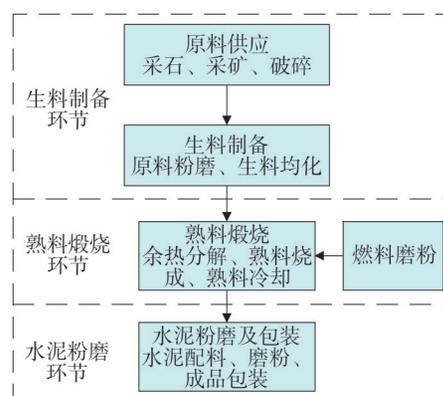


图1 水泥企业的工艺流程

Fig.1 Process flow chart of cement enterprise

1) 生料制备。在水泥生产过程中,需要对石灰石、黏土、铁矿石及煤等颗粒较大、硬度较高的原材料进行破碎、均化处理,以利于生料在后续过程中充分煅烧,提高熟料烧成效率和熟料质量。

2) 熟料煅烧。生料通过悬浮预热、预分解以及回转窑的煅烧,使生料中碳酸盐进行迅速分解并发生一系列固相反应,生成水泥熟料中的矿物,并且随着温度升高,矿物会逐渐变成液相,最后反应生成熟料。熟料烧成后,通过熟料冷却机将回转窑卸出的高温熟料进行冷却。目前熟料煅烧的水泥窑类型主要分为立窑和回转窑2种。由于能耗大、污染严重等问题,立窑工艺属于已经或正在淘汰的窑型。其中熟料煅烧阶段采用回转窑中的新型干法窑,其煅烧过程主要分为悬浮预热、余热分解、煅烧和冷却4个阶段。

3) 水泥粉磨。水泥熟料通过粉磨达到适宜的粒度,形成一定的颗粒级配,增大其水化面积,加快其水化速度,满足水泥浆体凝结、硬化的要求。水泥粉磨完成后利用包装机进行包装,输水泥成品。

水泥生产3个环节相互衔接,生料制备后进入生料库暂时储存,燃料磨粉后进入煤粉仓储存,熟料烧成后进入熟料库进行储存。生产过程中可以通过调整设备运行时间,控制库存来进行生产优化。

## 2 水泥企业的需求响应潜力分析

### 2.1 水泥生产的电能供应与消耗

水泥企业的电力供应主要来自3个方面:电网

购电、厂内余热发电机组发电、厂内安装的新能源发电设备(如屋顶光伏)。电力市场改革后,由于日内电价峰谷差越来越大,为了降低购电成本,部分水泥企业还安装储能设备,在厂内新能源和余热机组出力较大的时段将电能储存,在电价高峰时将电能放出,以降低购电成本。考虑水泥企业厂内安装余热发电机组、光伏发电设备和储能设备,供电系统如图2所示。

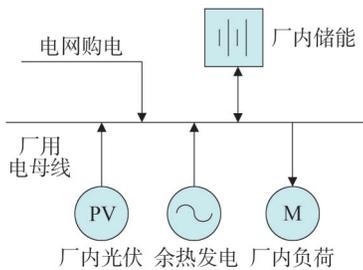


图2 水泥企业供电系统

Fig.2 Diagram of cement enterprise power supply system

水泥企业余热发电的能量来自熟料煅烧环节窑内废气排放所带走的热量。余热发电为纯低温余热发电技术,是利用新型干法水泥生产线窑头篌冷机和窑尾预热器排出的中低温废气加热给水生产蒸汽,推动汽轮机发电的一项技术,无须额外补充燃料,能有效地回收水泥生产线的余热资源,为水泥生产提供电能。由于余热发电和水泥熟料生产相互耦合<sup>[19]</sup>,在余热发电系统控制参数不变的条件下,余热发电功率可认为是熟料生产速率的线性函数。余热发电功率表示为

$$P_i^{\text{heat}} = \varphi^{\text{heat-clinker}} M_i^{\text{clinker}} + \varepsilon^{\text{heat}} \quad (1)$$

式中: $M_i^{\text{clinker}}$ 为*t*时段的熟料产量; $\varphi^{\text{heat-clinker}}$ 为余热发电功率与熟料产量的关联因子; $\varepsilon^{\text{heat}}$ 为修正系数。

### 2.2 水泥企业电力负荷需求响应分析

水泥企业生产过程中需要众多电力设备,其中部分电力设备在生产过程中可以停机或降负荷进行需求响应,而部分电力设备必须保持开机,否则将影响产品质量。由于设备数量众多,需求响应方案制定时如果按单台设备来考虑,将使问题复杂化,同时由于水泥生产中的大型负荷如破碎机、煤磨、水泥磨等无法自动启停,必须借助人力操作,频繁的负荷调整将面临高额的人力管理成本。将水泥生产的3个

环节视作3个整体模块考虑,每个环节内的设备做出同样的需求响应行为,这种设计方案能简化问题,同时方便管理。

可开展需求响应的电力负荷分为可中断负荷和可转移负荷。水泥生产过程中,可中断负荷主要包括生料制备环节的破碎机、输送机和生料磨,熟料煅烧环节的煤磨以及水泥粉磨环节的水泥磨和包装机。上述负荷在生产过程中可根据需要进行开停机。熟料煅烧采用的干法回转窑为连续生产设备,不能停炉停机,其相关用电负荷为不可中断负荷。回转窑在生产过程中,可根据产量需求,灵活调整进料量及配套电动机、风机等电力负荷来控制产量。因此其相关负荷为可转移负荷。生料制备环节的破碎机、生料磨,以及水泥粉磨环节的水泥磨可根据需要降低运行功率运行,也属于可转移负荷。上述负荷转移能力取决于中间的仓储能力和生产调度水平。水泥生产可开展需求响应的环节如图3所示。

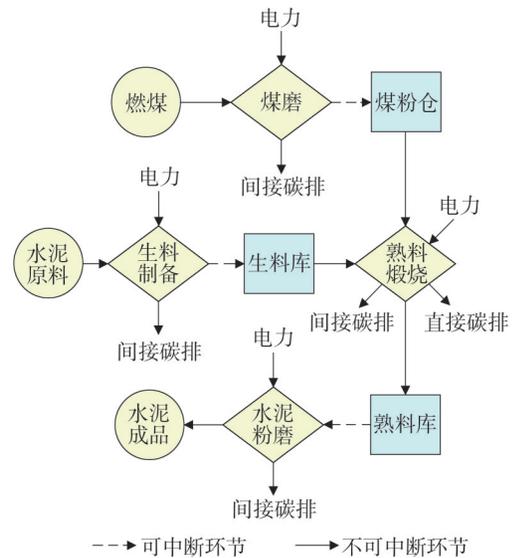


图3 水泥企业需求响应和碳排放示意图

Fig.3 Demand response and carbon emission diagram of cement enterprise

将生料制备、水泥粉磨两个环节的用电负荷均当作整体模块进行考虑。令 $\gamma_i^{\text{raw}}$ 、 $\gamma_i^{\text{cement}}$ 、 $\gamma_i^{\text{coal}}$ 分别为生料制备、水泥粉磨、煤磨在*t*时段是否开机的{0,1}指示变量,1表示开机,0表示关机; $D_{\text{rate}}^{\text{raw}}$ 、 $D_{\text{rate}}^{\text{cement}}$ 、 $D_{\text{rate}}^{\text{coal}}$ 为生料制备、水泥粉磨、煤磨的额定负荷, $D_{\text{min}}^{\text{raw}}$ 、 $D_{\text{min}}^{\text{cement}}$ 、 $D_{\text{min}}^{\text{coal}}$ 为生料制备、水泥粉磨、煤磨的最小允许负荷,则生

料制备、水泥粉磨、煤磨在  $t$  时段的实际负荷  $D_t^{\text{raw}}$ 、 $D_t^{\text{cement}}$ 、 $D_t^{\text{coal}}$  可分别表示为

$$\begin{cases} \gamma_t^{\text{raw}} D_{\min}^{\text{raw}} \leq D_t^{\text{raw}} \leq \gamma_t^{\text{raw}} D_{\text{rate}}^{\text{raw}} \\ \gamma_t^{\text{cement}} D_{\min}^{\text{cement}} \leq D_t^{\text{cement}} \leq \gamma_t^{\text{cement}} D_{\text{rate}}^{\text{cement}} \\ \gamma_t^{\text{coal}} D_{\min}^{\text{coal}} \leq D_t^{\text{coal}} \leq \gamma_t^{\text{coal}} D_{\text{rate}}^{\text{coal}} \end{cases} \quad (2)$$

设  $D_{\text{rate}}^{\text{clinker}}$  为熟料煅烧环节除煤磨外的额定负荷,  $D_{\min}^{\text{clinker}}$  为回转窑保持不停窑的最低生产负荷,则熟料煅烧环节除煤磨外在  $t$  时段的实际负荷  $D_t^{\text{clinker}}$  可表示为

$$D_{\min}^{\text{clinker}} \leq D_t^{\text{clinker}} \leq D_{\text{rate}}^{\text{clinker}} \quad (3)$$

### 3 水泥企业的碳排放与碳交易

#### 3.1 水泥生产过程的碳排放计算

水泥生产过程中的碳排放可分为直接碳排放和间接碳排放,其排放环节如图3所示。

##### 1) 直接碳排放。

水泥生产直接碳排放主要来源为:一是来自熟料煅烧环煤等化石燃料燃烧释放;二是熟料煅烧环节原料中含有的碳酸钙和碳酸镁在预热器、分解炉及回转窑的高温下分解产生二氧化碳。直接碳排放为

$$E_C^{\text{direct}} = \sum_{t=1}^T (\xi_C^{\text{coal}} V_t^{\text{coal}} + \xi_C^{\text{raw}} V_t^{\text{raw}}) \quad (4)$$

式中:  $E_C^{\text{direct}}$  为直接产生的碳排放;  $\xi_C^{\text{coal}}$  为燃煤的碳排放因子,该排放因子与燃煤品质有关,燃煤品质不变的情况下,该因子可认为是不变的<sup>[20-21]</sup>;  $\xi_C^{\text{raw}}$  为煅烧时生料分解的碳排放因子,该因子与生产不同标号水泥所用生料成分配比有关,短期内也可认为是不变的;  $V_t^{\text{coal}}$ 、 $V_t^{\text{raw}}$  分别为在  $t$  时段熟料煅烧环节煤粉和生料消耗量;  $T$  为决策周期内总的时段数。

##### 2) 间接碳排放。

间接碳排放是指使用电网外部购电产生的碳排放,企业内部新能源发电和无须补燃的余热发电所发电量不计入间接碳排放。间接碳排放由外购电量与区域碳排放因子的乘积计算。区域碳排放因子由国家生态环境部门定期公布。直接碳排放为

$$E_C^{\text{indirect}} = \sum_{t=1}^T \xi_C^{\text{power}} P_t^{\text{grid}} \quad (5)$$

式中:  $E_C^{\text{indirect}}$  为间接碳排放;  $\xi_C^{\text{power}}$  为区域碳排放因子;  $P_t^{\text{grid}}$  为  $t$  时段自电网购电量。

水泥企业总的碳排为

$$E_C^{\text{total}} = E_C^{\text{direct}} + E_C^{\text{indirect}} \quad (6)$$

#### 3.2 碳配额分配原则

政府部门通过免费分配的方式,将碳配额分配

给碳交易市场内需要减排的企业。企业碳排少于免费配额,则可以出售多余的碳配额;相反则要在碳交易市场上购买碳配额。目前碳排放配额的分配方法主要有基准线分配法、历史强度分配法和标杆分配法等。水泥行业的碳配额分配上述方法均有应用,以基准线法应用最广。基准线法是设定单位产品的排放基准线,排放基准线内配额免费分配,超出基准线则需要购买。基准线法在执行过程中,有地区将水泥生产3个环节区分对待,分别设置生料制备、熟料煅烧和水泥粉磨的排放基准线。设定成品水泥的排放基准线,以成品水泥产量确定水泥企业的碳排放配额。企业需要在市场中购买或出售碳配额为

$$E_C = E_C^{\text{total}} - \lambda_C \sum_{t=1}^T M_t^{\text{cement}} \quad (7)$$

式中:  $\lambda_C$  为国家免费分配的单位成品水泥碳排放基准线;  $M_t^{\text{cement}}$  为水泥企业在时段  $t$  的成品产量;  $E_C$  为水泥企业实际参与碳交易市场的碳排放量,当其大于0时,代表向市场中购买碳排份额,当其小于0时,代表向市场中出售碳排份额。

#### 3.3 碳交易成本模型

根据碳交易价格可以将碳交易分成单一价格型<sup>[22]</sup>、阶梯价格型<sup>[23]</sup>和出清碳价型。阶梯型碳交易将碳排放量分为多个区间,碳排放量越多,则单位碳排放价格越高。在保证一定经济性条件下,阶梯型碳交易可以更好地抑制系统碳排放,对碳减排更有利<sup>[24-25]</sup>。采用阶梯型碳交易模型,阶梯型碳交易成本可表示为

$$F_{\text{CO}_2} = \begin{cases} \mu E_C, & 0 \leq E_C \leq l \\ \mu(1 + \delta)(E_C - l) + \mu l, & l < E_C \leq 2l \\ \mu(1 + 2\delta)(E_C - 2l) + \mu(2 + \delta)l, & 2l < E_C \leq 3l \\ \mu(1 + 3\delta)(E_C - 3l) + \mu(3 + 3\delta)l, & E_C > 3l \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $F_{\text{CO}_2}$  为碳交易成本;  $\mu$  为碳交易基本价格;  $\delta$  为价格增长比例;  $l$  为阶梯长度。

### 4 考虑需求响应的水泥企业低碳生产调度模型

#### 4.1 目标函数

本文中水泥企业在生产调度过程中主要考虑购电成本以及碳交易成本。以1天为生产调度周期,  $\Delta t$

为最小调度时长,  $\Delta t$  可选择电能最小结算时间的倍数。以山东电力市场为例, 目前以小时为单位进行结算, 可选择1 h或其整数倍, 1天总的决策时段数  $T=24/\Delta t$ 。以水泥企业生产调度成本最小为优化目标, 包括购电成本  $F_G$ 、碳交易成本  $F_{CO_2}$ , 目标函数为

$$\min F = F_G + F_{CO_2} \quad (9)$$

以  $\pi_t$  表示  $t$  时段的电网购电价格,  $P_t^{\text{grid}}$  为电网购电功率, 则购电成本  $F_G$  为

$$F_G = \sum_{t=1}^T \pi_t P_t^{\text{grid}} \quad (10)$$

## 4.2 约束条件

水泥企业生产调度过程中需要考虑的约束条件包括电力平衡约束、产量约束、库容约束等。

### 4.2.1 电力平衡约束

水泥生产过程中需要满足的电力平衡约束为

$$P_{t,\text{dis}}^{\text{grid}} + P_{t,\text{dis}}^{\text{storage}} + P_t^{\text{pv}} + P_t^{\text{heat}} = P_{t,\text{ch}}^{\text{storage}} + D_t^{\text{raw}} + D_t^{\text{coal}} + D_t^{\text{clinker}} + D_t^{\text{cement}} \quad (11)$$

式中:  $P_{t,\text{ch}}^{\text{storage}}$ 、 $P_{t,\text{dis}}^{\text{storage}}$  分别为  $t$  时段储能装置的充电和放电功率;  $P_t^{\text{pv}}$ 、 $P_t^{\text{heat}}$  分别为  $t$  时段光伏和余热机组发电功率。

光伏发电电站在调度过程中需满足的出力约束为

$$0 \leq P_t^{\text{pv}} \leq P_t^{\text{pv,forecast}} \quad (12)$$

式中:  $P_t^{\text{pv,forecast}}$  为光伏电站在  $t$  时段的预测出力。

储能电站需满足的运行约束为

$$\begin{cases} u_{t,\text{dis}}^{\text{storage}} + u_{t,\text{ch}}^{\text{storage}} \leq 1 \\ 0 \leq P_{t,\text{dis}}^{\text{storage}} \leq u_{t,\text{dis}}^{\text{storage}} P_{\text{max,dis}}^{\text{storage}} \\ 0 \leq P_{t,\text{ch}}^{\text{storage}} \leq u_{t,\text{ch}}^{\text{storage}} P_{\text{max,ch}}^{\text{storage}} \\ H_t^{\text{storage}} = H_{t-1}^{\text{storage}} + \frac{(P_{t,\text{ch}}^{\text{storage}} \eta_{\text{ch}} - P_{t,\text{dis}}^{\text{storage}} / \eta_{\text{dis}}) \Delta t}{H_{\text{rate}}} \\ H_T^{\text{storage}} = H_0^{\text{storage}} \\ 0 \leq H_t^{\text{storage}} \leq 1 \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $u_{t,\text{ch}}^{\text{storage}}$  和  $u_{t,\text{dis}}^{\text{storage}}$  分别为储能电站在  $t$  时段的充电和放电状态变量;  $P_{\text{max,ch}}^{\text{storage}}$ 、 $P_{\text{max,dis}}^{\text{storage}}$  分别为储能系统的最大充电、放电功率;  $H_t^{\text{storage}}$  为储能电站  $t$  时段的荷电状态;  $H_0^{\text{storage}}$ 、 $H_T^{\text{storage}}$  分别为储能电站初始、末尾时段的荷电状态;  $\eta_{\text{ch}}$  为储能电站的充电效率;  $\eta_{\text{dis}}$  为储能电站的放电效率;  $H_{\text{rate}}$  为储能电站总容量。

### 4.2.2 产量约束

生料、煤粉、熟料和水泥成品的产量均可表示为相应环节用电负荷的线性函数<sup>[24]</sup>, 即为

$$\begin{cases} M_t^{\text{raw}} = D_t^{\text{raw}} / \alpha^{\text{raw-power}} \\ M_t^{\text{coal}} = D_t^{\text{coal}} / \alpha^{\text{coal-power}} \\ M_t^{\text{clinker}} = D_t^{\text{clinker}} / \alpha^{\text{clinker-power}} \\ M_t^{\text{cement}} = D_t^{\text{cement}} / \alpha^{\text{cement-power}} \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $M_t^{\text{raw}}$ 、 $M_t^{\text{coal}}$ 、 $M_t^{\text{clinker}}$ 、 $M_t^{\text{cement}}$  分别为  $t$  时段生料、煤粉、熟料和水泥成品的产量;  $\alpha^{\text{raw-power}}$ 、 $\alpha^{\text{coal-power}}$ 、 $\alpha^{\text{clinker-power}}$ 、 $\alpha^{\text{cement-power}}$  分别为生料、煤粉、熟料和水泥成品的产量-电量折算因子。

在每一生产环节, 由后端产量可以得到前端原材料用量。生产过程中生料、煤粉和熟料用量可以表示为

$$\begin{cases} V_t^{\text{raw}} = \beta^{\text{raw-clinker}} M_t^{\text{clinker}} \\ V_t^{\text{coal}} = \beta^{\text{coal-clinker}} M_t^{\text{clinker}} \\ V_t^{\text{clinker}} = \beta^{\text{clinker-cement}} M_t^{\text{cement}} \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $V_t^{\text{raw}}$ 、 $V_t^{\text{coal}}$ 、 $V_t^{\text{clinker}}$  分别为  $t$  时段生料、煤粉和熟料用量;  $\beta^{\text{raw-clinker}}$  为生料-熟料折算因子;  $\beta^{\text{coal-clinker}}$  为煤粉-熟料折算因子;  $\beta^{\text{clinker-cement}}$  为熟料-水泥成品折算因子。

水泥成品日产量必须满足生产计划, 约束为

$$\sum_{t=1}^T M_t^{\text{cement}} \geq M_{\text{plan}}^{\text{cement}} \quad (16)$$

式中:  $M_{\text{plan}}^{\text{cement}}$  为调度周期内成品水泥的日生产计划。

### 4.2.3 库容约束

水泥生产过程中的存储设备主要包括生料库、煤粉仓和熟料库。库容大小受上一时段库容、前序生产速度和后序消耗速度的影响。各库均存在初始库容、最大和最小库容。假定水泥生产的第一级原材料包括石灰石、铁矿石、燃煤等库存不受限制。令  $W_0^{\text{raw}}$ 、 $W_{\text{max}}^{\text{raw}}$ 、 $W_{\text{min}}^{\text{raw}}$  分别为生料库初始、最大和最小库容;  $W_0^{\text{coal}}$ 、 $W_{\text{max}}^{\text{coal}}$ 、 $W_{\text{min}}^{\text{coal}}$  分别为煤粉仓初始、最大和最小库容;  $W_0^{\text{clinker}}$ 、 $W_{\text{max}}^{\text{clinker}}$ 、 $W_{\text{min}}^{\text{clinker}}$  分别为熟料库初始、最大和最小库容, 则在  $t$  时段生料库库容  $W_t^{\text{raw}}$ 、煤粉仓库容  $W_t^{\text{coal}}$ 、熟料库库容  $W_t^{\text{clinker}}$  为

$$\begin{cases} W_t^{\text{raw}} = W_{t-1}^{\text{raw}} + M_t^{\text{raw}} - V_t^{\text{raw}} \\ W_t^{\text{coal}} = W_{t-1}^{\text{coal}} + M_t^{\text{coal}} - V_t^{\text{coal}} \\ W_t^{\text{clinker}} = W_{t-1}^{\text{clinker}} + M_t^{\text{clinker}} - V_t^{\text{clinker}} \end{cases} \quad (17)$$

需要满足的库容约束为

$$\begin{cases} W_{\text{max}}^{\text{raw}} \geq W_t^{\text{raw}} \geq W_{\text{min}}^{\text{raw}} \\ W_{\text{max}}^{\text{coal}} \geq W_t^{\text{coal}} \geq W_{\text{min}}^{\text{coal}} \\ W_{\text{max}}^{\text{clinker}} \geq W_t^{\text{clinker}} \geq W_{\text{min}}^{\text{clinker}} \end{cases} \quad (18)$$

至此, 完成了考虑需求响应和碳交易成本的水

泥企业生产调度方法建模。

### 4.3 求解方法

该模型主要决策变量为调度周期内生料制备、煤磨、水泥粉磨各环节的开停机状态,生料制备、熟料煅烧、水泥粉磨各环节的设备出力,电网的购电计划以及储能电池的充放电计划,同时能够给出调度时段内各级仓储的库容。模型的目标函数和约束条件均为线性,其中式(8)为分段线性表示,其等效表达式为

$$\begin{cases} F_{CO_2} = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \\ E_C = E_{m1} + E_{m2} + E_{m3} + E_{m4} \\ F_1 = \mu E_{m1}, & 0 \leq E_{m1} \leq l \\ F_2 = \mu(1 + \delta) E_{m2}, & 0 \leq E_{m2} \leq l \\ F_3 = \mu(1 + 2\delta) E_{m3}, & 0 \leq E_{m3} \leq l \\ F_4 = \mu(1 + 3\delta) E_{m4}, & 0 \leq E_{m4} \end{cases} \quad (19)$$

式中: $E_{m1}$ — $E_{m4}$ 为各分段上的碳排放量; $F_1$ — $F_4$ 为各分段上的碳排放成本。至此整个模型转化为混合整数线性规划模型,可以直接采用商业求解器CPLEX、GUROBI、COPT等进行求解。

## 5 算例分析

以一条日产量3 000 t的水泥生产线为例,以一天为一个调度周期,以1 h为一个调度时段;企业配套安装额定容量5 MW的余热发电机组,安装额定容量5 MW的光伏电站,以及5 MW/10 MWh储能电站,储能充放电效率均为90%,储能电站初始荷电状态(state of charge, SOC)为10%;阶梯型碳交易价格参考文献[25];分时电价参考山东电力市场2022年平均日前电价;企业生产计划为日产成品水泥2 000 t。水泥企业生产过程中各环节负荷参数如表1所示,各级库存参数如表2所示。

为了对比验证文中所提的考虑碳交易成本与需求响应的水泥企业生产调度模型的有效性,设置以下4种场景进行对比分析。场景1:不考虑碳交易成本和需求响应;场景2:不考虑碳交易成本,考虑需求响应;场景3:考虑碳交易成本,不考虑需求响应;场景4:同时考虑碳交易成本和需求响应。其中不考虑需求响应的情况下,企业各生产环节在满足产量要求的前提下按平均负荷进行生产。4种场景下水泥企业的生产成本如表3所示。

表1 水泥生产各环节负荷参数

Table 1 Load parameters of various stages in cement production 单位:MW

负荷	生料制备	回转窑	煤磨	水泥粉磨
额定负荷	10	5	1.0	10
最小负荷	2	1	0.2	2

表2 水泥生产各级库存参数

Table 2 Inventory parameters at all levels of cement production 单位:t

库存	初始库存	最小库存	最大库存
生料库	500	500	4 000
熟料库	500	500	4 000
煤粉仓	1	1	100

表3 不同场景下水泥企业的生产成本

Table 3 Production costs of cement enterprises under different scenarios

场景	总成本/元	购电成本/元	碳交易成本/元	购电量/MWh	碳交易量/t
1	158 241	44 507	113 734	108.00	259.6
2	66 796	16 705	50 091	90.75	115.3
3	74 952	30 069	44 883	84.05	103.5
4	62 184	17 104	45 080	86.64	103.9

从计算结果可以看出,场景1由于未考虑需求响应,各环节生产安排均按平均负荷执行,主要负荷均未进行停机操作,因此总的购电量最多,碳交易量也最多,总成本最高。场景2考虑了需求响应的要求,通过合理安排生产计划和储能电站的充放电计划,实现了总的购电成本最低,但由于未考虑碳交易的要求,致使碳交易量较高,总成本也较高。场景3以碳交易成本最小为目标,由于水泥生产过程中的直接碳排放与产量相关,间接碳排放与购电量相关,仅以碳交易成本最小为目标,则决策过程中会尽量减少外购电量,不进行储能电站的充放电操作,因此购电量最小,但是购电成本却较高,总成本也相对较高。场景4同时考虑需求响应和碳交易成本时,购电量和碳交易量相比场景3来说均有增加,但因为

储能电站的充放电操作降低了购电成本,企业的总成本也最低。

图4给出了场景1、场景4水泥企业电价-购电量曲线。从电价曲线来看,白天09:00—15:00为电价低谷,晚上18:00—24:00为电价高峰。场景1由于不考虑需求响应和碳交易成本,其生产用电曲线平稳,白天电价低谷时段由于有所配光伏电站的电量补充,外购电量较少,晚上外购电量增大,其外购电曲线与电价曲线趋势一致,导致其总购电成本最高。场景4由于考虑了需求响应,通过调整生产安排,在白天电价低谷时购入较多电量,并利用储能进行储存,电价高峰时减少电量购入,因此总购电成本也最低。场景4考虑需求响应后企业总的购电量比场景1减少了21.36 MWh,总的购电成本减少了27 403元,说明企业通过需求响应能够显著减少购电成本。

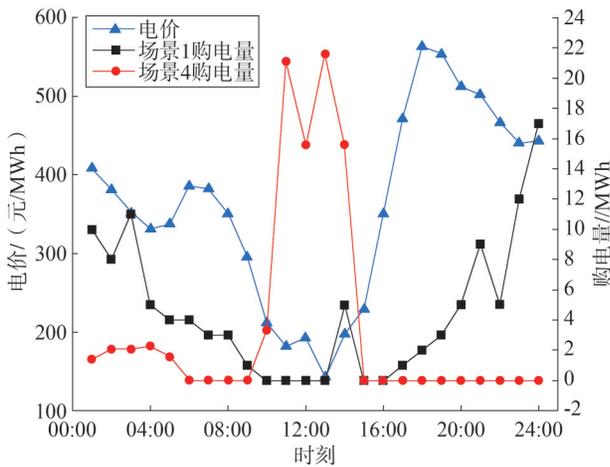


图4 场景1、4下水泥企业电价-购电量曲线图

Fig.4 Graph of electricity price-purchase quantity of cement enterprise under Scenarios 1 and 4

图5给出了场景4各环节用电曲线。从图中可以看出,煤磨和水泥粉磨在生产开始阶段由于电价较高,处于停机等待状态,生料制备由于需要提供煅烧环节所需生料,故处于小负荷生产状态;在中午电价低谷时段,生料制备、煤磨、煅烧和水泥粉磨各环节均处于满负荷生产状态;在晚上电价高峰时段,生料制备和煤磨由于已储备足够库存,所以处于停机等待状态,水泥粉磨由于需要完成既定产量计划,处于断续开机状态,直至最后满足产量要求。

图6给出了各场景下的碳排放量和交易量。从图中可以看出,除场景1外,其余场景直接碳排放量相同。因为水泥企业的直接碳排放来自熟料煅烧环节的燃料投放和生料分解,在产量不变的情况下,直接碳排放不变。由于生料分解产生的直接碳排放不可替代,水泥企业直接碳排的减排思路为一方面采用清洁能源如氢、天然气等代替燃煤,另一方面配置碳捕集设备,吸收生料分解产生的二氧化碳。从排放量来看,水泥企业的间接碳排放约占总排放量的3.5%左右。由于间接碳排由外购电量产生,企业用电和间接碳排之间存在直接关联。因此场景3、场景4与场景1、场景2相比,间接碳排量降低了约19%,间接碳排降低明显。水泥企业在间接碳排方面的减排措施包括配置新能源发电设备、采购绿电、提高回转窑废热利用和发电效率等。

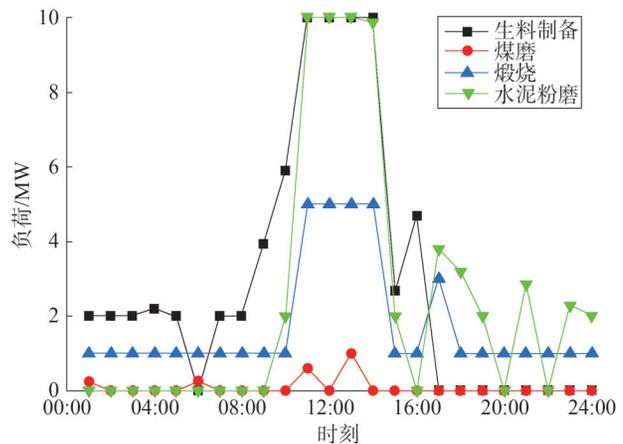


图5 场景4下水泥企业各环节用电曲线图

Fig.5 Electricity consumption curve of various links in cement enterprise under scenario 4

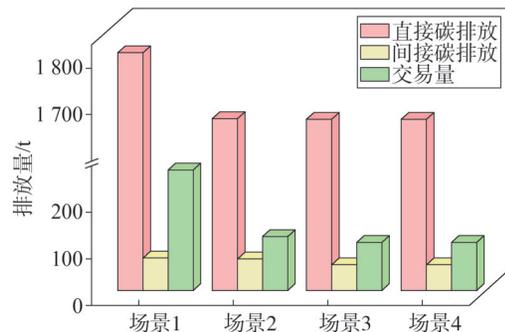


图6 各场景下水泥企业的碳排放量

Fig.6 Carbon emissions of cement enterprises under different scenarios

## 6 结束语

水泥企业是高耗能和排放大户,将很快纳入全国碳市场。提出水泥企业短期生产调度中考虑需求响应和碳交易的调度方法。通过分析水泥企业主要负荷需求响应潜力,建立水泥企业需求响应模型,并结合水泥企业的生产流程,建立碳排放与生产安排的量化表达,通过优化电网购电、储能充放电决策和水泥企业生产调度安排,实现碳交易成本和购电成本最小的运行目标。仿真分析结果表明,考虑需求响应能显著减少企业购电成本;考虑碳交易成本后,水泥企业可通过生产优化,减少碳排放;通过水泥生产的电-碳联合优化,一方面能够减少水泥企业的成本支出,另一方面也有助于水泥企业进行节能减排,促进碳达峰、碳中和的实现。

## 参考文献

- [1] 朱书涵,陆一磊,王松伟,等.2020—2050年我国水泥行业二氧化碳排放特征及减排潜力研究[J].环境科学学报,2024,44(2):453-463.  
ZHU Shuhan, LU Yilei, WANG Songwei, et al. Characteristics and reduction potential of carbon dioxide emission in China's cement industry from 2020 to 2050 [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2024, 44(2): 453-463.
- [2] 赵金兰,闫浩春,刘韬,等.论水泥企业碳中和的路径[J].新世纪水泥导报,2021,27(2):1-6.  
ZHAO Jinlan, YAN Haochun, LIU Tao, et al. On the path of carbon neutrality in cement enterprises [J]. Cement Guide for New Epoch, 2021, 27(2): 1-6.
- [3] 张希良,张达,余润心.中国特色全国碳市场设计理论与实践[J].管理世界,2021,37(8):80-95.  
ZHANG Xiliang, ZHANG Da, YU Runxin. Theory and practice of China's national carbon emissions trading system [J]. Journal of Management World, 2021, 37(8): 80-95.
- [4] 朱磊,梁壮,谢俊,等.全国统一碳市场对电力行业减排的影响分析[J].环境经济研究,2019,4(2):28-43.  
ZHU Lei, LIANG Zhuang, XIE Jun, et al. Analysis of the impact of national carbon market on emission reduction in power industry in China [J]. Journal of Environmental Economics, 2019, 4(2): 28-43.
- [5] 代心芸,陈皓勇,肖东亮,等.电力市场环境工业需求响应技术的应用与研究综述[J].电网技术,2022,46(11):4169-4186.  
DAI Xinyun, CHEN Haoyong, XIAO Dongliang, et al. Review of applications and researches of industrial demand response technology under electricity market environment [J]. Power System Technology, 2022, 46(11): 4169-4186.
- [6] 陈启鑫,吕睿可,郭鸿业,等.面向需求响应的电力用户行为建模:研究现状与应用[J].电力自动化设备,2023,43(10):23-37.  
CHEN Qixin, LÜ Ruike, GUO Hongye, et al. Electricity user behavior modeling for demand response: research status quo and applications [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(10): 23-37.
- [7] 赵杰,王聪,李冠冠,等.考虑需求响应的多微网P2P能源交易低碳运行策略[J].电力建设,2023,44(12):54-65.  
ZHAO Jie, WANG Cong, LI Guanguan, et al. Low-carbon operation strategy for P2P energy trading among multiple microgrids considering demand response [J]. Electric Power Construction, 2023, 44(12): 54-65.
- [8] GOLMOHAMADI H, KEYPOUR R, BAK-JENSEN B, et al. A multi-agent based optimization of residential and industrial demand response aggregators [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 107: 472-485.
- [9] 徐文滨,孙一凡,王林,等.区块链架构下考虑共享储能的用户需求响应[J].浙江电力,2023,42(4):54-64.  
XU Wenbin, SUN Yifan, WANG Lin, et al. Demand response of users considering shared energy storage under blockchain architecture [J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(4): 54-64.
- [10] 桑乃云.基于可调节负荷的水泥厂用电策略研究[J].技术与市场,2018,25(12):191-192.  
SANG Naiyun. Study on power consumption strategy of cement plant based on adjustable load [J]. Technology and Market, 2018, 25(12): 191-192.
- [11] 尚楠,陈政,卢治霖,等.电力市场、碳市场及绿证市场互动机理及协调机制[J].电网技术,2023,47(1):142-154.  
SHANG Nan, CHEN Zheng, LU Zhilin, et al. Interaction principle and cohesive mechanism between electricity market, carbon market and green power certificate market [J]. Power System Technology, 2023, 47(1): 142-154.
- [12] 赵长红,张明明,吴建军,等.碳市场和电力市场耦合研究[J].中国环境管理,2019,11(4):105-112.  
ZHAO Changhong, ZHANG Mingming, WU Jianjun, et al. The coupling study on carbon market and power market [J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2019, 11(4): 105-112.
- [13] 梁作放,潘华,何辉,等.考虑碳交易的区域综合能源系统经济调度研究[J].山东电力技术,2020,47(2):20-26.  
LIANG Zuofang, PAN Hua, HE Hui, et al. Study on economic dispatch of regional integrated energy system considering carbon trading [J]. Shandong Electric Power, 2020, 47(2): 20-26.
- [14] 史家乐,李静,海燕.水泥行业碳源分析及碳排放核算研究[J].水泥,2023(11):20-23.  
SHI Jiale, LI Jing, HAI Yan. Study on carbon source analysis and carbon emission accounting in cement industry [J]. Cement, 2023(11): 20-23.

- [15] 孙挺. 水泥行业碳排放核算及低碳发展路径研究[J]. 中国水泥, 2022(3):80-83.  
SUN Ting. Research on carbon emission accounting and low-carbon development path of cement industry [J]. China Cement, 2022(3):80-83.
- [16] 卢志刚, 郭凯, 闫桂红, 等. 考虑需求响应虚拟机组和碳交易的含风电电力系统优化调度[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(15): 58-65.  
LU Zhigang, GUO Kai, YAN Guihong, et al. Optimal dispatch of power system integrated with wind power considering virtual generator units of demand response and carbon trading [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(15):58-65.
- [17] 韩刚, 黎雄, 徐箭, 等. 计及需求响应下典型工业负荷排放特性的环境经济调度[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(8):109-119.  
HAN Gang, LI Xiong, XU Jian, et al. Environmental economic dispatch considering emission characteristics of typical industrial loads under demand response [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(8):109-119.
- [18] 宫飞翔, 赵永亮, 赵昕, 等. 基于状态任务网络的水泥生产流程分析[J]. 电子技术应用, 2023, 49(10):8-14.  
GONG Feixiang, ZHAO Yongliang, ZHAO Xin, et al. Analysis of cement production process based on state task network [J]. Application of Electronic Technique, 2023, 49(10):8-14.
- [19] 张宁. 水泥生产电耗预测与用电负荷优化调度技术研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2015.
- [20] 叶萌, 杨宏兵, 汪宣乾, 等. 基于碳市场设定水泥熟料过程碳排放默认值的探讨[J]. 水泥, 2023(6):7-10.  
YE Meng, YANG Hongbing, WANG Xuanqian, et al. Discussion on setting default value of process carbon emission in cement clinker based on carbon market [J]. Cement, 2023(6):7-10.
- [21] 张舒涵, 陈晖, 王彬, 等. 基于水泥企业电-碳关系的碳排放监测[J]. 中国环境科学, 2023, 43(7):3787-3795.  
ZHANG Shuhan, CHEN Hui, WANG Bin, et al. Carbon emission monitoring based on analysis from "electricity-carbon" relationship of cement enterprises [J]. China Environmental Science, 2023, 43(7):3787-3795.
- [22] 段新会, 黄嵘, 齐传杰, 等. 计及碳交易与需求响应的微能源网双层优化模型[J]. 太阳能学报, 2024, 45(3):310-318.  
DUAN Xinhui, HUANG Rong, QI Chuanjie, et al. Bi-level optimization model for micro energy grid considering carbon trading and demand response [J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2024, 45(3):310-318.
- [23] 苏志鹏, 王莉, 梁欣怡, 等. 考虑阶梯式碳交易及综合需求响应的虚拟电厂优化调度[J]. 中国电力, 2023, 56(12):174-182.  
SU Zhipeng, WANG Li, LIANG Xinyi, et al. Optimal dispatch of virtual power plant considering stepped carbon trading and comprehensive demand response [J]. Electric Power, 2023, 56(12):174-182.
- [24] 周林元, 吴柯, 付涛, 等. 面向节能减排的水泥炉窑煅烧电耗预测方法[J]. 自动化与仪器仪表, 2023(10):209-213.  
ZHOU Linyuan, WU Ke, FU Tao, et al. Energy-saving and emission reduction-oriented electricity consumption prediction method for cement kiln calcination [J]. Automation & Instrumentation, 2023(10):209-213.
- [25] 陈锦鹏, 胡志坚, 陈嘉滨, 等. 考虑阶梯式碳交易与供需灵活双响应的综合能源系统优化调度[J]. 高电压技术, 2021, 47(9):3094-3106.  
CHEN Jinpeng, HU Zhijian, CHEN Jiabin, et al. Optimal dispatch of integrated energy system considering ladder-type carbon trading and flexible double response of supply and demand [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9):3094-3106.

收稿日期:2024-04-09

修回日期:2024-07-12

作者简介:

刘鹏龙(1976),男,高级工程师,主要研究方向为电力营销;

王平欣(1986),通信作者(15665786590@163.com),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为电能计量与采集技术;

夏晓东(1979),男,高级工程师,主要研究方向为综合能源、电能计量、电力营销技术;

杨剑(1980),男,高级工程师,主要研究方向为电能计量与采集技术、故障检测、负荷辨识、智能安全识别技术;

王清(1984),男,博士,主要研究方向为电能计量与采集技术。

(责任编辑 郑天茹)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2025.03.003

# 计及阶梯碳交易机制的热电氢联供型综合能源系统 多目标优化调度

邢家维, 赵 帅, 杨 颂\*, 王玥娇, 孙立群  
(国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250003)

**摘要:**在“双碳”目标背景下, 热电氢联供型综合能源系统作为一种具有潜力的清洁能源系统, 能够有效整合电力、热能和氢能, 满足不断增长的能源需求并减少碳排放。为此, 提出一种计及阶梯碳交易机制的热电氢联供型综合能源系统多目标优化调度方法。首先, 构建含火电机组、燃气锅炉、电转气和氢燃料电池等设备的热电氢联供型综合能源系统架构。其次, 建立运行成本最小化、碳排放量小化的多目标优化调度模型。最后, 引入线性递减约束的粒子群算法进行求解, 提高求解的收敛精度、收敛速度。仿真结果表明, 所建立的模型能够有效提高系统的经济收益和碳减排能力。

**关键词:**综合能源; 优化调度; 阶梯碳交易机制; 多目标优化; 粒子群算法

中图分类号: TM73

文献标志码: A

文章编号: 1007-9904(2025)03-0021-11

## Multi-objective Optimal Scheduling of Combined Heat, Power, and Hydrogen Integrated Energy System Considering the Stepped Carbon Trading Mechanism

XING Jiawei, ZHAO Shuai, YANG Song\*, WANG Yuejiao, SUN Liqun  
(State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250003, China)

**Abstract:** Against the backdrop of the "dual-carbon" goals, the combined heat, power, and hydrogen supply integrated energy system emerges as a promising clean energy solution. It effectively integrates electricity, heat, and hydrogen, meeting the continuously growing energy demand while reducing carbon emissions. To achieve the widespread application of the integrated energy system, a multi-objective optimization scheduling method is introduced for the integrated energy system considering a tiered carbon trading mechanism in this paper. Firstly, the architecture of the system is established, encompassing equipment such as thermal power units, gas boilers, power-to-gas, and hydrogen fuel cells. Secondly, a multi-objective optimization model is formulated, considering the reduction of operational expenses and carbon footprints. Finally, a particle swarm algorithm with linearly decreasing constraints is employed for solving, enhancing the convergence accuracy and speed of the solution. Simulation results indicate that the proposed model effectively improves the economic benefits and carbon emission reduction capability of the system.

**Keywords:** integrated energy; optimal scheduling; stepped carbon trading mechanism; multi-objective optimization; particle swarm algorithm

## 0 引言

近年来, 我国正在积极探索未来能源行业的低

**基金项目:**国网山东省电力公司电力科学研究院自主研发项目“用户侧综合能源系统协同运行关键技术研究”(ZY-2023-11)。

Independent Research and Development Project of State Grid Shandong Electric Power Research Institute "Research on Key Technologies for Collaborative Operation of User Side Integrated Energy Systems" (ZY-2023-11).

碳化发展方向, 以实现“双碳”目标<sup>[1]</sup>。在这背景下, 迫切需要构建一个可持续的能源体系, 以满足日益增加的能源需求。综合能源系统的优化调度在确保能源供应的同时发挥着至关重要的作用。传统经济调度是在各种约束条件下, 合理配置火电机组的发电功率, 以降低燃料成本<sup>[2]</sup>。然而, 火电机组是一种依赖于燃烧化石燃料以产生能量的发电设备, 其燃

烧过程会排放出大量二氧化碳,加剧了大气中的温室效应,增加全球气候变化的问题。随着公众对环保问题关注度不断提升,传统的经济调度已经不再符合要求。因此,为综合考虑优化调度的经济和环境效益,多目标优化调度成为综合能源系统优化调度领域的研究热点之一<sup>[3]</sup>。

氢能具有资源丰富、高热值和无污染等特点,被广泛认为是理想的清洁能源,对实现低碳减排目标具有重要意义。在氢能的开发和利用方面,绿氢被认为具有良好的发展前景。绿氢是指利用可再生能源作为原料生产氢能,有效解决了弃风、弃光问题,且氢能相比于电能更易大规模长期储存<sup>[4]</sup>。不少学者已对氢能参与系统优化调度进行研究。文献[5]利用可再生能源协同电解槽(electrolyzer, EL)制氢,实现了风光灵活消纳。文献[6]将电转气装置(power to gas, P2G)细化为电解槽和甲烷反应器(methane reactor, MR)并配合氢燃料电池(hydrogen fuel cell, HFC)运行,解决了源荷供需不平衡问题。文献[7]引入天然气市场,构建了含有碳捕集装置的火电机组和P2G协同运行系统。文献[8]在氢能侧引入氢能汽车、化工行业,扩大了氢能的消纳方式。上述文献多侧重于电-气互联系统中的火电机组与电转气协同运行框架,未能考虑电、冷、热、氢等多种能源的耦合。

随着人们对气候变化和环境保护的日益关注以及社会对碳排放管理和减缓全球变暖的紧迫需求,碳排放交易市场得到大力发展。在文献[9]中,引入统一型碳交易机制,并综合考虑源荷两侧的碳减排效果。在碳交易机制的基础上,文献[10]引入光热电站的低碳手段,增加系统的碳减排量和可再生能源消纳率。以上文献主要集中在统一型碳交易模型上,未能全面挖掘系统中的潜在低碳能力。近年来,研究者们开始关注阶梯碳交易模型,并展开了相关研究。文献[11]提出计及碳排放和空调负荷的源网荷协同调度方法,进一步约束了碳排放。在文献[12]中,对综合能源系统中的阶梯型碳交易和统一型碳交易两种碳交易机制进行了对比研究。文献[13]对阶梯碳交易机制进一步分析,研究碳价和系数选取对优化调度的影响。

在“双碳”目标下,优化调度不能再只关注单一

目标,如运行成本最小,而需要同时关注碳排放,传统的单目标优化调度在这一新背景下已难以满足要求<sup>[14]</sup>。文献[15]中针对冷热电联供型微电网建立了综合运行费用和环境惩罚因子的目标函数,并利用模糊几何加权法,明确各个目标函数的权重,然后通过模糊逻辑运算将多个目标函数模糊化,最终将其转为一个单目标函数。在综合能源优化调度研究中,通常采用将多目标问题简化为单目标问题的方法。然而,这种转化涉及决策者对多个目标的偏好,尤其是在确定各目标权重占比方面,存在一定难度。目前,智能算法如遗传算法和粒子群算法在多目标优化问题中得到广泛应用。文献[16]构建了一个以运行经济效益、用户舒适度和碳排放量为优化目标的虚拟电厂优化调度方案,并使用改进的遗传算法对虚拟电厂优化调度模型进行求解。文献[17]构建了一个以冷热电联供型微网为主体的多目标优化调度模型,该模型的目标函数涵盖了调度成本、负荷曲线方差以及可再生能源弃电量等多个方面,并采用粒子群算法进行求解。文献[18]旨在解决电网负荷峰谷差、降低火电调峰成本,构建了光热-风电联合系统的优化调度模型,并运用粒子群算法进行求解。然而,上述文献均采用了传统粒子群算法,这往往导致收敛困难和求解速度较慢的问题,从而在某种程度上限制了系统实时调度的灵活性<sup>[19]</sup>。

基于上述分析,提出一种计及阶梯碳交易机制的热电氢联供综合能源的多目标优化调度方法,首先建立含有火电机组、燃气锅炉、P2G等设备的热电氢联供型综合能源系统,并根据综合能源系统的实际碳排放量建立阶梯碳交易机制模型、通过引入线性递减约束的粒子群算法对多目标优化调度模型进行求解,最后,通过对不同设备的优化调度结果进行分析,验证所提多目标优化调度方法的可行性。

## 1 热电氢联供型综合能源系统建模

### 1.1 综合能源系统的交互架构

构建的热电氢联供综合能源系统由风机、两段式P2G、氢燃料电池、储氢罐、碳捕集设备、燃气锅炉、火电机组、电制冷机和吸收式制冷机、储热罐构成。负荷包括电、热和冷负荷,电负荷由风机、火电机组和氢燃料电池出力承担,热负荷由燃气锅炉和

储热罐共同供热,冷负荷由电制冷机和吸收式制冷机共同制冷。具体交互架构如图1所示。

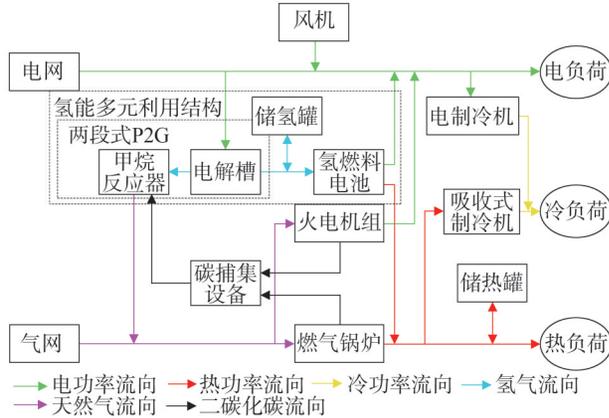


图1 热电氢联供型综合能源系统交互架构

Fig.1 Energy interaction architecture for integrated energy system for cogeneration of heat, power and hydrogen

在热电氢联供型综合能源系统中,将两段式P2G和储能装置作为灵活性资源,充分最大限度地发挥它们的能量时移特性。通过预测可再生能源产出和负荷情况,协同调度各设备出力,以平抑可再生能源的出力波动。系统在确保满足负荷需求和保障安全性的前提下,致力于获取最佳的经济效益。

## 1.2 计及碳捕集的火电机组模型

在火电机组领域,碳捕集技术(carbon capture and storage, CCS)为实现低碳目标提供了关键的技术支持,有助于平衡能源安全、环境保护和经济效益之间的关系<sup>[20]</sup>。CCS设备捕集火电机组产生的二氧化碳,一部分进行驱油封存,另一部分作为两段式P2G甲烷化反应过程中所需碳源。

计及碳捕集的火电机组中的碳捕集设备能耗 $P_{CCS}$ 由火电机组提供,由基础能耗 $P_B$ 和运行能耗 $P_o$ 组成,前者不随CCS设备状态变化而变化,可看作常数,后者与二氧化碳的捕集量有关,如式(1)所示。

$$\begin{cases} P_{CCS}(t) = P_B + P_o(t) \\ P_o(t) = \alpha_c Q_{c2}(t) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\alpha_c$ 为运行能耗系数,即捕获单位二氧化碳所需能耗; $Q_{c2}(t)$ 为 $t$ 时段碳捕集设备处理的二氧化碳量。

## 1.3 氢能多元利用结构

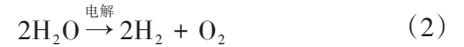
P2G技术利用电能制取天然气,能够有效地消

纳富余风电能量,同时降低天然气系统的购气成本。为精准反映P2G的运行工况,将P2G细化为电解槽和甲烷反应器,并在中间环节引入储氢罐。首先,在电解槽中,通过外部电源施加电流,将水分解成氢气和氧气,形成制氢环节。然后,产生的氢气不仅可用于甲烷反应器,将其与二氧化碳反应生成甲烷,降低了天然气系统的购气成本,也可传输给氢燃料电池进行发电。同时,储氢罐充当了一个重要的中间环节,将过剩的风电能量以氢气形式存储,而在负荷需求较高时通过氢燃料电池转化为电能和热能,为系统提供灵活的能源供应。

### 1.3.1 两段式P2G模型

#### 1) 电解槽模型。

电解槽 $t$ 时段产氢功率 $Q_{EL,H_2}(t)$ 与其运行功率 $P_{EL,e}(t)$ 之间的关系为:

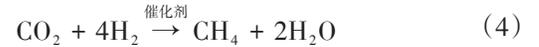


$$Q_{EL,H_2}(t) = \eta_{EL} P_{EL,e}(t) \quad (3)$$

式中: $\eta_{EL}$ 为电解槽的能量转换效率。

#### 2) 甲烷反应器模型。

甲烷反应器 $t$ 时段耗氢功率 $Q_{MR,H_2}(t)$ 与其产气功率 $Q_{MR,g}(t)$ 之间的关系为:



$$Q_{MR,g}(t) = \eta_{MR} Q_{MR,H_2}(t) \quad (5)$$

式中: $\eta_{MR}$ 为甲烷反应器的能量转换效率。

由甲烷反应器电化学反应过程可知,产生甲烷的体积 $V_{MR,g}(t)$ 和消耗二氧化碳的体积 $V_{MR,c}(t)$ 相同,如式(6)所示。

$$\begin{cases} V_{MR,c}(t) = V_{MR,g}(t) = \frac{\sigma_{e-h} Q_{MR,g}(t)}{L_g} \\ Q_{MR,c}(t) = \rho_{CO_2} V_{MR,c}(t) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\sigma_{e-h}$ 为热电折算系数; $L_g$ 为天然气燃烧热值; $Q_{MR,c}(t)$ 为 $t$ 时段甲烷化所需二氧化碳量。

碳捕集电厂与P2G联合运行时,P2G制取甲烷所需要的二氧化碳不必再额外购买,可以由火电机组的碳捕集利用量满足,即

$$Q_{c2}(t) = Q_{MR,c}(t) + Q_{storage}(t) \quad (7)$$

式中: $Q_{storage}(t)$ 为 $t$ 时段碳封存量。

### 1.3.2 氢燃料电池模型

HFC通过电解槽产生的氢气供电和供热,其热

电转化效率总和被视为常数,且在一定范围内可调整<sup>[21]</sup>。在综合能源系统中,通过调度 HFC 能够降低系统的运行成本和减少碳排放。因此,本文引入 HFC,并提供了具体的数学模型如式(8)和式(9)所示,以实现系统低碳经济运行。

$$P_{\text{HFC}_e}(t) + P_{\text{HFC}_h}(t) = \eta_{\text{HFC}_e} Q_{\text{HFC}_H_1}(t) \quad (8)$$

$$\lambda_{\min} \leq \frac{P_{\text{HFC}_h}(t)}{P_{\text{HFC}_e}(t)} \leq \lambda_{\max} \quad (9)$$

式中: $Q_{\text{HFC}_H_1}(t)$ 为 $t$ 时段 HFC 的输入氢能; $P_{\text{HFC}_e}(t)$ ,  $P_{\text{HFC}_h}(t)$ 分别为 $t$ 时段 HFC 输出的电能和热能; $\eta_{\text{HFC}_e}$ 为 HFC 转化为热电总效率; $\lambda_{\min}$ ,  $\lambda_{\max}$ 分别为 HFC 热电效率的最小值和最大值。

### 1.3.3 储氢罐模型

储氢罐可以在能源生产高峰期或其他需要高能量需求的情况下释放储存的氢气,以满足电力需求的增加。相反,在能源供应过剩时,储氢罐可以将剩余的电能转化为氢气,通过储存氢气以备后续使用,从而实现能源的平衡和储备。储热罐模型与储氢罐模型类似,储氢罐数学模型如式(10)所示。

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{ch}_n}(t) \leq P_{\text{ESS}} \\ 0 \leq P_{\text{dis}_n}(t) \leq P_{\text{ESS}} \\ S_{\text{ESS}}^{\min} \leq S_{\text{ESS}_n}(t) \leq S_{\text{ESS}}^{\max} \\ S_{\text{ESS}_n}(1) = S_{\text{ESS}_n}(T) \\ S_{\text{ESS}_n}(t) = S_{\text{ESS}_n}(t-1) + \frac{\eta_{\text{ch}} P_{\text{ch}_n}(t)}{E_{\text{ESS}_n}} - \frac{P_{\text{dis}_n}(t)}{\eta_{\text{dis}} E_{\text{ESS}_n}} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $P_{\text{ch}_n}(t)$ ,  $P_{\text{dis}_n}(t)$ 分别为 $t$ 时段储氢罐 $n$ 对应的充电和放电功率; $P_{\text{ESS}}$ 为储氢罐的最大充放电功率; $S_{\text{ESS}_n}(t)$ ,  $S_{\text{ESS}_n}(t-1)$ 分别为 $t$ 时段、 $t-1$ 时段储氢罐 $n$ 的储存容量; $S_{\text{ESS}}^{\max}$ ,  $S_{\text{ESS}}^{\min}$ 分别为储氢容量最大值、最小值; $\eta_{\text{ch}}$ ,  $\eta_{\text{dis}}$ 分别为储氢罐的对应的充电和放电效率; $E_{\text{ESS}_n}$ 为储氢罐 $n$ 的额定容量; $T$ 为调度周期。

储热罐模型表达式与储氢罐相似,不再赘述。

### 1.4 燃气锅炉模型

燃气锅炉 $t$ 时段产热功率 $P_{\text{GB}_h}(t)$ 与其消耗天然气功率 $Q_{\text{GB}_g}(t)$ 之间的关系为

$$P_{\text{GB}_h}(t) = \eta_{\text{GB}}^h Q_{\text{GB}_g}(t) \quad (11)$$

式中: $\eta_{\text{GB}}^h$ 为燃气锅炉的产热效率。

### 1.5 制冷系统模型

#### 1) 电制冷机模型。

电制冷机 $t$ 时段制冷功率 $P_{\text{EC}_c}(t)$ 与其输入电

功率 $P_{\text{EC}_e}(t)$ 之间的关系为

$$P_{\text{EC}_c}(t) = \eta_{\text{EC}}^c P_{\text{EC}_e}(t) \quad (12)$$

式中: $\eta_{\text{EC}}^c$ 为电制冷机制冷系数。

#### 2) 吸收式制冷机模型。

吸收式制冷机 $t$ 时段制冷功率 $P_{\text{AC}_c}(t)$ 与其输入热功率 $P_{\text{AC}_h}(t)$ 之间的关系为

$$P_{\text{AC}_c}(t) = \eta_{\text{AC}}^h P_{\text{AC}_h}(t) \quad (13)$$

式中: $\eta_{\text{AC}}^h$ 为吸收式制冷机的制冷系数。

## 2 基于阶梯碳交易的综合能源多目标优化调度模型

### 2.1 目标函数

针对热电氢联供型综合能源系统,提出了涉及经济性、碳排放的多目标优化方法。在提升经济性的同时,考虑国家推行的“双碳”目标政策。多目标函数 $f_{\min}$ 为

$$f_{\min} = (f_e, f_{\text{CET}}) \quad (14)$$

式中: $f_e$ 为经济性目标; $f_{\text{CET}}$ 为碳交易,两个目标占相同权重并相互制约,相互促进。

#### 2.1.1 阶梯碳交易机制

阶梯碳交易机制作为系统碳减排的重要手段,借助碳排放权交易市场的机制,鼓励发电企业根据其碳排放配额调整生产与碳排放计划,从而有效实现碳减排目标。

#### 1) 碳排放权配额模型。

热电氢联供型综合能源系统中的碳排放源主要包括上级购电、火电机组和燃气锅炉,其免费碳配额由式(15)进行确定。

$$\begin{cases} C_{\text{VPP}} = C_{\text{buy}} + C_G + C_{\text{GB}} \\ C_{\text{buy}} = \chi_e \sum_{t=1}^T P_{e,\text{buy}}(t) \\ C_G = \chi_e \sum_{t=1}^T P_G(t) \\ C_{\text{GB}} = \chi_g \sum_{t=1}^T P_{\text{GB},h}(t) \end{cases} \quad (15)$$

式中: $C_{\text{VPP}}$ 为免费碳配额; $C_{\text{buy}}$ 为上级购电碳配额; $C_G$ 为火电机组碳配额; $C_{\text{GB}}$ 为燃气锅炉碳配额; $\chi_e$ 和 $\chi_g$ 分别为火电机组产生单位电力产生所排放的二氧化碳相应的配额、燃气锅炉消耗单位天然气所对应的二氧化碳排放的配额; $P_{e,\text{buy}}(t)$ 为上级购电功率; $P_G(t)$ 为火电机组输出功率。

## 2) 实际碳排放模型。

实际碳排放模型如式(16)所示。

$$\begin{cases} C_{VPP,a} = C_{buy,a} + C_{G,a} + C_{GB,a} - C_{MR,a} \\ C_{buy,a} = \sum_{t=1}^T \varepsilon_e P_{buy_e}(t) \\ C_{G,a} = \sum_{t=1}^T \varepsilon_e P_G \\ C_{GB,a} = \sum_{t=1}^T \varepsilon_g P_{GB,h}(t) \\ C_{MR,a} = \sum_{t=1}^T Q_{MR,c}(t) \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $C_{VPP,a}$  为实际碳排放量;  $C_{buy,a}$  为向电网购电的实际碳排放量;  $C_{G,a}$  为火电机组的实际碳排放量;  $C_{GB,a}$  为燃气锅炉的实际碳排放量;  $C_{MR,a}$  为甲烷化设备吸收二氧化碳的量;  $\varepsilon_e$  为火电机组产生单位电力所排放的二氧化碳参数;  $\varepsilon_g$  为燃气锅炉消耗单位天然气所排放的二氧化碳参数。

## 3) 阶梯式碳交易模型。

通过将实际碳排放量与碳配额进行比较,即可求得实际参与到碳交易市场的交易额。如果有剩余的碳配额,可以考虑将这些额度出售,从而获得经济回报。相反,如果超过了其分配的碳配额,则需要购买额外的碳配额。

$$C_{VPP,t} = C_{VPP,a} - C_{VPP} \quad (17)$$

式中:  $C_{VPP,t}$  为  $t$  时段碳排放交易额。

引入的阶梯式碳交易机制,旨在进一步限制碳排放。在这一机制中,购买碳配额的数量被划分为多个区间,随着所需购买的碳配额增加,相应区间的购买价格逐渐增加。阶梯式碳交易成本  $f_{CET}$  为

$$f_{CET} = \begin{cases} \lambda C_{VPP,t}, & C_{VPP,t} \leq l \\ \lambda(1+\alpha)(C_{VPP,t}-l) + \lambda l, & l < C_{VPP,t} \leq 2l \\ \lambda(1+2\alpha)(C_{VPP,t}-2l) + \lambda(2+\alpha)l, & 2l < C_{VPP,t} \leq 3l \\ \lambda(1+3\alpha)(C_{VPP,t}-3l) + \lambda(3+3\alpha)l, & 3l < C_{VPP,t} \leq 4l \\ \lambda(1+4\alpha)(C_{VPP,t}-4l) + \lambda(4+6\alpha)l, & 4l < C_{VPP,t} \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $\lambda$  为碳交易初始价格;  $l$  为阶梯区间长度;  $\alpha$  为价格增长率。

### 2.1.2 经济性目标函数

经济性目标函数综合考虑综合能源系统的运行成本  $f_{om}$ 、购能成本  $f_{buy}$  和碳封存成本  $f_{storage}$ , 经济性目

标函数如式(19)所示。

$$f_e = f_{om} + f_{buy} + f_{storage} \quad (19)$$

运行成本为

$$f_{om} = \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^M (\rho_k P_k(t)) \quad (20)$$

式中:  $\rho_k$  为设备  $k$  的输出单位功率的运行成本;  $P_k(t)$  为第  $t$  时段设备  $k$  的输出功率。

购能成本为

$$f_{buy} = \sum_{t=1}^T \alpha_t P_{e,buy}(t) + \sum_{t=1}^T \beta_t P_{g,buy}(t) \quad (21)$$

式中:  $P_{g,buy}(t)$  为  $t$  时段的购气量;  $\alpha_t, \beta_t$  分别为  $t$  时段的电价、气价。

碳封存成本为

$$f_{storage} = \sum_{t=1}^T \gamma_t Q_{storage}(t) \quad (22)$$

式中:  $\gamma_t$  为  $t$  时段封存单位二氧化碳的费用,取 40 元/t。

## 2.2 约束条件

### 1) 功率平衡约束。

虚拟电厂内部的电、热、冷、天然气、氢气应分别满足式(23)所示的功率平衡约束。

$$\begin{cases} P_G(t) + P_W(t) + P_{HFC_e}(t) + P_{buy_e}(t) \\ = P_{Load_e}(t) + P_{CCS}(t) + P_{EL_e}(t) \\ P_{HFC_h}(t) + P_{GB_h}(t) + P_{ESS_h}(t) = P_{Load_h}(t) \\ P_{EC_c}(t) + P_{AC_c}(t) = P_{Load_c}(t) \\ Q_{EL_{H_2}}(t) + Q_{ESS_{H_2}}(t) = Q_{HFC_{H_2}}(t) \end{cases} \quad (23)$$

式中:  $P_W(t)$  为  $t$  时段风电输出功率;  $P_{Load_e}(t)$  为  $t$  时段电负荷;  $P_{ESS_h}(t)$  为  $t$  时段储热罐输出热功率;  $P_{Load_h}(t)$  为  $t$  时段的热负荷;  $P_{Load_c}(t)$  为  $t$  时段的冷负荷;  $Q_{ESS_{H_2}}(t)$  为  $t$  时段储氢罐输出氢气功率。

### 2) 风电出力约束为

$$0 \leq P_W(t) \leq P_W^{\max} \quad (24)$$

式中:  $P_W^{\max}$  为风电功率输出最大值。

### 3) 设备运行约束。

本文涉及的设备包括火电机组、两段式 P2G、氢燃料电池、燃气锅炉和制冷系统,都应该满足运行约束,主要包括设备的容量约束和爬坡约束,如式(25)所示。

$$\begin{cases} P_y^{\min} \leq P_y(t) \leq P_y^{\max} \\ \Delta P_y^{\min} \leq P_y(t+1) - P_y(t) \leq \Delta P_y^{\max} \end{cases} \quad (25)$$

式中:  $P_y^{\min}, P_y^{\max}$  分别为设备  $y$  输入功率的下限、上限;

$\Delta P_y^{\min}, \Delta P_y^{\max}$  分别为设备  $y$  的爬坡下限、上限。

### 3 热电氢联供型综合能源系统优化调度求解方法

#### 3.1 粒子群算法

粒子群算法 (particle swarm optimization, PSO) 基于模拟社会性群体行为的原理, 将搜索空间中的潜在解表示为粒子。这些粒子根据其个体的当前位置和速度在整个群体中历史上表现最好的位置和速度 (全局最优解), 通过更新规则来调整其位置和速度。通过不断迭代, 粒子群算法能够在搜索空间中找到最优解或者接近最优解的解集。粒子群算法中, 粒子位置  $x_{ij}^{m+1}$  和速度  $v_{ij}^{m+1}$  如下<sup>[22]</sup>:

$$v_{ij}^{m+1} = \omega v_{ij}^m + c_1 r_1 (P_{ij}^m - x_{ij}^m) + c_2 r_2 (P_{gj}^m - x_{ij}^m) \quad (26)$$

$$x_{ij}^{m+1} = v_{ij}^{m+1} + x_{ij}^m \quad (27)$$

$$\begin{cases} v_{ij}^{m+1} = v_{ij}^{\max}, & v_{ij}^{m+1} > v_{ij}^{\max} \\ v_{ij}^{m+1} = -v_{ij}^{\max}, & v_{ij}^{m+1} < -v_{ij}^{\max} \end{cases} \quad (28)$$

式中:  $m$  为当前迭代的次数;  $i = 1, 2, \dots, I, I$  为粒子群的规模;  $j = 1, 2, \dots, J, J$  为粒子群的维度;  $\omega$  为惯性参数;  $c_1, c_2$  为学习因子, 均为常数;  $r_1, r_2$  为  $[0, 1]$  的随机数;  $P_{ij}^m$  为第  $i$  个粒子最优解的第  $j$  维分量;  $P_{gj}^m$  为全局最优解的第  $j$  维分量;  $x_{ij}^m, v_{ij}^m$  分别为第  $i$  个粒子当前位置与速度的第  $j$  维分量;  $v_{ij}^{\max}$  为第  $i$  个粒子最大速度的  $j$  维分量。

#### 3.2 引入线性递减约束的粒子群算法

##### 3.2.1 惯性参数和学习因子处理

传统的粒子群算法在优化性能上受惯性参数和学习因子设置的显著影响。在每一次迭代过程中, 尽管进行了空间位置和速度的更新, 却常常忽视了不同代粒子之间的个体差异<sup>[23]</sup>。为解决这一问题, 提出一项改进策略, 通过对粒子群算法的惯性参数和学习因子引入线性递减的约束, 以提高优化算法的性能表现。

改进方法的具体步骤如下: 首先, 设定较大的惯性参数和学习因子, 并开始算法的迭代过程。在每一次迭代中, 实时调整这些参数, 使其逐渐减小。最终, 在较小的惯性参数和学习因子下完成整个迭代过程。这种线性递减的参数设置方法有助于灵活地调整参数, 全面考虑粒子群中不同代粒子之间的个体特征。通过引入这一改进策略, 能够提升粒子群

算法的求解速率和收敛性。通过动态调整惯性参数和学习因子, 在迭代前期更为迅速地探索搜索空间, 而在迭代后期则更为细致地收敛于最优解。对于惯性权重和学习因子的处理方法如下:

$$\omega = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{m_{\max}} m \quad (29)$$

$$c_1 = c_2 = c_{\max} - \frac{c_{\max} - c_{\min}}{m_{\max}} m \quad (30)$$

式中:  $m_{\max}$  为总迭代次数;  $\omega_{\max}, \omega_{\min}$  分别取 0.9, 0.2;  $c_{\max}, c_{\min}$  分别取 1.5, 1。

##### 3.2.2 多目标函数模糊决策

通过粒子群算法求解多目标优化问题时, 通常会生成多个非劣解, 即一组在目标空间中相对于其他解而言并无明显劣势的解, 非劣解最终存储至外部档案。外部档案指的是多目标粒子群算法改进方案中各个时间段的非劣解集。为引入线性递减约束的多目标粒子群算法, 可以采用模糊决策方法从外部档案的非劣解集中提取最终的综合能源系统优化调度方案。这种方法有助于在复杂的目标空间中更灵活地选择适当的解, 以提高算法的性能和效果。

$$F_s = \frac{f_{\max} - f_s}{f_{\max} - f_{\min}} \quad (31)$$

式中:  $F_s$  为多目标函数模糊化后的数值;  $f_s$  为非劣解集中第  $s$  个非劣解的目标函数值;  $f_{\max}, f_{\min}$  分别为非劣解集中第  $s$  个非劣解目标函数值的上限和下限<sup>[24]</sup>。

将  $(f_e, f_{\text{CET}})$  作为因素集, 并对非劣解集做单因素评价, 形成模糊评价矩阵。为方便分析, 本文评价因素权向量取为  $[0.5, 0.5]$ 。最终, 通过模糊综合评价, 选取最优解作为最终的综合能源系统优化调度方案。

##### 3.2.3 引入线性递减约束的粒子群算法流程

为验证引入线性递减约束的粒子群算法的正确性与有效性, 设计了如下的求解流程和优化计算方法。首先, 给定粒子的初始位置和速度, 并根据各设备的模型需求确定对应粒子群的速度上下限和最大迭代次数。输入热电氢联供型综合能源系统数据进行初次计算, 并记录粒子最优值和粒子群最优值。其次, 在每次迭代过程中, 动态更新惯性参数和学习因子, 判断粒子的寻优条件, 并进行相应的计算。在迭代的过程中, 记录 Pareto 最优解集, 该集合保存了

迭代过程中获得的最佳非支配解。最后,系统迭代至设定次数后停止寻优。在停止寻优时,记录此时迭代记录的历史最优值集合。求解算法流程如图2所示。

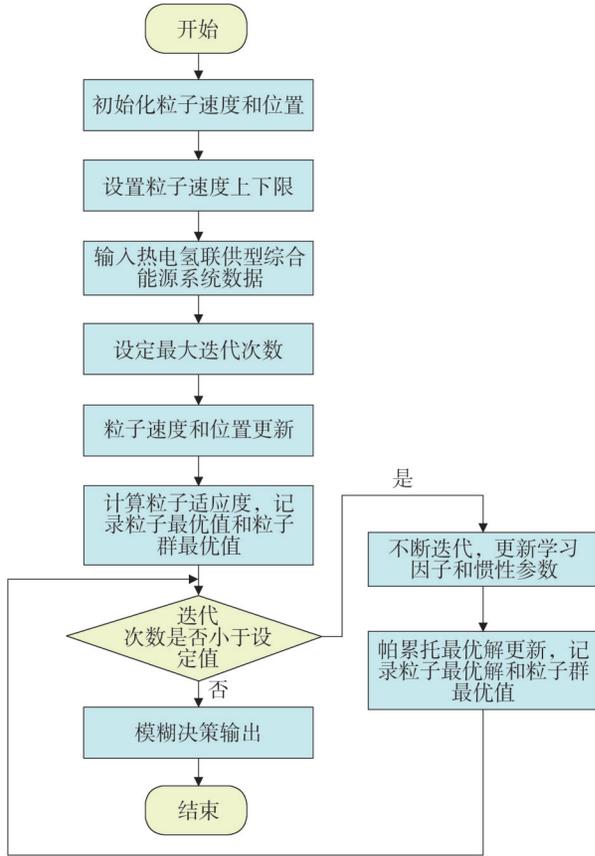


图2 求解算法流程图  
Fig.2 Algorithm flowchart

## 4 算例分析

### 4.1 算例模型

本文以图1所构建的热电氢联供型综合能源系统为研究对象,该系统包括风机、电解槽、甲烷反应器、氢燃料电池、燃气锅炉、火电机组、储能装置等设备参数以及碳相关参数详见文献[25-26],本文以 $T=24\text{ h}$ 为一个调度周期对热电氢联供型综合能源系统进行算例分析,分时电价见表1,冷、热、电负荷曲线和风机预测出力如图3所示。

### 4.2 阶梯碳交易机制分析

为验证本文提出的阶梯碳交易机制的有效性,进行了3个场景的对比分析:在场景1中,未采用碳交易机制;在场景2中,采用了统一型碳交易机制;

而在场景3中,采用了本文提出的阶梯碳交易机制。3个场景的成本及碳排放量对比结果如表2所示。

表1 分时电价

Table 1 Time-of-use electricity price

时段	电价/(元/kWh)
01:00—08:00、23:00—24:00	0.38
08:00—12:00、15:00—19:00	0.68
12:00—15:00、19:00—23:00	1.20

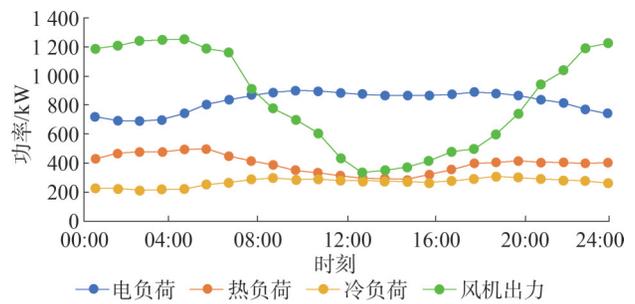


图3 负荷情况和风机预测出力图  
Fig.3 Forecast diagram of each load and wind turbine output

表2 场景1、2、3的成本及碳排放量对比

Table 2 Comparison of costs and carbon emissions for scenarios 1, 2, and 3

场景	总成本/万元	经济性成本/万元			碳交易成本/万元	碳排放量/t
		运行成本	购能成本	碳封存成本		
1	8.59	6.72	1.87	0	0	11.43
2	10.11	7.89	0.92	0.23	1.07	10.36
3	9.78	7.48	0.86	0.31	1.13	9.67

由表2可以看出,场景1采用传统的经济调度方式,未采用碳交易机制。系统结合分时电价和天然气价格,在满足能源需求的过程中通过增加火电机组和燃气锅炉的出力,导致大量燃烧煤炭资源,进而使碳排放量相较于场景2和场景3显著增加。因此,场景1侧重于经济效益而忽略碳排放问题,导致碳排放量较大。场景2采用统一型碳交易机制,通过碳交易成本限制火电机组和燃气锅炉的出力,采用氢能综合利用结构,引入氢燃料电池利用氢能以

满足能源需求,此过程不产生碳排放,且能降低一部分的火电机组和燃气锅炉的碳排放。场景3采用阶梯碳交易机制,通过在碳排放配额价格上引入阶梯定价,相对于场景2在一定程度上进一步限制了系统的碳排放量,可以更好地调整碳减排策略,平衡经济效益和环境目标。

通过对比3个场景的总成本,可以发现,场景1的总成本最小,但其碳排放量最大,未考虑环境因素。而场景3的总成本相较于场景1增加1.19万元,但碳排放量降低1.76 t;相较于场景2增加0.33万元,但碳排放量降低0.69 t。这表明本文提出的阶梯碳交易机制在保证相对较低的成本的同时,能够显著提高系统的碳减排能力,为环境友好型的经济调度提供了有效途径。

#### 4.3 粒子群算法分析

首先,对引入线性递减约束的多目标粒子群算法进行验证。设置两组验证方案。传统粒子群算法中传统粒子群算法中 $w = 0.6, c_1 = c_2 = 2$ ,保持固定不变。两种算法的粒子群大小均为100,最大迭代次数均为500。

运用引入线性递减约束的多目标粒子群算法最终得到69个Pareto最优解,即可供选择的优化调度方案,每个优化调度方案的运行费用和阶梯碳交易成本各不相同,具体的解集如图4所示。

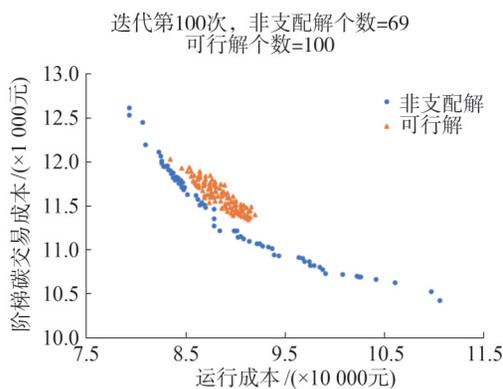


图4 帕累托最优解集

Fig.4 Pareto optimal solution set

传统粒子群算法和引入线性递减约束的粒子群算法结果对比如表3所示,由表3可以看出,两种算法最终都可以找到较好的最优解,并且引入线

性递减约束的粒子群算法在运行时间上缩短了7%。引入线性递减约束的多目标粒子群算法的平均最优解也要低于传统的粒子群算法找到的最优解。

表3 传统粒子群算法和引入线性递减约束的粒子群算法结果对比

Table 3 Comparison of the results obtained by the traditional PSO algorithm and the PSO algorithm with the introduction of linear decreasing constraints

算法	运行次数	单次运行时间/s	平均最优解/万元
传统粒子群算法	100	30.349 7	(8.87, 1.17)
引入线性递减约束的粒子群算法	100	28.226 5	(8.65, 1.13)

#### 4.4 优化调度结果分析

根据以上参数设置,热电氢联供型综合能源系统根据本文提出的引入线性递减约束的多目标粒子群算法并通过模糊综合评价,选取最优解作为最终的综合能源系统优化调度方案。

电功率如图5所示,在12:00—17:00时段,风机出力不足以满足电负荷的需求,这使得可再生能源无法提供盈余电量,电解槽在此期间停止工作,由火电机组、氢燃料电池和储电设备进行供电,氢燃料电池的氢气供应仅能依赖于储氢罐,而无法通过电解槽直接获得。这导致了氢燃料电池的输出功率下降,因此只能增加火电机组的出力,以弥补电解槽停工所带来的能源缺口。热功率如图6所示,系统采用燃气锅炉和氢燃料电池的共同供热方式,因为燃气锅炉碳排放较高,供热以氢燃料电池为主、燃气锅炉为辅的手段来降低碳交易成本。冗余的热量经过吸收式制冷机处理,转化为冷能,以满足冷负荷需求。冷功率如图7所示,由电制冷机和吸收式制冷机共同制冷。氢功率如图8所示,电解槽利用风机产生的可再生能源将水分解成氢气和氧气,一部分氢气传输到甲烷反应器与二氧化碳发生反应,生成天然气供燃气锅炉使用,一部分氢气传输到氢燃料电池进行发电发热,满足供能需求。

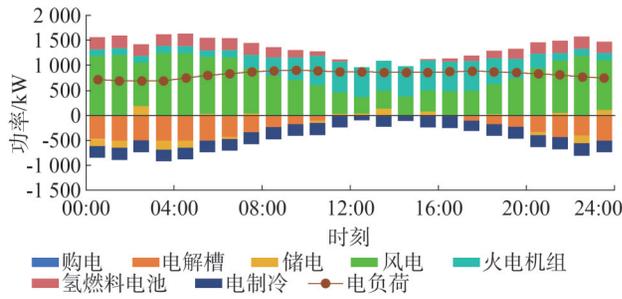


图5 电功率图

Fig.5 Power balance diagram

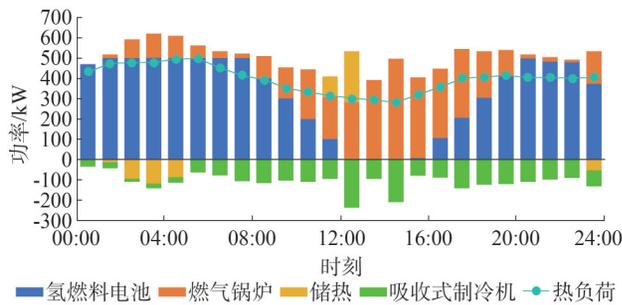


图6 热功率图

Fig.6 Thermal power balance diagram

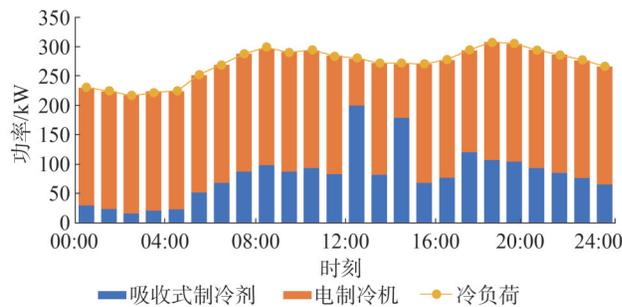


图7 冷功率图

Fig.7 Cold power balance diagram

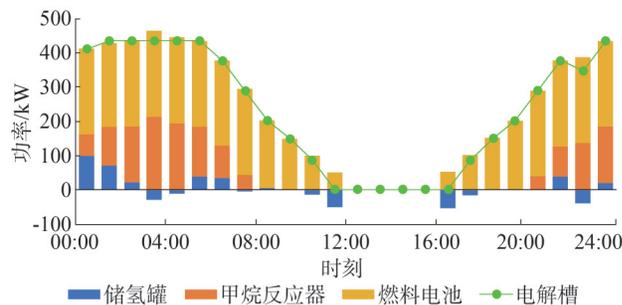


图8 氢功率图

Fig.8 Hydrogen power balance diagram

## 5 结论

在阶梯碳交易市场中,构建热电氢联供型综合能源系统的多目标优化调度模型,并通过引入线性递减约束的多目标粒子群算法进行求解,得到如下结论:

1)通过电解槽、甲烷反应器和氢燃料电池的协同作用,采用氢能多元利用结构的热电氢联供型综合能源系统实现了能源的多样化,提高了系统对不同能源的适应性,从而提升了系统的可靠性和灵活性。

2)引入线性递减约束的多目标粒子群算法,相对于传统粒子群算法降低了7%的求解时间,提高了算法的效率,为系统的实时调度提供了更灵活、更快速的优化策略。

3)引入阶梯碳交易机制,仿真结果充分证明了所提模型的可行性,在降低运行成本的同时降低了碳排放,实现了系统的脱碳减排,并提升了能源利用效率。

## 参考文献

- [1] 周孝信,陈树勇,鲁宗相,等.能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J].中国电机工程学报,2018,38(7):1893-1904.  
ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904.
- [2] 罗经馨,陈庆超,黄秋立.考虑调峰主动性的梯级水光互补与火电耦合系统经济调度[J].电网与清洁能源,2021,37(5):106-114.  
LUO Jingxin, CHEN Qingchao, HUANG Qiuli. Economical dispatch of the coupling system of cascade hydro-photovoltaic and thermal power considering the initiative of peak regulating [J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(5): 106-114.
- [3] 孙慧君,闫志彬,余蕾,等.微电网多目标优化运行综述[J].山东电力技术,2020,47(2):37-42.  
SUN Huijun, YAN Zhibin, YU Lei, et al. Review of multi-objective optimization operation of micro-grid [J]. Shandong Electric Power, 2020, 47(2): 37-42.
- [4] 潘光胜,顾伟,张会岩,等.面向高比例可再生能源消纳的电氢能源系统[J].电力系统自动化,2020,44(23):1-10.  
PAN Guangsheng, GU Wei, ZHANG Huiyan, et al. Electricity and hydrogen energy system towards accomodation of high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(23): 1-10.

- [5] AKARSU B, SERDAR GENÇ M. Optimization of electricity and hydrogen production with hybrid renewable energy systems [J]. Fuel, 2022, 324: 124465.
- [6] KOTZUR L, MARKEWITZ P, ROBINIUS M, et al. Time series aggregation for energy system design: modeling seasonal storage [J]. Applied Energy, 2018, 213: 123-135.
- [7] 赵振宇, 李忻薪. 基于阶梯碳交易的碳捕集电厂-电转气虚拟电厂低碳经济调度[J]. 发电技术, 2023, 44(6): 769-780.  
ZHAO Zhenyu, LI Xinxin. Low-carbon economic dispatch based on ladder carbon trading virtual power plant considering carbon capture power plant and power-to-gas [J]. Power Generation Technology, 2023, 44(6): 769-780.
- [8] 李江南, 程初俐, 刘稼瑾, 等. 含碳捕集及电转氢设备的低碳园区综合能源系统随机优化调度[J/OL]. 中国电力: 1-8 [2024-01-01]. [https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=wYgW8A8u9vrRDu81aeFvX8p50h0CbrHJzvGTCtMTtyqLvDBqb0h3ySGf476W2nU4PZtsVtfDyJ6hdoFHjiu2i20pXle95U2bKmYcOLwIqVkvobBhq\\_BIFtiANv2azZGeA8ZDjUEkzKg=&uniplatform=NZKPT&language=CHS](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=wYgW8A8u9vrRDu81aeFvX8p50h0CbrHJzvGTCtMTtyqLvDBqb0h3ySGf476W2nU4PZtsVtfDyJ6hdoFHjiu2i20pXle95U2bKmYcOLwIqVkvobBhq_BIFtiANv2azZGeA8ZDjUEkzKg=&uniplatform=NZKPT&language=CHS).  
LI Jiangnan, CHENG Jianli, LIU Jiajin, et al. Stochastic Optimal of Integrated Energy System in Low-carbon Parks Considering Carbon Capture Storage and Power to Hydrogen [J/OL]. Electric Power: 1-8 [2024-01-01]. [https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=wYgW8A8u9vrRDu81aeFvX8p50h0CbrHJzvGTCtMTtyqLvDBqb0h3ySGf476W2nU4PZtsVtfDyJ6hdoFHjiu2i20pXle95U2bKmYcOLwIqVkvobBhq\\_BIFtiANv2azZGeA8ZDjUEkzKg=&uniplatform=NZKPT&language=CHS](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=wYgW8A8u9vrRDu81aeFvX8p50h0CbrHJzvGTCtMTtyqLvDBqb0h3ySGf476W2nU4PZtsVtfDyJ6hdoFHjiu2i20pXle95U2bKmYcOLwIqVkvobBhq_BIFtiANv2azZGeA8ZDjUEkzKg=&uniplatform=NZKPT&language=CHS).
- [9] WANG Li, XIWANG Abuduwayiti, CHENG Jing, et al. VPP economic dispatching of carbon capture equipment under carbon trading mechanism [J]. Modern Electronics Technique, 2023, 46(5): 126-131.
- [10] 崔杨, 邓贵波, 王铮, 等. 计及碳交易的光热电站与风电系统低碳经济调度策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 232-239.  
CUI Yang, DENG Guibo, WANG Zheng, et al. Low-carbon economic scheduling strategy for power system with concentrated solar power plant and wind power considering carbon trading [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 232-239.
- [11] 程定一, 马欢, 杨冬, 等. 计及碳排放和空调负荷的源网荷协同调度技术研究[J]. 山东电力技术, 2022, 49(11): 20-24.  
Cheng Dingyi, Ma Huan, Yang Dong, et al. Co-dispatch of source-grid-load considering carbon emission and air conditioning loads [J]. Shandong Electric Power, 2022, 49(11): 20-24.
- [12] 秦婷, 刘怀东, 王锦桥, 等. 基于碳交易的电-热-气综合能源系统低碳经济调度[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(14): 8-13.  
QIN Ting, LIU Huaidong, WANG Jinqiao, et al. Carbon trading based low-carbon economic dispatch for integrated electricity-heat-gas energy system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(14): 8-13.
- [13] 吴含欣, 董树锋, 张祥龙, 等. 考虑碳交易机制的含风电电力系统日前优化调度[J/OL]. 电网技术: 1-10 [2024-01-01]. [https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=wYgW8A8u9vqUp0i4HFqkG2NdXIZQmxdreQFvgPaG-aUteq8X10qMmua-dUnT3A4o-gIS9RA9th3foHa9GuK\\_frI7xarwpWtzc44DUTIsdbN50EVE1-q6cA8ndo07vgRtNmp-oQpkagRf1rPCYwHkA==&uniplatform=NZKPT&language=CHS](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=wYgW8A8u9vqUp0i4HFqkG2NdXIZQmxdreQFvgPaG-aUteq8X10qMmua-dUnT3A4o-gIS9RA9th3foHa9GuK_frI7xarwpWtzc44DUTIsdbN50EVE1-q6cA8ndo07vgRtNmp-oQpkagRf1rPCYwHkA==&uniplatform=NZKPT&language=CHS).  
WU Hanxin, DONG Shufeng, ZHANG Xianglong, et al. Optimal Dispatching of Power System with Wind Power Considering Carbon Trading Mechanism [J/OL]. Power System Technology: 1-10 [2024-01-01]. [https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=wYgW8A8u9vqUp0i4HFqkG2NdXIZQmxdreQFvgPaG-aUteq8X10qMmua-dUnT3A4o-gIS9RA9th3foHa9GuK\\_frI7xarwpWtzc44DUTIsdbN50EVE1-q6cA8ndo07vgRtNmp-oQpkagRf1rPCYwHkA==&uniplatform=NZKPT&language=CHS](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=wYgW8A8u9vqUp0i4HFqkG2NdXIZQmxdreQFvgPaG-aUteq8X10qMmua-dUnT3A4o-gIS9RA9th3foHa9GuK_frI7xarwpWtzc44DUTIsdbN50EVE1-q6cA8ndo07vgRtNmp-oQpkagRf1rPCYwHkA==&uniplatform=NZKPT&language=CHS).
- [14] 袁桂丽, 贾新潮, 陈少梁, 等. 虚拟电厂源-荷协调多目标优化调度[J]. 太阳能学报, 2021, 42(5): 105-112.  
YUAN Guili, JIA Xinchao, CHEN Shaoliang, et al. Multiobjective optimal dispatch considering source-load coordination for virtual power plant [J]. Acta Energetica Sinica, 2021, 42(5): 105-112.
- [15] 程亚航, 王迎春, 杨东升, 等. 基于禁忌粒子群的多能源热电联供优化方法研究[J]. 太阳能学报, 2018, 39(4): 909-916.  
CHENG Yahang, WANG Yingchun, YANG Dongsheng, et al. Optimization method of hybrid energy heat and power cogeneration based on tabu particle swarm optimization [J]. Acta Energetica Sinica, 2018, 39(4): 909-916.
- [16] 韩帅, 孙乐平, 卢健斌, 等. 含电动汽车的气电互联虚拟电厂区间多目标优化调度策略[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(5): 1428-1436.  
HAN Shuai, SUN Leping, LU Jianbin, et al. Multi-objective optimal dispatch strategy of gas-electric interconnected virtual power plant interval with electric vehicles [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(5): 1428-1436.
- [17] 马燕峰, 谢家荣, 赵书强, 等. 考虑园区综合能源系统接入的主动配电网多目标优化调度[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(13): 53-61.  
MA Yanfeng, XIE Jiarong, ZHAO Shuqiang, et al. Multi-objective optimal dispatching for active distribution network considering park-level integrated energy system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(13): 53-61.
- [18] 宋汶秦, 吕金历, 赵玲霞, 等. 光热-风电联合运行的电力系统经济调度策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(5): 95-102.  
SONG Wenqin, LÜ Jinli, ZHAO Lingxia, et al. Study on the economic dispatch strategy of power system with combined operation of concentrated solar power and wind farm [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(5): 95-102.

- [19] 陶静,徐武,李逸琳,等.基于多目标算法的冷热电联供型综合能源系统运行优化[J].科学技术与工程,2019,19(33):200-205.  
TAO Jing, XU Wu, LI Yilin, et al. Optimal operation of integrated energy system combined cooling heating and power based on multi - objective algorithm [J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(33):200-205.
- [20] 郭静蓉,向月,吴佳婕,等.考虑CCUS电转气技术及碳市场风险的电-气综合能源系统低碳调度[J].中国电机工程学报,2023,43(4):1290-1302.  
GUO Jingrong, XIANG Yue, WU Jiajie, et al. Low-carbon optimal scheduling of integrated electricity-gas energy systems considering CCUS-P2G technology and risk of carbon market[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(4):1290-1302.
- [21] 崔杨,闫石,仲悟之,等.含电转气的区域综合能源系统热电优化调度[J].电网技术,2020,44(11):4254-4264.  
CUI Yang, YAN Shi, ZHONG Wuzhi, et al. Optimal thermoelectric dispatching of regional integrated energy system with power-to-gas [J]. Power System Technology, 2020, 44(11):4254-4264.
- [22] 周秋慧.天然气冷热电联供能源系统运行机制优化分析[D].北京:北京交通大学,2014.
- [23] BILLER M, JAEGER J. Novel distance protection algorithm based on current comparison for closed-ring structures with distributed generation[C]//15th International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2020). London: IET, 2020:1-6.
- [24] 周成,芮涛,王群京.基于模型预测控制的微电网多目标协调优化[J].电测与仪表,2019,56(22):44-50.  
ZHOU Cheng, RUI Tao, WANG Qunjing. Multi objective coordination optimization of micro-grid based on model predictive control [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(22):44-50.
- [25] 陈锦鹏,胡志坚,陈颖光,等.考虑阶梯式碳交易机制与电制氢的综合能源系统热电优化[J].电力自动化设备,2021,41(9):48-55.  
CHEN Jinpeng, HU Zhijian, CHEN Yingguang, et al. Thermoelectric optimization of integrated energy system considering ladder-type carbon trading mechanism and electric hydrogen production [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9):48-55.
- [26] 陈登勇,刘方,刘帅.基于阶梯碳交易的含P2G-CCS耦合和燃气掺氢的虚拟电厂优化调度[J].电网技术,2022,46(6):2042-2054.  
CHEN Dengyong, LIU Fang, LIU Shuai. Optimization of virtual power plant scheduling coupling with P2G-CCS and doped with gas hydrogen based on stepped carbon trading [J]. Power System Technology, 2022, 46(6):2042-2054.

收稿日期:2024-01-03

修回日期:2024-06-12

作者简介:

邢家维(1994),男,硕士,工程师,从事分布式电源及微电网、综合能源领域工作;

赵 帅(1988),男,工程师,从事分布式电源及微电网、综合能源领域工作;

杨 颂(1997),通信作者(yangsong6636@163.com),女,硕士,工程师,从事分布式电源及微电网、综合能源领域工作;

王玥娇(1989),女,硕士,高级工程师,从事分布式电源及微电网、综合能源领域工作;

孙立群(1998),男,硕士,工程师,从事分布式电源及微电网、综合能源领域工作。

(责任编辑 娄婷婷)

## 智能配电网全方位一键转供技术

宋圣兰,张超\*,刘晓亮,李琰,张乃刚

(国网山东省电力公司潍坊供电公司,山东 潍坊 261021)

**摘要:**在极端恶劣天气或电网特殊运行方式下,上级电源失电极易造成配电网大面积失电。传统故障处理模式下,有经验的调度员通过配电自动化系统主站完成十条以上的配电线路恢复供电甚至需要1 h以上。经调研,配电网大面积失电情况下,当故障点不在配电线路时,存在判定发生大面积失电故障难和因失电线路多且联络多导致快速、合理复电难等问题。文中通过打通配电自动化系统主站与主网自动化主站系统接口,实现主网、配电网数据和图模贯通,将变电站侧全量遥测、遥信信息及图形、模型参数接入配电主站实时监测,同时制定配电网大面积失电的判定逻辑并部署到配电主站,作为启动快速复电功能的条件;功能启动后,通过对配电线路失电前负载率的监测计算,配电主站自动给出复电方案,一键执行。测试表明该技术自愈策略简单、方式灵活,运维方便,投资少、见效快,实现了配电网线路负荷由“人工转供”变为“程序转供”,负荷转供用时由小时级降到分钟级,解决了操作慢、用时长、复电效率低等问题,提升了配电网的应急恢复能力,缩短了停电时间,减小了停电损失,使因事故或检修而导致的停电范围最小,对保障社会供电安全意义重大。

**关键词:**配电自动化;配电网;一键转供;大面积停电;负荷转供

中图分类号:TM734

文献标志码:A

文章编号:1007-9904(2025)03-0032-08

## Intelligent Distribution Network All-around One Click Transfer Supply Technology

SONG Shenglan, ZHANG Chao\*, LIU Xiaoliang, LI Yan, ZHANG Naigang

(State Grid Weifang Power Supply Company, Weifang 261021, China)

**Abstract:** In extremely harsh weather or special operating conditions of the power grid, the loss of electrodes from the superior power supply can easily cause large-scale power loss in the distribution network. In the traditional fault handling mode, experienced dispatchers can restore power to more than ten distribution lines through the main station of the distribution automation system, which may take more than an hour. After research, it has been found that in the case of large-scale power loss in the distribution network, when the fault point is not on the distribution line, there are difficulties in determining the occurrence of large-scale power loss faults and difficulties in quickly and reasonably restoring power due to the large number of power loss lines and connections. In the article, by connecting the interface between the main station of the distribution automation system and the main network automation main station system, achieving the data and graphical models integration of the main network and distribution network. The full telemetry on the substation side, remote signaling information, and graphical and model parameters are connected to the real-time monitoring of the distribution main station. At the same time, a judgment logic for large-scale power loss in the distribution network is developed and deployed to the distribution main station as a condition for initiating the rapid power restoration function. After the function is activated, by monitoring and calculating the load rate of the distribution lines before power loss, the distribution main station automatically provides a power restoration plan, which can be executed with one click. Tests have shown that the self-healing strategy of this technology is simple, flexible, and easy to operate and maintain, with low investment and quick results. It has achieved a change in the load of distribution network lines from "manual transfer" to "program transfer," and the time required for load transfer has been reduced from hour level to minute level, solving problems such as slow operation, long time consumption, and low restoration

**基金项目:**国网山东省电力公司科技项目“面向新型电力系统的配电自动化应用能力提升关键技术研究”(2023A-016)。

Science and Technology Project of State Grid Shandong Electric Power Company "Research on Key Technologies for Enhancing the Application Capability of Distribution Automation in New Power Systems" (2023A-016).

efficiency. It has improved the emergency recovery ability of the distribution network, shortened power outage time, reduced power outage losses, and minimized the scope of power outages caused by accidents or maintenance, which is of great significance for ensuring social power supply safety.

**Keywords:** distribution automation; distribution power network; one click transfer; large-scale power outage; load transfer

## 0 引言

变电站作为变换电压、交换功率和汇集、分配电能的设施,是电网网架的关键连接点。为更好提高变电站对下级线路的供电保障能力,变电站通常由双进线供电,两台及以上主变压器运行,配置备自投装置,以快速恢复非故障区域的供电<sup>[1-3]</sup>。但当变电站本身接线方式、计划检修、非计划检修、故障等原因导致变电站出现单线路、单主变压器、单通道的情况时,传统的备自投装置无法应用<sup>[4-5]</sup>;一旦进线或主变压器发生故障跳闸,中、低压母线将全部失电,而现有配电自动化系统自愈功能仅能实现单一配电线路发生故障时自动恢复非故障区域的供电<sup>[6-8]</sup>,无法在上级电源故障造成 10 kV 母线失压时启动自愈功能、自动恢复供电。另外,在极端恶劣天气或电网特殊运行方式下,上级电源失电极易造成配电网大面积失电<sup>[9-11]</sup>。目前 10 kV 母线失电后,调度员手动查询每条线路是否有联络开关、联络开关是否有异站联络、线路日常最大负荷、线路最大允许电流、主变压器负荷等信息,耗时长,对调度员的经验和能力有很高要求,无法满足用户对供电可靠性的要求<sup>[12]</sup>。因此,如何在最短的时间内恢复用户供电,把事故损失降至最低,显得尤为重要。

日常运行过载、越限、检修、更改运行方式等工作前,须进行负荷转供<sup>[13-15]</sup>或配合上级工作进行倒负荷,由调度管理部门方式计划组负责人校核最大允许电流、线路电缆等因素,调度员手动编写负荷转供方案,逐条操作转供,确认合、解环电流和开关位置,费时费力,容易出差错。

常规的备自投装置<sup>[16-22]</sup>利用本地信息制定相应的动作策略,只能按照预设好的运行方式及应对策略动作,无法适应其他运行方式的变化(如检修造成单主变压器运行)。本文将配电网自动化、备自投与调度事故处理策略有机结合,创新性地提出了一种配电网负荷转供方法及装置。该方法包括打通主网、配电网接口,配电主站可以实时获取主网系统中

变电站侧进线开关、主变、母线等主网设备的图形、模型参数以及遥信、遥测数据等;在故障信号满足预设条件后,收集带路线路和被转供线路的负荷断面数据,自动校验线路和主变压器载流量,得到具备优先级的若干转供方案;基于预设的负荷转供模式,按照转供方案执行负荷转供。既可应用于日常运行过载、越限、检修、更改运行方式等工作,实现单个线路、单个母线、单个厂站快速负荷转供,也可在配电网大面积停电时,利用剩余容量大和安全可靠性的线路恢复 10 kV 母线供电,从而实现母线及负荷自动恢复供电,消除单线路、单主变压器、单通道运行变电站因负荷损失造成的七级、六级甚至五级电网风险。

## 1 技术原理

智能配电网全方位一键转供技术,可部署在国家电网有限公司广泛使用的配电自动化系统主站上,通过打通配电自动化系统主站与主网自动化主站系统接口,实现主网、配电网数据和图模贯通,将变电站侧全量遥测、遥信信息及图形、模型参数接入配电主站实时监测,同时制定配电网大面积失电的判定逻辑并部署到配电主站,作为启动快速复电功能的条件。功能启动后,通过对配电线路失电前负载率的监测计算,配电主站自动给出复电方案,一键执行。具体包括两种模式:日常模式和配电网大面积停电模式。

### 1.1 日常模式

根据计划或临时性工作,设定目标设备,分析其影响负荷,并自动或人工确认将受影响负荷安全转至新电源点,提出包括转供路径、转供容量在内的负荷转供操作方案,调度员确认后一键执行,具体步骤如下。

1) 预案生成。该技术部署在配电自动化主站系统上,在系统应用界面上点击该功能图标,进入该应用。为保证安全,须输入用户名和密码,单击进入预案编制界面,可通过搜索框选择厂站,在厂站展开页

面,根据需要选择线路、母线、厂站,自动分析生成相应的负荷转供预案。如果运行方式变化,只需要重新生成预案即可。

2) 预案编辑。双击预案,查看预案所有详细操作步骤,该步骤是根据电网实时运行方式、联络开关状态、允许电流等信息生成的。有权限的调度员可对弹出的方案进行预案编辑和预案删除、提升或降低优先级等操作。例如,如果一条线路有多条可转供通道,会按照转供通道负载率从小到大排序,负载率越小,优先级越高,调度员可右键更改优先级,选择转供通道;对于方案中多条线路负荷调出时,系统会按照重要用户、保电用户及民生用户优先供电原则生成操作顺序,调度员可选择优先转供哪几条线路。

3) 预案执行。分为校验预案和执行预案两部分。

在校验预案部分,执行预案的遥控操作命令前,会对预案进行最终校验。校验内容如下。

① 遥信质量码校验,识别转供预案中所有遥控操作的开关遥信质量码是否正常,如果遥控操作的开关遥信质量码不正常,如遥信质量码显示为工况退出、闭锁遥控,则校验不通过。

② 转供方式校验,对转供线路和带路线路进行电源点追踪,计算判断两条线路是否有合环相角差,智能进行合环调电(热倒)或者停电调电(冷倒)模式的选择;对于跨区域不允许合环的线路,在系统中维护 220 kV 电源分区,通过拓扑分析追溯到转供线路和带路线路的 220 kV 母线,根据 220 kV 母线维护的所属分区判断是否为同一电网分区,不同电网分区线路转供负荷,推送冷倒模式。

③ 安全性校验,如果转供路径上的开关遥信质量码为接地,则校验不通过。如果某条线路有多个方案,当进行校验的时候,如果第一条方案校验不成功,会继续校验第二条方案,校验成功的方案用绿色标识,失败以红色标识。只有通过校验的方案才能显示在“执行预案”页面。

在预案执行部分,先进行遥控模式的选择,可以“单步执行”“顺序执行”“并发执行”3种模式。单步执行是每条线路转供均需要值班调控员确认后再次执行;顺序执行是多条线路按照操作顺序依次转供;并发执行是多条线路并行同时转供。校验通过后,值

班调控员根据实际可灵活选择任一种转供模式快速进行负荷转供。执行成功的步骤用绿色标识,失败以红色标识。

4) 运行方式恢复。运行方式恢复与“预案执行”模块类似,左侧为待恢复的变电站区域,右侧可以对待恢复的变电站进行遥控操作。恢复阶段遥控模式有“单步执行”和“顺序执行”2种。

## 1.2 大面积停电模式

### 1.2.1 动作原理

配电网大面积停电事故处理<sup>[23]</sup>,指利用配电网自动化系统,根据当前电网运行状态,自动生成事故应急预案,通过远程遥控操作,实现多条失电线路的快速负荷转移,如图 1 所示,主要由故障感知阶段、预案生成阶段、事故预案执行、运行状态恢复 4 个环节组成。

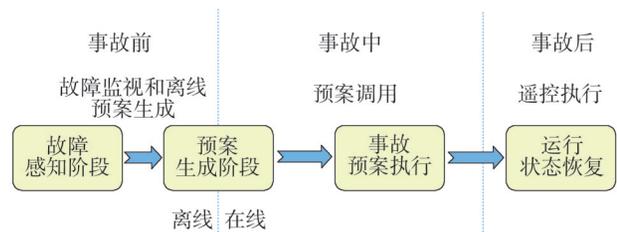


图 1 大面积停电模式组成部分

Fig.1 Component of large-scale power outage mode

上级电源造成 10 kV 母线停电,无法恢复时,满足启动条件,自动生成转供方案,调度员确认后一键执行,图 2 为大面积停电模式动作流程图,具体步骤如下<sup>[24-25]</sup>。

1) 系统不断监听母线电压、主变压器低压侧开关、各出线电流、主变压器保护、线路保护等信号。

2) 根据设定的启动条件,分析是否满足启动条件,若满足,判断是否有闭锁条件,无闭锁条件则根据设置的等待时间收集信号,大面积停电模式启动原理如图 3 所示,图中  $\square \& \rightarrow$  为与门,当所有的输入同时为逻辑 1 时,输出为 1,否则输出为 0;  $\square \& \rightarrow$  为或非门,只有当所有输入均为 0 时,输出为逻辑 1,否则输出为逻辑 0。

其中启动条件包括:

① 变电站 10 kV 母线全部失去电压,即 I、II 母

线电压互感器检测到三相电压均为零。

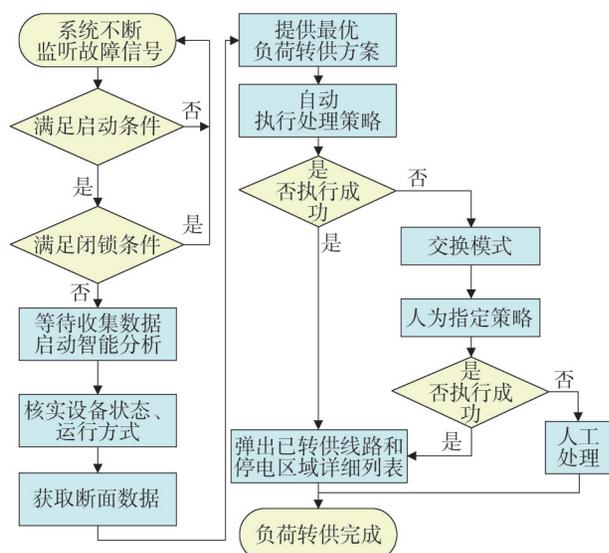


图2 大面积停电模式动作流程图

Fig.2 Action flow chart of large-scale power outage mode

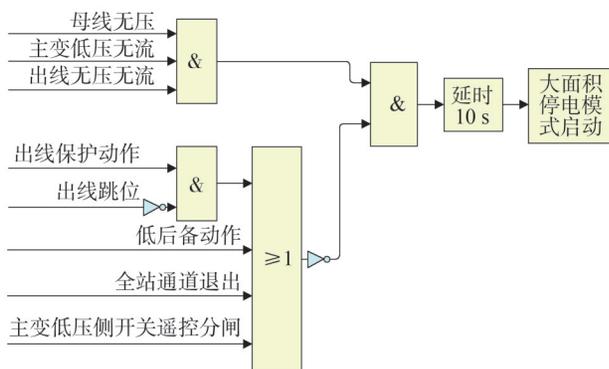


图3 大面积停电模式启动原理图

Fig.3 Start-up schematic diagram of large-scale power outage mode

②变电站 10 kV 出线拓扑失电,即所有出线的无压无流。

③主变低压侧开关无电流,即母线的进线也无压无流。

以上三个启动条件必须同时满足。

闭锁条件包括:

①10 kV 出线保护动作信号。10 kV 出线有保护动作信号,但开关未跳闸,为该线路保护拒动所致,若进行负荷转供会将故障点转至带路线路,导致带路线路跳闸。

②主变后备保护动作信号。主变低后备有动作信号,说明故障在母线或者保护装置拒动,若倒供母线,将导致负荷转供失败,停电范围进一步扩大。

③全站通道退出。网络通信全部中断、远动机故障会导致全站通道退出,此时配电自动化主站系统中无法实时获取变电站的三遥信息,信息不可信,故禁止进行负荷转供。

④主变低压侧开关遥控分闸。调度员操作或处理故障引起的失电,该功能应闭锁不启动。

出现以上任一信号,该功能不启动。另外还须考虑系统的防误闭锁,要防止自动化信息误发、遥测数据不刷新或突变、现场自动化终端故障异常等原因造成的系统误动作。

为有效避免上下级动作混乱,须考虑与上级线路保护进行时间配合。本技术优先级低于上级电源重合闸(时限一般为 2 s)及备自投(时限一般为 8 s 以内)动作,只有躲过以上时间并满足启动条件,系统才判定母线确已失电。考虑一次装置的动作时间,可将大面积停电模式的动作时限设为 10 s,或者将其启动条件的判定时限设为 10 s 以上,即主变压器低压侧、母线、出线无压无流 10 s 以上,才考虑启动该功能。

3)核实异站联络开关状态(是否智能、挂牌、离线)、相关线路运行方式(排除接地、故障未处理结束)、分布式电源等相关信息。

4)收集带路线路和转供线路的负荷断面数据,结合线路最大允许电流等因素,提供最优转供方案。

5)负荷转供执行方式分为自动模式、交互模式两种,前者根据执行策略进行全自动执行;后者在弹出实时交互界面(辅助语音报警),由人工参与处理。配电网调度员与主网调度核实上级电源是否可快速恢复送电、方案路径,可以选择一键执行全部负荷转供方案或只执行部分内容;如果全自动执行故障处理方案没有完成,则转交互提示调度员处理。

6)执行结束后弹出已转供线路详细信息,系统自动统计停电区间、停电客户数量、停电总负荷、停电时长等信息,并生成停电区域详细表,如表 1 所示

( $N$ 、 $X$  和  $x$  根据实际转供情况确定),方便调度员后续处理和监测指挥班做好停电客户沟通工作。

表1 停电区域详情样表

Table1 Detailed list of power outage areas

序号	变电站	线路	停电区域	停电台区总数	停电总负荷/MW	停电时长/h
1	某站	某线	某开关至末端线路	$N$	$X$	$x$
...						

### 1.2.2 动作示例

现以一典型单主变压器变电站联络图为例介绍原理,变电站联络图如图4所示。图中甲站为110 kV双进线单主变压器变电站,10 kV母线为单母线分段接线:I母线、II母线,有3条10 kV馈线A线、B线、C线。图中乙站的10 kV馈线D线,通过拉手开关AD与甲站10 kV馈线A线联络;丙站的10 kV馈线E线,通过拉手开关CE与甲站10 kV馈线C线联络。

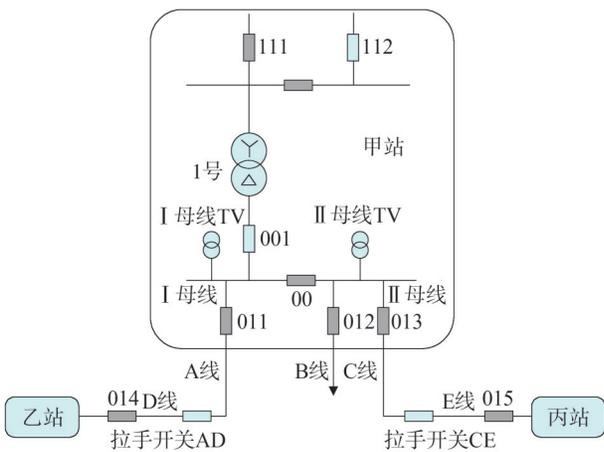


图4 典型单主变压器变电站联络图

Fig.4 Contact diagram of typical "single main transformer" substation

按照1.2.1节原理,当图4中的甲站1号主变压器发生差动保护或瓦斯保护动作跳闸时,判定满足大面积停电模式启动原理,根据负荷情况及线路允许载流量等信息,生成最优负荷转供方案,调度员确认后一键执行,实现10 kV失电母线的快速恢复送

电。如图5所示,恢复送电后的供电情况为:甲站10 kV馈线C线通过配电网联络开关CE转供至丙站10 kV馈线E线,甲站10 kV I母线、II母线及10 kV馈线B线通过乙站10 kV馈线D线—拉手开关AD—甲站10 kV馈线A线转供。

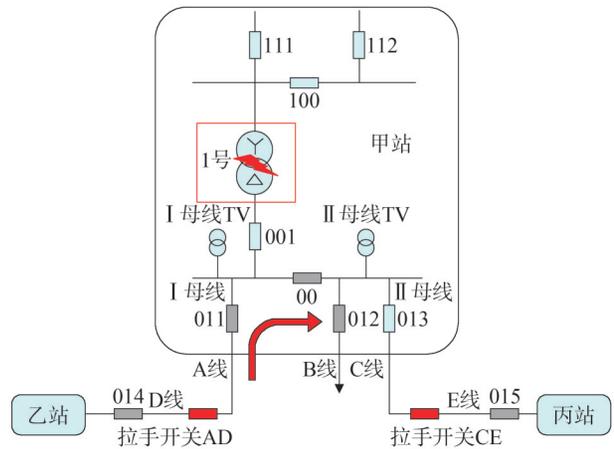


图5 一典型单主变压器变电站负荷转供图

Fig.5 Load transfer diagram of a typical "single main transformer" substation

### 1.3 负荷转供策略

无法实现转供的情景如下。

- 1)转供操作开关上或转供主路径上任何一处挂有禁止牌。
  - 2)联络开关质量码为双位错(坏数据)。
  - 3)对侧线路发生单相接地故障。
  - 4)对侧线路站内开关分位或对侧线路失电(失电母线上相互联络线路不会作为带路路径)。
  - 5)操作开关离线、工况退出、非实测。
- 负荷转供恢复策略优先级如下。

1)优先保证双电源重要用户的转供电源和现有电源不是来自同一个变电站的负荷。(按照不同线路、不同母线、不同变电站分为三个级别)。

2)如果一条被转供线路有多条带路线路,转供路径优先选择传统电源的带路路径,尽量不采用存在分布式电源参与恢复供电的路径。

3)根据对侧电源剩余容量减去本侧线路负载的大小来建立模型选出最优的线路倒供母线,假设某变电站10 kV母线上共有 $n$ 条出线,其中,有 $a$ 条异站联络拉手线路,以拉手线路可开放容量最大为优

化目标建立模型,目标函数为

$$f = \max(\text{sort}(\boldsymbol{\mu}))$$

$$= \max\{\text{sort}(I_{\text{per}} - I_{\text{dui}} - I_{\text{ben}})\} \quad (1)$$

式中: $\boldsymbol{\mu}$ 为 $a \times 1$ 的对侧拉手线路可开放容量矩阵; $I_{\text{ben}}$ 为 $a \times 1$ 本侧线路的负荷断面数据矩阵; $I_{\text{dui}}$ 为 $a \times 1$ 对侧拉手线路负荷断面数据矩阵; $I_{\text{per}}$ 为 $a \times 1$ 对侧带路线路最大允许电流矩阵。

$$I_{\text{ben}} = [I_{\text{ben},1}, I_{\text{ben},2}, \dots, I_{\text{ben},a}]^T \quad (2)$$

$$I_{\text{dui}} = [I_{\text{dui},1}, I_{\text{dui},2}, \dots, I_{\text{dui},a}]^T \quad (3)$$

$$I_{\text{per}} = [I_{\text{per},1}, I_{\text{per},2}, \dots, I_{\text{per},a}]^T \quad (4)$$

此外,该模型满足每条线路的电流值 $I$ 均不大于线路最大允许电流值 $I_{\text{per}}$ 的约束。

$$I \leq I_{\text{per}} \quad (5)$$

可开放容量越大,优先级别越高,选取可开放容量矩阵 $\boldsymbol{\mu}$ 最大值对应的对侧拉手线路作为倒供母线的路径,即带路线路;若可开放容量相同或接近,则选择保护允许电流最大的线路作为倒供母线的路径。

4)兼顾考虑带路线路所在主变压器和高压侧线路不过载。

该技术设有模拟态,对于正常方式或检修方式造成的单线路、单主变压器、单通道运行情况,提前模拟出负荷转供方案,经调度员审阅,不断补充修改完善负荷转供策略,以便在配电网大面积停电事故发生时,通过远程遥控操作,快速准确实现多条失电线路的恢复送电。

## 2 实用化验证

### 2.1 实际电网算例

该技术可部署在配电自动化系统上,按照上述原理,选取一典型的110 kV单主变压器变电站,如图6所示,验证各种故障情况下该技术动作的可靠性和准确性。图6中,甲站有10条10 kV线路,其中4条10 kV线路可拉手倒出,线路4与线路C联络为非智能设备,需要现场人员到场操作。

### 2.2 主变压器主保护动作测试

设置甲站1号主变压器差动保护动作跳闸,该技术检测到甲站10 kV母线失去电压、10 kV线路1—线路10均无压无流、1号主变低压侧001开关无电流,无闭锁条件,延时10 s大面积停电模式启动;收集负荷断面数据、联络情况等信息,如表2所示,

选取可开放容量最大的拉手线路D倒供母线,自动生成负荷倒供方案,方案内容如下。

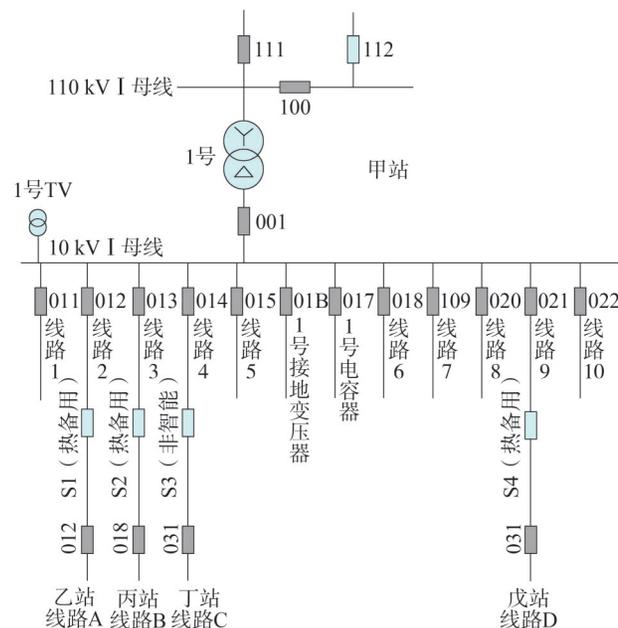


图6 测试变电站接线图

Fig.6 The wiring diagram of test substation

表2 甲站与外站联络信息表

Table 2 Contact list between Jia station and external station

甲站	负荷电 流/A	最大允许 电流/A	联络 开关	联络 线	联络 站	负荷 电流/A	最大允许 电流/A
线路2	210	486	S1	线路A	乙站	120	400
线路3	150	486	S2	线路B	丙站	80	300
线路4	87	486	S3	线路C	丁站	80	554
线路9	26	486	S4	线路D	戊站	23	400
线路1	101	486					
线路5	50	486					
线路6	35	554					
线路7	300	600					
线路8	16	486					
线路10	21	486					

- 1)10 kV线路7(用户专线)停电。
- 2)10 kV线路2负荷倒乙站10 kV线路A供电。
- 3)10 kV线路3负荷倒丙站10 kV线路B供电。
- 4)110 kV戊站10 kV线路D经线路9倒供10 kV线路1、线路5、线路8、线路10、线路6、线路4。

5)因S3为非智能开关,需要现场到人操作,丁站10 kV线路C作为倒供备用通道。

系统推送负荷倒供方案,自动复电或调度员确认后一键执行,配电自动化系统用时不到12 min,自动实现10条10 kV配电线路负荷转供,母线停电负荷恢复时间从小时级缩短至分钟级,执行后的测试结果如图7所示。

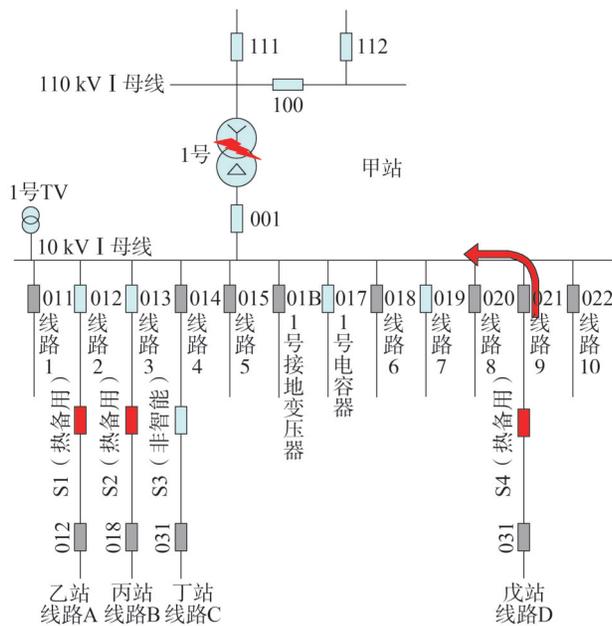


图7 甲站1号主变压器差动保护动作后测试结果图

Fig.7 Test result diagram after differential protection action of No.1 main transformer of Jia Station

设置甲站1号主变压器差动保护动作跳闸1 h后,故障解除,调度员可选择一键执行系统推送的负荷恢复方案,相应的停电信息如表3所示。

表3 甲站1号主变压器差动保护动作后停电区域详情表

Table 3 Detailed list of power outage areas after differential protection action of No.1 main transformer of Jia Station

序号	变电站	线路	停电区域	停电台区总数	停电总负荷/MW	停电时长/h
1	甲站	线路7	全线	专变1台	5.2	1.1
...						

### 2.3 干扰测试

为防止该技术误启动,导致故障范围扩大,影响

电网的供电可靠性和安全性,进行以下测试:

1)设置甲站1号主变压器低后备保护动作跳闸,10 kV母线失电,该技术检测到甲站10 kV母线失去电压、10 kV线路1—线路10均无压无流、1号主变低压侧001开关无电流,满足启动条件,但检测到甲站1号主变压器低后备保护动作信号,闭锁不启动大面积停电模式。

2)设置甲站10 kV线路1的011开关过流I段保护动作,011开关未分闸,该技术闭锁不启动。

3)设置甲站全站通道退出,该技术闭锁不启动。

4)设置对甲站1号主变压器低压侧开关遥控分闸,该技术闭锁不启动。

### 3 结束语

将该一键转供技术应用在实际电网系统中,实用化效果显著。该技术在单线路、单主变压器、单通道运行变电站高压侧失电导致10 kV母线所带客户失电情况下,能够快速灵活恢复客户供电,提高了供电可靠性和供电质量。该技术通过智能逻辑判断,确定最优恢复路径、负荷量,避免了备自投需联切负荷的情况。信息采集、启动判定、动作执行等环节均在配电自动化系统通过逻辑实现,无须加装备自投装置,投资少、见效快。

### 参考文献

[1] 张志华,刘健,张小庆,等.面向供电可靠性的城市配电网单相接地故障处理配置策略研究[J].供用电,2022,39(9):27-34. ZHANG Zhihua, LIU Jian, ZHANG Xiaoqing, et al. Research on strategy of single-phase grounding fault treatment in urban distribution network for power supply reliability[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(9): 27-34.

[2] 金公羽.广域备自投原理及其动作策略研究[D].杭州:浙江大学,2022.

[3] 秦岳.10 kV配电网供电可靠性研究[J].电气技术与经济,2023(10):13-16. QIN Yue. Study on power supply reliability of 10 kV distribution network[J]. Electrical Equipment and Economy, 2023(10): 13-16.

[4] 古卫婷,刘晓波,古卫涛.变电站备自投装置存在问题及改进措施[J].继电器,2007,35(10):70-71. GU Weiting, LIU Xiaobo, GU Weitao. Problems existing in bus-bar automatic transfer switch and measures for improvement[J]. Relay, 2007, 35(10): 70-71.

[5] 刘嘉镇.变电站备自投装置的应用与研究[D].广州:广东工业

- 大学,2021.
- [6] 张宇轩,苏娟,贾涛,等.电力用户对供电可靠性敏感度的评价与分类方法[J].江苏大学学报:自然科学版,2021,42(5):575-581.  
ZHANG Yuxuan, SU Juan, JIA Tao, et al. Sensitivity evaluation and classification method of power users to power supply reliability[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2021, 42(5):575-581.
- [7] 梁廷安.基于广义备用投技术的配电网故障自愈控制研究[J].光源与照明,2021(5):119-120.  
LIANG Tingan. Research on fault self-healing control of distribution network based on generalized standby automatic switching technology[J]. Lamps & Lighting, 2021(5):119-120.
- [8] 孟建建.配网自动化对配电网供电可靠性影响研究[J].电气技术与经济,2024(1):40-42.  
MENG Jianjian. Study on the influence of distribution automation on power supply reliability of distribution network[J]. Electrical Equipment and Economy, 2024(1):40-42.
- [9] 鞠冠章,王靖然,崔琛,等.极端天气事件对新能源发电和电网运行影响研究[J].智慧电力,2022,50(11):77-83.  
JU Guanzhang, WANG Jingran, CUI Chen, et al. Impact of extreme weather events on new energy power generation and power grid operation[J]. Smart Power, 2022, 50(11):77-83.
- [10] 周战.电网特殊运行方式的风险管理[J].农村电气化,2008(11):23-24.  
ZHOU Zhan. Risk management of special operation mode of power grid[J]. Rural Electrification, 2008(11):23-24.
- [11] 程林,刘满君,易俊,等.基于运行可靠性模型的连锁故障模拟及薄弱环节分析[J].电网技术,2016,40(5):1488-1494.  
CHENG Lin, LIU Manjun, YI Jun, et al. The power system cascading outage simulation and vulnerability analysis based on operational reliability model[J]. Power System Technology, 2016, 40(5):1488-1494.
- [12] 田炎明.简析大面积停电事件配网调度应急转电处置[J].能源与节能,2015(2):14-16.  
TIAN Yanming. Analysis on the emergent power transfer disposal of distribution network scheduling after large-scale power failure[J]. Energy and Energy Conservation, 2015(2):14-16.
- [13] 李庆生,李震,孙斌,等.考虑源荷储协调的高弹性配电网最优负荷转供方法[J].中国测试,2023,49(10):64-70.  
LI Qingsheng, LI Zhen, SUN Bin, et al. Optimal load transfer method of high elastic distribution network considering coordination of source-load-storage[J]. China Measurement & Test, 2023, 49(10):64-70.
- [14] 唐学军,韩佶,苗世洪,等.基于需求侧响应的多类型负荷协调控制模型[J].电力系统保护与控制,2017,45(16):116-123.  
TANG Xuejun, HAN Ji, MIAO Shihong, et al. Coordinated control model of multi-type load based on demand response[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16):116-123.
- [15] 王光华,李晓影,宋秉睿,等.基于深度强化学习的配电网负荷转供控制方法[J].电力自动化设备,2022,42(7):253-260.  
WANG Guanghua, LI Xiaoying, SONG Bingrui, et al. Load transfer control method of distribution network based on deep reinforcement learning[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(7):253-260.
- [16] 邹彬,李玮,韩俊.基于Multi-Agent的智能配电网自愈系统研究[J].自动化与仪器仪表,2020(10):145-148.  
ZOU Bin, LI Wei, HAN Jun. Research on self-healing system of intelligent distribution network based on Multi-Agent[J]. Automation & Instrumentation, 2020(10):145-148.
- [17] 刘健,负保记,崔琪,等.一种快速自愈的分布智能馈线自动化系统[J].电力系统自动化,2010,34(10):62-66.  
LIU Jian, YUN Baoji, CUI Qi, et al. A distributed intelligent feeder automation system with fast self-healing performance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(10):62-66.
- [18] 陈思培.备用投装置隐患分析与防止对策[J].中国电力企业管理,2021(12):94-95.  
CHEN Sipei. Analysis of hidden danger of standby automatic switching device and its preventive countermeasures[J]. China Power Enterprise Management, 2021(12):94-95.
- [19] 杨朝赞,张国平,张丰,等.特殊接线变电站10kV备用投设计原则及逻辑分析[J].电气技术,2021,22(7):83-88.  
YANG Chaoyun, ZHANG Guoping, ZHANG Feng, et al. Design principle and logic analysis of 10kV backup automatic switching in special connection substation[J]. Electrical Engineering, 2021, 22(7):83-88.
- [20] 陈勇,姚玉斌,夏翔,等.考虑备用投的地区电网静态安全分析与设计[J].电力系统自动化,2004,28(19):84-87.  
CHEN Yong, YAO Yubin, XIA Xiang, et al. Design and application of static security analysis considering bats for a district power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(19):84-87.
- [21] 杨浚文,吴文传,孙宏斌,等.一种基于EMS的广域备用投控制系统[J].电力系统自动化,2010,34(11):61-66.  
YANG Junwen, WU Wenchuan, SUN Hongbin, et al. A wide-area automatic switchover system based on EMS[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(11):61-66.
- [22] 邱建,蔡泽祥,李爱民,等.基于N-1准则的备用投退控制策略[J].电网技术,2009,33(8):66-71.  
QIU Jian, CAI Zexiang, LI Aimin, et al. Analysis on control strategy of busbar automatic transfer switch based on N-1 criterion[J]. Power System Technology, 2009, 33(8):66-71.
- [23] 阙波,陈蕾,刘家齐,等.配网大面积停电事故处理设计与实现[C]//2016智能电网发展研讨会论文集.北京,2016:229-234.

(下转第48页)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2025.03.005

# 考虑不确定性分布式电源的电能质量概率性选址定容策略

李建杰, 钟文涛, 穆明亮\*, 李平, 王志

(国网山东省电力公司滨州供电公司, 山东 滨州 256600)

**摘要:**近年来,大量电力电子类分布式电源(distributed generation, DG)随机接入配电网,导致发电情况具有随机性和不确定性。同时,配电网也受到负荷的随机性和非线性特点的影响,导致配电网的电能质量问题相较于以往更为严重。为解决该问题,提出一种考虑负荷和DG不确定性的选址定容方法,以功率损耗和电压总谐波畸变率为目标函数;建立负荷和DG概率模型,并分别采用非线性最小二乘法和极大期望优化算法对模型参数进行求解;采用改进的无迹变换方法确定系统潮流情况。遍历最优化算法与网络损耗灵敏度因子相结合,在降低计算量的同时找到DG的最佳接入方案。构建概率性优化求解算法,求解不确定性情况下配电网中DG的概率性优化问题,实现DG的优化管控。采用IEEE-33和IEEE-69节点系统进行仿真验证,结果表明所提方法可显著降低网损,改善电能质量。

**关键词:**分布式电源;概率模型;改进的无迹变换方法;遍历最优化算法

中图分类号:TM919

文献标志码:B

文章编号:1007-9904(2025)03-0040-09

## Probabilistic Site Selection and Capacity Determination Strategy for Power Quality Considering Uncertain Distributed Power Sources

LI Jianjie, ZHONG Wentao, MU Mingliang\*, LI Ping, WANG Zhi

(State Grid Binzhou Power Supply Company, Binzhou 256600, China)

**Abstract:** In recent years, the random integration of numerous power electronics-based distributed generations (DGs) into distribution networks has led to increased randomness and uncertainty in power generation. Simultaneously, the distribution networks are also affected by the stochastic and nonlinear characteristics of loads, exacerbating the issue of power quality compared to the past. To address this, we propose a site selection and capacity determination method that considers the uncertainties of both loads and DGs, with power loss and total harmonic distortion (THD) of voltage serving as the objective functions. Probability models for loads and DGs are established, and their parameters are estimated using nonlinear least squares and expectation maximization optimization algorithms, respectively. An improved unscented transformation method is employed to ascertain the power flow conditions within the system. By integrating the traversal optimization algorithm with network loss sensitivity factors, we are able to identify the optimal integration scheme for DGs while minimizing computational complexity. Furthermore, we construct a probabilistic optimization solution algorithm to tackle the probabilistic optimization problem of DGs in distribution networks under uncertain conditions, thereby enabling optimized management and control of DGs. Simulation verifications conducted on the IEEE-33 and IEEE-69 node systems reveal that the proposed method can significantly reduce network losses and improve power quality.

**Keywords:** distributed generation; probabilistic models; improved traceless transformation methods; traversal optimization algorithms

## 0 引言

为应对日益严峻的全球性气候变暖和能源枯竭问题,我国积极推动能源转型,确立了在2030年和2060年之前分别实现碳达峰和碳中和的目标<sup>[1]</sup>。以太阳能和风能为代表的新能源具有储量巨大、清洁

低碳、可循环再生的特性,是实现“双碳”目标的关键所在。因而大力推动新能源的发展是大势所趋<sup>[2]</sup>。现有的新能源发电设备大多数是分布式的,并且大量随机接入配电网。由于新能源本身具有不确定性,导致此类分布式新能源发电设备的发电情况具有随机性和不确定性。另一方面,配电网中的负荷

也具有相当大的不确定性,且大多数负荷为非线性负荷。因此,分布式电源(distributed generation, DG)接入配电网的位置和接入容量的大小对电网的稳定运行尤为重要。在选址定容时产生的微小误差可能会导致配电网及其运行点的潮流模式发生剧烈变化<sup>[3]</sup>,使配电网的功率损耗大幅增加,进一步破坏配电网整体稳定性。这也导致配电网的电能质量超标问题相比以往更严重。例如,谐波畸变更严重,功率损耗增加导致经常出现电压越限问题<sup>[4]</sup>。为提高系统可靠性、降低成本、整合非常规能源、改善在配电网中安装 DG 所产生的经济和环境影响,改善配电网的电能质量超标问题,需要对 DG 进行布置。从微电网(即光伏电站、风力发电厂等)中随机安置本地能源发电机会增加系统损耗,因此,要降低系统损耗,就必须优化 DG 的容量和选址<sup>[5]</sup>,而如何提高可靠性、减少损耗和改善电压曲线,一直是研究人员面临的挑战<sup>[6]</sup>。

DG 选址定容研究的早期工作集中在寻找考虑完全可控发电的 DG 的最佳位置和容量,其目标函数主要是最小化系统功率损耗,所采取的研究方法主要有 3 种:基于数值的方法、基于分析的方法和启发式技术。广泛采用的数值方法是蒙特卡罗模拟法,文献[7]采用典型的蒙特卡洛仿真技术基于配电网可靠性对分布式发电进行布置,提高了配电网可靠性。文献[8]以电压稳定性分析为基础,解决了风电机组布置问题。文献[9]根据 DG 布置引起的支路电流有功和无功分量变化,推导出了合适的分析表达式。首先确定在不同母线上产生最大效益的风电机组容量,然后选择效益最高的母线作为风电机组布置的最佳位置。文献[10-12]采用了不同的启发式技术,分别选择共生有机体搜索算法、授粉算法、闪电搜索算法来完成 DG 的优化布置和大小确定。文献[13]应用了田口可取函数分析技术优化风电机组的多目标布局和大小。

上述研究工作集中在寻找完全可控的 DG 的最佳位置和容量,没有考虑 DG 和负荷的不确定性,最新的一些文章对此做出研究。文献[14]考虑负载随时间的变化,通过一种穷举法研究了风电机组布置的最佳可靠性和效率问题。文献[15]提出了一种基于无迹变换的概率潮流(unscented transformation

probabilistic power flow, UT-PPF)计算方法,UT-PPF 方法充分考虑了有功和无功功率负载以及 DG 的不确定性。文献[16]开发了一种新的电压稳定指数,用于优化径向配电网中 DG 的布置。文献[17]提出以半不变量随即潮流法来处理随机变量,结合 Gram-Charlier 级数进行卷积运算,以此降低整体随机潮流卷积的运算量,达到提高计算速度的效果。文献[18]将改进天牛须搜索算法应用于 DG 的选址定容研究,提高了算法稳定性和高效性。文献[19]采用田口法和遗传算法相结合的混合优化算法,具有良好的多目标优化效果。

上述研究中对网络、DG 和负荷的不确定性所作研究不够深入,以非常近似的求解方法来优化管控分布式电源。在目标函数的选择上大多是最小化功率损耗,很少考虑配电网的电能质量。基于此,考虑以最小化电网损耗和提升配电网电能质量为目标,构建 DG 和负荷概率模型,采用基于改进无迹变换的概率性方法计算系统潮流,通过引入网络功率损耗灵敏度因子降低遍历最优化算法的计算量,从而找到 DG 的最优接入位置,选取 IEEE-33 和 IEEE-69 节点系统进行算例分析,实现 DG 的优化管控。

## 1 DG 选址定容模型

### 1.1 目标函数

DG 的布置问题可表述为一个优化问题,即找到使目标函数最优化的 DG 接入方案<sup>[20]</sup>。目前已有研究人员对 DG 进行研究,但是很少将 DG 改善电能质量的性能应用到实际中。因此有必要在研究电网的经济效益时考虑 DG 改善电能质量的作用,这对改善配电网电能质量意义重大。为实现改善配电网电能质量的目标,选取节点电压总畸变率作为衡量配电网电能质量的指标。这样就可通过合理规划 DG 的容量和位置,来达到最小化配电网的有功损耗和无功损耗以及各节点电压总畸变率最小的目标。因此给出其目标函数为

$$F_{obj} = \min(a_1 P_{loss} + a_2 Q_{loss} + a_3 C_{avg}) \quad (1)$$

式中: $P_{loss}$ 和 $Q_{loss}$ 分别为系统总的有功损耗和无功损耗; $a_1$ 、 $a_2$ 和 $a_3$ 均为权重系数; $C_{avg}$ 为配电网所有节点的电压总谐波畸变率的平均值,表达式如式(2)所示。

$$C_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^N C_i}{N} \quad (2)$$

式中:  $C_i$  为第  $i$  个节点的电压总谐波畸变率;  $N$  为配电网的总节点数。

### 1.2 等式约束

通过获取配电网实际网络情况, 建立配电网各个节点的功率等式和谐波潮流等式约束。

DG 接入配电网后, 根据功率平衡原理, 可列写出潮流方程为

$$\begin{cases} P_{in} - P_g + P_L - P_{dg} = Z_{ero} \\ Q_{in} - Q_g + Q_L - Q_{dg} = Z_{ero} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $P_{in}$  和  $Q_{in}$  分别为各个节点注入的有功和无功功率所形成的矩阵;  $P_g$  和  $Q_g$  分别为对应节点发电机所发出的有功和无功功率所形成的矩阵;  $P_L$  和  $Q_L$  分别为各节点接入负荷的有功和无功功率所形成的矩阵;  $P_{dg}$  和  $Q_{dg}$  分别为各节点 DG 的有功和无功功率所形成的矩阵;  $Z_{ero}$  为零矩阵。

为了考虑电能质量谐波, 需要计算配电网的谐波潮流, 谐波潮流计算方程为

$$I_h = Y_h V_h \quad (4)$$

式中:  $I_h$  为各节点往配电网中注入的  $h$  次谐波电流向量所组成的矩阵;  $V_h$  为对应处节点的  $h$  次谐波电压向量所组成的矩阵;  $Y_h$  为在  $h$  次谐波下系统各个节点之间的谐波导纳矩阵。

### 1.3 不等式约束

综合考虑设备与节点的物理限制与运行条件限制, 给出配电网中各个节点的发电机有功功率矩阵  $P_g$  和无功功率矩阵  $Q_g$ 、DG 有功功率矩阵  $P_{dg}$  和无功功率矩阵  $Q_{dg}$ 、电压幅值矩阵  $V$ 、电压相角矩阵  $\theta$ 、电压畸变率  $C$  的不等式约束, 如式(5)所示。

$$\begin{cases} P_g^{\min} \leq P_g \leq P_g^{\max} \\ Q_g^{\min} \leq Q_g \leq Q_g^{\max} \\ P_{dg}^{\min} \leq P_{dg} \leq P_{dg}^{\max} \\ Q_{dg}^{\min} \leq Q_{dg} \leq Q_{dg}^{\max} \\ V^{\min} \leq V \leq V^{\max} \\ \theta^{\min} \leq \theta \leq \theta^{\max} \\ C \leq C^{\max} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $P_g^{\min}$  和  $P_g^{\max}$  分别为对应节点发电机所发出的最小和最大有功功率所形成的矩阵;  $Q_g^{\min}$  和  $Q_g^{\max}$  为对应节点发电机所发出的最小和最大无功功率所形成的矩阵;  $P_{dg}^{\min}$  和  $P_{dg}^{\max}$  为 DG 所发出的最小和最大有

功率所形成的矩阵;  $Q_{dg}^{\min}$  和  $Q_{dg}^{\max}$  为 DG 所发出的最小和最大无功功率所形成的矩阵;  $V^{\min}$  和  $V^{\max}$  为各个节点所对应的最小和最大电压幅值所形成的矩阵;  $\theta^{\min}$  和  $\theta^{\max}$  为各个节点所对应的最小和最大电压相角所形成的矩阵;  $C^{\max}$  为各个节点所对应的满足国标规定的电压总谐波畸变率所形成的矩阵。

### 1.4 功率损耗灵敏度因子

文献[21]通过开发和使用各种基于灵敏度的性能指标以确定配电网中 DG 的最佳接入位置。与原始的穷举算法相比, 该方法大大减少计算量, 提高了解决问题的效率。

本文中, 选取功率损耗灵敏度因子作为性能指标, 通过判断其大小, 确定 DG 最佳接入位置。

结合配电网潮流结果, 构建网络功率损耗灵敏度因子, 其计算式为

$$\begin{cases} L_p^k = \sqrt{\left(\frac{\partial P_{loss}}{\partial P_k}\right)^2 + \left(\frac{\partial P_{loss}}{\partial Q_k}\right)^2} \\ L_Q^k = \sqrt{\left(\frac{\partial P_{loss}}{\partial Q_k}\right)^2 + \left(\frac{\partial Q_{loss}}{\partial Q_k}\right)^2} \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $L_p^k$  和  $L_Q^k$  分别为视在损耗针对第  $k$  个节点注入的有功功率  $P_k$  和无功功率  $Q_k$  的灵敏度。

当节点  $k$  注入功率时, 配电网损耗通常会减少, 相关的损耗灵敏度因子为负值, 然而  $L_p^k$  和  $L_Q^k$  为正值, 因此损耗灵敏度因子越高的节点更能减少注入功率的损耗, 其越适合作为 DG 的接入节点。

## 2 概率模型

考虑 DG 和负荷的不确定性, 以往确定性的 DG 布置不能够很好地提供最佳规划。通过建立 DG 和负荷的概率模型能够将不确定性考虑在内, 提供更佳的规划方案。

由于 DG 种类繁多, 其特性不同, 对其模型参数辨识的需求也有所不同, 需要根据不同设备实际特性构建模型, 并采用合适的模型参数辨识方法, 尽可能追踪设备真实的出力情况。

### 2.1 负荷概率模型

配电网中负荷类型种类较多, 为准确表征负荷的概率特性, 采用多高斯曲线拟合的方法建立负荷概率模型, 负荷的有功功率和无功功率概率密度函

数表达式为

$$\begin{cases} f(P_1) = \sum_{w=1}^W a_p^w e^{-(P_1 - \mu_p^w)^2 / 2(\sigma_p^w)^2} \\ f(Q_1) = \sum_{w=1}^W a_q^w e^{-(Q_1 - \mu_q^w)^2 / 2(\sigma_q^w)^2} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $a_p^w, \mu_p^w$  和  $\sigma_p^w$  均为有功功率概率密度函数表达式中第  $w$  个高斯函数的参数; $a_q^w, \mu_q^w$  和  $\sigma_q^w$  均为无功功率概率密度函数表达式中第  $w$  个高斯函数的参数; $W$  为高斯函数的总个数。采用非线性最小二乘法求解式(7)中参数,从而确定负荷的概率模型。

## 2.2 DG 概率模型

考虑现有 DG 的随机特性<sup>[22]</sup>,采用高斯混合分布模型,建立 DG 的概率模型,其功率的概率密度函数为

$$\begin{cases} f(P_{dg}) = \sum_{m=1}^M a_p^m \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_p^m} e^{-(P_{dg} - \mu_p^m)^2 / 2(\sigma_p^m)^2}, \sum_{m=1}^M a_p^m = 1 \\ f(Q_{dg}) = \sum_{m=1}^M a_q^m \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_q^m} e^{-(Q_{dg} - \mu_q^m)^2 / 2(\sigma_q^m)^2}, \sum_{m=1}^M a_q^m = 1 \end{cases} \quad (8)$$

式中: $a_p^m, \mu_p^m$  和  $\sigma_p^m$  均为有功功率概率密度函数表达式中第  $m$  个高斯分布的参数; $a_q^m, \mu_q^m$  和  $\sigma_q^m$  均为无功功率概率密度函数表达式中第  $m$  个高斯分布的参数; $M$  为高斯函数的总个数。采用极大期望优化算法求解式(8)中参数,从而确定 DG 的概率模型。

## 3 概率性优化求解算法

### 3.1 改进的无迹变换方法

无迹变换通过确定性选择一系列的西格玛点,近似非线性地映射随机变量的概率密度分布。用其处理随机潮流问题速度快、精度高,且易于处理随机变量的相关性,无须对非线性函数进行近似,受输入随机变量分布类型的限制较小<sup>[23]</sup>。本节采用改进的无迹变换方法计算配电网的概率潮流,得到配电网各个节点的电压和电流的幅值和相角。具体步骤如下:

1)以负荷功率和 DG 功率作为输入数据,生成其西格玛点和对应的权重数据。假设有  $2n+1$  个西格玛点数据,其中第  $j$  个点为  $\chi_j$ ,表示输入数据与其均值之间的差值,对应的权重为  $W_j, W_1 = \kappa / (n + \kappa), W_{j+1} = 1 / (2(n + \kappa)), j = 1, \dots, n$ ,所有权重之和为 1。

2)将所生成的每一个西格玛点,依次代入确定性谐波潮流计算表达式,运行  $2n+1$  次潮流计算,可以得到潮流计算结果,即  $\{y | y_j = g(\chi_j), j = 1, \dots, 2n + 1\}$ 。

3)计算概率潮流的输出变量均值和方差结果,具体计算方式为

$$\begin{cases} y_s = \sum_{j=1}^{2n+1} W_j y_j \\ P_y = \sum_{j=1}^{2n+1} W_j (y_j - y_s)^2 \end{cases} \quad (9)$$

式中: $y_s$  和  $P_y$  分别为输出变量的均值和协方差矩阵。综合步骤 1)—3)可以求解概率潮流结果。

### 3.2 遍历最优化算法

DG 的最优位置与容量的选取问题是一个非凸的小值问题,不能保证其结果的全局最优性。但通过与现有方法进行比较分析可以获得局部最优解并确定其优劣。想要获得全局最优的 DG 的位置和容量,唯一的方法是对所有可能的网络位置组合进行计算,使得目标函数最小的位置和容量即为全局最优解<sup>[24]</sup>。对于小型系统来说,这种穷举式的搜索是可行的,但是随着网络规模和 DG 安装数量的增加,网络位置组合的数量将出现爆炸式增长,使得搜索过程变得极为复杂。这导致目标函数微小程度的改善都需要耗费巨大的计算资源。因此,考虑利用合适的性能指标来减小搜索范围,在计算复杂度和解决方案质量之间达到平衡。遍历最优化算法步骤如图 1 所示。

根据各母线的功率损耗灵敏度因子,计算相应的母线排名,按照从大到小进行排序,将其中排在前 25% 的节点作为 DG 的待接入节点。计算各节点位置的目标函数,选择目标函数最小的位置作为 DG 的安装位置。在确定了第一个 DG 的安装位置后,通过重复整个过程寻找下一个 DG 的安装位置。这种在网络中逐个增加 DG 的方法有助于获得良好的最终规划,并且大大减轻了计算负担。需要注意的是,在确定第一个 DG 的接入位置时,只考虑了负荷的不确定性。但是,在计算后续安装的 DG 时,需要同时考虑负荷和 DG 的不确定性。

## 4 算例分析

### 4.1 模型搭建

IEEE-33 节点系统和 IEEE-69 节点系统是电力系统领域广泛接受的 2 个标准测试节点系统。这两个系统具有一定的规模和复杂程度,又不至于太过庞大和复杂,能够很好地验证遍历最优算法的性能。同时,这两个系统的拓扑结构与参数是公开共享的,

更有利于结果的复现。仿真程序在一台配备 AMD Ryzen 5 3500U 2.10 GHz 的个人电脑上运行。

考虑负荷的不确定性,选取某地区居民负荷数据进行概率模型拟合,得到有功功率和无功功率的多高斯曲线拟合模型概率密度函数如图 2 和图 3 所示。

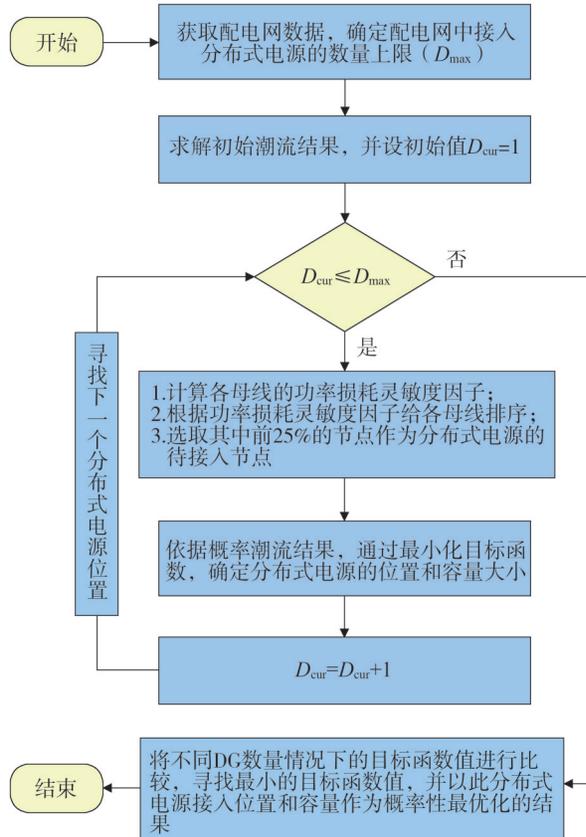


图1 遍历最优化算法步骤框图

Fig.1 Block diagram of the steps of the traversal optimization algorithm

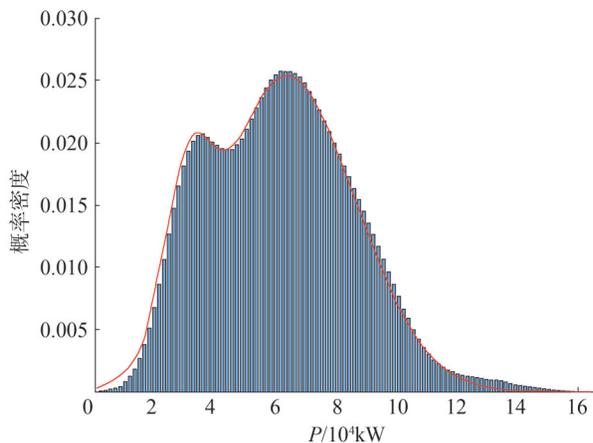


图2 负荷有功功率概率密度函数拟合图

Fig.2 Fitted plot of load active power probability density function

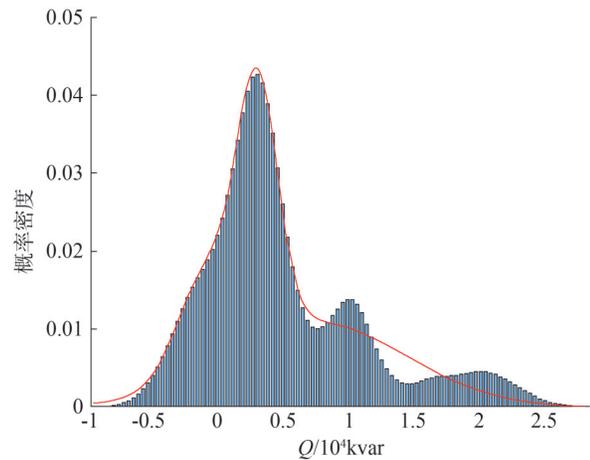


图3 负荷无功功率概率密度函数拟合图

Fig.3 Fitted plot of load reactive power probability density function

考虑 DG 的不确定性,选取某地区分布式光伏和风力发电的数据进行概率模型拟合。分布式光伏的概率分布如图 4 所示,风力发电的概率分布如图 5 所示。

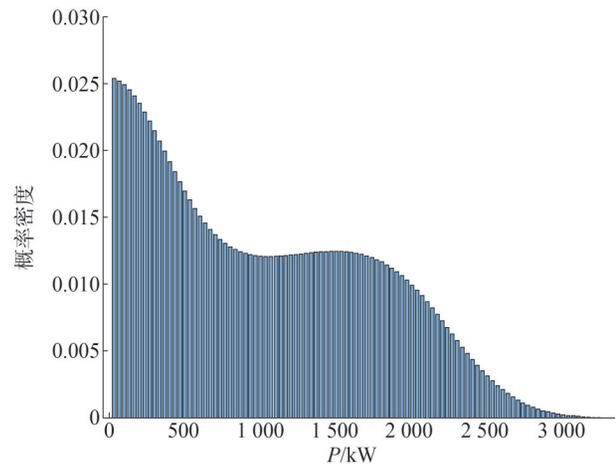


图4 分布式光伏的概率分布图

Fig.4 Probability distribution plot for distributed PV

#### 4.2 IEEE-33 节点系统

IEEE-33 节点系统是一个有 33 个母线节点和 32 条支路的配电网系统<sup>[25]</sup>。在不考虑负荷不确定性和 DG 情况下,整个系统的有功和无功功率损耗分别为 272.57 kW 和 178.05 kvar,其节点系统结构如图 6 所示。

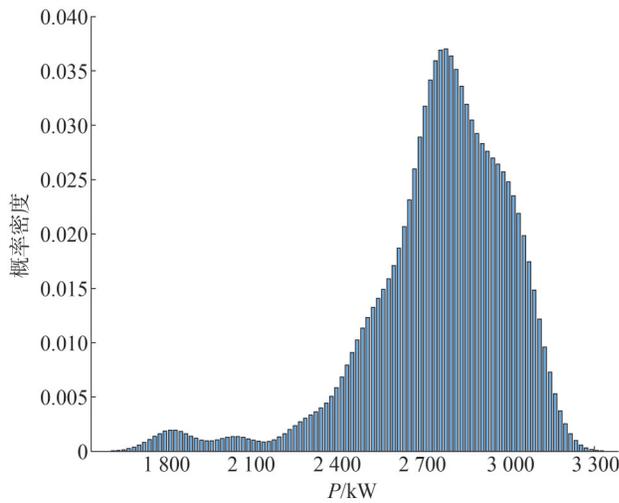


图5 风力发电的概率分布图

Fig.5 Probability distribution plot for wind power

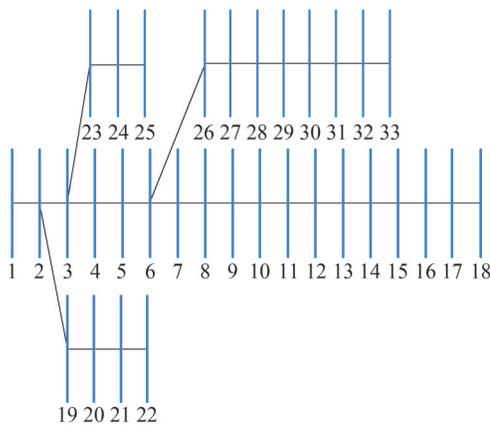


图6 IEEE-33节点系统图

Fig.6 IEEE-33 node system diagram

经过比较配电网的系统损耗因子,可以知道节点 15、6、9、10、16、17、28、26、27 为前 8 个适合接入 DG 的节点。各仿真案例具体情况如表 1 所示。

表 1 IEEE-33 仿真案例情况表

Table 1 Simulation case fact sheet for IEEE-33 system

仿真案例	风电接入节点	光伏接入节点
1		15
2	6	15
3	6	15、9
4	6、10	15、9
5	6、10	15、9、16

仿真所得概率潮流计算结果如图 7 所示。配电网有功损耗、无功损耗均值以及电压总谐波畸变率如表 2 所示。

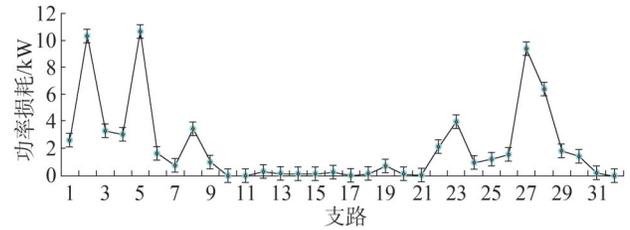


图7 IEEE-33节点系统的概率潮流计算功率损耗均值、方差图

Fig.7 Probabilistic trend calculation of power loss mean and variance plots for IEEE-33 node system

表 2 配电网损耗均值及电压总谐波畸变率表

Table 2 Table of average loss and total harmonic distortion rate of voltage in distribution network

仿真案例	有功损耗/kW	无功损耗/kvar	电压总谐波畸变率/%
1	77.80	50.28	3.4
2	66.82	43.51	2.6
3	58.28	38.06	2.1
4	55.15	36.15	1.8
5	59.50	39.68	1.9

分析表 1 数据可发现,随着接入配电网的 DG 的数量的增加,系统的有功和无功损耗以及电压总谐波畸变率明显降低。仿真案例 4 中,4 个优选的节点接入 DG,此时的系统损耗和电压总谐波畸变率达到最低。说明仿真案例 4 为系统最佳的 DG 接入方案。

采用文中所提无迹变化方法进行潮流计算所需的时间为 12.88 s。结合遍历最优算法,经过 56.67 min 即可找到最佳的 DG 接入方案。而穷举法却需要 233.77 min。可见遍历最优算法大大提高了计算效率。

### 4.3 IEEE-69 节点系统

IEEE-69 节点系统是一个有 68 个分支、69 个节点的配电网系统。在不考虑负荷不确定性和 DG 情况下,整个系统的有功和无功功率损耗分别为 200.64 kW 和 91.19 kvar。其节点系统结构如图 8 所示。

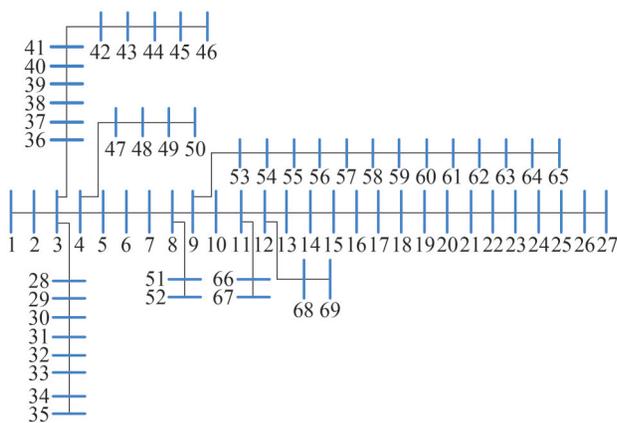


图8 IEEE-69节点系统图  
Fig.8 IEEE-69 node system diagram

经过比较配电网的系统损耗因子,可以知道节点 20、64、6、41、42、22 为前 6 个适合接入 DG 的节点。各仿真案例具体情况如表 3 所示。

表3 IEEE-69 仿真案例情况表  
Table 3 Simulation case fact sheet for IEEE-69 system

仿真案例	风电接入节点	光伏接入节点
1		20
2	64	20
3	64	20、6
4	64、41	20、6

仿真所得概率潮流计算结果如图 9 所示。配电网有功损耗、无功损耗均值以及电压总谐波畸变率如表 4 所示。

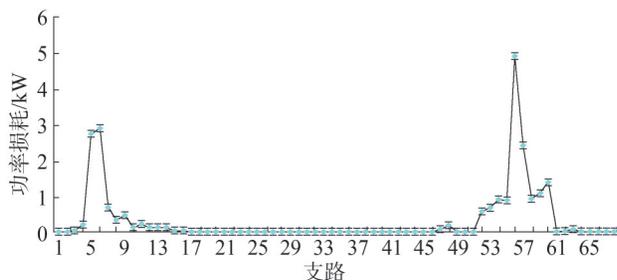


图9 IEEE-69节点系统的概率潮流计算功率损耗均值、方差图  
Fig.9 Probabilistic trend calculation of power loss mean and variance plots for IEEE-69 node system

表4 配电网损耗均值及电压总谐波畸变率表  
Table 4 Table of average loss and total harmonic distortion rate of voltage in distribution network

仿真案例	有功损耗/kW	无功损耗/kvar	电压总谐波畸变率/%
1	24.99	11.23	3.2
2	24.88	11.15	2.4
3	23.27	10.57	1.9
4	25.18	11.58	2.1

与 IEEE-33 节点系统相似,随着接入配电网的 DG 的数量的增加,系统的有功和无功损耗以及电压总谐波畸变率明显降低。仿真案例 3 中,3 个优选的节点接入 DG,此时的系统损耗达到最低。这说明仿真案例 3 为系统最佳的 DG 接入方案。

分析上述仿真结果,可以发现在 IEEE-33 节点系统中。拟议的方案使有功损耗降低了 86.71%,无功损耗降低了 79.69%,电压总谐波畸变率均值为 1.8%。在 IEEE-69 节点系统中,拟议方案使有功损耗降低了 51.92%,无功损耗降低了 71.61%,电压总谐波畸变率均值为 1.9%。这验证了拟议方案的有效性,说明了所提概率性优化求解算法能明显降低电网损耗,改善电能质量。

### 5 结论

提出一种考虑 DG 和负荷不确定性的概率性优化管控策略,用于确定 DG 接入配电网的最佳位置和容量,以最大限度地减少配电网的损耗并提高电能质量。选取 IEEE-33 节点系统和 IEEE-69 节点系统进行仿真验证,可发现随着 DG 接入配电网,配电网的功率损耗和电能质量都得到了明显改善。本文的主要结论如下:

1)以最小化配电网的有功损耗和无功损耗以及各节点电压总畸变率为目标函数。这在降低网损的同时实现了提升电能质量的目标,大大降低了电压总谐波畸变率。

2)充分考虑负荷和 DG 的不确定性。对负荷建立多高斯曲线拟合模型并采用非线性最小二乘法求解模型参数;对 DG 建立高斯混合分布模型并采用极大期望优化算法确定其参数。相较于以往确定性的 DG 选址定容更具有现实意义。

3)在潮流计算方面,采用改进的无迹变换方法计算配电网的概率潮流情况,此方法充分考虑了有功和无功功率负载以及 DG 的不确定性。

4)针对穷举式算法计算量大的缺点,以功率损耗灵敏度因子为性能指标,采用遍历最优化算法来确定 DG 的最佳接入位置,在降低计算复杂度的同时保证了计算质量。

## 参考文献

- [1] 张智刚,康重庆.碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J].中国电机工程学报,2022,42(8):2806-2819.  
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new - type power system towards a carbon neutrality future[J].Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806-2819.
- [2] 郑国光.支撑“双碳”目标实现的问题辨识与关键举措研究[J].中国电力,2023,56(11):1-8.  
ZHENG Guoguang. Problem identification and key measures to support the achievement of carbon peak and carbon neutrality[J]. Electric Power, 2023, 56(11): 1-8.
- [3] 丁月明,张学清,崔荣喜,等.计及线性化潮流约束的主动配电网运行优化[J].山东电力技术,2024,51(3):36-44.  
DING Yueming, ZHANG Xueqing, CUI Rongxi, et al. Operation optimization of active distribution network considering linearized power flow constraints[J].Shandong Electric Power, 2024, 51(3): 36-44.
- [4] CAICEDO J E, AGUDELO-MARTÍNEZ D, RIVAS-TRUJILLO E, et al. A systematic review of real-time detection and classification of power quality disturbances[J].Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(1): 3.
- [5] 李泽成,孙燕盈.新型电力系统下考虑分布式光伏并网的配电网可靠性评估[J].山东电力技术,2023,50(5):1-5.  
LI Zecheng, SUN Yanying. Reliability evaluation of distribution network considering flexible grid connection of distributed photovoltaic power generations[J].Shandong Electric Power, 2023, 50(5): 1-5.
- [6] PANDEY A K, KIRMANI S, KUMAR A, et al. Allocation of DG in distribution network using parameter independent JAYA algorithm [J].Journal of Electrical Engineering & Technology, 2023, 18(3): 1675-1692.
- [7] MUHAMMAD RIDZUAN M I, ROSLAN N N R, MOHD FAUZI N F, et al. Reliability-based DG location using Monte-Carlo simulation technique[J].SN Applied Sciences, 2020, 2(2): 145.
- [8] ETTEHADI M, GHASEMI H, VAEZ-ZADEH S. Voltage stability-based DG placement in distribution networks [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(1): 171-178.
- [9] GOPIYA NAIK S N, KHATOD D K, SHARMA M P. Analytical approach for optimal siting and sizing of distributed generation in radial distribution networks [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2015, 9(3): 209-220.
- [10] DAS B, MUKHERJEE V, DAS D. Optimum placement of biomass DG considering hourly load demand [J]. Energy and Climate Change, 2020, 1: 100004.
- [11] JAYASREE M S, SREEJAYA P, BINDU G R. Multi-objective metaheuristic algorithm for optimal distributed generator placement and profit analysis [J]. Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy, 2019, 4(1): 11.
- [12] MANNA D, GOSWAMI S K. Optimum placement of distributed generation considering economics as well as operational issues [J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2020, 30(3): e12246.1- e12246.20.
- [13] GALGALI V S, RAMACHANDRAN M, VAIDYA G A. Multi-objective optimal placement and sizing of DGs by hybrid fuzzy TOPSIS and taguchi desirability function analysis approach [J]. Electric Power Components and Systems, 2020, 48(19/20): 2144-2155.
- [14] ZHU D, BROADWATER R P, TAM K S, et al. Impact of DG placement on reliability and efficiency with time-varying loads [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(1): 419-427.
- [15] PERES W. A probabilistic load flow for unbalanced three-phase islanded microgrids using Unscented Transformation [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2024, 155: 109554.
- [16] MURTY V V S N, KUMAR A. Optimal placement of DG in radial distribution systems based on new voltage stability index under load growth [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 69: 246-256.
- [17] 朱一听,陈奕帆,毕恺韬,等.基于半不变量随机潮流计算的分布式光伏优化配置研究[J].智慧电力,2023,51(3):67-72.  
ZHU Yixin, CHEN Yifan, BI Kaitao, et al. Optimal allocation of distributed PV based on semi-invariant stochastic power flow calculation [J]. Smart Power, 2023, 51(3): 67-72.
- [18] 卢光辉,滕欢,廖寒逊,等.基于改进天牛须搜索算法的分布式电源选址定容[J].电测与仪表,2019,56(17):6-12.  
LU Guanghui, TENG Huan, LIAO Hanxun, et al. Location and sizing of distributed generation planning based on the improved beetle antennae search algorithm [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(17): 6-12.
- [19] 高子晏,董婷.基于田口法和遗传算法的取向硅钢片直线电机优化设计[J].微特电机,2023,51(11):30-36.  
GAO Ziyang, DONG Ting. Optimization design of oriented silicon steel linear motor based on taguchi method and genetic algorithm [J]. Small & Special Electrical Machines, 2023, 51(11): 30-36.
- [20] 翟鹤峰,杨明,赵利刚,等.提升分布式电源接纳能力的配电网

- 三相鲁棒动态重构[J].电力系统自动化,2019,43(18):35-42.  
ZHAI Hefeng, YANG Ming, ZHAO Ligang, et al. Three-phase robust dynamic reconfiguration of distribution network to improve acceptance ability of distributed generator [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(18):35-42.
- [21] 易海琼,刘宏杨,王梓怡,等.基于灵敏度因子的随机电网规划方法[J].广东电力,2024,37(2):1-9.  
YI Haiqiong, LIU Hongyang, WANG Ziyi, et al. Stochastic power grid planning using sensitivity factors [J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(2):1-9.
- [22] 吴龙腾,朱卓文,邱泽坚.分布式电源接入配电网可靠性评估[J].光源与照明,2024(3):165-167.  
WU Longteng, ZHU Zhuowen, QIU Zejian. Reliability evaluation of distributed power supply connected to distribution network [J]. Lamps & Lighting, 2024(3):165-167.
- [23] 代景龙,韦化,鲍海波,等.基于无迹变换含分布式电源系统的随机潮流[J].电力自动化设备,2016,36(3):86-93.  
DAI Jinglong, WEI Hua, BAO Haibo, et al. Stochastic power flow calculation based on unscented transform for power system with distributed generations [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3):86-93.
- [24] 黄闽.分布式电源接入对供电系统的影响及应对策略[J].光源与照明,2024(3):162-164.  
HUANG Min. Influence of distributed power supply access on power supply and distribution system and its countermeasures [J]. Lamps & Lighting, 2024(3):162-164.
- [25] 赵乐冰,王蕾,万灿,等.基于数据包络分析法的城市综合能源系统分环节能效评价[J].电力系统自动化,2022,46(17):132-141.  
ZHAO Lebing, WANG Lei, WAN Can, et al. Segmented energy efficiency evaluation of urban integrated energy system based on data envelopment analysis method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(17):132-141.

收稿日期:2024-05-19

修回日期:2024-08-07

作者简介:

李建杰(1978),男,高级工程师,从事电力系统电网规划、新能源系统接入、分布式能源研究等工作;

钟文涛(1985),男,高级工程师,从事电力系统电网规划、新能源系统接入、分布式能源研究等工作;

穆明亮(1989),通信作者(bzgdmm18848@163.com),男,硕士,高级工程师,从事电力系统规划前期、电网投资、电能质量管理等工作;

李平(1975),女,高级工程师,从事电力系统规划前期、电网投资、电能质量管理等工作;

王志(1986),男,硕士,高级工程师,从事电力系统规划前期、电网投资、电能质量管理等工作。

(责任编辑 姜婷婷)

(上接第39页)

- [24] 王文林,张杰,万山景,等.变电站全停负荷智能转供策略研究与示范应用[J].农村电气化,2023(4):28-30.  
WANG Wenlin, ZHANG Jie, WAN Shanjing, et al. Research and demonstration application of intelligent load transfer strategy in case of substation total shutdown [J]. Rural Electrification, 2023(4):28-30.
- [25] 吕超,费平平.电网负荷转供装置转供模式与当值策略实施研究[J].黑龙江电力,2023,45(5):407-410.  
LYU Chao, FEI Pingping. Research on transfer mode and on-duty strategy implementation of power grid load transfer device [J]. Heilongjiang Electric Power, 2023, 45(5):407-410.
- 收稿日期:2024-04-18
- 修回日期:2024-06-20
- 作者简介:
- 宋圣兰(1991),女,硕士,高级工程师,从事配电网调控和配电网自动化相关工作;
- 张超(1985),通信作者(lion8126@163.com),女,硕士,高级工程师,从事配电网调控和配电网自动化相关工作;
- 刘晓亮(1985),男,硕士,高级工程师,从事主配电网调度和自动化等工作;
- 李琰(1998),女,硕士,研究员,从事配电网自动化相关工作;
- 张乃刚(1992),男,硕士,工程师,从事配电网调控和配电网自动化相关工作。

(责任编辑 车永强)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2025.03.006

# 台风灾害中配电网故障抢修策略

吴龙腾<sup>1</sup>, 郭乾<sup>1</sup>, 吴杰康<sup>2\*</sup>, 陈冠熹<sup>2</sup>

(1. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广东 广州 510600; 2. 广东工业大学自动化学院, 广东 广州 510006)

**摘要:**台风灾害对配电线路造成重大冲击,极易引发故障停电,基于此,提出灾时灾后配电网复电性能提升策略。首先,利用台风预测数据和蒙特卡洛抽样法模拟线路故障。随后,结合分布式电源与可控负荷调度,以优先恢复重要负荷供电为目标,构建配电网故障重构模型,实现灾时配电网的灵活调整与负荷优化分配。灾后阶段基于故障线路与抢修队伍的位置,以最大化负荷恢复量和最小化抢修时间为目标,通过优化算法确定抢修顺序,并在抢修过程中协同配电网重构进行优化。以IEEE 33配电系统为例进行仿真分析,验证了所提策略的有效性。结果显示,该策略能够在台风灾害时,有效保障系统内关键负荷的持续供电。在台风灾害后显著缩短抢修时间,显著提升了配电网的复电性能与应急响应能力。提出的策略为台风灾害下的配电线路故障抢修与快速恢复关键负荷供电提供了创新的解决方案与思路,增强配电网抗灾与供电可靠性。

**关键词:**极端灾害;配电网;复电性能;关键负荷

中图分类号:TM727

文献标志码:B

文章编号:1007-9904(2025)03-0049-10

## Fault Repair Strategy for Distribution Network in Typhoon Disaster

WU Longteng<sup>1</sup>, GUO Qian<sup>1</sup>, WU Jiekang<sup>2\*</sup>, CHEN Guanxi<sup>2</sup>

(1. Dispatching control center of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510600, China;

2. School of Automation, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

**Abstract:** Typhoon disasters severely impact distribution lines, causing power outages. Thus, this paper proposes a comprehensive strategy for improving the power recovery performance of distribution network during and after disaster. Firstly, typhoon forecasts and Monte Carlo sampling are used to simulate line faults. Then, integrating distributed generation and controllable load scheduling, with the goal of prioritizing the restoration of critical loads, a distribution network fault reconfiguration model is constructed to achieve flexible adjustment and optimized load distribution within the distribution network during disaster. In the post-disaster phase, based on the locations of faulty lines and repair teams, an optimization algorithm determines repair sequences to maximize load restoration and minimize repair time. During the repair process, optimization is achieved through coordinated distribution network reconfiguration. Taking the IEEE 33 distribution system as an example for simulation analysis, the results verify the strategy's effectiveness, ensuring continuous critical load power during typhoons, shortening repair time, and improving restoration performance and emergency response. The strategy provides innovative solutions for rapid fault repair and critical load restoration, enhancing distribution network resilience and reliability.

**Keywords:** extreme disaster; distribution network; restoring power performance; critical load

## 0 引言

配电网系统具有错综复杂的系统结构和相对薄弱的运行环节特性<sup>[1]</sup>,导致其易受台风灾害的影响。这种小概率、高风险的灾害会在短时间内对电力系

统的设备造成严重的干扰,导致配电网系统被迫切除负荷<sup>[2]</sup>。由于台风天气的持续影响,导致系统难以在短时间内恢复,可能会进一步导致大面积长时间的停电事故<sup>[3]</sup>。以2015年的台风“彩虹”为例,它侵袭了中国的广东省,导致超过1万座的杆塔倒塌,

1 000 多条 10 kV 或更高电压级别的输电线路和配电线路发生跳闸,造成 447 万用户的电力供应中断;2019 年强台风“利奇马”猛烈袭击了浙江等多个省份,其后果是超过 4 000 条配电线路发生故障,并引发了 677 万用户的停电事故。因此,迫切需要研究台风灾害对电网的影响评估手段,从而为电网的防护和恢复策略提供坚实的理论支撑<sup>[4]</sup>。

在台风灾害与故障抢修方面,国内外学者进行了相关研究。文献[5-6]基于台风的大量历史资料,运用熵权法和层次分析法,对各项指标进行科学合理的权重分配,综合权重系数,预测台风灾害下输电配电线路受影响程度,从而在灾前阶段对脆弱线路进行加固来提高配电网的防御能力。文献[7-8]提出了移动应急电源的预布置和实时调配,确保应急供电。文献[9-10]提出了分布式电源与联络线结合的协同策略,考虑孤岛划分的前提下进行配电网重构来提高灾后配电网负荷恢复效率。文献[11]提出了电动汽车调度与配电网重构相协调的灾后供电恢复策略。然而,上述文章只考虑了配电网重构与分布式电源以及移动储能之间的协同调度问题,未考虑灾后对故障线路的抢修,且由于台风灾害影响较大,失负荷程度较高,储能等灵活资源对负荷的应急支撑有限,仅依赖灵活资源来提升系统负荷恢复的效果有限。

在此背景下,提出一种在台风灾害情境下,综合考虑分布式电源(distributed generator, DG)负荷重要权重、可控负荷、配电网重构与故障抢修协同的灾时灾后配电网复电性能提升策略。基于台风预测数据,采用蒙特卡洛抽样法对线路故障模型进行模拟<sup>[12]</sup>,在台风过境后的降负荷运行阶段得到确定的故障线路集合后马上调配进行配电网线路的重构,同时考虑分布式电源的出力和对可控负荷的控制<sup>[13-14]</sup>,尽可能恢复重要负荷的供电。根据故障线路和抢修队伍所在位置,以最大负荷恢复量和最短抢修时长为目标,获得抢修队伍线路抢修顺序<sup>[15-16]</sup>。为充分发挥故障抢修和配电网重构对配电网复电性能提升的双重作用,构建配电网重构与故障抢修协同优化框架,加快台风灾害后系统负荷的供电恢复。本研究将探讨规划与运作方面的难题,通过转换得到一个混合整数线性规划问题,并依托 MATLAB-YALMIP 平台,调用商业求解器 CPLEX 对这一问题

进行求解。在 IEEE 33 节点配电网系统中进行实际测试,以验证本文提出策略的有效性。

## 1 台风灾区配电线路状态特性

台风可被构建为一种特殊的圆形模型,其特性在于风速在最大风速半径位置达到峰值,并由此向中心和外圈两个方向逐渐降低。在进行模拟台风风场时,由于台风风场具有显著的不对称性,通常认为台风是由两个不同的风矢量叠加形成的,其中一个为台风中心保持静止的圆形环流风场,而另一个则是与台风中心的距离成反比的移动风场<sup>[17-18]</sup>。本文选用宫崎正卫移动风场模型和改进型 Rankine 环流风速模型<sup>[19]</sup>进行叠加。

### 1.1 移动风速模型

宫崎正卫移动风速模型是一种常见的台风的移动风场模型,这是一个与大气导向气流相关的大规模风场,目前的计算主要依赖于经验公式,具体的模型如式(1)所示。

$$V_d = V_0 e^{-\frac{\pi r}{K_1 R_{\max}}} \quad (1)$$

式中: $K_1$ 为经验系数,通过实验进行取值; $V_0$ 为台风中心移动速度,可从气象部门发布的台风预报信息中获得; $R_{\max}$ 为最大风速半径; $r$ 为台风风力影响范围内的某点与台风中心之间的距离。

距离 $r$ 可由两点经纬度坐标 $(x_1, y_1)$ 、 $(x_2, y_2)$ 和地球平均半径 $R_{av}$ 求得,如式(2)所示。

$$r = R_{av} \arccos(\sin(y_1) \sin(y_2) + \cos(y_1) \cos(y_2) \cos(x_1 - x_2)) \quad (2)$$

式中: $R_{av}$ 近似取 6 371 km。

### 1.2 改进 Rankine 环流风速模型

传统的 Rankine 涡理论模型如式(3)所示。

$$V_r = \begin{cases} \frac{r}{R_{\max}} V_{\max}, & r \in [0, R_{\max}] \\ \frac{R_{\max}}{r} V_{\max}, & r \in (R_{\max}, \infty) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $V_{\max}$ 为台风环流风速的最大值。

传统的 Rankine 涡理论模型在台风的内部风速呈直线上升趋势,风速变化过于急剧;特别是在台风的外部区域和台风眼地带,风速会急剧降低。不论在台风的内部还是外部,风速的分布轮廓都相对较窄,这使得模拟结果与真实情况相比显得不够合理。因此,对传统 Rankine 模型进行了修正,通过引入一

个无量纲的风速修正系数,以提高模型预测结果与实际情况的吻合度,如式(4)所示。 $V_{\max}$ 可通过式(5)进行计算。

$$V_r = \begin{cases} \frac{r}{R_{\max}} V_{\max} \frac{1}{1 - \frac{r}{R_{\max}} + \left(\frac{r}{R_{\max}}\right)^2}, r \in [0, R_{\max}] \\ \frac{R_{\max}}{r} V_{\max} \frac{1}{1 - \frac{R_{\max}}{r} + \left(\frac{R_{\max}}{r}\right)^2}, r \in (R_{\max}, \infty) \end{cases} \quad (4)$$

$$V_{\max} = V_{\max} - V_d \Big|_{r=R_{\max}} = V_{\max} - V_0 e^{-\frac{\pi}{k_1}} \quad (5)$$

式中: $V_{\max}$ 为台风近中心风速的最大值,这一数据可以从气象部门官方发布的台风预报信息中直接获取。

### 1.3 最大风速半径的计算

依据台风风场中某一特定点的实际风速为该点移动风速与环流风速的矢量合成,在台风的7级风圈半径 $r_7$ 的特定处一定满足式(6)。

$$V_{d7} + V_{r7} = V_{7\min} \quad (6)$$

式中: $V_{d7}$ 、 $V_{r7}$ 分别对应于为7级风圈的移动风速和环流风速; $V_{7\min}$ 为7级风圈风速下限值,一般取13.9 m/s。

将式(6)整理,可得

$$V_0 e^{-\frac{\pi r_7}{10R_{\max}}} + \frac{R_{\max}}{r_7} V_{\max} \frac{1}{1 - \frac{R_{\max}}{r_7} + \left(\frac{R_{\max}}{r_7}\right)^2} = V_{7\min} \quad (7)$$

通过联合方程式(5)与式(7)可以解出最大风速半径 $R_{\max}$ ,利用 $R_{\max}$ 能够计算出风场中任意一点的移动风速和环流风速。

针对这个方程不能直接进行求解的问题,通过模拟退火算法进行迭代求解,具体求解目标函数如式(8)所示。

$$\min \left[ V_{7\min} - V_0 e^{-\frac{\pi r_7}{10R_{\max}}} + \frac{R_{\max}}{r_7} V_{\max} \frac{1}{1 - \frac{R_{\max}}{r_7} + \left(\frac{R_{\max}}{r_7}\right)^2} \right] \quad (8)$$

## 2 配电网线路故障模型

### 2.1 区域内线路故障概率模型

为便于分析,将配电网系统进行网格化处理,

具体做法是在经纬度坐标上将配电网划分为若干个网格,每个网格的边长均等于配电网的平均档距。鉴于网格区域相较于台风影响范围显著较小,故可合理假定各网格内所受台风灾害的强度是均一的<sup>[20]</sup>。利用每个网格区域的中心点到台风风眼的距离算出该网格内台风风速大小,通过结合配电网元件的脆弱性曲线,可以计算出在 $t$ 时刻,第 $n$ 个网格中线路 $h$ 发生故障的具体概率,如式(9)所示。

$$p_{h,t,n} = \begin{cases} 0, & 0 < V < V_{re} \\ \exp\left[\frac{K_2(V_n - V_{re})}{V_{re}}\right] - 1, & V_{re} \leq V \leq 2V_{re} \\ 1, & V > 2V_{re} \end{cases} \quad (9)$$

$$V_n = V_{r,n} + V_{d,n} \quad (10)$$

式中: $V_n$ 为网格 $n$ 内的实际风速大小; $V_{r,n}$ 、 $V_{d,n}$ 分别为网格 $n$ 内的环流风速大小和移动风速大小; $V_{re}$ 为线路预设的最大可抵抗风速; $K_2$ 为经验系数,通过实验进行取值。

### 2.2 线路总故障概率

线路被划分到多个网格当中可以视为将同一条线路的多个网格路段以串联方式相连,因此,任一网格的线路段发生故障就会导致整条线路停止运行<sup>[21]</sup>,因此 $t$ 时刻线路 $h$ 的故障概率为

$$P_{h,t} = 1 - \prod_{n \in \Omega_h} (1 - p_{h,t,n}) \quad (11)$$

式中: $\Omega_h$ 为线路 $h$ 所在的网格集合。

## 3 受灾配电网重构复电能力

图1是配电网系统遭遇极端台风灾害事件全过程的性能曲线,展现了台风灾害对电力系统性能产生的动态影响及其变化情况。图中, $T_a$ 为台风灾害登陆并开始对电力系统展开侵袭时刻; $T_b$ 为电力系统性能出现下滑时刻; $T_c$ 为电力系统开始降额运行时刻; $T_d$ 为台风灾害结束影响并离开该地区的时刻; $T_e$ 为灾害离境后,系统性能逐渐回升的起始时刻; $T_f$ 为系统性能完全恢复并达到正常运行状态的时刻; $T_g$ 为电力系统恢复正常运行时刻。依据台风灾害的演进过程可以根据时间尺度将系统性能的变化曲线细分为灾前( $0-T_a$ )、灾中( $T_a-T_e$ )和灾后( $T_e-T_g$ )3个阶段。

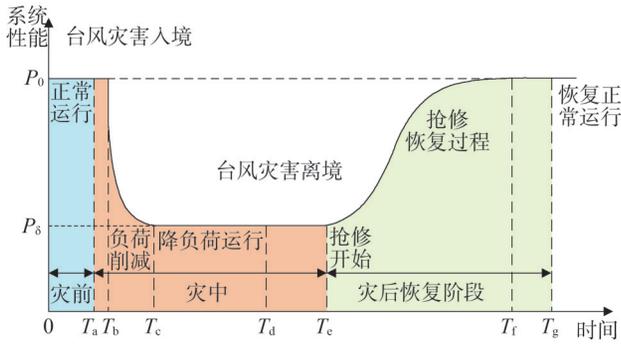


图1 配电网系统灾害全过程性能曲线

Fig.1 Performance curve of the entire disaster process of distribution network system

采用配电网的供电负荷量作为系统性能评估的衡量指标,构建3个评价指标,分别为负荷恢复时间、负荷恢复速率和负荷供缺率,用以全面评估负荷的恢复情况。

1) 负荷恢复时间,如式(12)所示。

$$R_t = \max(T_1, T_2, \dots, T_i) \quad (12)$$

式中:  $T_1, T_2, \dots, T_i$  为各负荷恢复供电的时间节点。

2) 负荷恢复速率,如式(13)所示。

$$R_s = \frac{\sum_{i=1}^B P_i}{R_t} \quad (13)$$

式中:  $P_i$  为灾前节点  $i$  正常运行的负荷;  $B$  为配电网节点总数。

3) 电量供缺率。

当配电网发生故障后,为确保负荷供电能够逐步恢复正常,应制定详尽的恢复计划。而电量缺供率,它反映了负荷实际供电量的不足与总供电量的比率,是评估电力供应短缺情况的关键指标。

$$R = 1 - \frac{\sum_{i=1}^B \sum_{t=T_d}^{T_g} P_{load,t,i}}{\sum_{i=1}^B P_i \times (T_g - T_d)} \times 100\% \quad (14)$$

式中:  $P_{load,t,i}$  为灾后  $t$  时刻节点  $i$  处的负荷。

## 4 配电网复电能力提升方法

### 4.1 灾时配电网重构

配电网进行灾时重构的实质是在台风过境之后,配电网多处发生断联,此时并未执行有效的配电网故障抢修策略,系统处于降负荷运行阶段,此时可以通过控制联络线上的常开开关闭合进行网络重

构,为恢复部分非故障区域内关键负荷的电力供应,进而提升配电网系统复电性能。因此,所建立的重构模型以系统重要负荷恢复量最大为目标函数,运用二阶锥优化算法,可以将原本非凸的重构模型成功转化为一个混合整数的二阶锥规划问题<sup>[22]</sup>,进而能够利用现有的商用求解器进行快速而高效的求解。

### 4.2 配电网重构优化模型

#### 4.2.1 重构目标函数

配电网重构策略的主要目标是配置联络线路的开合状态,在满足配电网运行的约束条件下是尽可能多地恢复重要失电负荷。此外,重构后运行状态下的网络损耗、电压质量与恢复策略的开关操作次数同样需要综合考虑。因此采取多个目标函数进行规划。

1) 负荷恢复总量最大化。

$$f_1 = \max \left( \sum_{V_e \in C} c_e \omega_e P_{L,e} + \sum_{V_b \in C} Y_b \omega_b P_{L,b} \right) \quad (15)$$

式中:  $C$  为可控负荷集合;  $c_e$  为可控负荷  $e$  的供电比例;  $\omega_e$  为负荷  $e$  的权重,其值越大表示该负荷恢复顺序越高;  $P_{L,e}$  为负荷  $e$  的有功负荷;  $Y_b$  为节点  $b$  的荷电状态,其值为0或1,节点荷电状态变量  $Y_b$  允许取0,即在重构过程中允许切除负荷运行;  $\omega_b$  为负荷  $b$  的权重。

为保证网络的连通性和结构呈放射状,并允许在负荷无法完全恢复情况下的切负荷操作。可控负荷  $e$  的供电比例  $c_e$  满足

$$0 \leq c_e \leq 1 \quad (16)$$

2) 网络损耗最小化。

$$f_2 = \min \left( \sum_{V_l \in E_1} r_{ij} I_{ij}^2 \right) \quad (17)$$

式中:  $l_{ij}$  为节点  $i, j$  确定的支路;  $E_1$  为网络中所有闭合支路的集合;  $r_{ij}, I_{ij}$  分别为  $l_{ij}$  的支路电阻与电流。

3) 电压偏移量最小化。

$$f_3 = \min \left( \sum |U - U_i| \right) \quad (18)$$

式中:  $U$  为基准电压;  $U_i$  为节点  $i$  的电压。

4) 开关操作次数最小化。

$$f_4 = \min \left( \sum_{V_l \in E} \left[ Y_{ij(0)} (1 - Y_{ij}) + Y_{ij} (1 - Y_{ij(0)}) \right] \right) \quad (19)$$

式中:  $Y_{ij(0)}, Y_{ij}$  分别为支路  $l_{ij}$  上开关的初始开关状态和当前开关状态,其值为0时,表示支路上的开关闭合;其值为1时,表示支路上的开关断开;  $E$  为网络中所有支路的集合。

最后,进行归一化处理后总的目标函数为

$$f = \sum_{z=1}^4 \lambda_z f_z \quad (20)$$

式中: $f_z$ 、 $\lambda_z$ 分别为第 $z$ 个目标函数的计算值和权重。

#### 4.2.2 相关约束条件

1)网络拓扑约束。

$$Z_{ij} + Z_{ji} = W_{ij} \quad (21)$$

$$\sum_{\forall l_{ij} \in E} Z_{ji} \leq 1 \quad (22)$$

式中: $Z_{ij}$ 、 $Z_{ji}$ 为线路流通方向变量, $Z_{ij} = 1$ 表示支路 $l_{ij}$ 上的功率由节点 $i$ 流向节点 $j$ , $Z_{ji}$ 同理; $W_{ij}$ 为线路连接状态变量。

2)网络潮流约束。

$$\sum_{j \in \Phi(i)} P_{ji} - \sum_{k \in \Psi(i)} P_{ik} - r_{ij} I_{ji}^2 = Y_i P_i \quad (23)$$

$$\sum_{j \in \Phi(i)} Q_{ji} - \sum_{k \in \Psi(i)} Q_{ik} - x_{ij} I_{ji}^2 = Y_i Q_i \quad (24)$$

$$P_i = P_{DG,i} - P_{L,i} \quad (25)$$

$$Q_i = Q_{DG,i} - Q_{L,i} \quad (26)$$

$$U_i^2 - U_j^2 - 2(r_{ij} P_{ij} + x_{ij} Q_{ij}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) I_{ij}^2 = 0 \quad (27)$$

式中: $P_i$ 、 $Q_i$ 分别为节点 $i$ 的注入有功功率和注入无功功率; $P_{ij}$ 、 $Q_{ij}$ 分别为由节点 $i$ 到节点 $j$ 传输的有功功率和无功功率; $r_{ij}$ 、 $x_{ij}$ 分别为线路 $l_{ij}$ 的电阻和电抗; $\Phi(i)$ 、 $\Psi(i)$ 分别为与节点 $i$ 相连的上游点集合和下游节点集合; $P_{DG,i}$ 、 $Q_{DG,i}$ 分别为位于节点 $i$ 的DG的有功和无功出力。 $P_{L,i}$ 、 $Q_{L,i}$ 分别为节点 $i$ 负荷的有功功率和无功功率。

对于可控负荷节点来说,式(23)和式(24)等号右边注入功率的乘数须用 $c_i$ 替代 $Y_i$ 。

3)DG出力约束。

$$\begin{cases} P_{DG,\min} \leq P_{DG} \leq P_{DG,\max} \\ 0 \leq Q_{DG} \leq P_{DG,\max} \tan \phi \end{cases} \quad (28)$$

式中: $P_{DG,\min}$ 、 $P_{DG,\max}$ 分别为DG有功出力下限和上限; $\phi$ 为功率因数角,取其上限为定值。

4)电压与电流约束。

$$U_{i,\min}^2 \leq Y_i U_i^2 \leq U_{i,\max}^2 \quad (29)$$

$$0 \leq I_{ij}^2 \leq I_{\max}^2 \quad (30)$$

式子: $U_{i,\min}$ 、 $U_{i,\max}$ 分别为节点 $i$ 电压下限值和上限值; $I_{\max}$ 为电流上限。

5)二阶锥约束。

由于目标函数与约束中所有非线性项多数为线路电流和节点电压的平方项。因此,构造型变量 $v_i$ 、 $q_{ij}$ 分别代替上述所有约束与目标函数中电压与电流

的平方项 $U_i^2$ 和 $I_{ij}^2$ 。

配电网重构模型实际上是每个线路状态下的配电网最优潮流问题的叠加,经过松弛后的可行域转换为一个二阶锥体,形成凸可行域,其二阶锥凸松弛的准确性和可行性已得到验证<sup>[23]</sup>。经过进一步转换可得到标准二阶锥形式为

$$\begin{cases} 2P_{ij} \\ 2Q_{ij} \\ q_{ij} - v_i \end{cases} \leq q_{ij} + v_i \quad (31)$$

经转换后的模型的所有决策变量已经能够满足二阶锥算法要求,并且限制其搜索空间在凸锥范围内,可以采用成熟的数学规划求解工具进行求解。

#### 4.3 故障抢修策略

制定科学有效的配电网故障抢修策略有利于缩短配电网恢复时间,加快灾后的复电速度,实现配电网复电性能的提升。本文主要考虑在台风灾害发生后,可计算台风灾害下元件故障概率并生成故障集合。以每次抢修完成可恢复负荷量最大和抢修时间最短为目标函数,采用模拟退火算法生成最优抢修顺序,实现抢修恢复效益最大化,提高系统复电性能<sup>[24]</sup>。模拟退火算法的原理源自物理退火过程的启发,它模拟了固体材料由高温状态缓慢冷却至低温状态的过程,以此来求解优化问题。在算法的初始阶段,会选定一个解作为当前解,并设置一个相对较高的初始温度。随后,在当前温度条件下,算法会对当前解进行随机扰动,生成一个新的解,并计算新解与当前解之间的目标函数差异。依据波尔兹曼概率,算法会以一定的概率接受新解,即使新解的目标函数值不如当前解,也有机会被采纳。这一机制使得算法能够在解空间中进行广泛的搜索,有效避免陷入局部最优解。随着温度的逐步降低,算法接受较差解的概率也逐渐减小,搜索过程因此逐渐趋于稳定,并最终收敛至全局最优解或近似最优解<sup>[25]</sup>。具体流程如图2所示。

##### 4.3.1 故障抢修目标函数

当配电网遭遇大规模的故障,故障线路数量远大于抢修队伍数量时应该制定合适的故障修复策略。设定的目标函数是确保抢修过程中的总失电量达到最低。

$$\min \left[ \sum_{\forall i \in G} Y_i P_{L,i} + \sum_{g=1}^{G-1} \sum_{\forall j \in G} Y_j P_{L,j} (m_{g+1} - m_g) \right] \quad (32)$$

式子: $G$ 为故障点集合; $m_g$ 为故障节点 $g$ 修复时间。

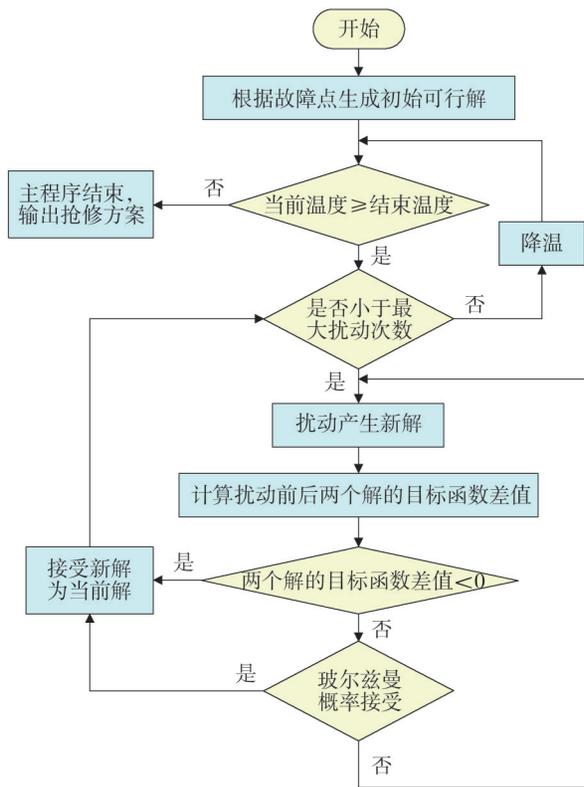


图2 模拟退火算法流程图

Fig.2 Flowchart of simulated annealing algorithm

### 4.3.2 故障抢修约束条件

#### 1) 施工队约束。

为符合实际常理,单个施工队一次只能从一个故障点出发前往另一个故障点。

$$\sum_{g=1}^G \sum_{d=1}^G o_{gd} = 1 \quad (33)$$

式子:  $o_{gd}$  表示施工队从故障点  $g$  移动至故障点  $d$ , 是为 1, 否则为 0。

#### 2) 故障抢修时间约束。

正常气象条件下的故障抢修时间由抢修小队路程时间和检修时间两部分构成,其约束可表示为

$$M_{p,h} = M_{s,h} + M_{r,h} \quad (34)$$

式中:  $M_{p,h}$ 、 $M_{s,h}$  和  $M_{r,h}$  分别为正常气象条件下的线路  $h$  修复时间、抢修队伍路程时间和检修时间。

极端灾害情况下,可认为故障线路修复时间与天气强度为正相关关系,因此,极端灾害情况下故障线路修复时间可表示为

$$M_{e,h} = K_3 M_{p,h} = K_3 (M_{s,h} + M_{r,h}) \quad (35)$$

式中:  $M_{e,h}$  为极端灾害情况下的线路  $h$  修复时间;  $K_3$  为极端天气影响因子,通过实验进行取值。

### 4.4 灾后故障抢修和配电网重构协同优化

网络重构和故障抢修都是配电网在极端灾害下提高系统复电性能的有效措施,将二者的优点结合,相互作用,协同优化。按照方法实现的时序步骤,可将流程划分为故障抢修实现和网络重构实现。在灾时网络重构后的拓扑结构基础上利用故障抢修模型得到最优故障抢修方案,完成抢修任务后对设备状态进行更新,在设备状态更新后进行网络重构实现,利用网络重构模型实现对配电网拓扑结构的更新,并检查是否还有故障线路未被修复,若仍存在故障,则重复网络重构与故障抢修协同方法。协同互动方法的实现是完成系统故障排除、节点负荷恢复的最后一环,有效提高配电网系统复电的速度,同时提升复电效率。配电网二阶段重构资源调控优化的方法流程如图3所示。

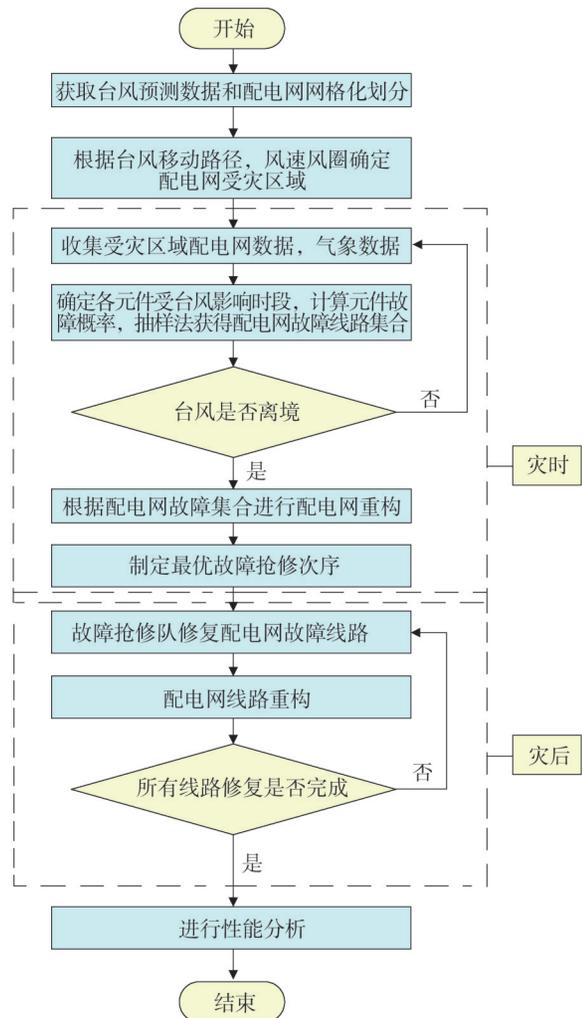


图3 配电网二阶段重构资源调控优化的方法流程图

Fig.3 Method flowchart for optimizing resource regulation and control in two-stage reconstruction of distribution network

### 5 算例

选用 IEEE 33 配电网作为算例。在 IEEE 33 配电网中,加入功率恒定的分布式电源和可控负荷,并将其划分为 27 个区域,图 4 展示了配电网的拓扑结构以及区域的详细划分。算例中 DG 种类只考虑受台风影响

较小的风力发电且假设其功率恒定。各负荷权重等级和可控负荷的划分列于表 1。配电网系统与台风影响范围的地理拓扑关系如图 5 所示,其中,黑色椭圆范围为电力系统所处位置;根据气象部门提供的历史台风数据,设定台风路径,如图中虚线所示;红色圆圈为台风十级风圈,在其范围内将遭受强风侵袭。

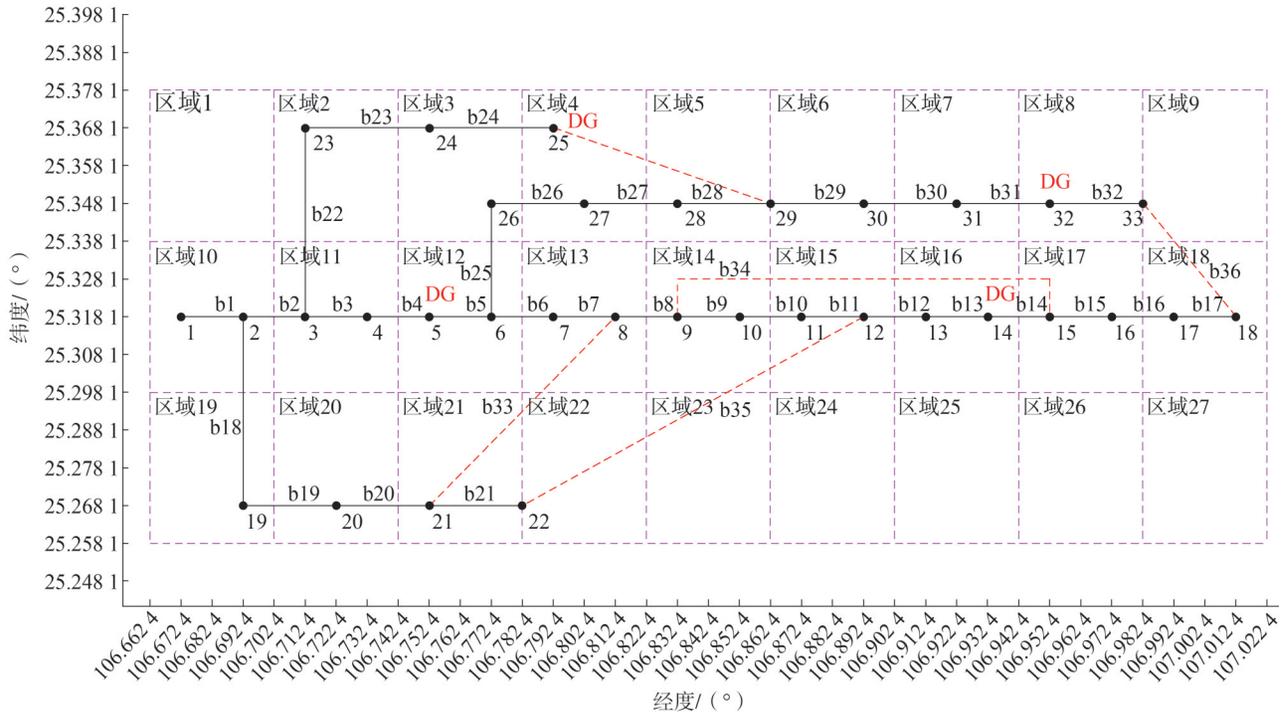


图 4 配电网拓扑结构及区域划分图

Fig.4 Topological structure and regional division diagram of distribution network

表 1 节点的负荷等级和可控负荷划分

Table 1 Load level and controllable load division of nodes

一级负荷	二级负荷	三级负荷	可控负荷	不可控负荷
	4, 6, 12,	1, 2, 5, 7, 8,		1, 2, 4, 5, 6, 7, 9, 10,
	3, 10, 15,	9, 13, 14,		11, 12, 13, 14, 16, 17,
	11, 24,	19, 21, 16, 17, 20,	3, 8, 15,	18, 19, 20, 21, 22, 23,
	31	22, 23, 25, 26, 27,	27, 33	24, 25, 26, 28, 29, 30,
	30, 33	28, 29, 32		31, 32

为验证本文提出的故障供电恢复策略方法的可行性与最优性,在相同的故障场景下,采用 3 种不同的方案来求解供电恢复策略。

方案一:使用传统的配电网故障修复策略,仅考虑在灾后进行故障抢修。

方案二:灾中时考虑配电网重构方法以恢复关

键负荷的电力供应,灾后时仍以传统的配电网故障修复策略对故障线路进行抢修。

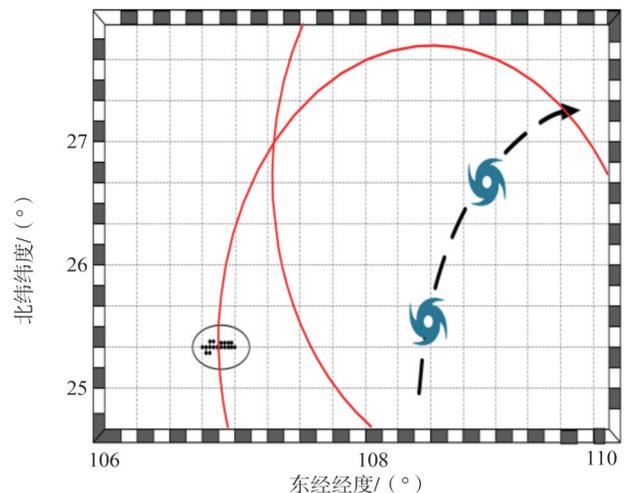


图 5 电力系统地理拓扑图

Fig.5 Geographic topology diagram of power system

方案三:灾中时考虑配电网重构方法以恢复关键负荷的电力供应,灾后时采取本文所述方法,将故障抢修与配电网重构协同优化进行灾后复电。

假设配电网在早上 10:00 遭受台风侵袭,配电网多段线路都出现断线故障(线路 b11,b12,b13,b16,b19,b23,b24,b27,b28,b34,b35)。灾害持续时间为 5h。在台风灾害离境后,方案二和方案三按策略对配电网系统立刻采取灾时配电网重构措施,尽可能地恢

复重要负荷供电。通过闭合联络线路 b33、b36、b37,完成灾时重构,恢复节点 18、节点 20、节点 21、节点 22、节点 29、节点 30 和节点 33 的部分负荷供电,同时由于 DG 参与负荷供电恢复,故增大了对 DG 的功率消纳,提高 DG 的利用率,减少弃风量。灾中适应阶段对配电网进行重构后的拓扑结构如图 6 所示,各 DG 出力量和消纳量如图 7 所示。

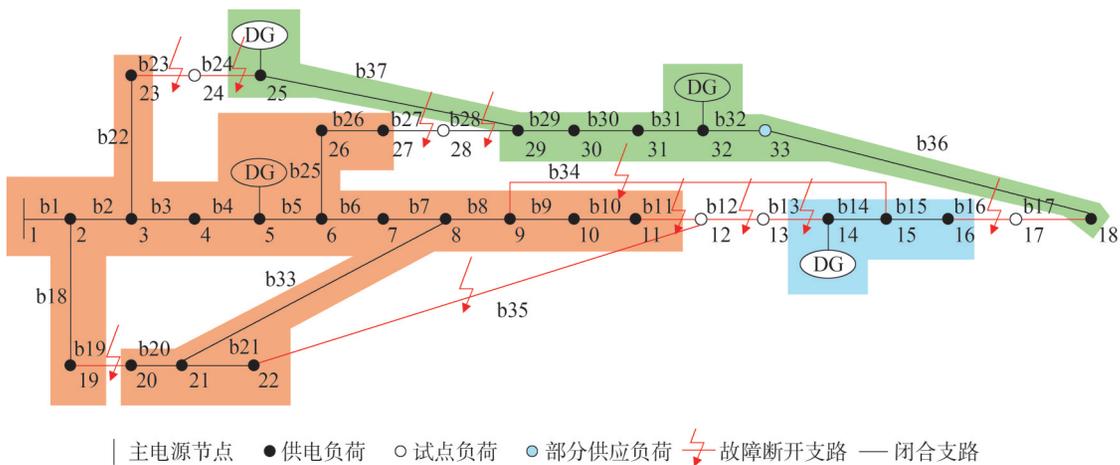


图6 配电网灾时重构拓扑结构图

Fig.6 Topological structure diagram for distribution network reconstruction during disasters

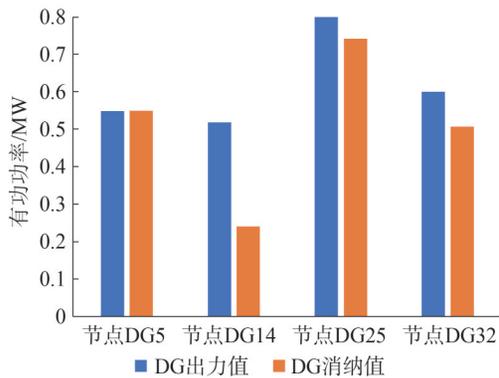


图7 各DG出力值和消纳值

Fig.7 Output and absorption values of each DG

在台风离境后 2 h 后,3 个方案均进行配电网灾后抢修阶段,本文讨论的 3 种方案均考虑只有一支抢修队队伍的情况,并设置抢修队从节点 16 处开始出发。由于方案一和方案二仅将修复的故障线路进行闭合操作,不进行整体的配电网重构操作,故优先考虑修复配电网主要线路。方案二是在重构后的拓扑结构基础上进行抢修并闭合线路,故会出现短时间的环网,由于处于灾后抢修阶段,允许环网短暂出

现。而方案三根据得到的最优故障抢修顺序对配电网故障线路进行抢修后,协同配电网重构策略,允许其对故障的联络线进行修复,结合配电网重构以最快的速度恢复所有负荷的正常供电,配电网也不会出现环网问题。方案三最优故障抢修及重构协同策略结果如表 2 所示。

表2 最优故障抢修顺序及重构过程

Table 2 Optimal fault repair sequence and reconstruction process

故障线路	故障	故障线路	故障	故障线路	故障
修复顺序	线路	修复顺序	线路	修复顺序	线路
1	线路 23	5	线路 35	9	线路 28
2	线路 24	6	线路 13	10	线路 16
3	线路 11	7	线路 27	11	线路 12
4	线路 34	8	线路 19		

为分析比较灾害下配电网恢复供电策略优越性,绘制配电网系统 3 个复电策略方案的配电网性能随故障时间变化的曲线如图 8 所示,系统复电指

标的结果如表 3 所示。

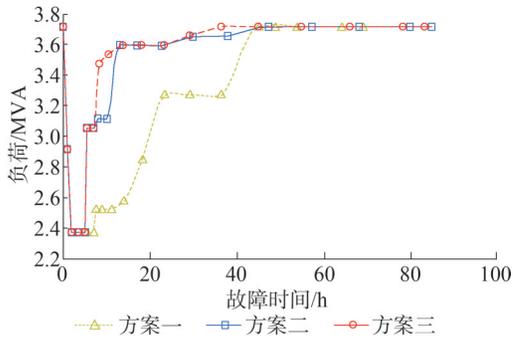


图8 各方案故障时间内系统负荷曲线图

Fig.8 System load curve during the failure time of each scheme

表3 配电网复电策略比较

Table 3 Comparison of power restoration strategies for distribution network

方案	所有负荷恢复时间/h	负荷恢复速度/(MW/h)	负荷缺供率/%
一	39.45	0.033 97	86.744 6
二	52.15	0.025 69	95.369 3
三	31.3	0.042 81	96.003 7

由图 7 曲线可以看出,在灾时降负荷运行阶段,对配电网进行网络重构,可以将受灾区域的重要负荷节点转移到非受灾区域或利用配电网中的分布式电源对重要负荷节点进行供电,不仅可以提高配电网的供电稳定性,更提高了风电消纳,减少弃风率。与方案一相较,方案二和方案三在故障恢复方面展现出更高的经济性,这一特点恰好满足了实现社会经济总价值最大化的需求。

由图 7 曲线和表 3 可以看出,在灾后故障抢修阶段,相比于方案一和方案二,方案三的负荷恢复时间最短,负荷恢复速度最快,负荷缺供率值也最大。可以在最短的时间内恢复配电网对所有负荷节点的供电,减少缺供电造成的损失。同时,方案三较方案二更加灵活,不会出现短时间的环网,从而提升了电力供应的稳定性和系统运营的经济性。

## 6 结束语

通过灾中阶段配电网重构和灾后最优故障抢修次

序方案,结合配电网动态重构,通过配电网在抢修过程中的网架重构进一步优化抢修策略,从而进一步完善了配电网的故障恢复机制。特别是在配电网遭遇强台风等极端天气导致多条线路同时断裂时,该策略能显著提高故障恢复的速度。此外,这一优化策略还确保了在灾害期间降负荷运行以及灾后故障抢修过程中,能够最大化地恢复负荷供电。

在未来的研究中,关于提升极端灾害下配电网故障恢复策略的效果,可以考虑融入应急供电车的调配策略,此外还可以深入探讨分布式电源在极端灾害下出力的不稳定性和多种不同类型的分布式电源在极端灾害下的能源互补特性。

## 参考文献

- [1] 刘柏私,谢开贵,马春雷,等.复杂中压配电网的可靠性评估分块算法[J].中国电机工程学报,2005,25(4):40-45.  
LIU Bosi,XIE Kaigui,MA Chunlei,et al.Section algorithm of reliability evaluation for complex medium voltage electrical distribution networks[J].Proceedings of the CSEE,2005,25(4):40-45.
- [2] 王鹏飞.基于综合考量的配电网供电可靠性评估[J].电气开关,2024,62(2):80-81.  
WANG Pengfei.Power supply reliability evaluation based on multi-level distribution network [J].Electric Switchgear, 2024, 62 (2) : 80-81.
- [3] 薛禹胜,肖世杰.综合防御高风险的小概率事件:对日本相继天灾引发大停电及核泄漏事件的思考[J].电力系统自动化,2011,35(8):1-11.  
XUE Yusheng, XIAO Shijie. Comprehensively defending high risk events with low probability [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(8) : 1-11.
- [4] 李家钰,秦文萍,景祥,等.台风灾害下考虑连锁故障的电力系统弹性评估[J].电力系统及其自动化学报,2023,35(1):14-22.  
LI Jiayu, QIN Wenping, JING Xiang, et al. Power system resilience assessment considering cascading failure under typhoon disaster [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(1) : 14-22.
- [5] 李扬,赵艳雷,周国良,等.台风灾害下配电网脆弱线路的多角度辨识方法[J].电子测量技术,2021,44(15):15-22.  
LI Yang, ZHAO Yanlei, ZHOU Guoliang, et al. Multi - angle identification method of vulnerable lines in distribution network under typhoon disaster [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(15) : 15-22.
- [6] 谢宇峥,章德,杨祺铭,等.台风灾害下考虑修复不确定性和V2G的弹性城市电网动态供电恢复方法[J].电网与清洁能源,2024,40(6):107-114.  
XIE Yuzheng, ZHANG De, YANG Qiming, et al. A dynamic power supply restoration method for resilient urban power grids considering repair uncertainty and V2G under typhoon disaster [J].

- Power System and Clean Energy, 2024, 40(6):107-114.
- [7] LEI S B, WANG J H, CHEN C, et al. Mobile emergency generator pre-positioning and real-time allocation for resilient response to natural disasters [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(3):2030-2041.
- [8] 王钰山, 邓晖, 王旭, 等. 考虑台风时空演变的配电网移动储能优化配置与运行策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(9):42-51. WANG Yushan, DENG Hui, WANG Xu, et al. Optimal configuration and operation strategy of mobile energy storage in distribution network considering spatial-temporal evolution of typhoon [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(9):42-51.
- [9] 李明昊, 杨祺铭, 李更丰, 等. 台风场景下基于多种分布式资源协同的弹性配电网两阶段供电恢复策略[J]. 高电压技术, 2024, 50(1):93-104. LI Minghao, YANG Qiming, LI Gengfeng, et al. Two-stage power supply restoration strategy of resilient distribution network based on coordination of multiple distributed resources in typhoon scenario [J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1):93-104.
- [10] 邢晓敏, 潘成琳, 李贻涛. 考虑孤岛与重构的配电网故障双层恢复策略[J]. 吉林电力, 2022, 50(5):4-8. XING Xiaomin, PAN Chenglin, LI Yitao. A bi-level fault recovery strategy for distribution networks considering islanding and reconfiguration [J]. Jilin Electric Power, 2022, 50(5):4-8.
- [11] 杨祺铭, 李更丰, 别朝红, 等. 台风灾害下基于V2G的城市配电网弹性提升策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(12):130-139. YANG Qiming, LI Gengfeng, BIE Zhaohong, et al. Vehicle-to-grid based resilience promotion strategy for urban distribution network under typhoon disaster [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(12):130-139.
- [12] 郑幸. 基于蒙特卡洛法的配电网可靠性评估[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [13] 杨丽君, 魏玲玲, 卢志刚, 等. 考虑可中断负荷的配电网分区动态故障恢复[J]. 电工电能新技术, 2016, 35(8):73-80. YANG Lijun, WEI Lingling, LU Zhigang, et al. Fault partition dynamic recovery strategy for distribution network considering interruptible loads [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2016, 35(8):73-80.
- [14] 李顺昕, 张姚, 岳云力, 等. 基于重构有效性和最优网架选择的配电网动态重构研究[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(7):30-37. LI Shunxin, ZHANG Yao, YUE Yunli, et al. Research on dynamic reconfiguration of distribution network based on reconstruction effectiveness and optimal network selection [J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(7):30-37.
- [15] 陈广宇, 柳慧琴, 邱文祥, 等. 基于适应度的配电网多故障抢修任务分配策略[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(11):67-74. CHEN Guangyu, LIU Huiqin, QIU Wenxiang, et al. Fitness-based task allocation strategy for multi-fault repair of distribution system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(11):67-74.
- [16] 李明轩, 魏韡, 许寅, 等. 基于预演算法的灾后配电网应急抢修决策优化[J]. 电力建设, 2023, 44(12):85-94. LI Mingxuan, WEI (WeiXue), XU Yin, et al. Rollout algorithm-based post-disaster distribution system emergency repair optimization [J]. Electric Power Construction, 2023, 44(12):85-94.
- [17] 胡邦辉, 谭言科, 王举. 热带气旋海面最大风速半径的计算[J]. 应用气象学报, 2004, 15(4):427-435. HU Banghui, TAN Yanke, WANG Ju. Calculation of maximum wind velocity radius of tropical cyclone on sea surface [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 2004, 15(4):427-435.
- [18] 王冬辉. 极端台风下电网弹性评估时域仿真方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.
- [19] 吴勇军, 薛禹胜, 谢云云, 等. 台风及暴雨对电网故障率的时空影响[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(2):20-29. WU Yongjun, XUE Yusheng, XIE Yunyun, et al. Space-time impact of typhoon and rainstorm on power grid fault probability [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(2):20-29.
- [20] 王文媛. 基于弹性理论和复杂网络理论的电网关键环节辨识方法[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
- [21] 兰颖. 考虑台风影响的配电网可靠性评估和规划[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- [22] 刘健辰, 刘山林. 基于二阶锥松弛和Big-M法的配电网分布式电源优化配置[J]. 电网技术, 2018, 42(8):2604-2611. LIU Jianchen, LIU Shanlin. Optimal distributed generation allocation in distribution network based on second order conic relaxation and big-M method [J]. Power System Technology, 2018, 42(8):2604-2611.
- [23] 刘一兵, 吴文传, 张伯明, 等. 基于混合整数二阶锥规划的主动配电网有功-无功协调多时段优化运行[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16):2575-2583. LIU Yibing, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. A mixed integer second-order cone programming based active and reactive power coordinated multi-period optimization for active distribution network [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16):2575-2583.
- [24] 刘莉, 陈学锋, 翟登辉. 智能配电网故障恢复的现状与展望[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(13):148-154. LIU Li, CHEN Xuefeng, ZHAI Denghui. Status and prospect of service restoration in smart distribution network [J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(13):148-154.
- [25] 张滢. 调度优化配网故障抢修方法分析研究[D]. 厦门: 厦门理工学院, 2017.

收稿日期: 2024-06-08

修回日期: 2024-10-12

作者简介:

吴龙腾(1982), 男, 高级工程师, 从事电网运行调度控制相关工作;

郭乾(1986), 男, 硕士, 工程师, 从事电网运行调度控制相关工作;

吴杰康(1965), 通信作者(wujiekang@163.com), 男, 教授, 工学博士, 博士生导师, 研究方向为电力系统运行与控制等;

陈冠熹(2001), 男, 硕士在读, 研究方向为电力系统规划与运行等。

(责任编辑 姜婷婷)

# 基于时频域多特征和优化KELM的电能质量扰动检测

徐琳<sup>1\*</sup>, 范松海<sup>1</sup>, 赵淳<sup>2,3</sup>, 隗震<sup>2,3</sup>, 刘畅<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. 南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院有限公司), 江苏 南京 211000;

3. 国网电科院武汉南瑞有限责任公司, 湖北 武汉 430079)

**摘要:** 电能质量扰动的准确分类是改善和治理电能质量的前提。为提高电能质量快速检测的准确性, 提出一种基于时频多特征和改进核极端学习机(kernel extreme learning machine, KELM)的电能质量扰动(power quality disturbance, PQD)分类方法。该方法首先利用小波变换和S变换提取各电能质量扰动信号的特征量, 然后根据提取的特征量构造具有分类规则的KELM模型, 并使用混沌粒子群优化(chaotic particle swarm optimization, CPSO)对KELM的参数进行自适应优化。实例仿真结果和对比分析表明, 该方法能有效识别7种常见的单一扰动信号和10种复合扰动信号, 并且抗噪声能力更强, 分类精度高于KELM和PSO-KELM模型。该方法为电能质量的改善和治理提供了新的思路和方法。

**关键词:** 电能质量扰动分类; 时频多特征; 混沌粒子群优化; 核极限学习机

中图分类号: TM93

文献标志码: A

文章编号: 1007-9904(2025)03-0059-09

## Power Quality Disturbance Detection Based on Time-frequency Domain Multi-features and Optimized KELM

XU Lin<sup>1\*</sup>, FAN Songhai<sup>1</sup>, ZHAO Chun<sup>2,3</sup>, Wei ZHEN<sup>2,3</sup>, LIU Chang<sup>1</sup>

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

2. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211000, China;

3. Wuhan NARI Limited Liability Company, State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** Accurate classification of power quality disturbances is the premise for improving and controlling power quality. In order to improve the accuracy of rapid detection of power quality, this paper proposes a power quality disturbance (PQD) classification method based on time-frequency multi-features and improved kernel extreme learning machine (KELM). This method first uses wavelet transform and S transform to extract the feature quantities of each power quality disturbance signal. Then a KELM model with classification rules is constructed based on the extracted feature quantities, and chaotic particle swarm optimization (CPSO) is used to adaptively optimize the parameters of KELM. Example simulation results and comparative analysis show that this method can effectively identify seven kinds of common single disturbance signals and ten kinds of compound disturbance signals. The proposed method has stronger anti-noise ability, and its classification accuracy is higher than the KELM and PSO-KELM models, providing new ideas for the improvement and management of power quality.

**Keywords:** classification of power quality disturbances; time-frequency multi-features; chaotic particle swarm optimization; kernel extreme learning machine

## 0 引言

随着新能源、电力电子设备等非传统主体机组接入

基金项目: 国家电网有限公司科技项目“农网台区末端融合感知、智能诊断及服务提升技术研究及应用”(52199922000M)。

Science and Technology Project of State Grid Corporation of China "Research and Application of Fusion Perception, Intelligent Diagnosis and Service Improvement Technology at the Terminal of Rural Grid Stations"(52199922000M)。

电网, 电能质量扰动(power quality disturbance, PQD)问题日益突显<sup>[1-2]</sup>。PQD的准确识别对PQD定位、扰动数据相关性分析以及电压暂降综合评估至关重要<sup>[3]</sup>。

PQD分类主要涉及特征提取和分类识别两个过程。常见的特征提取方法如快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)、短时傅里叶变换(short time Fourier transform, STFT)、小波变换、S变换等。其

中,FFT是一种从时域到频域的转换方法,具有正交和完备的特征。然而,基于此方法的信号频率分析是从频率整体构成的角度进行的,无法分析信号的局部频率特性<sup>[4]</sup>。STFT能够分析信号的局部频谱特征,但其窗函数是固定的,没有自适应能力<sup>[5]</sup>。小波变换具有多尺度时频分辨率的能力,可用于信号的局部分析,但信号分析容易受到小波基和分解层的影响<sup>[6]</sup>。S变换其理论借鉴了小波变换和STFT,不仅克服了两种基础方法的缺点,而且能够分析信号中某一频率分量的幅值随时间的变化,其窗函数随频率变化,频率分辨率较高,但计算量大<sup>[7]</sup>。

随着科学技术的迅猛发展,机器学习技术在PQD分类研究中得到了广泛应用<sup>[8]</sup>。尽管人工神经网络(artificial neural network, ANN)<sup>[9]</sup>、支持向量机(support vector machine, SVM)<sup>[10]</sup>等常见方法在实践中取得了一定效果,但也存在着一些不足之处<sup>[11-12]</sup>。例如,ANN需要大量参数进行训练,且其训练收敛速度较慢。而基于SVM的分类方法通常产生硬分割边界,核函数的选择也颇具挑战,特别是在面对复合PQD时易发生误判<sup>[13]</sup>。此外,基于梯度下降学习的单隐层前馈神经网络算法容易陷入局部极值,需要大量样本训练才能取得良好的分类效果<sup>[14]</sup>。另外,神经网络的训练过程可能会导致过拟合,从而导致测试结果不尽如人意<sup>[15]</sup>。

基于上述研究背景,通过分析7种单一电能质量扰动和10种复合扰动,将小波变换和S变换相结合,在时域和频域提取更丰富的特征量。根据提取的特征量,建立电能质量扰动信号的分类规则。随后,提出一种优化核极限学习机(kernel extreme learning machine, KELM)的电能质量快速分类方法。并使用混沌粒子群优化(chaotic particle swarm optimization, CPSO)对KELM的参数进行自适应优化。最后,通过仿真分析和对比实验,验证该算法的分类准确率。相较于传统PQD检测分类方法,本文提出的模型具有更高的准确率,平均高出对比方法4%~16%,具有广阔的应用前景。

## 1 电能质量扰动检测方法

### 1.1 基于小波和S变换的特征提取

电能质量扰动通常表现为非线性突变信号,如

瞬态振荡和谐波。为有效分析这些信号,本文选用db4小波基,将电能质量扰动信号分解为多个层级,使主要频率成分集中在小波频带的中心,从而最大限度地减少频谱泄漏,提高分析精度和可靠性。各分解层的小波能量 $E_{Dy}$ 可表示为<sup>[16]</sup>

$$E_{Dy} = \sum_{k=1}^N d_{cy}(k)^2 \quad (1)$$

式中: $d_{cy}(k)$ 为第 $\gamma$ 层的第 $k$ 个细节系数; $N$ 为第 $\gamma$ 层的细节系数个数。

S变换通过动态调整窗函数的高度和宽度随着频率的变化,融合了小波变换和STFT的优点。对于连续S变换可定义为<sup>[17]</sup>:

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} r(t) g(\tau - t, f) e^{-j2\pi ft} dt \quad (2)$$

$$g(\tau, f) = |f| e^{-\pi t^2 f^2} \quad (3)$$

式中: $r(t)$ 为扰动信号, $g(\tau - t, f)$ 为高斯窗口函数。在实际应用中,信号是通过采样获得的。

设采样信号为 $h[kT]$  ( $k=0, 1, 2, \dots, M-1$ ),其中 $M$ 为采样点的数量, $T$ 为采样周期,则离散S变换的表达式为

$$\begin{cases} S[KT, \frac{n}{MT}] = \\ \sum_{m=0}^{M-1} H(\frac{m+n}{MT}) G(m, n) e^{j\frac{2\pi mk}{M}}, n \neq 0 \\ S[KT, 0] = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^{M-1} H(\frac{m}{MT}), n = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $j$ 为虚数单位; $m$ 为FFT的频率分量; $n$ 为离散时刻下的窗口值。 $H(n/MT)$ 和 $G(m, n)$ 分别是信号 $H[kT]$ 和高斯窗口的FFT,并且如式(5)所示。

$$\begin{cases} H[kT] = \frac{1}{M} \sum_{k=0}^{M-1} h[kT] e^{j\frac{2\pi mk}{M}} \\ G(m, n) = e^{-\frac{2\pi^2 m^2}{n^2}} \end{cases} \quad (5)$$

S变换产生的二维复矩阵可用于构建模型,形成模矩阵。模矩阵的行向量展示幅值变化,而列向量则显示了采样时刻幅值随频率的变化,能够全面反映电能信号的时频特性。当信号存在扰动时,这些扰动将在模矩阵中显现。进一步地,通过分析时频矩阵,能够检测出扰动的幅值和频率突变。

### 1.2 核极限学习机

极限学习机是一种单隐层前馈神经网络,通过用随机生成的权值和阈值代替网络训练过程中的迭代过程,减少了参数设置,提高了算法的训练速度。

同时,也避免了通过梯度下降学习的单层隐层前馈神经网络算法容易陷入局部极值的问题。极限学习机结构模型如图1所示。

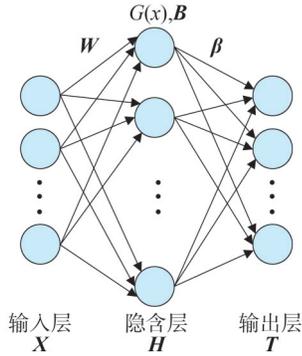


图1 极限学习机模型结构  
Fig.1 Structure of ELM model

图1中, $W$ 为连接权重矩阵, $B$ 为阈值矩阵, $G$ 为非线性激活函数, $\beta$ 为输出链路的权重矩阵, $X$ 为输入矩阵, $H$ 为隐藏层矩阵, $T$ 为输出期望值矩阵。极限学习机的目的是通过选择适当的参数,使实际输出尽可能接近预期值。该模型可以表示为<sup>[18]</sup>

$$f(X) = h(X)\beta \quad (6)$$

式中: $f(X)$ 为输出结果; $h(X)$ 为隐藏层映射矩阵。

计算过程如式(7)所示。

$$\beta = H^T(HH^T + \frac{I}{\lambda})^{-1}T \quad (7)$$

式中: $I$ 为单位对角矩阵; $\lambda$ 为正则化系数。

为避免极限学习机权值和阈值的随机生成,导致模型的泛化能力不稳定。本文通过引入核函数 $K(\mu, v)$ 作为隐层输出矩阵<sup>[19]</sup>,从而保证算法的计算稳定性,其计算过程如式(8)所示。

$$K(\mu, v) = \exp\left(-\frac{\|\mu - v\|^2}{2s^2}\right) \quad (8)$$

式中: $s$ 为高斯径向基函数(radial basis function, RBF)的宽度参数; $v$ 为RBF的中心向量; $\mu$ 为输入向量。

当RBF的中心向量取0.5, $s$ 分别取0.1、0.3、0.5和0.7时,得到图2所示的径向基核函数特性曲线。从图2可以看出,靠近测试点的样本数据更容易受到径向基核函数的影响,并且影响程度随着核函数半径的减小而增加,这表明其在提取样本的局部特

征方面非常有效。

此外,内核函数的引入使得KELM算法对 $(\lambda, s)$ 的设置极其敏感<sup>[20]</sup>。同时,使KELM算法能够实现最佳泛化能力的 $(\lambda, s)$ 范围非常小<sup>[21]</sup>。为此,本文将混沌理论与PSO相结合,从而有效避免KELM算法陷入局部最优的问题。

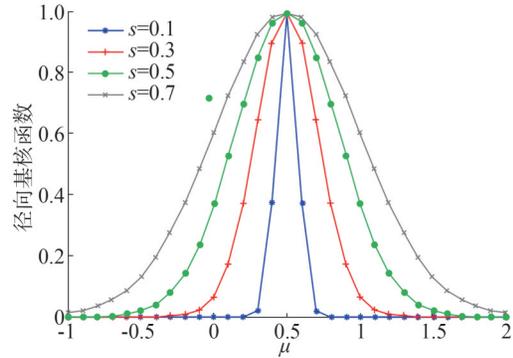


图2 径向基核函数特性曲线图

Fig.2 Radial basis kernel function characteristic curve

### 1.3 混沌粒子群优化

传统PSO在处理离散优化问题时,易受限于局部极值,并随着进化迭代,收敛速度和精度会减弱<sup>[22]</sup>。为此,本文引入混沌搜索在给定范围内探索每个可能的状态,从而避免PSO陷入局部最优。具体步骤简述如下<sup>[23]</sup>。

1)引入惯性权重因子 $a$ ,则PSO速度公式可表述为

$$V_{i,d}^{l+1} = aV_{i,d}^l + c_1r_1(p_{i,d} - x_{i,d}^l) + c_2r_2(g_i - x_{i,d}^l) \quad (9)$$

式中: $V_{i,d}^{l+1}$ 为粒子 $i$ 在维度 $d$ 上的第 $l+1$ 代的速度; $p_{i,d}$ 和 $g_i$ 分别为粒子 $i$ 在维度 $d$ 上的PSO局部和全局最优位置; $l$ 为当前代数; $c_1$ 、 $c_2$ 为加速常数; $x_{i,d}^l$ 为粒子 $i$ 当前所处的位置; $r_1$ 、 $r_2$ 为 $(0,1)$ 中的随机数。

2)基于Tent映射探索每个可能的状态,其数学表达如式(10)所示。

$$z_{n+1} = L(1 - 2|z_n - 0.5|) \quad (10)$$

式中: $L$ 为控制参数, $z_n \in [0,1]$ 。当 $L=1$ 时,0和1之间的Tent映射表现出遍历性和完全混沌动力学。

粒子 $i$ 生成混沌点序列的步骤如下。

1)将粒子位置的每个维度映射到 $(0,1)$ 的混沌

变量  $z_{i,d}^l$ , 计算过程如式(11)所示。

$$z_{i,d}^l = \frac{x_{i,d}^l - x_{i,\min}}{x_{i,\max} - x_{i,\min}}, i = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

式中:  $x_{i,\max}$  和  $x_{i,\min}$  分别为第  $i$  维变量的最大值和最小值; 第  $d$  维变量  $x_{i,d}$  的域是  $(x_{d,\min}, x_{d,\max})$ 。

2) 对  $z_{i,d}^l$  使用 Tent 映射的迭代, 以生成混沌序列并确定下一代混沌变量  $z_{i,d}^{l+1}$ 。

3) 将混沌序列中的点映射回原始优化空间, 计算过程如式(12)所示。

$$x_{i,d}^{l+1} = x_{\min} + z_{i,d}^{l+1}(x_{\max} - x_{\min}) \quad (12)$$

4) 混沌点被列为  $\mathbf{x}_i^l = (x_{i1}^l, x_{i2}^l, \dots, x_{iD}^l)$ ,  $D$  为混沌点序列维度。

## 2 电能质量扰动识别

### 2.1 电能质量扰动信号

本文参考标准 IEEE Std1159—2019, 在 MATLAB 仿真软件中生成 PQD 信号<sup>[24]</sup>。采样长度设置为 10 个周期, 采样频率为 6.4 kHz, 采样点个数为 1 024。

理想情况下, 标准的电能质量扰动信号指幅值与频率恒定的正弦信号, 表示系统电压未受干扰的正常状况, 其数学表达式为

$$x(t) = \sin(\omega t + \varphi) \quad (13)$$

式中:  $\omega = 2\pi f$ ,  $\varphi \in (-\pi, \pi)$ ,  $f$  为频率。

PQD 可分为单一扰动和复合扰动两种类型。复合扰动是由多个单一扰动信号组合而成。常见单一扰动信号波形如图 3 所示。主要涉及: 中断、暂降、暂升、振荡、脉冲、闪变和谐波。

单一 PQD 信号数学模型及参数范围如表 1 所示。其中,  $t$  为时间,  $f_{\text{dm}}$  为信号基频,  $\varphi_{\text{dm}}$  为基波相位,  $\varepsilon(t)$  为单位阶跃函数,  $t_1$  和  $t_2$  为分别为扰动的开始和结束时间。此外,  $k$ ,  $\varphi$  和  $\rho$  为扰动参数。

在实际电网中, 复合扰动事件是由各种单一扰动事件混合堆叠而成, 其结构会更加复杂, 同时所包含的更多特征信息也会增大特征提取的难度。本文基于 7 种典型的单一扰动信号, 耦合建立了 10 种复合扰动, 具体类型及对应编码如表 2 所示。

### 2.2 7种单一扰动分类实验与分析

根据 IEEE 关于电能质量扰动的相关标准及其产生原理, 根据每个单一干扰信号在时间、幅度和频率上的差异, 提取出以下特征<sup>[25]</sup>。

1) 时间最大振幅矢量的最大值  $F_{\max}$ 、最小值  $F_{\min}$  和标准差  $F_{\sigma}$  可计算为:

$$F_{\max} = [V_{l-A}(kT)]_{\max} \quad (14)$$

$$F_{\min} = [V_{l-A}(kT)]_{\min} \quad (15)$$

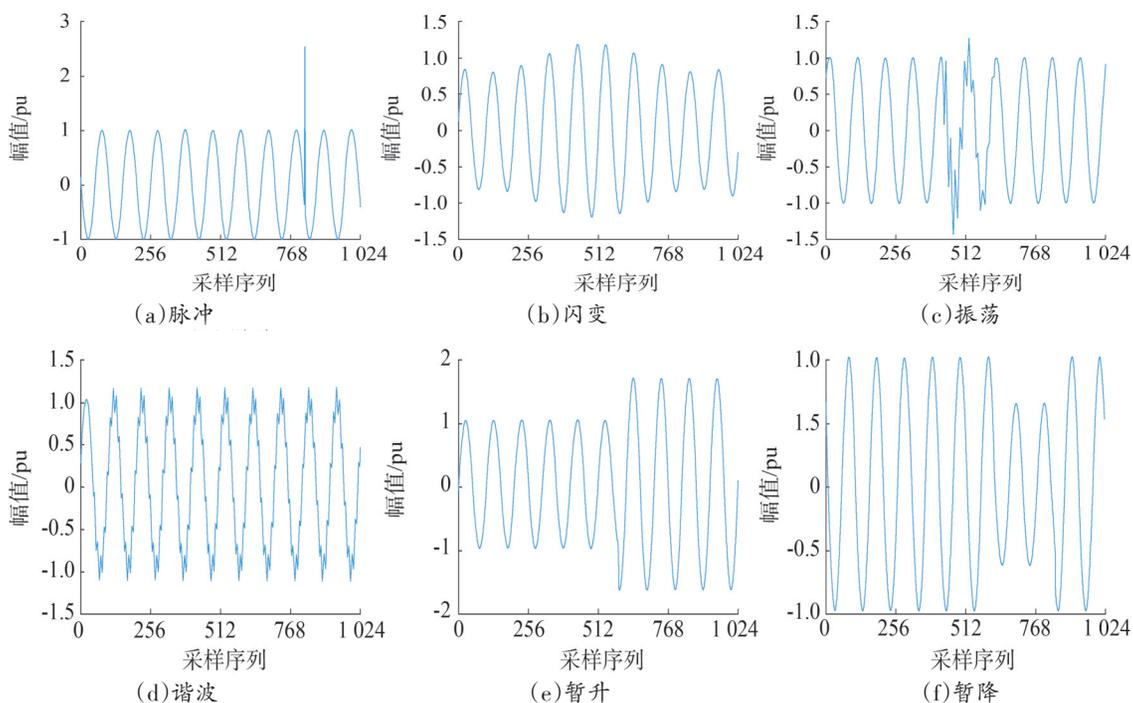


图3 常见单一电能质量扰动信号波形

Fig.3 Common single power quality disturbance signal waveform

表1 单一电能质量扰动信号的数学模型

Table 1 Mathematical model of single power quality disturbance signal

PQDs	数学方程式	参数
中断	$x(t) = \{1 - k[\varepsilon(t_1) - \varepsilon(t_2)]\} \sin(2\pi f_{\text{fdm}} t + \varphi_{\text{fdm}})$	$k \in (0.9, 1); t_2 - t_1 \in (0.5T, 50T)$
暂降	$x(t) = \{1 - k[\varepsilon(t_1) - \varepsilon(t_2)]\} \sin(2\pi f_{\text{fdm}} t + \varphi_{\text{fdm}})$	$a \in (0.1, 0.9); t_2 - t_1 \in (0.5T, 50T)$
暂升	$x(t) = \{1 + k[\varepsilon(t_1) - \varepsilon(t_2)]\} \sin(2\pi f_{\text{fdm}} t + \varphi_{\text{fdm}})$	
振荡	$x(t) = \sin(2\pi f_{\text{fdm}} t + \varphi_{\text{fdm}}) + k \cdot \sin(2\pi f t + \varphi) \cdot e^{-\rho(t-t_1)} \cdot [\varepsilon(t_2) - \varepsilon(t_1)]$	$k \in (0.1, 0.8); f \in [300, 400]; \varphi \in [0, 2\pi]; \rho \in [25, 125]; t_2 - t_1 \in (0.5T, 3T)$
脉冲	$x(t) = \sin(2\pi f_{\text{fdm}} t + \varphi_{\text{fdm}}) + k[\varepsilon(t_2) - \varepsilon(t_1)]$	$k \in (0.5, 3); t_2 - t_1 \in (1 \text{ ms}, 3 \text{ ms})$
闪变	$x(t) = [1 + k \cdot \sin(2\pi f + \varphi)] \cdot \sin(2\pi f_{\text{fdm}} t + \varphi_{\text{fdm}})$	$k \in (0.1, 0.2); f \in (0.05, 35); \varphi \in [0, 2\pi]$
谐波	$x(t) = \sin(2\pi f_{\text{fdm}} t + \varphi_{\text{fdm}}) + k \cdot \sin(2\pi f t + \varphi) [\varepsilon(t_2) - \varepsilon(t_1)]$	$k \in (0.05, 0.15); f \in (0, 25 \cdot f_{\text{fdm}}]; \varphi \in [0, 2\pi]; t_2 - t_1 \in (3T, 3T + T)$

$$F_{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} [V_{1r-A}(kT) - \bar{V}_1]^2} \quad (16)$$

式中:  $V_{1r-A}$  为时间的最大振幅矢量,  $k=0, 1, 2, \dots, N-1$ ;  $N$  是采样点;  $\bar{V}_1$  为最大振幅矢量的平均值。

表2 PQDs的类型及对应编码

Table 2 Types and corresponding codes of PQDs

扰动类型	标签	PQDs	状态编码
单一扰动	C0	正常	(0,0,0,0,0,0,0)
	C1	中断	(0,0,0,0,0,0,1)
	C2	暂降	(0,0,0,0,0,1,0)
	C3	暂升	(0,0,0,0,1,0,0)
	C4	振荡	(0,0,0,1,0,0,0)
	C5	脉冲	(0,0,1,0,0,0,0)
	C6	闪变	(0,1,0,0,0,0,0)
复合扰动	C7	谐波	(1,0,0,0,0,0,0)
	C8	谐波+暂升	(1,0,0,0,1,0,0)
	C9	谐波+暂降	(1,0,0,0,0,1,0)
	C10	谐波+中断	(1,0,0,0,0,0,1)
	C11	谐波+闪变	(1,1,0,0,0,0,0)
	C12	暂降+振荡	(0,0,0,1,0,1,0)
	C13	暂升+振荡	(0,0,0,1,1,0,0)
	C14	中断+振荡	(0,0,0,1,0,0,1)
	C15	谐波+振荡+暂升	(1,0,0,1,1,0,0)
	C16	谐波+振荡+暂降	(1,0,0,1,0,1,0)
	C17	谐波+振荡+中断	(1,0,0,1,0,0,1)

2) 频段内最大频率幅值矢量的均值  $\bar{F}$  计算为

$$\bar{F} = \frac{f_0}{\Delta f} \sum_{f_{\min}}^{f_{\max}} [V_{f-\max A}(f)] \quad (17)$$

式中:  $f_0$  为频率分辨率;  $\Delta f$  为频率范围;  $V_{f-\max A}(f)$  为频段内最大频率幅值矢量;  $f_{\max}, f_{\min}$  分别为频率最大值和最小值。

3) 振幅由小到大或由大到小的变化被认为是扰动信号。

采用小波变换对 PQDs 信号进行多尺度分解, 同时利用各干扰信号分解后小波系数的差异表示信号的特征量。

7个类型的扰动小波能量分布如图4所示。可以看出, 各 PQDs 对应的小波能量主要集中在第6层和第7层。随后, 将提取的特征量用于训练分类器模型。

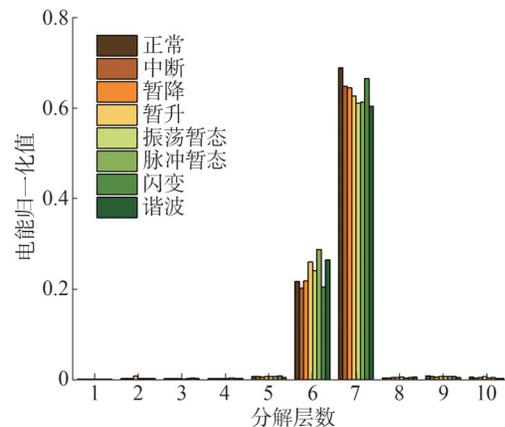


图4 单一PQD信号的小波能量分布

Fig.4 Wavelet energy distribution of single PQD signal

本文共使用了350组电能质量单一扰动的样本数据, 每种扰动的样本数量均为50组。其中, 样本数

据中的280个样本集用于训练交叉验证,70组样本用于测试。为了验证所设计算法的有效性,使用KELM算法、PSO-KELM算法和CPSO-KELM方法对180组样本数据进行了训练和验证测试。KELM和ELM模型选取RBF作为核函数,隐层节点数经过CPSO算法寻优设定为32。分类结果如图5—图7所示。

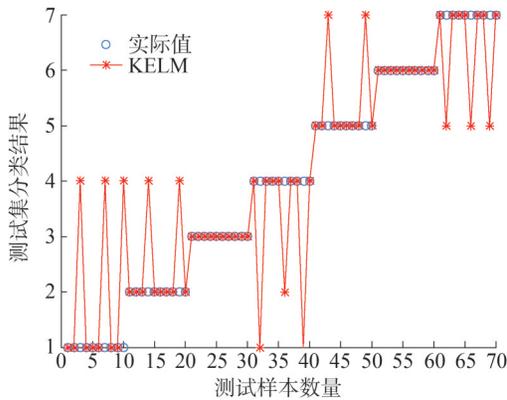


图5 KELM方法的分类结果  
Fig.5 Classification results of KELM method

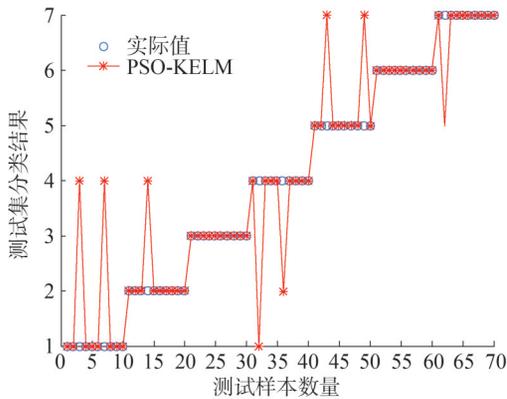


图6 PSO-KELM方法的分类结果  
Fig.6 Classification results of PSO-KELM method

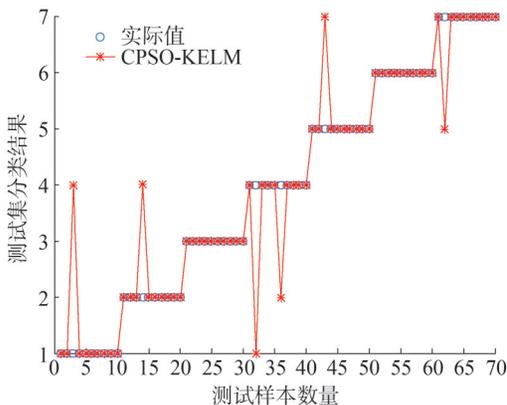


图7 CPSO-KELM方法的分类结果  
Fig.7 Classification results of CPSO-KELM method

同时选用精确率和 $F_1$ 分数评价三种模型的测试集分类结果。公式如下:

$$P = \frac{P_T}{P_T + P_F} \times 100\% \quad (18)$$

$$F_1 = 2 \times \frac{PR}{P + R} \quad (19)$$

式中: $P$ 为精确率; $P_T$ 为真正例; $P_F$ 为假正例; $R$ 为召回率。

在图5—图7中,蓝色的“o”表示实际分类输出结果,红色的“\*”表示每个算法对应的预测输出结果。结果表明,70组测试样本数据,KELM算法共有13组误差,其准确率约为81.429%, $F_1$ 为1.629。PSO-KELM算法有8组误差,其准确率约为88.571%, $F_1$ 为1.771。本文提出的CPSO-KELM算法的错误率最小,只有6组错误,其准确率约为91.429%, $F_1$ 为1.829,在3种算法中准确率最高。

为进一步验证本文所以方法针对PQD中单一扰动分类的优势,通过建立决策树(decision tree, DT)和K近邻(K nearest neighbor, KNN)两种典型分类模型进行对比试验。同时利用网格搜索确定两种对比模型的参数设置。在DT模型中,使用基尼不纯度作为准则,最大深度设置为7,最小分裂样本数为3,最小叶子样本数为2。对于KNN模型,邻居数(K值)设置为5,度量方式选用曼哈顿距离,权重函数采用距离加权。

图8显示了3种模型对应的(receiver operating characteristic, ROC)曲线。通常理想的模型其ROC曲线应尽量靠近左上角,即真阳性率接近1而假阳性率接近0。从图8中可以看出,DT和KNN模型距离无识别率线(对角线)较近,其对应的AUC值较低。对比之下,CPSO-KELM方法的曲线均远高于对角线,在并且曲线稳定后AUC值能保持在0.90以上。由此可见,本文所提的CPSO-KELM模型在处理PQD单一扰动分类问题上具有显著优势。

### 2.3 10种复合扰动分类实验与分析

针对复合扰动分类研究,本文采用叠加方法,将单一扰动信号按照表2中定义的组合方式进行相加,形成复合扰动的波形样本。实验数据集规模与前文单一扰动实验相同。

在复合扰动的分类研究中,基于从单一PQD信号中提取的各频带能量分布特征,建立CPSO-KELM分类模型,用于将复合扰动信号分为不同类别。同时考虑到实际环境中的噪声问题,本文将高斯白噪

声添加到干扰数据集中,以验证本文算法的抗噪声性能。构建信噪比为 20 dB、30 dB、40 dB 和 50 dB 的噪声环境测试集,仿真结果如表 3 所示。

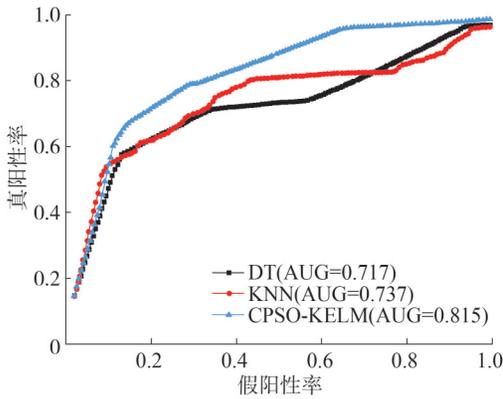


图8 3种模型ROC曲线对比图

Fig.8 Comparison of ROC curves of three models

表3 不同信噪比下CPSO-KELM模型的识别准确率  
Table 3 Recognition accuracy of CPSO-KELM model under different signal-to-noise ratios 单位:%

标签	无噪声	20 dB	30 dB	40 dB	50 dB
C8	100	96.01	98.17	99.56	100
C9	100	95.02	99.04	99.17	99.68
C10	98.67	96.01	97.38	97.69	98.52
C11	99.43	96.42	97.65	98.74	98.88
C12	100	95.19	99.77	99.87	100
C13	99.02	95.96	98.52	98.69	98.86
C14	99.71	96.04	98.24	99.44	99.59
C15	99.34	94.05	97.63	99.06	99.19
C16	99.65	94.12	98.77	99.05	99.32
C17	99.61	95.16	97.59	98.89	99.44
平均值	99.69	95.68	98.48	99.26	99.54

从表 3 可以看出,在 20 dB 强噪声环境中,CPSO-KELM 模型的分类识别准确率能够保持在 95% 以上。20 dB 环境下对应的混淆矩阵如图 9 所示。图 9 中每行代表实际类,每列代表预测类。对角线上的值表示正确分类的样本数,非对角线上的值表示错误分类的样本数。

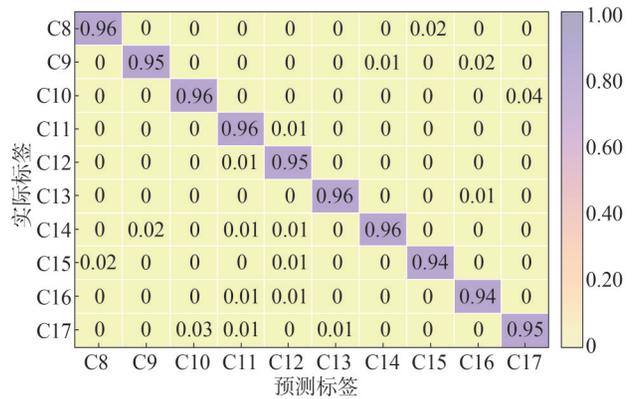


图9 CPSO-KELM模型分类的混淆矩阵

Fig.9 Confusion matrix of CPSO-KELM model classification

由图 9 可知,对角线上大部分值接近 0.95 或更高,表明模型在 20dB 强噪声环境下能够准确分类大部分复合扰动信号。错误分类的样本分布较为分散,表明模型在噪声环境下仍能保持较好的分类鲁棒性。因此,本文所提模型不仅能够在 20 dB 强噪声环境中保持 95% 以上的分类准确率,而且能够有效区分不同类型的复合扰动信号,验证了该方法的有效性和抗噪声能力。

最后,为验证本文提出的算法在 PQD 识别方面的优越性,选择 PQD 分类常用的 BPNN、SVM 和 ELM 作为对比模型进行实验。同时,为了保证比较实验的公平性,采用 CPSO 算法对 SVM 模型和 BPNN 的参数进行了优化。其中,SVM 算法需要优化的参数主要包括核函数和罚因子;BPNN 需要优化的参数主要针对隐藏层神经元数量和结构。

实验选择验证集中分类精度最高的参数进行设置。SVM 模型的参数设置如下:核参数为 28.63,惩罚因子为 1.5。BPNN 训练次数设置为 100,隐藏层中的神经元数量为 10,输出神经元数量为 9。输入和输出传递函数都使用 sigmoid 函数。各模型识别不同信噪比下的 PQD 信号的精度如表 4 所示。

表4 分类精度与现有方法的比较

Table 4 Comparison of classification accuracy

方法	with existing methods					平均 值
	无噪声	20 dB	30 dB	40 dB	50 dB	
BPNN	86.31	74.21	80.22	82.14	86.13	81.80
SVM	91.73	86.14	88.12	90.96	91.49	89.69
ELM	94.76	91.51	93.01	93.79	94.69	93.55
KELM	99.69	95.68	98.48	99.26	99.54	98.53

从表5中的数据可以看出,提出的方法具有较高的相对识别精度,平均识别精度可达98.53%。与目前常用的故障识别方法相比,平均准确率高出4~16个百分点。证明提出的方法能够有效地处理复杂的特征数据,并且所提出的模型不依赖专家经验设置阈值,仍然保证了高精度。可见,本文提出的故障识别方法能够更好地捕捉异常数据,具有较强的工程实用价值。

### 3 结束语

针对不同类型电能质量扰动辨识,提出一种结合时频域多特征分析和优化KELM的PQDs分类方法。该方法通过结合小波变换和S变换的优点,提取7个单一扰动的时频域特征值。随后,根据提取的特征量,利用CPSO优化的KELM模型进行PQDs分类。测试结果表明,本文所提出的方法可以有效分辨7种单一扰动信号和10种复合扰动信号。并且与BPNN、SVM、ELM的分类结果相比,本文提出的分类方法具有更高的精度,识别平均准确率高出对比方法4~16个百分点。

### 参考文献

- [1] 王华佳,张岩,于丹文,等.储能电站接入电网电能质量评估分析[J].山东电力技术,2022,49(3):1-6.  
WANG Huajia, ZHANG Yan, YU Danwen, et al. Evaluation and analysis of power quality of power energy storage station connected to power grid[J]. Shandong Electric Power, 2022, 49(3): 1-6.
- [2] 郭祥富,张旭,刘书铭,等.计及动态相关性的配电网稳态电能质量智能评价方法[J].浙江电力,2024,43(12):28-37.  
GUO Xiangfu, ZHANG Xu, LIU Shuming, et al. An intelligent evaluation method for steady-state power quality in distribution networks incorporating dynamic correlations[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(12): 28-37.
- [3] 李玉超,高经国,张秀华,等.暂态电能质量对电能计量的影响研究[J].山东电力技术,2019,46(2):1-5.  
LI Yuchao, GAO Jingguo, ZHANG Xiuhua, et al. Study on the influence of transient power quality to electric energy metering[J]. Shandong Electric Power, 2019, 46(2): 1-5.
- [4] 张逸,刘必杰,林才华,等.基于负荷等值阻抗参数的谐波责任划分方法[J].高电压技术,2023,49(8):3487-3501.  
ZHANG Yi, LIU Bijie, LIN Caihua, et al. Harmonic responsibility allocation method based on load equivalent impedance parameters [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(8): 3487-3501.
- [5] 黄建明,瞿合祚,李晓明.基于短时傅里叶变换及其谱峭度的电能质量混合扰动分类[J].电网技术,2016,40(10):3184-3191.  
HUANG Jianming, QU Hezuo, LI Xiaoming. Classification for hybrid power quality disturbance based on STFT and its spectral kurtosis[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 3184-3191.
- [6] 肖贤贵,李开成,贺才郡,等.基于稀疏分解和复合熵编码的电能质量扰动数据高效压缩算法[J].电工技术学报,2023,38(23):6318-6331.  
XIAO Xiangui, LI Kaicheng, HE Caijun, et al. A highly efficient compression algorithm for power quality disturbance data using sparse decomposition and hybrid entropy encoding [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(23): 6318-6331.
- [7] LIANG C B, TENG Z S, LI J M, et al. Improved S-transform for time-frequency analysis for power quality disturbances [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(4): 2942-2952.
- [8] 李贝奥,李开成,肖贤贵,等.基于多尺度卷积融合时间序列Transformer的复合电能质量扰动识别[J/OL].电网技术,2024: 1-12 [2024-06-01].[https://kns-cnki-net-s.vpn.uestc.edu.cn:8118/kcms2/article/abstract?v=\\_W1AupcyYgYNAPdeSXnkVOOyTl7I9BWG3HW0C3LMlOkOUtIIPAmS8JHw4Q1q9lhNbm\\_Wgt35Qd-ibyXHTkbaOpQtPfoB4qHG9oHTHW7rgEFrfQZsqh0yc5geh7UxjDqqJHfBsq4YSzlJqxMJeem-ZxWIKg8yQATXU7WWZIXwaZ5ofGqGSQd2uZEQfVdnnt&uniplatform=NZKPT&language=CHS](https://kns-cnki-net-s.vpn.uestc.edu.cn:8118/kcms2/article/abstract?v=_W1AupcyYgYNAPdeSXnkVOOyTl7I9BWG3HW0C3LMlOkOUtIIPAmS8JHw4Q1q9lhNbm_Wgt35Qd-ibyXHTkbaOpQtPfoB4qHG9oHTHW7rgEFrfQZsqh0yc5geh7UxjDqqJHfBsq4YSzlJqxMJeem-ZxWIKg8yQATXU7WWZIXwaZ5ofGqGSQd2uZEQfVdnnt&uniplatform=NZKPT&language=CHS).  
LI Beiao, LI Kaicheng, XIAO Xiangui, et al. Composite power quality disturbance identification based on multi-scale convolution fusion time series Transformer [J/OL]. Power System Technology, 2024: 1-12 [2024-06-01]. [https://kns-cnki-net-s.vpn.uestc.edu.cn:8118/kcms2/article/abstract?v=\\_W1AupcyYgYNAPdeSXnkVOOyTl7I9BWG3HW0C3LMlOkOUtIIPAmS8JHw4Q1q9lhNbm\\_Wgt35Qd-ibyXHTkbaOpQtPfoB4qHG9oHTHW7rgEFrfQZsqh0yc5geh7UxjDqqJHfBsq4YSzlJqxMJeem-ZxWIKg8yQATXU7WWZIXwaZ5ofGqGSQd2uZEQfVdnnt&uniplatform=NZKPT&language=CHS](https://kns-cnki-net-s.vpn.uestc.edu.cn:8118/kcms2/article/abstract?v=_W1AupcyYgYNAPdeSXnkVOOyTl7I9BWG3HW0C3LMlOkOUtIIPAmS8JHw4Q1q9lhNbm_Wgt35Qd-ibyXHTkbaOpQtPfoB4qHG9oHTHW7rgEFrfQZsqh0yc5geh7UxjDqqJHfBsq4YSzlJqxMJeem-ZxWIKg8yQATXU7WWZIXwaZ5ofGqGSQd2uZEQfVdnnt&uniplatform=NZKPT&language=CHS).
- [9] 方群会,刘强,周林,等.模式分类方法在电能质量扰动信号分类中的应用综述[J].电网技术,2009,33(1):31-36.  
FANG Qunhui, LIU Qiang, ZHOU Lin, et al. A survey on application of pattern classification in power quality disturbance signals classification [J]. Power System Technology, 2009, 33(1): 31-36.
- [10] 郑翔,杜奇伟,阮黎翔,等.基于WOA-SVM的智能变电站二次系统故障参数映射模型[J].浙江电力,2024,43(1):36-44.  
ZHENG Xiang, DU Qiwei, RUAN Lixiang, et al. A WOA-based fault parameter mapping model for the secondary systems of intelligent substations [J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(1): 36-44.
- [11] KUMAR R, SINGH B, SHAHANI D T, et al. Recognition of power-quality disturbances using S-transform-based ANN classifier and rule-based decision tree [J]. IEEE Transactions on Industry

- Applications, 2015, 51(2): 1249-1258.
- [12] 张明龙, 张振宇, 罗翔, 等. 基于多核支持向量机的混合扰动波形辨识算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(15): 43-49.  
ZHANG Minglong, ZHANG Zhenyu, LUO Xiang, et al. Complex disturbance waveform recognition based on a multi-kernel support vector machine[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(15): 43-49.
- [13] 郭云峰, 杨晓梅. 基于SVM的电能质量扰动信号分类方法[J]. 计算机应用与软件, 2022, 39(7): 95-100.  
GUO Yunfeng, YANG Xiaomei. Power quality disturbance signal classification method based on svm[J]. Computer Applications and Software, 2022, 39(7): 95-100.
- [14] 刘宇龙, 崔宪阳, 袁丁, 等. 基于多级注意力机制融合的电能质量扰动点分类及时间定位方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(11): 4298-4310.  
LIU Yulong, CUI Xianyang, YUAN Ding, et al. Research on classification and time location method of power quality disturbance points based on multi-level attention mechanism fusion[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(11): 4298-4310.
- [15] 周娟娟. 基于局部均值分解的暂态电能质量扰动检测方法[J]. 山东电力技术, 2018, 45(12): 20-23.  
ZHOU Juanjuan. Transient power quality disturbance detection based on local mean decomposition[J]. Shandong Electric Power, 2018, 45(12): 20-23.
- [16] BISWAL M, DASH P K. Measurement and classification of simultaneous power signal patterns with an S-transform variant and fuzzy decision tree [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(4): 1819-1827.
- [17] LI P, ZHANG H, XIANG W X, et al. A fast adaptive S-transform for complex quality disturbance feature extraction [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(5): 5266-5276.
- [18] WU T, HU R F, ZHU H Y, et al. Combined IXGBoost-KELM short-term photovoltaic power prediction model based on multidimensional similar day clustering and dual decomposition [J]. Energy, 2024, 288: 129770.
- [19] 唐晓, 陈芳, 许强, 等. 改进鲸鱼算法优化的多维度深度极限学习机短期负荷预测[J]. 山东电力技术, 2023, 50(1): 1-7.  
TANG Xiao, CHEN Fang, XU Qiang, et al. Short-term load forecasting based on multi-dimensional deep extreme learning machine optimized by improved whale algorithm [J]. Shandong Electric Power, 2023, 50(1): 1-7.
- [20] 王元元, 孙名好, 司君诚, 等. 基于在线极限学习机的配电网无功电压控制[J]. 山东电力技术, 2022, 49(12): 39-46.  
WANG Yuanyuan, SUN Mingyu, SI Juncheng, et al. Reactive power optimization of distribution network based on online sequential extreme learning machine [J]. Shandong Electric Power, 2022, 49(12): 39-46.
- [21] 郭明杰, 韦根原. 基于SA-PSO算法的主汽温控制系统参数优化研究[J]. 山东电力技术, 2019, 46(7): 44-47.  
GUO Mingjie, WEI Genyuan. Research on parameter optimization of main steam temperature control system based on SA-PSO algorithm [J]. Shandong Electric Power, 2019, 46(7): 44-47.
- [22] 陶旭嫣, 郝德荣, 梁中会, 等. 一种未来电网调控策略研究[J]. 山东电力技术, 2016, 43(10): 7-11.  
TAO Xuyan, HAO Derong, LIANG Zhonghui, et al. Study on one control strategy of the future power grids [J]. Shandong Electric Power, 2016, 43(10): 7-11.
- [23] 郭晓冰, 徐光华, 李辉, 等. 联合经验模式分解和混沌理论的稳态视觉诱发电位脑电识别[J/OL]. 西安交通大学学报, 2024: 1-9 [2024-06-01]. [https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=UjEBX92ALNGjg\\_SohKc2GCVM4aJ3lkeccZRpWIXhH9zZAOExmlxqitMCiAgalJZO3fdZzHUXRJa8Ehy7jFBv8ts5W37HS104Ur5AL2wdEM40XPcJ5gUB4AwoKqoMdlISIRz4cktRx\\_y4gJNE3gJ2wtCY4uq9rpe3Q01DVzOWk0zHAUwz1CanEqZTCfoadXuv&uniplatform=NZKPT&language=CHS](https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=UjEBX92ALNGjg_SohKc2GCVM4aJ3lkeccZRpWIXhH9zZAOExmlxqitMCiAgalJZO3fdZzHUXRJa8Ehy7jFBv8ts5W37HS104Ur5AL2wdEM40XPcJ5gUB4AwoKqoMdlISIRz4cktRx_y4gJNE3gJ2wtCY4uq9rpe3Q01DVzOWk0zHAUwz1CanEqZTCfoadXuv&uniplatform=NZKPT&language=CHS).
- [24] QIU W, TANG Q, LIU J, et al. An automatic identification framework for complex power quality disturbances based on multifusion convolutional neural network [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(5): 3233-3241.
- [25] ZHAO W J, SHANG L Q, SUN J F. Power quality disturbance classification based on time-frequency domain multi-feature and decision tree [J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(4): 1-6.

收稿日期: 2024-06-05

修回日期: 2024-10-29

作者简介:

徐琳(1984), 通信作者(191861187@qq.com), 女, 博士, 正高级工程师, 研究方向为电能质量分析与控制, 电力系统建模与仿真、智能电网等;

范松海(1975), 男, 博士, 正高级工程师, 研究方向为新型电力系统、在线监测等;

赵淳(1985), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化、智能电网等;

隗震(1992), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统自动化、智能电网等;

刘畅(1993), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电能质量分析、新型电力系统等。

(责任编辑 姜婷婷)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2025.03.008

# 一种快速动态响应同步调相机低励限制定值整定方法

解笑苏<sup>1,2\*</sup>, 朱应峰<sup>1,2</sup>, 李明<sup>1,2</sup>, 孙福春<sup>1,2</sup>, 许金阳<sup>1,2</sup>

(1. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250003; 2. 山东省智能电网技术创新中心, 山东 济南 250003)

**摘要:**随着特高压直流的快速发展,快速动态响应同步调相机对电网的暂稳态无功支撑作用愈发重要。部分机组除提供故障情况下的暂态无功支撑外,还按调度指令逐步开始承担稳态无功调节任务。由于与换流站无功控制系统间未建立协调控制机制,当机组运行在稳态进相运行无功边界附近时,换流站投入交流滤波器导致的母线电压突升可能激发调相机次暂态调节及励磁系统的电压调节,使机组无功迅速下降,此时若励磁系统低励限制与调相机失磁保护定值整定存在配合问题,可能引发失磁保护不必要的启动甚至跳机。文中剖析了快速动态响应同步调相机与传统发电机失磁保护及低励限制的差异性,并对二者的配合关系进行了分析,提出了一种快速动态响应同步调相机低励限制定值整定方法,并通过案例分析及仿真对所提出的方法进行了验证。

**关键词:**调相机;失磁保护;低励限制

中图分类号:TM772

文献标志码:A

文章编号:1007-9904(2025)03-0068-07

## A Setting Method of Low Excitation Limit of Fast Dynamic Response Synchronous Condenser

XIE Xiaosu<sup>1,2\*</sup>, ZHU Yingfeng<sup>1,2</sup>, LI Ming<sup>1,2</sup>, SUN Fuchun<sup>1,2</sup>, XU Jinyang<sup>1,2</sup>

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

2. Shandong Smart Grid Technology Innovation Center, Jinan 250003, China)

**Abstract:** With the rapid development of UHV DC power grid, the fast dynamic response synchronous condenser plays an increasingly important role in supporting the transient reactive power of the power grid. Some condensers not only provide transient reactive power support in case of faults, but also gradually begin to undertake steady-state reactive power regulation tasks according to dispatch instructions. Because of the lack of coordination between condensers and the reactive power control system of the converter station, a coordination problem between loss of excitation protection and low excitation limit may lead to the act of loss of excitation protection when a condenser operates near the reactive power boundary of steady-state and the AC filters of converter station put into operation, conduct to the subtransient state effect of condensers and the voltage regulation effect of the excitation system. This paper analyzes the differences of loss of excitation protection and low excitation limit between fast dynamic response synchronous condenser and traditional generator, and analyzes the coordination relationship between the two. A setting method of low excitation limit of fast dynamic response synchronous condenser is proposed, and verified through case analysis and simulation.

**Keywords:** condenser; loss of excitation protection; low excitation limit

## 0 引言

随着特高压直流工程的大规模投运,电网对无功支撑的需求愈发强烈。快速动态响应同步调相机凭借其较强的瞬时无功支撑能力和短时过载能力,

**基金项目:**国网山东省电力公司电力科学研究院自主研发项目(ZY-2023-12)。

Independent Research and Development Project of State Grid Shandong Electric Power Research Institute(ZY-2023-12).

能够有效抑制换相失败故障的发生,为特高压直流输电稳定运行提供了坚强保障<sup>[1-5]</sup>。

随着投运数量的快速增长,一些调相机不仅需要提供故障情况下的无功支撑,还逐步开始按调度指令承担稳态无功调节任务<sup>[6-7]</sup>,其中部分机组存在长期运行在稳态进相运行无功边界(对于300 Mvar调相机通常为-150 Mvar)附近的情况。这种运行工况的出现对励磁系统低励限制(也称“欠励限制”)及

调相机失磁保护的定值整定提出了更高要求。

而由于换流站无功控制系统与调相机之间尚未建立相应的协调控制机制,截至目前,已发生多起因低励限制与失磁保护定值配合问题引发的换流站交流滤波器投入后调相机失磁保护启动甚至动作的事件。

文中对传统发电机及调相机失磁保护与低励限制的配合原理及定值整定原则进行了分析对比,提出了一种快速动态响应同步调相机低励限制定值整定方法,并通过一起实际发生的换流站交流滤波器投入引发的调相机失磁保护跳机典型案例及仿真对该方法进行了分析验证。

## 1 失磁保护与低励限制配合

传统发电机失磁保护通常采用定子阻抗判据(即静稳极限阻抗圆、异步边界阻抗圆)作为主判据,励磁低电压判据作为辅助判据<sup>[8-12]</sup>,其中,一般以静稳极限阻抗圆作为主判据。在如图1所示的单机无穷大系统中,忽略电阻分量,可得到如图2所示的相量图。E为机组内电势( $\dot{E}$ 为其相量,下同), $U_s$ 为无穷大系统电压, $U_g$ 为发电机机端电压,I为定子电流, $X_d$ 为机组同步电抗, $X_s$ 为机组与系统间的联系电抗, $\delta$ 为功角, $\varphi$ 为功率因数角。则其输送至系统的有功功率P及无功功率Q为

$$\begin{cases} P = \frac{EU_s}{X_d + X_s} \sin\delta \\ Q = \frac{EU_s}{X_d + X_s} \cos\delta - \frac{U_s^2}{X_d + X_s} \end{cases} \quad (1)$$

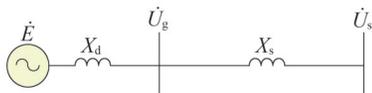


图1 单机无穷大系统

Fig.1 Single machine infinite bus power system

当发电机失磁时,其内电势将降低,进而造成机组电磁功率减小。而此时原动机调速系统无法立刻发生反应,因此机械功率将保持不变,大于电磁转矩而产生不平衡力矩,使转子加速并拉大功角,最终达到新的平衡。当功角 $\delta$ 增大至 $90^\circ$ 时,发电机达到静稳极限,功角继续增加将导致机组失稳。 $\delta=90^\circ$ 时,

其送出功率由式(1)变为

$$\begin{cases} P = \frac{EU_s}{X_d + X_s} \\ Q = -\frac{U_s^2}{X_d + X_s} \end{cases} \quad (2)$$

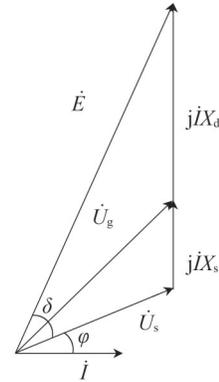


图2 单机无穷大系统相量图

Fig.2 Phasor diagram of single machine infinite bus power system

此时机组的测量阻抗Z为

$$\begin{aligned} Z &= \frac{U_s^2}{S} + jX_s = \frac{U_s^2 [P - jQ - (P + jQ)]}{-j2Q(P - jQ)} + jX_s \\ &= \frac{U_s^2}{-j2Q} \left( 1 - \frac{P + jQ}{P - jQ} \right) + jX_s \\ &= \frac{U_s^2}{-j2Q} (1 - e^{j2\varphi}) + jX_s \\ &= -j \frac{X_d - X_s}{2} + j \frac{X_d + X_s}{2} e^{j2\varphi} \end{aligned} \quad (3)$$

式中:S为机组复功率。

由此可得阻抗平面静稳极限圆,如图3所示,图中,R为机组测量电阻,圆内为静稳破坏区,圆外为正常运行区。

$$\hat{S} = \frac{U_g^2}{Z} \quad (4)$$

式中: $\hat{S}$ 为机组复功率的共轭。

将式(3)代入式(4),可将静稳极限圆从阻抗平面换算至功率平面。

$$S = j \frac{U_g^2}{2} \left( \frac{1}{X_s} - \frac{1}{X_d} \right) + \frac{U_g^2}{2} \left( \frac{1}{X_s} + \frac{1}{X_d} \right) e^{-j\theta} \quad (5)$$

功率平面的静稳极限圆如图4所示,图中圆内为正常运行区,圆外为静稳破坏区。

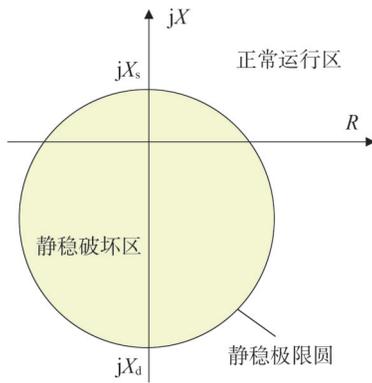


图3 阻抗平面静稳极限圆

Fig.3 Static steady circularity of impedance plane

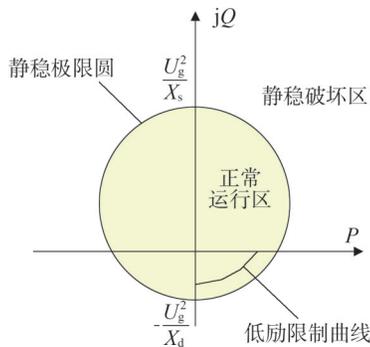


图4 功率平面静稳极限圆及低励限制曲线

Fig.4 Static steady circularity and low excitation limit of power plane

低励限制是励磁调节器的一种附加控制功能,用于限制调相机进相运行时允许的无功功率。传统发电机低励限制一般为功率平面多个点组成的折线。由图4及式(5)可知,在功率平面,静稳极限圆与 $U_g^2$ 成正比。因此,为与失磁保护协调配合,发电机低励限制一般投入电压平移使能,使低励限制曲线随 $U_g^2$ 变化,即

$$Q = K_n P + C_n U_g^2 \quad (6)$$

式中: $K_n$ 、 $C_n$ 分别为根据低励限制定值相邻两点 $(P_n, Q_n)$ 、 $(P_{n+1}, Q_{n+1})$ 计算得到的第 $n$ 段直线的斜率与截距。为保证低励限制与失磁保护协调配合,仅须使低励限制曲线各点位于功率平面的静稳极限圆内,如图4所示。

调相机失磁保护与传统发电机失磁保护原理存在较大差异,其对失磁故障配置了2段失磁保护<sup>[13-16]</sup>。失磁保护I段从防止调相机失磁故障等原因引起系统电压崩溃和大面积停电的角度出发,其

主要目标在于保护整个系统。该段保护由机端低电压判据或者母线低电压判据与逆无功判据组成,机端低电压判据、母线低电压判据和逆无功判据的整定值分别为额定值的90%、90%和-11%,经1s延时后动作或告警。失磁保护II段用于反应调相机全失磁故障,其主要目标在于保护调相机。该段保护由励磁低电压判据与逆无功判据组成,2个判据的定值分别按躲过深度进相运行时的励磁电压和无功功率整定,并依据现场试验数据进行修正,经2s延时后动作<sup>[17]</sup>。

调相机失磁保护II段逆无功功率定值整定方法<sup>[14]</sup>为

$$Q_p = K_{rel} Q_0 \quad (7)$$

式中: $Q_0$ 为调相机稳态进相运行无功边界(300 Mvar调相机一般为-150 Mvar); $Q_p$ 为失磁保护逆无功功率II段无功定值; $K_{rel}$ 为可靠系数,一般取1.1~1.2。在并网后,定值应根据调相机最大深度进相能力进行修正,即不超过失磁保护试验实测得到的机组最大进相深度。

调相机失磁保护II段直接采用无功功率及励磁低电压作为判据,排除了机端电压变化的影响。与发电机低励限制<sup>[18]</sup>不同,为与失磁保护协调配合,调相机低励限制未投入电压平移功能。同时,由于调相机有功功率近似为零,调相机低励限制曲线仅包含 $P = 0$ 时的一个常数 $C$ ,即

$$Q = C \quad (8)$$

为避免低励限制调相机进相能力,保证失磁保护有效发挥保护作用,并确保限制先于保护动作、避免不必要的跳机,调相机低励限制与失磁保护II段无功定值配合关系应满足式(9),且各级间留有足够级差。

$$Q_M < Q_p < Q_L < Q_0 \quad (9)$$

式中: $Q_M$ 为机组最大进相深度,由失磁保护试验实测; $Q_p$ 依据式(7)及 $Q_0$ 整定; $Q_L$ 为低励限制无功定值,依据 $Q_0$ 及 $Q_p$ 整定。

动作时间应满足

$$t_L < t_p \quad (10)$$

式中: $t_L$ 为低励限制动作时间; $t_p$ 为失磁保护II段动作时间。由此可得调相机低励限制与失磁保护II段配合关系如图5所示,图中 $t$ 为动作时间。

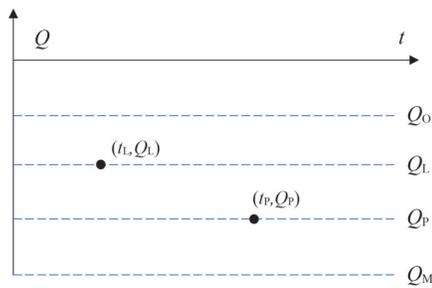


图5 调相机低励限制与失磁保护配合关系

Fig.5 Cooperation of condenser low excitation limit and loss of excitation protection

## 2 低励限制定值问题及整定方法

### 2.1 存在的问题

对国家电网在运调相机低励限制及失磁保护定值配合情况进行分析排查,发现的问题及主要影响如下:

1)  $Q_L$  与  $Q_0$  相同。该问题可能导致机组正常运行时低励限制动作,励磁系统经常工作在非正常状态下,复合无功环无法投入;且限制动作后,多数情况下需要手动操作返回,增加了运行人员负担。

2)  $Q_L$  与  $Q_P$  间级差不足。该问题可能导致低励限制无法充分发挥作用,失磁保护不必要的启动甚至动作。

3)  $Q_P$  低于  $Q_M$ 。该问题可能导致失磁保护无法正确发挥保护作用。

4)  $Q_L$  低于  $Q_P$ 。该问题可能导致失磁保护先于低励限制动作,引发不必要的跳机。

5) 低励限制延时过短。该问题不利于发挥机组对暂态过电压的抑制效果,且可能造成低励限制在系统无功波动情况下频繁启动。

针对上述问题,建议采取的措施如下:

1) 合理整定失磁逆无功功率 II 段百分比定值。严格依据文献[14]对失磁逆无功功率 II 段百分比定值进行整定,使之与正常进相运行边界、失磁保护试验实测最大进相深度间均留有足够的级差。

2) 合理整定低励限制定值。在合理整定失磁逆无功功率 II 段定值的基础上,对机组低励限值无功定值进行整定,使之与正常进相运行边界、失磁逆无功功率 II 段定值间留有足够级差。

### 2.2 整定方法

#### 1) 无功定值整定。

条件 a: 对国网调相机无功功率复合控制环定值进行统计发现,为防止无功功率波动情况下的反复

调节,其调节死区一般设置为 2 Mvar。因此,为防止调相机运行在  $Q_0$  附近时低励限制反复动作,  $Q_L$  与  $Q_0$  间级差不应小于 2 Mvar。

条件 b: 为保证调相机充分发挥深度进相能力,根据工程实践经验,  $Q_L$  取值上限一般为  $0.9Q_P$ 。根据失磁保护试验结果统计,国网调相机  $Q_P$  最高(即绝对值最小)为 -159 Mvar,为满足条件 a,  $Q_L$  取值应不低于 -152 Mvar,即约  $0.96Q_P$ ; 为保证低励限制失磁保护 II 段间留有足够级差,  $Q_L$  取值下限定为  $0.96Q_P$ 。

综上所述,得到低励限制无功定值整定方法为

$$\begin{cases} Q_L = xQ_P, x \in [0.9, 0.96] \\ Q_L \leq Q_0 - 2 \end{cases} \quad (11)$$

#### 2) 延时定值整定。

直流系统故障导致的过电压通常需要一段时间才能采取有效措施降低,如在直流多次换相失败双极闭锁后 200 ms 才能切除所有滤波器,进而对过电压进行限制。如果在故障发生时立即进行低励限制,将导致调相机立即减小进相无功,进而导致交流母线电压进一步升高,不利于系统稳定运行。因此,为保证调相机对暂态过电压的抑制效果,同时降低因系统无功波动造成限制频繁动作的概率,建议将低励限制动作延时整定为 0.5 s。

## 3 案例验证

2022 年 10 月 31 日 00 时 00 分 00 秒,某换流站 1 号调相机(额定无功功率为 300 Mvar)按照调度指令(AVC 未投入)将无功功率由 -50 Mvar 调整为 -150 Mvar 运行。03 时 08 分 46 秒,该换流站自动投入一组交流滤波器(容量为 260 Mvar)后无功开始下降。03 时 08 分 48 秒,该机组第一套调变组保护失磁保护 II 段动作跳机。跳机前,机组最低无功约为 -153 Mvar。跳机过程无功变化过程如图 6 所示。

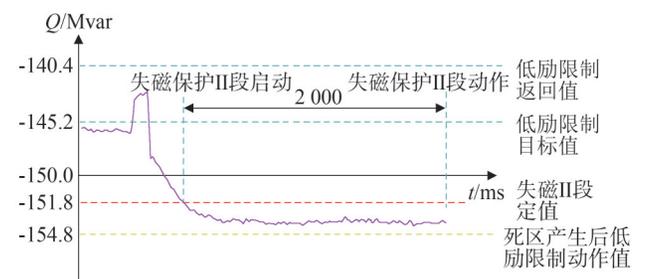


图6 跳机过程机组无功变化

Fig.6 The reactive power variation of trip

### 3.1 励磁系统相关定值及动作情况

该机组励磁系统低励限制功能正常投入,动作定值为 $-150\text{ Mvar}$ ,动作延时为 $0.06\text{ s}$ 。

该励磁系统低励限制功能正常状态下不存在死区,在机组无功持续低于动作定值达动作延时后动作,自动将无功拉至目标值附近。由于限制返回值高于调目标值,此时除运行人员进行增磁操作或电网电压出现一定程度降低外,低励限制一般不会自动返回。同时,在低励限制未返回的情况下,为防止其反复输出,将产生一个向下约 $1.6\%Q_N$ 的死区, $Q_N$ 为机组额定无功功率,对于 $300\text{ Mvar}$ 调相机, $1.6\%Q_N$ 约为 $4.8\text{ Mvar}$ 。该励磁系统低励限制正常动作过程如图7所示。

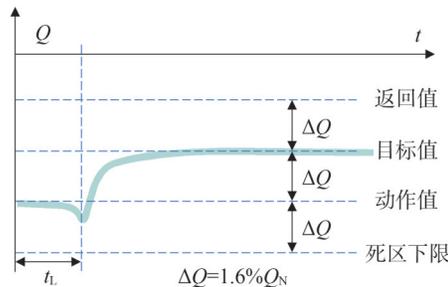


图7 低励限制正常动作过程

Fig.7 Normal action process of low excitation limit

故障发生前,该机组按调度指令运行在 $-150\text{ Mvar}$ 附近时,由于系统电压波动造成低励限制动作后长时间未返回,死区产生并持续存在,即机组无功功率低于 $-154.8\text{ Mvar}$ 前,低励限制不再输出。

在交流滤波器投入造成 $500\text{ kV}$ 交流母线及该机组机端电压突然上升后,机组无功功率在调相机次暂态特性及励磁调节器的调节作用下降至 $-153\text{ Mvar}$ ,未超出低励限制死区,因此低励限制未提供输出对机组进行增磁。

### 3.2 失磁保护相关定值及动作情况

该机组失磁保护逆无功功率Ⅱ段百分比定值为 $-50.6\%$ (即 $-151.8\text{ Mvar}$ ),动作延时 $2\text{ s}$ ;失磁保护Ⅱ段励磁低电压定值为 $20.7\text{ kV}$ ,其展宽(保护装置内部定值,现场无法修改)两套保护(不同厂家)有所不同,第一套保护设置为 $2\text{ s}$ ,第二套保护设置为 $1\text{ s}$ 。

交流滤波器投入后,机组无功功率降至 $-153\text{ Mvar}$ 并保持,低于逆无功功率Ⅱ段百分比定值,持续时间超过 $2\text{ s}$ ;励磁电压降至 $10.92\text{ V}$ ,低于励磁低电压定

值,并于 $52\text{ ms}$ 后恢复至定值以上。第一套保护由于励磁低电压判据展宽为 $2\text{ s}$ ,即满足励磁低电压判据达 $2.052\text{ s}$ ,达到动作条件跳闸;第二套保护由于展宽为 $1\text{ s}$ ,即满足励磁低电压判据达 $1.052\text{ s}$ ,励磁低电压判据在动作延期内返回,未发生动作。

### 3.3 跳机原因分析

1)失磁逆无功功率Ⅱ段百分比定值设置不合理。

该机组失磁逆无功功率Ⅱ段百分比为 $50.6\%$ ( $-151.8\text{ Mvar}$ ),与低励限制无功定值间级差仅 $1.8\text{ Mvar}$ 。该机组失磁保护试验实测最大进相深度为 $-179.3\text{ Mvar}$ ,失磁Ⅱ段逆无功功率定值间级差为 $27.5\text{ Mvar}$ ,失磁逆无功功率Ⅱ段定值与实测最大进相深度级差偏大,与低励限制无功定值间级差过小,并与稳态进相运行无功边界过于接近,造成交流滤波器正常投入即引发了保护的启动。

2)低励限制与机组正常进相运行边界重合且动作延时过短。

该机组低励限制无功定值为 $-150\text{ Mvar}$ ,与机组稳态进相运行无功边界重合,使低励限制在机组正常运行状态下即发生动作。动作延时定值为 $0.06\text{ s}$ ,时间过短,一方面不利于发挥调相机对系统过电压的抑制效果<sup>[19-20]</sup>,另一方面在无功定值不合理的情况下增加了系统无功波动造成低励限制动作的概率。本次故障过程中,低励限值定值设置不合理造成其在故障发生时未能发挥作用。

3)低励限制存在死区。

该励磁系统低励限制设置死区是为避免低励限制反复输出,但对于维持机组无功功率及电压稳定并无明显作用。从本次跳机机组定值整定来看,低励限制与失磁保护Ⅱ段间仍存在较小级差,而产生的死区使低励限制的实际动作值低于失磁保护定值,造成低励限制无法发挥作用。本次故障中,若低励限制未设置死区,失磁保护虽然会启动,但由于限制延时设置极短,低励限制迅速动作后,仍有可能在失磁保护动作前将机组无功功率升至保护动作值以上,从而避免保护动作。针对该问题,厂家已对调相机励磁系统进行程序升级以去除死区。因此文中提出的整定方法是在低励限制无死区的前提下建立的,下文不再赘述。

4)失磁保护Ⅱ段励磁低电压展宽设置不合理。

调相机正常运行时,励磁电压由于电网电压扰动等原因会发生波动。因此失磁保护Ⅱ段励磁低电压判据一般设有展宽,用于防止励磁电压在略低于判据时由于波动造成保护拒动。展宽设置过短,可能导致保护拒动;设置过长,则可能导致保护误动。本次跳机的失磁保护Ⅱ段励磁低电压展宽固定为2 s(不可整定),与逆无功功率Ⅱ段动作延时相同,励磁电压在满足判据后即使迅速恢复,只要逆无功功率持续满足判据,就会造成保护动作,增加了保护误动的风险。但此问题与文中探讨的励磁系统低励限制整定方法无关,因此下文不再赘述。

### 3.4 定值整定

针对上述问题,首先根据式(7)对失磁保护定值整定。取 $K_{rel} = 1.1$ ,则 $Q_P = K_{rel}Q_0 = 1.1 \times (-150 \text{ Mvar}) = -165 \text{ Mvar}$ 。该机组失磁保护试验实测结果 $Q_M = -179.3 \text{ Mvar}$ ,满足 $Q_M < Q_P$ ,符合文献[14]要求。

根据式(11)对低励限制定值整定,则 $Q_L$ 取值范围为 $[-158.4 \text{ Mvar}, -152 \text{ Mvar}]$ ,考虑要与 $Q_P, Q_0$ 均留有足够级差, $Q_L$ 建议整定为 $-155 \text{ Mvar}$ ,延时整定为 $0.5 \text{ s}$ 。

由于本次跳机过程中,无功功率达到 $-153 \text{ Mvar}$ 附近时已趋于稳定,因此判断修改定值后,低励限制、失磁保护均不会发生动作。

目前,该换流站调相机已按上述定值对低励限制进行整定修改,机组运行稳定。

### 3.5 仿真验证

据2022~2023年该换流站调相机无功动作情况统计,其500 kV交流母线出现的最恶劣电压突增情况为电压从1.051 pu突增至1.063 pu。按该换流站1号调相机参数定值(低励限制定值 $-155 \text{ Mvar}$ 、 $0.5 \text{ s}$ ,失磁保护Ⅱ段定值 $-165 \text{ Mvar}$ 、 $2 \text{ s}$ )在实时数字仿真器(real-time digital simulator, RTDS)中搭建单机无穷大系统。对系统电压由1.049 pu突增至1.065 pu的极端情况下的低励限制动作情况进行了仿真,仿真结果如图8所示,图中 $U_h$ 为500 kV交流母线电压。

由图8可知,机组无功功率由 $-150 \text{ Mvar}$ 最低降至 $-196 \text{ Mvar}$ ,低励限制延时 $0.5 \text{ s}$ 动作后,在 $0.3 \text{ s}$ 内将机组无功功率提升至 $-165 \text{ Mvar}$ 以上,即失磁保护Ⅱ段启动约 $0.8 \text{ s}$ 内返回,保护不会发生动作,该组定值能够保证机组低励限制在极端情况下充分发挥作用,避免失磁保护不必要的动作。

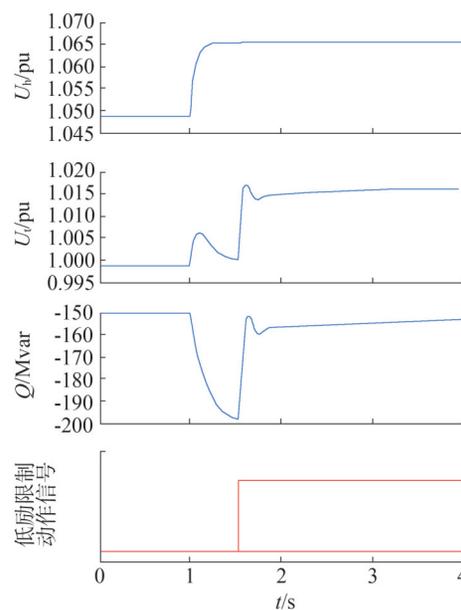


图8 极端情况仿真结果

Fig.8 The simulation result of extreme situation

## 4 结束语

文中对传统发电机与调相机失磁保护及低励限制的配合原理及定值整定原则进行了分析对比,根据理论分析及工程实践经验,提出了一种快速动态响应同步调相机低励限制无功功率及动作时间定值的整定方法。通过一起实际发生的换流站交流滤波器投入引发调相机失磁保护跳机典型案例的分析及仿真,对该方法进行了验证,并提出了取消低励限制死区的建议,对同类问题排查及整改、保障调相机稳定运行具有实际指导意义。

## 参考文献

- [1] 金一丁,于钊,李明节,等.新一代调相机与电力电子无功补偿装置在特高压交直流电网中应用的比较[J].电网技术,2018,42(7):2095-2102.  
JIN Yiding, YU Zhao, LI Mingjie, et al. Comparison of new generation synchronous condenser and power electronic reactive-power compensation devices in application in UHV DC/AC grid [J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2095-2102.
- [2] 刘振亚,张启平,王雅婷,等.提高西北新甘青750 kV送端电网安全稳定水平的无功补偿措施研究[J].中国电机工程学报,2015,35(5):1015-1022.  
LIU Zhenya, ZHANG Qiping, WANG Yating, et al. Research on reactive compensation strategies for improving stability level of sending-end of 750 kV grid in Northwest China [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(5): 1015-1022.

- [3] 王雅婷,张一驰,周勤勇,等.新一代大容量调相机在电网中的应用研究[J].电网技术,2017,41(1):22-28.  
WANG Yating, ZHANG Yichi, ZHOU Qinyong, et al. Study on application of new generation large capacity synchronous condenser in power grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(1):22-28.
- [4] 郭强,李志强.同步调相机发展综述[J].中国电机工程学报,2023,43(15):6050-6064.  
GUO Qiang, LI Zhiqiang. Summarization of synchronous condenser development[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(15):6050-6064.
- [5] 张兴,李旭,田杰,等.构网型储能与调相机的暂态过电压抑制能力对比研究[J].浙江电力,2024,43(2):88-95.  
ZHANG Xing, LI Xu, TIAN Jie, et al. Comparison of transient overvoltage suppression capability of grid-forming converter and synchronous condenser[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(2):88-95.
- [6] 汤晓峥,党睿,刘一丹,等.含同步调相机的HVDC输电系统电压稳定控制策略[J].电力系统及其自动化学报,2019,31(1):65-70.  
TANG Xiaozheng, DANG Rui, LIU Yidan, et al. Control strategy for voltage stabilization of HVDC transmission system with the integration of synchronous condenser[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(1):65-70.
- [7] 巩伟峥,肖洋,夏潮,等.华东电网调相机AVC控制策略研究[J].电网技术,2020,44(8):3106-3113.  
GONG Weizheng, XIAO Yang, XIA Chao, et al. Study on AVC control strategy of synchronous condenser in East China grid[J]. Power System Technology, 2020, 44(8):3106-3113.
- [8] 张保会,尹项根.电力系统继电保护[M].北京:中国电力出版社,2005.
- [9] 大型发电机变压器继电保护整定计算导则:DL/T 684—2012[S].北京:中国电力出版社,2012.
- [10] 王维俭.电气主设备继电保护原理与应用[M].北京:中国电力出版社,2002.
- [11] 高春如.大型发电机组继电保护整定计算与运行技术[M].北京:中国电力出版社,2006.
- [12] 王书扬,王兴国,李彬,等.基于功率平面隐极发电机励磁限制与失磁保护配合研究[J].电力系统保护与控制,2022,50(6):180-187.  
WANG Shuyang, WANG Xingguo, LI Bin, et al. Coordination of the low excitation limit and loss of excitation protection of a round-pole generator based on a power plane[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(6):180-187.
- [13] 邹东霞,余锐,聂娟红,等.300 Mvar大型同步调相机的启动及继电保护[J].电力系统保护与控制,2016,44(20):160-164.  
ZOU Dongxia, YU Rui, NIE Juanhong, et al. SFC start and relay protection of 300 Mvar large synchronous condenser[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20):160-164.
- [14] 同步调相机变压器组继电保护整定计算导则:DL/T 2542—2022[S].北京:中国电力出版社,2022.
- [15] 桑建斌,包明磊,李玉平,等.300 Mvar调相机继电保护的分析与改进[J].电力自动化设备,2019,39(6):217-223.  
SANG Jianbin, BAO Minglei, LI Yuping, et al. Analysis and improvement of relay protection of 300 Mvar synchronous condenser[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(6):217-223.
- [16] 郭智琳,郝亮亮,陈争光,等.调相机失磁特性及其对直流系统的影响分析[J].电力系统自动化,2019,43(20):130-137.  
GUO Zhilin, HAO Liangliang, CHEN Zhengguang, et al. Analysis on excitation loss characteristics of synchronous condenser and its influence on direct current system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(20):130-137.
- [17] 郑作伟,郑玉平,潘书燕,等.调相机失磁保护励磁电压判据性能分析与改进[J].电力系统自动化,2020,44(10):174-179.  
ZHENG Zuowei, ZHENG Yuping, PAN Shuyan, et al. Performance analysis and improvement of excitation voltage criterion for loss of excitation protection of condenser[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(10):174-179.
- [18] 解兵,徐珂,刘建坤,等.励磁调节器低励限制整定原则和整定方法研究[J].电力系统保护与控制,2018,46(8):142-147.  
XIE Bing, XU Ke, LIU Jiankun, et al. Study on the principle and setting method of low excitation limit setting for excitation regulator[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8):142-147.
- [19] 李志强,蒋维勇,王彦滨,等.大容量新型调相机关键技术参数及其优化设计[J].大电机技术,2017(4):15-22.  
LI Zhiqiang, JIANG Weiyong, WANG Yanbin, et al. Key technical parameters and optimal design of new types of large capacity synchronous condenser[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2017(4):15-22.
- [20] 李志强,种芝艺,黄金军.快速动态响应同步调相机动态无功特性试验验证[J].中国电机工程学报,2019,39(23):6877-6885.  
LI Zhiqiang, CHONG Zhiyi, HUANG Jinjun. Test verification of dynamic reactive power characteristics of fast dynamic response synchronous condenser[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(23):6877-6885.

收稿日期:2024-02-28

修回日期:2024-08-10

作者简介:

解笑苏(1987),通信作者(xiexiaosu063@163.com),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为发电机及调相机励磁系统;

朱应峰(1992),男,硕士,工程师,主要研究方向为发电机及调相机励磁系统;

李明(1988),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为发电机及调相机本体;

孙福春(1988),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为发电机及调相机本体;

许金阳(1997),男,硕士,主要研究方向为发电机及调相机励磁系统。

(责任编辑 车永强)

# 基于CiteSpace的核电机组故障诊断发展趋势分析

李蔚<sup>1</sup>, 李翱<sup>1\*</sup>, 方兴煜<sup>1</sup>, 卢韩斌<sup>1</sup>, 林小杰<sup>1</sup>, 尚宪和<sup>2</sup>

(1. 浙江大学能源工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 中核核电运行管理有限公司, 浙江 海盐 314300)

**摘要:**核电作为一种清洁能源,对优化我国能源结构、保障能源安全、助力实现“双碳”目标具有重要作用,而核电机组的安全运行尤其重要。文中使用CiteSpace 6.1.6软件对2009—2024年中国知网(China National Knowledge Infrastructure, CNKI)和Web of Science(WOS)数据库的核电机组故障诊断相关研究进行量化分析。研究表明:该领域国内发文以研究院为主体,国际文献则由高校领衔;故障诊断技术从专家驱动向数据驱动转变,热点趋势归纳为在线监测/性能监测-预防性维修-机器学习/主成分分析-深度学习/卷积神经网络;核电厂的数字化进程热点为仪控系统-人因工程-智能运维-数字孪生。根据文献结果分析可知,未来人工智能算法在核电故障诊断领域的应用有助于提高故障诊断精度、增强故障可解释性。

**关键词:**核电机组;故障诊断;核电数字化;CiteSpace软件

中图分类号:TP277

文献标志码:A

文章编号:1007-9904(2025)03-0075-11

## Analysis of Development Trends in Fault Diagnosis of Nuclear Power Units Based on CiteSpace

LI Wei<sup>1</sup>, LI Ao<sup>1\*</sup>, FANG Xingyu<sup>1</sup>, LU Hanbin<sup>1</sup>, LIN Xiaojie<sup>1</sup>, SHANG Xianhe<sup>2</sup>

(1. College of Energy Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. China National Nuclear Power Operation Management Co., Ltd., Haiyan 314300, China)

**Abstract:** As a kind of clean energy, nuclear power plays a pivotal role in optimizing energy structure, ensuring energy security, and contributing to the achievement of the "dual carbon" goals in China. Ensuring the safe operation of nuclear power units is paramount. In this paper, CiteSpace 6.1.6 software is utilized to quantitatively analyze the related research on fault diagnosis of nuclear power units in the China National Knowledge Infrastructure (CNKI) and Web of Science (WOS) databases from 2009 to 2024. The study indicates that in this field, the main body of domestic publications is the research institute, while universities take the lead of international literature. Fault diagnosis technology has transitioned from expert-driven to data-driven approaches. The hotspot trend can be summarized as online monitoring/performance monitoring, preventive maintenance, machine learning/principal component analysis, and deep learning/convolutional neural networks. The hotspots of the digitalization process of nuclear power plant are instrument control system, human factor engineering, intelligent operation and maintenance, and digital twin. According to the analysis of literature results, future applications of artificial intelligence algorithms in the field of nuclear power fault diagnosis will contribute to improving the diagnostic accuracy and enhancing interpretability.

**Keywords:** nuclear power unit; fault diagnosis; digital nuclear power; CiteSpace software

## 0 引言

核能是各国实现零排放的关键支撑,攀升的新能源接入比例导致更为严峻的电力系统调峰形势,

核电资源的灵活性挖掘为建立多元调节特性的电力系统提供方案<sup>[1-2]</sup>。核电产业被视为我国新兴战略性新兴产业之一,三代核电建设持续推进,已进入规模化阶段<sup>[3]</sup>。预计在2035年,中国核电发电规模约达到总发电量的10%,意味着二氧化碳排放将降低约9.2亿t。核能利用,特别是核电,具备平衡其他清洁

基金项目:国家自然科学基金项目(51806190)。  
National Natural Science Foundation of China (51806190)。

能源对电网造成波动的能力,能克服自然环境限制,稳定输出高品质电能,确保电网安全运行;同时,核能还能接替燃煤和燃气供热,并与现有供热系统有效对接<sup>[4-6]</sup>。

随着核电机组的投运量逐步提升,发电份额与日俱增<sup>[7]</sup>,核电机组故障诊断领域也迎来密切关注。对于进入此领域的研究者,受制于多年学术沉淀积累的庞杂文献资料,存在不易梳理与辨识发展方向的难题。目前,对核电机组故障诊断的研究已有一些文献综述。黄倩等<sup>[8]</sup>综述了故障诊断技术在核电机组循环水泵上的应用,提出未来重要的发展方向为智能诊断技术。刘才学等<sup>[9]</sup>总结了反应堆关键设备预防性和预测性健康监测和故障诊断技术,综述了传感技术、监测技术和健康监测体系的研究现状。许勇等<sup>[10]</sup>分析应用现状和综述研究成果,提出异常检测、寿命预测和故障诊断为一回路核电设备三大问题,着重强调了深度学习在该领域的应用潜力。但传统综述存在主观性强、整理繁复的固有问题。

文献可视化图谱作为实用工具和创新方法,凭借其系统性、可视化、非主观等鲜明特点和先天优势,已经在中国科研领域得到广泛应用<sup>[11]</sup>。在能源领域,林俊光等<sup>[12]</sup>使用 CiteSpace 对国内外能源系统优化调度方面进行研究,分析出该领域虽仍处于常规发展阶段,但发文量呈现高增速趋势,启发式算法和深度学习等在未来能源系统有望实现研究范式转变。张明礼等<sup>[13]</sup>依靠 CiteSpace 工具,指出汽轮机的相关研究涉及效率、故障诊断、材料结构等多方面,汽轮机材料、蒸汽热力参数提高、热电联产等研究领域在未来有较好发展前景。本文着力于应用 CiteSpace 工具分析核电机组故障诊断领域的发表文献,运用科学计量学对国内外相关研究与焦点问题进行概括梳理,有助于热点问题的讨论和进一步深入研究。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料来源与检索策略

为保证文献的查全率,从中国知网(China National Knowledge Infrastructure, CNKI)数据库以“SU=‘核电’ AND (SU=‘故障诊断’+‘预防性维修’+‘性能监测’+‘数字化’+‘智慧化’+‘常规岛’+‘二回路’)”为关键词进行检索;从 Web of Science

(WOS)核心数据库检索的主题为“TS=((‘Nuclear Power’) AND (‘Fault Diagnosis’ OR ‘Preventive maintenance’ OR ‘Performance Monitoring’ OR ‘Digital’ OR ‘Smart’ OR ‘Conventional Island’ OR ‘Secondary Circuit’))”;文献框定在“研究论文”与“综述论文”。两个数据库的检索时段都限制为2009年1月1日至2024年5月1日,手动去除非核电领域的不相关内容、新闻、报纸等文献,最后去除重复文献,纳入待分析文献共1 145篇(CNKI)和2 607篇(WOS)。

### 1.2 数据处理与研究方法

采用 CiteSpace 6.1.6 软件对文献资料建立可视化图谱模型。CiteSpace 分析工具是由信息可视化学者陈超美及其科研团队协同合作推出的知识图谱绘制软件<sup>[14]</sup>。本文研究 WOS 的文献以纯文本形式导出全记录与引用的参考文献, CNKI 的文献以 Refwork 格式导出。时间切片以一年为单位,节点类型包括作者、发文机构、关键词,以关键词聚类 and 聚类时间线可视化图谱的形式分析文献资料。

## 2 结果与分析

### 2.1 发文量分析

#### 2.1.1 年发文量及发文数趋势分析

对2009—2024年CNKI和WOS数据库中收录的文献按时间分布进行统计(文献统计时处于2024年,该年文献数未完全记录,故该年数据不参与绘制),如图1所示。

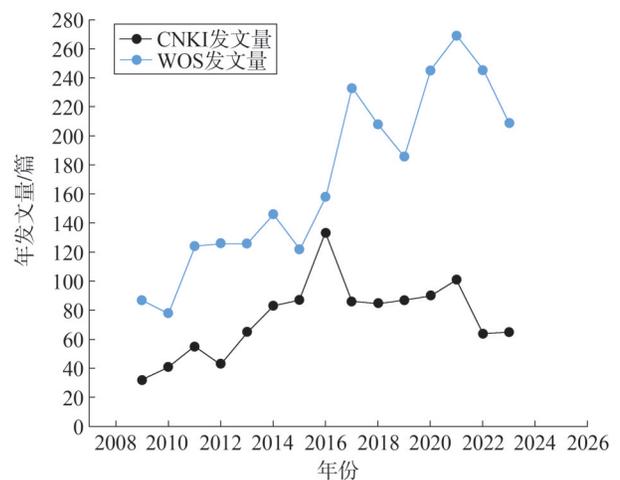


图1 文献时间分布

Fig.1 Time distribution of paper

图 1 中文献的时间分布表明,核电预防性维修相关研究领域发文量呈现一定上升趋势,年度发文量数据表现出较大波动,整体趋势符合世界各国提出的节能减排目标和对核电发展的支持,而波动源于核安全问题这一敏感话题的关注度。WOS 数据库相较于 CNKI 数据库发文量增势明显,反映该领域的国际关注度持续提升。

### 2.1.2 国家发文量及国际合作分析

根据 WOS 数据库,按照第一作者所在国家进行国家发文量统计分析,核电机组预防性维修研究涉及全球 85 个国家或地区。图 2 的中介中心性反映该国参与国际科研合作程度及中介连接作用强弱。发文量最高的国家是中国,反映了中国对核电发展的国力支持与工程技术进步。英国、美国等传统科研强国的中介中心性相对突出,表明了这些国家在核电领域的国际合作有较高重视程度。

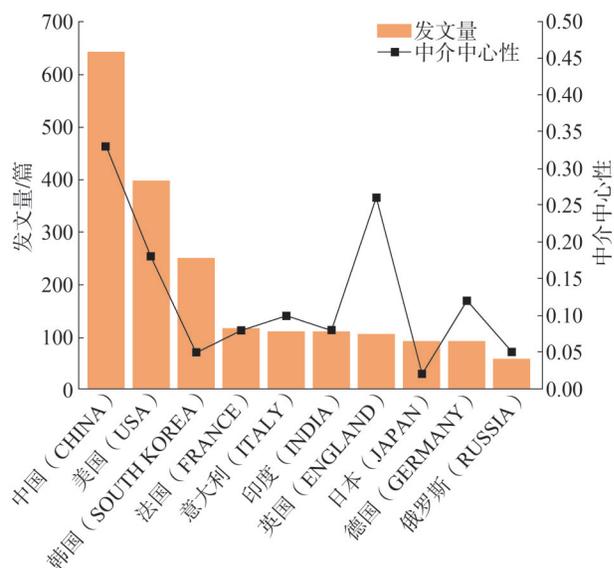


图2 文献国家发文量及中介中心性  
Fig.2 National document volume and betweenness centrality

### 2.2 发文机构分析

通过对发文机构合作网络进行分析,能够将核电预防性维修领域的科研力量分布情况和合作关系具象化。CNKI 的机构网络的节点数和连接数分别为 353 和 179,密度为 0.002 9。鉴于节点数和连接数的比例关系和较低的密度值可知,国内各研究机构合作

频次较低,跨地域合作较为薄弱。由表 1 可见,国内该领域的发文机构主体为国有企业和研究院,而非高校,国内核电领军企业中核核电运行管理有限公司和中广核工程有限公司等发文量较高,表明了其带动作用较为突出。在国家推进核电发展的政策态势下,机构企业间加强合作关系网络构建是大势所趋。

表 1 研究机构网络分析(CNKI)

Table 1 Network analysis of co-institution (CNKI)

排名	机构	发文量/篇
1	中核核电运行管理有限公司	82
2	中广核工程有限公司	43
3	中国核电工程有限公司	43
4	江苏核电有限公司	36
5	广东省电力设计研究院	34
6	福建福清核电有限公司	32
7	苏州热工研究院有限公司	29
8	三门核电有限公司	20

对 WOS 数据库的文献进行分析,绘制出世界范围研究机构合作网络图,如图 3 所示,其节点数和连接数分别为 507 和 561,密度值为 0.004 4。相较于 CNKI 数据库,WOS 数据库的发文机构的领军者由企业 and 研究院变为了高校,各机构间的合作关系有了更好的媒介,机构的中介中心性也有所提高,说明高校是该领域机构间合作重要的黏合剂。其中哈尔滨工程大学和清华大学为研究团体的领头羊,带动了研究共同体的发展。

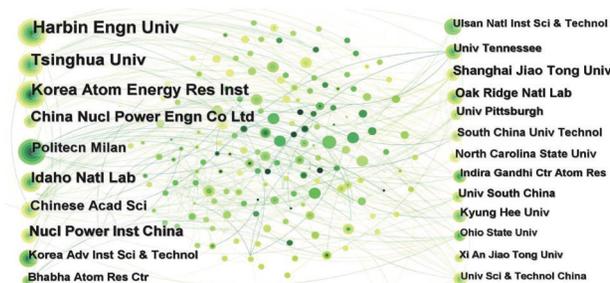


图3 研究机构网络分析(WOS)  
Fig.3 Network analysis of co-institution (WOS)

### 2.3 关键词共现分析

关键词共现图谱实现了对文献议题可视化呈



化发展;聚类 I(optical fiber sensors)、聚类 J(plastic scintillator)为新型工具引入。

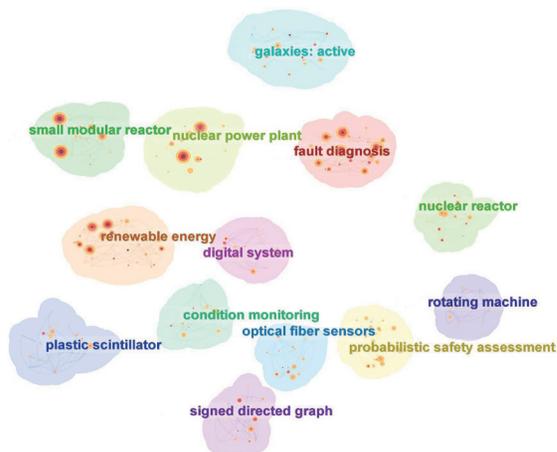


图7 关键词聚类图(WOS)

Fig.7 Keywords cluster diagram (WOS)

## 2.5 聚类时间线分析

基于核电故障诊断领域的关键词聚类时间线探究,实现对该领域热点、焦点的挖掘,有助于判断该领域的研究前沿与发展趋势<sup>[15]</sup>。对于聚类时间线的有效性确认,聚类模块值与聚类平均轮廓值须满足基本评判标准<sup>[16]</sup>。图 8、图 9 分别为两个数据库的聚类时间线,基于 CNKI 文献库数据,聚类的模块度(聚

类模块值)为 0.612 6,大于 0.3;平均轮廓系数(聚类平均轮廓值)为 0.873 7,大于 0.7,判断出聚类结果是较为合理、令人信服的。基于 WOS 文献库数据,聚类的模块度(聚类模块值)为 0.631 1,大于 0.3;平均轮廓系数(聚类平均轮廓值)为 0.825 9,大于 0.7,说明聚类具备高效率、有效性。下文以核电机组故障诊断和核电数字化两大研究热点为主线,结合关键要素分别进行阐述。

### 2.5.1 核电故障诊断的研究热点及发展趋势

故障诊断技术的功能实现方式历经演变,早期为专家设置参数阈值判断故障,对于复杂系统难以规避并发、继发及低危害故障。随着人工智能技术的发展,人工智能(artificial intelligence, AI)逐渐被应用到核电站的故障诊断中,相关的方法可分为知识驱动(亦称专家知识系统)的方法和数据驱动(亦称数据发掘)的方法<sup>[17]</sup>。本节以故障诊断为主线,分阶段对核电站故障诊断技术发展热点进行论述。

2009—2016 年,能源挑战下激发的核电规模扩张和人工智能在核电领域的实际应用,催生了预防性维修技术在核电领域新的发展。核电厂的运维成本是发电成本的主要部分,相较保守的设备在设计寿命和定期维修策略上缺乏经济性。预防性维修的技术体系涉及状态监测、故障诊断、状态预测、维修决策,为设备的检修置换工作提供合理充分的依据,

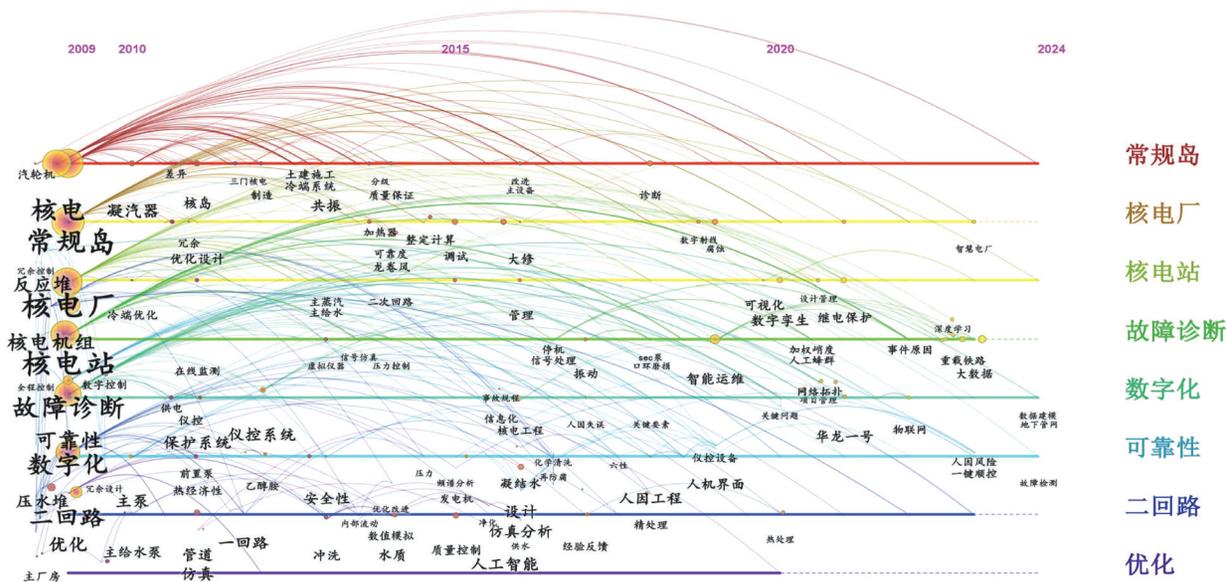


图8 关键词聚类时间线(CNKI)

Fig.8 Timeline map of keywords cluster (CNKI)



2015—2019年,核电厂的数字化程度在这一阶段到达了一个微妙的节点,科技进步与工程应用经验积累使设备的可靠性达到新高度,相较之下人因失误成了核电厂主要的事故原因。对人因失误构建机理模型,大体可分为个体失误模型、班组失误模型、组织失误模型和复杂社会-技术系统模型<sup>[31]</sup>。冗余组件的存在导致部分微小的失误并不会直接导致主冷却剂系统故障,但在降低系统效能的同时可能引起连锁反应,导致更严重的后果<sup>[32]</sup>。故该阶段的研究从知识经验水平、压力水平、信息显示质量、注意力与警觉性、安全态度五个方面总结分析人因失误产生模式<sup>[33]</sup>,以针对性预案保障核电安全。

2020年后,核电厂开始全面数字化改造工作,智能运维、数字孪生、智慧电厂成为核电领域的研究热点。智能运维要实现运维完整体系和具体设备详细、智能地统筹规划,在安全可靠发电作业的目标下兼顾最低的运维成本。概率安全评估被认为是研究核电厂安全的最广泛的方法<sup>[34]</sup>,以此为依据建立的智能化运维诊断系统能够完成预防性维修,实现优化维护策略,充分发挥机组能力,降本增效。数字孪生技术通过创建物理对象的数字化副本,模拟其在真实环境中的行为,将产品、生产过程和整个工厂映射到虚拟空间。这种技术能够全面反映设备的全生命周期。在核电厂中,数字孪生技术提供在线监控和实时操作指导,增强设备的监控能力,及时调整运行状态,优化设备性能,从而提升机组整体效率。智慧电厂涉及以上方面建设,并结合人工智能技术构建智能问答模块、智能监测模块和文本生成模块等,考虑核电机机械故障安全设计<sup>[35]</sup>,由此可见核电厂新的智慧化发展将成为后续的研究方向。

## 2.6 关键词突现分析

突现词代指某些时间段文献中出现频次激增的专业词汇,用以表征热点整体变化态势<sup>[36]</sup>。核电领域的人工智能技术逐步应用与厂区数字化是研究热点。Hu等<sup>[37]</sup>对核电厂关于故障诊断技术的数据驱动方法进行了全面综述;解光耀等<sup>[38]</sup>对健康管理和预测系统进行了综述,并提出适应我国核电的发展路线;Sethu等<sup>[39]</sup>对利用人工智能技术减免规避人为失误进行了综述;Huang等<sup>[40]</sup>对利用人工智能技术进行反应堆设计优化和运行维护进行了全面回顾;

Khentout等<sup>[41]</sup>研究论述了在线监测和决策领域的研究现状;Wu等<sup>[42]</sup>对核电厂报警系统进行综述并进一步提出人因与人机工程学在核电厂的应用;Ayodeji等<sup>[43]</sup>综述了入侵检测系统与网络安全机器学习工具。

本节以CNKI和WOS文献库数据为研究对象,完成关键词突现分析,获得某些年份骤增的关键词信息,进而分析核电厂故障诊断的研究前沿。图10和图11分别显示了近15年CNKI和WOS文献库该领域关键词的突现强度和突现热点的起止年份。2015年之前,突现的关键词技术热点为核岛与常规岛的预防性维修,期间重视利用可再生能源与发展智能电网,这也预示着核电发展进入新阶段。2016—2021年这段时间,核电厂故障诊断技术与计算机技术、信息技术的耦合成为主流研究方向;大数据统计人工可靠性并分析规避人因失误成为另一个爆发现点。自2018年起,机器学习等人工智能算法成为核电故障诊断领域突发性热点。2021年后,随着卷积神经网络逐步在核电故障诊断领域开展应用研究,深度学习成为外文文献该领域至今重要的拓展方向,一定程度影响了国内研究方向。同时期的数字孪生技术与电厂结合成为国内外共同热点,表明研究人员对智慧电厂建设的密切关注。

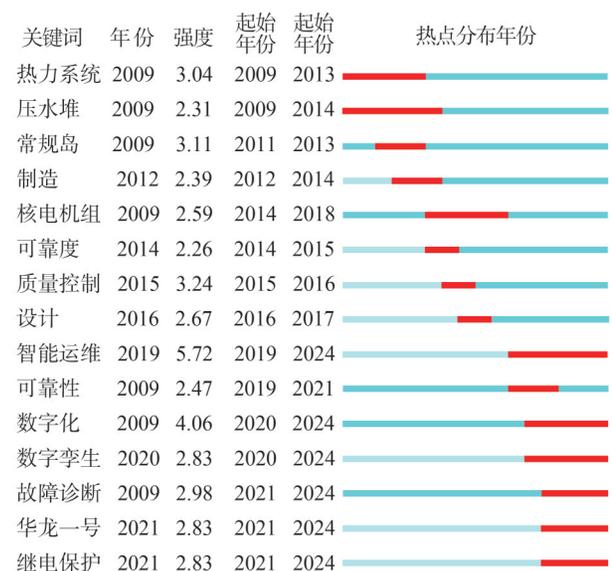


图10 前15位突现词(CNKI)

Fig.10 Top fifteen emerging words (CNKI)



图 11 前 25 位突现词 (WOS)

Fig.11 Top twenty-five emerging words (WOS)

### 3 结论与展望

#### 3.1 结论

通过对核电故障诊断领域进行文献可视化统计与分析,归纳出以下结论:

1)分析文献来源及分布可知,核电故障诊断领域的年发文量存在上升趋势但呈现明显波动,国内发文以研究院为主体,国际文献则由高校领衔,高校在机构合作间起重要桥梁作用。中国发文影响力最高且强调合作,美国发文量次之但国际合作程度不及英国。

2)分析关键词聚类及时间线可知,故障诊断技

术从专家驱动向数据驱动转变,热点趋势时移为在线监测/性能监测-预防性维修-机器学习/主成分分析-深度学习/卷积神经网络;核电厂的数字化进程热点时移为仪控系统-人因工程-智能运维-数字孪生。

3)分析突现词及热点时段可知,核电厂的安全稳定运行依靠完备的人机结合体系,人因失误机理-数据共建模型尚有发展空间,涉及个人、班组、社会技术等方面的细化;计算机应用层面,人工智能算法在核电故障诊断领域的提高精度、增强可解释性、克服时变影响等角度具备可拓展性。

4)故障诊断技术是支撑核电厂安全稳定运行的关键技术,文中梳理了近年核电机组故障诊断技

术的迭代过程,探讨了核电厂数字化转型的关键要素,重点讨论了现有故障诊断技术的局限,其能耗与碳排放也是不可忽视的问题,更多从工程实际应用的角度去剖析存在的困境,并提炼出未来发展方向。

### 3.2 研究展望

随着核电厂向着智慧化发展,故障诊断体系向着重时效、高精度、安全可靠的目标发展,数字孪生技术和深度学习技术是当下科研人员热衷的研究路径。现有的预防性维修技术严重受制于设备故障运行数据,若缺乏典型故障的典型数据将难以搭建有效模型,运行数据结合设备失效机理的研究是未来的发展方向。现有的机器学习方法多采用确定性模型,在进行故障诊断工作时原有的监测数据容易受外界无序扰动、内部工况调整等时变影响,可能导致报警区间偏移,进一步优化模型构建方式是有待研究的领域。现有的核电事故多由人因失误导致,人工可靠性不足但又无法完全脱离人工,因此在将来有效降低人因失误的体系亟须构建。现有的深度学习技术在核电故障诊断领域已有应用,但涉及设备更换或维修、参数的改变等对深度学习的结果造成较大影响,预测的准确度和可靠度下降。同时复杂构架意味着较久的训练时长、可解释性较差并一定程度脱离设备机理,这对现场操作人员缺乏一定的工程价值。未来实现提高深度学习模型的可解释性和透明性将变得更加重要,尤其是核电行业这样对安全极其关注的领域,这将有助于增强行业对人工智能的信任。

### 参考文献

- [1] 郑宽,徐志成,鲁刚,等.高比例新能源电力系统演化进程中核电与新能源协调发展策略[J].中国电力,2021,54(7):27-35.  
ZHENG Kuan, XU Zhicheng, LU Gang, et al. Coordinated development strategy for nuclear power and new energy in the evolution process of power system with high penetration of new energy[J].Electric Power,2021,54(7):27-35.
- [2] 仵华南,李华东,李昌卫,等.用混合储能辅助核电一次调频控制策略研究[J].山东电力技术,2022,49(3):14-19.  
WU Huanan, LI Huadong, LI Changwei, et al. Research on primary frequency control strategy of nuclear power unit assisted by hybrid energy storage[J].Shandong Electric Power,2022,49(3):14-19.
- [3] 郭娟娟,沈迪,童朴,等.中国三代核电经济评价方法与参数优化[J].中国电力,2024,57(3):206-212.  
GUO Juanjuan, SHEN Di, TONG Pu, et al. Economic evaluation method and parameter optimization for Third Generation nuclear power in China[J].Electric Power,2024,57(3):206-212.
- [4] 王丛林,柴晓明,杨博,等.先进核能技术发展及展望[J].核动力工程,2023,44(5):1-5.  
WANG Conglin, CHAI Xiaoming, YANG Bo, et al. Development and prospect of advanced nuclear energy technology [J]. Nuclear Power Engineering,2023,44(5):1-5.
- [5] 晁文浩,袁至,李骥.计及电转气-风-火-核-碳捕集的多源联合系统优化调度[J].中国电力,2024,57(1):183-194.  
CHAO Wenhao, YUAN Zhi, LI Ji. Optimal dispatch of power system with P2G-wind-thermal-nuclear-carbon capture units [J]. Electric Power,2024,57(1):183-194.
- [6] 于航,耿文龙.AP1000核电机组核能供热示范项目综合评价[J].山东电力技术,2021,48(12):72-76.  
YU Hang, GENG Wenlong. Comprehensive evaluation for a nuclear heating demonstration project of AP1000 nuclear power unit [J]. Shandong Electric Power,2021,48(12):72-76.
- [7] 史香锟,杨均勇,杨鹏,等.调峰运行对核电机组主汽轮机的影响分析[J].浙江电力,2019,38(1):35-39.  
SHI Xiangkun, YANG Junyong, YANG Peng, et al. Effects of peak load regulation on main steam turbines of nuclear power units [J]. Zhejiang Electric Power,2019,38(1):35-39.
- [8] 黄倩,张荣勇.核电站循环水泵故障诊断技术现状[J].给水排水,2020,56(增刊1):25-27.  
HUANG Qian, ZHANG Rongyong. Current situation of circulating water pump fault diagnosis technology in nuclear power plant [J]. Water & Wastewater Engineering,2020,56(S1):25-27.
- [9] 刘才学,罗能,何攀,等.反应堆关键设备健康监测与故障诊断技术研究进展[J].核动力工程,2023,44(3):8-20.  
LIU Caixue, LUO Neng, HE Pan, et al. Research progress of hearth monitoring and fault diagnosis for reactor critical equipment [J]. Nuclear Power Engineering,2023,44(3):8-20.
- [10] 许勇,蔡云泽,宋林.基于数据驱动的核电设备状态评估研究综述[J].上海交通大学学报,2022,56(3):267-278.  
XU Yong, CAI Yunze, SONG Lin. Review of research on condition assessment of nuclear power plant equipment based on data-driven [J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University,2022,56(3):267-278.
- [11] GONÇALVES M C P, KIECKBUSCH T G, PERNA R F, et al. Trends on enzyme immobilization researches based on bibliometric analysis[J].Process Biochemistry,2019,76:95-110.
- [12] 林俊光,冯彦皓,林小杰,等.基于CiteSpace的能源系统优化调度研究热点与趋势分析[J].热力发电,2023,52(8):1-12.  
LIN Junguang, FENG Yanhao, LIN Xiaojie, et al. Research hotspots and trends analysis of energy systems optimal scheduling based on CiteSpace [J]. Thermal Power Generation,2023,52(8):1-12.

- [13] 张明理,宋晓辉,蒯奕存,等.基于CiteSpace的汽轮机研究进展分析[J].热力发电,2022,51(4):1-9.  
ZHANG Mingli, SONG Xiaohui, LIN Yicun, et al. Analysis on research progress of steam turbines based on CiteSpace [J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(4): 1-9.
- [14] CHEN C. Searching for intellectual turning points: progressive knowledge domain visualization [J]. Proc Natl Acad Sci USA, 2004, 101(Suppl 1): 5303-5310.
- [15] 吴岩,王光政.基于CiteSpace的配电网韧性评估与提升研究综述与展望[J].中国电力,2023,56(12):100-112.  
WU Yan, WANG Guangzheng. Review and prospect of distribution network resilience assessment and improvement based on CiteSpace [J]. Electric Power, 2023, 56(12): 100-112.
- [16] 肖涵彬,李明,田世杰,等.碳中和背景下碳捕集、利用与封存技术专利发展研究——基于知识图谱的可视化分析[J].热力发电,2021,50(12):122-131.  
XIAO Hanbin, LI Ming, TIAN Shijie, et al. Development of patent on carbon capture, utilization and storage technology under carbon neutral background: visual analysis based on knowledge graph [J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(12): 122-131.
- [17] QI B, LIANG J G, TONG J J. Fault diagnosis techniques for nuclear power plants: a review from the artificial intelligence perspective [J]. Energies, 2023, 16(4): 1850.
- [18] 尚宪和,曾春,李蔚.预测性维修技术在核电厂的应用研究[J].核动力工程,2022,43(增刊2):60-66.  
SHANG Xianhe, ZENG Chun, LI Wei. Research on the application of predictive maintenance technology in nuclear power plant [J]. Nuclear Power Engineering, 2022, 43(S2): 60-66.
- [19] 李蔚,吴恺逾,陈坚红,等.基于非线性自回归神经网络和随机森林算法的核电汽轮机组出力优化[J].中国电机工程学报,2021,41(2):409-416.  
LI Wei, WU Kaiyu, CHEN Jianhong, et al. Output optimization of nuclear power steam turbine based on nonlinear autoregressive neural network and random forest algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(2): 409-416.
- [20] SARKAR A, MUKHERJEE S, SINGH M. Determination of the uranium elemental concentration in molten salt fuel using laser-induced breakdown spectroscopy with partial least squares-artificial neural network hybrid models [J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2022, 187: 106329.
- [21] 魏文涛,李美福,朱大欢,等.基于动态贝叶斯网络的核能系统可靠性评估方法研究[J].核动力工程,2023,44(增刊2):109-114.  
WEI Wentao, LI Meifu, ZHU Dahuan, et al. Research on reliability evaluation method of nuclear energy system based on dynamic Bayesian network [J]. Nuclear Power Engineering, 2023, 44(S2): 109-114.
- [22] 刘艳琪,张力,刘雪阳,等.核电厂数字化主控室操纵员行为形成因子评价模型[J].原子能科学技术,2021,55(5):926-932.  
LIU Yanqi, ZHANG Li, LIU Xueyang, et al. Evaluation model of performance shaping factor of operator in digital main control room of nuclear power plant [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2021, 55(5): 926-932.
- [23] BARALDI P, CAMMI A, MANGILI F, et al. An ensemble approach to sensor fault detection and signal reconstruction for nuclear system control [J]. Annals of Nuclear Energy, 2010, 37(6): 778-790.
- [24] WANG H, PENG M J, YU Y, et al. Fault identification and diagnosis based on KPCA and similarity clustering for nuclear power plants [J]. Annals of Nuclear Energy, 2021, 150: 107786.
- [25] 张秀春,夏虹,刘永康,等.基于移动窗核主成分分析的核电厂主泵故障检测[J].核动力工程,2024,45(3):234-240.  
ZHANG Xiuchun, XIA Hong, LIU Yongkang, et al. Fault detection for reactor coolant pump based on moving window kernel principal component analysis [J]. Nuclear Power Engineering, 2024, 45(3): 234-240.
- [26] 朱继忠,骆腾燕,吴皖莉,等.综合能源系统运行可靠性评估评述 II:数据驱动法与模型-数据混合驱动法[J].电工技术学报,2022,37(13):3227-3240.  
ZHU Jizhong, LUO Tengyan, WU Wanli, et al. A review of operational reliability assessment of integrated energy systems II: data-driven method and model-data hybrid driven method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(13): 3227-3240.
- [27] 胡启昊,郝亮亮,周艳真,等.基于励磁电流时序特征的核电多相旋转整流器二极管开路故障诊断[J].中国电机工程学报,2023,43(20):8082-8094.  
HU Qihao, HAO Liangliang, ZHOU Yanzhen, et al. Diode open-circuit fault diagnosis of nuclear multi-phase rotating rectifier based on timing features of field current [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(20): 8082-8094.
- [28] 汪凡雨,吴一纯,卜扬,等.基于机器学习的核电厂DCS卡件故障诊断研究[J].自动化仪表,2023,44(6):5-12.  
WANG Fanyu, WU Yichun, BU Yang, et al. Research on DCS card fault diagnosis in nuclear power plants based on machine learning [J]. Process Automation Instrumentation, 2023, 44(6): 5-12.
- [29] 刘勤明.基于状态监测信息的设备在线健康预测及维护优化研究[D].上海:上海交通大学,2014.
- [30] 沈江飞,王双飞,黄立军,等.核电厂设备状态多参数同步监测技术研究[J].核动力工程,2022,43(4):168-173.  
SHEN Jiangfei, WANG Shuangfei, HUANG Lijun, et al. Research on multi-parameter synchronous monitoring technology of nuclear power plant equipment status [J]. Nuclear Power Engineering, 2022, 43(4): 168-173.
- [31] 李鹏程.核电厂数字化控制系统中人因失误与可靠性研究[D].广州:华南理工大学,2011.

- [32] DUI H Y, XU Z, CHEN L W, et al. Data-driven maintenance priority and resilience evaluation of performance loss in a main coolant system[J]. *Mathematics*, 2022, 10(4): 563.
- [33] 常猛,王茹,李鹏程,等.数据驱动的核电厂人因失误因果机理模型研究[J]. *核动力工程*, 2023, 44(1): 198-203.  
CHANG Meng, WANG Ru, LI Pengcheng, et al. Research on data-driven human error causal mechanism in nuclear power plants[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2023, 44(1): 198-203.
- [34] YANG R F, KANG J S, QUAN Z Y. An enhanced preventive maintenance optimization model based on a three-stage failure process[J]. *Science and Technology of Nuclear Installations*, 2015, 2015: 193075.
- [35] 温亮,李盛杰,顾明洲,等.机械设备故障安全在核电厂中的应用探讨[J]. *山东电力技术*, 2021, 48(4): 68-71.  
WEN Liang, LI Shengjie, GU Mingzhou, et al. The application research of the fail safe in the nuclear power plant[J]. *Shandong Electric Power*, 2021, 48(4): 68-71.
- [36] 姜春林,刘盛博,丁堃.《中国科技期刊研究》研究热点及其演进知识图谱[J]. *中国科技期刊研究*, 2008, 19(6): 954-958.  
JIANG Chunlin, LIU Shengbo, DING Kun. Research hotspots of China sci-tech journals and its evolution knowledge map[J]. *Chinese Journal of Scientific and Technical Periodicals*, 2008, 19(6): 954-958.
- [37] HU G, ZHOU T T, LIU Q F. Data-driven machine learning for fault detection and diagnosis in nuclear power plants: a review[J]. *Frontiers in Energy Research*, 2021, 9: 663296.
- [38] 解光耀,刘井泉,曾聿赟. PHM技术在核电厂的应用与展望[J]. *核动力工程*, 2018, 39(2): 189-192.  
XIE Guangyao, LIU Jingquan, ZENG Yuyun. Application and prospect of PHM technology in nuclear power plants[J]. *Nuclear Power Engineering*, 2018, 39(2): 189-192.
- [39] SETHU M, KOTLA B, RUSSELL D, et al. Application of artificial intelligence in detection and mitigation of human factor errors in nuclear power plants: a review[J]. *Nuclear Technology*, 2023, 209(3): 276-294.
- [40] HUANG Q, PENG S, DENG J, et al. A review of the application of artificial intelligence to nuclear reactors: where we are and what's next[J]. *Heliyon*, 2023, 9(3): e13883.
- [41] KHENTOUT N, MAGROTTI G. Fault supervision of nuclear research reactor systems using artificial neural networks: a review with results[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2023, 185: 109684.
- [42] WU X J, LI Z Z. A review of alarm system design for advanced control rooms of nuclear power plants[J]. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 2018, 34(6): 477-490.
- [43] AYODEJI A, LIU Y K, CHAO N, et al. A new perspective towards the development of robust data-driven intrusion detection for industrial control systems[J]. *Nuclear Engineering and Technology*, 2020, 52(12): 2687-2698.

收稿日期:2024-08-01

修回日期:2024-10-10

作者简介:

李蔚(1974),女,博士,副研究员,主要从事核电机组性能监测和故障诊断、汽轮机热力设计等方面的研究工作;

李翱(2000),通信作者(22360188@zju.edu.cn),男,硕士在读,主要研究方向为核电故障诊断领域;

方兴煜(2000),男,硕士在读,主要研究方向为知识图谱;

卢韩斌(2001),男,硕士在读,主要研究方向为热力计算;

林小杰(1992),男,博士,主要研究方向为综合能源系统、能源+AI、智慧综合能源管控;

尚宪和(1973),男,博士,研究员级高级工程师,主要从事反应堆运行和设备管理工作。

(责任编辑 车永强)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2025.03.010

## 局部配水对高位收水冷却塔防冻节能特性影响的数值研究

杨利<sup>1</sup>, 李旋<sup>2</sup>, 李禹江<sup>2</sup>, 韩强<sup>2</sup>, 张智慧<sup>3</sup>, 赵元宾<sup>4\*</sup>

(1. 国能平罗发电有限公司, 宁夏 石嘴山 753400; 2. 山东电力工程咨询院有限公司, 山东 济南 250013;

3. 济南蓝辰能源技术有限公司, 山东 济南 250101; 4. 山东大学核科学与能源动力学院, 山东 济南 250061)

**摘要:**为提高冬季低负荷工况下自然通风高位收水冷却塔(以下简称高位塔)的防冻节能特性,以我国某两机一塔高位塔为原型,提出六区域单独可控的局部配水方案,建立适用于高位塔局部配水的三维数值计算模型,探究不同局部配水方式对高位塔水温分布特征与迎风侧进风口空气流速的影响,并结合环境温度、风速,分析局部配水下高位塔冬季运行的防冻节能特性。结果表明:局部配水可显著提高高位塔防冻特性,并减小填料底部水温偏差,当高位塔的局部配水方式由外圈配水变为1/2外圈配水、1/4外圈配水,填料底部最低水温从-2.93℃逐渐升高至6.83℃、10.85℃,平均水温与最低水温之间偏差始终为2℃左右;在局部配水尤其是1/4外圈配水下,迅速升高的配水区最低水温有利于高位塔冬季工况下迎风侧防冻的灵活调控。当环境温度从0依次降低至-5℃、-10℃,填料底部平均水温依次降低3.47℃、4.44℃。环境侧风会增大填料底部水温偏差,使得高位塔防冻性能变差。当环境风速从0增大至5 m/s、10 m/s,填料底部最低水温依次降低2.81℃、2.42℃。5 m/s以上大风速下,平均水温与最低水温之间偏差增大至8℃以上。

**关键词:**高位收水冷却塔;局部配水;防冻;节能;数值模拟

中图分类号: TM621

文献标志码: A

文章编号: 1007-9904(2025)03-0086-11

## Numerical Study on the Effect of Local Water Distribution on the Anti-freezing and Energy-saving Characteristics of High Cooling Tower

YANG Li<sup>1</sup>, LI Xuan<sup>2</sup>, LI Yujiang<sup>2</sup>, HAN Qiang<sup>2</sup>, ZHANG Zhihui<sup>3</sup>, ZHAO Yuanbin<sup>4\*</sup>

(1. Guoneng Pingluo Power Electric Co., Ltd., Shizuishan 753400, China;

2. Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute Co., Ltd., Jinan 250013, China;

3. Jinan Lanchen Energy Technology Co., Ltd., Jinan 250101, China;

4. School of Nuclear Science, Energy and Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract:** In order to improve the antifreeze and energy-saving characteristics of high level water collecting natural draft wet cooling tower under low load conditions in winter, a six-region individually controllable local water distribution scheme is proposed based on a "two-machine-one-tower" high cooling tower in China. A three-dimensional numerical calculation model is established, which is applied to the local water distribution of the high cooling tower. The effects of different local water distribution methods on the water temperature distribution and the air flow velocity of the air inlet on the windward side of the high cooling tower are investigated. Combined with the ambient temperature and the wind speed, the anti-freezing and energy-saving characteristics of the high cooling tower operating in winter under local water distribution are analyzed. The results show that: The implementation of local water distribution can markedly enhance the antifreeze characteristics of the high cooling tower, and reduce the deviation of water temperature at the bottom of the fill. The local water distribution method of the high cooling tower is changed from outer ring to 1/2 and 1/4 outer ring water distribution, and the minimum water temperature at the bottom of the filler gradually increased from -2.93℃ to 6.83℃ and 10.85℃, and the deviation between the average and minimum water temperature is always about 2℃; under the local water distribution, especially under 1/4 outer ring water distribution, the rapidly increasing minimum water temperature in the distribution area is beneficial to flexible control of anti-freezing on the windward side of the high cooling tower under winter conditions. As the ambient temperature decreased from 0 to

基金项目: 山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目(2022TSGC1026)。

Shandong Province Science and Technology Small and Medium-sized Enterprise Innovation Ability Promotion Project(2022TSGC1026).

-5 °C and -10 °C in turn, the average water temperature at the bottom of the filler decreased by 3.47 °C and 4.44 °C in turn. Affected by the environmental crosswind, the water temperature deviation at the bottom of the filler is increased, and the anti-freezing performance of the high cooling tower is deteriorated; As the ambient wind speed increased from 0 to 5 m/s and 10 m/s, the minimum water temperature at the bottom of the fill is reduced by 2.81 °C and 2.42 °C in turn; under the wind speed of more than 5 m/s, the deviation between the average and minimum water temperature is increased to more than 8°C.

**Keywords:** high level water collecting cooling tower; local water distribution; anti-freezing; energy-saving; numerical simulation

## 0 引言

近年来,相比于其他常规湿冷却塔,自然通风高位收水冷却塔(以下简称高位塔)因利用填料底部的收水装置和集水槽代替了集水池和雨区<sup>[1-2]</sup>,降低了循环水泵的扬程<sup>[3]</sup>,拥有节能、低噪音等优势<sup>[4]</sup>而得到推广,但其同样存在着出塔水温易波动、冬季防冻形势严峻等问题<sup>[5-7]</sup>。

冬季的低环境温度极易导致湿冷却塔进风口上沿、填料底部结冰<sup>[8-9]</sup>,尤其在深度调峰工况下,较低的热负荷会进一步加剧湿冷却塔安全运行压力。针对冬季低气温下冷却塔的防冻措施大多集中于采用局部配水、设置进风格栅、悬挂挡风板等<sup>[10-12]</sup>。王中华等<sup>[13]</sup>通过不同工况下的湿冷却塔数值模拟,发现在低负荷运行时,湿冷却塔防冻性能急剧降低,须加装防冻装置。李永华等<sup>[14]</sup>指出,冬季加装进风调节装置可有效提高出塔水温,防止结冰。王季夫<sup>[15]</sup>对加装挡风装置的冷却塔进行了变工况数值模拟,发现随环境横向风速的增加,冷却塔空气温度较高区域由背风侧向迎风侧转移。Wang等<sup>[16]</sup>指出,侧风虽然不利于湿冷却塔换热,但侧风越大,填料底部水温越高,越不容易结冰。周晓慧<sup>[17]</sup>、Li等<sup>[18]</sup>进行了常规湿冷却塔不同配水方式下的三维数值研究,研究表明局部配水使塔内部温度场更均匀。王锁斌等<sup>[19]</sup>指出,常规湿冷却塔采用外圈配水时出塔水温与循环水流量密切相关,循环水流量较高时,外圈配水的出塔水温高于全塔配水,循环水流量较低时则相反。陈瑞<sup>[20]</sup>通过常规湿冷却塔的局部配水研究发现了冷却效率、通风量随内区配水量比例增加表现出先增加后减小的变化趋势。杨静等<sup>[21]</sup>指出外区配水循环水流量并非越大越好,过大的循环水流量增大了冷却塔进风口空气阻力。Wang等<sup>[22]</sup>研究了旁路抽取循环水的比例对湿冷却塔冷却性能和防冻性能的影响,结果表明抽取比例越高,温降越大,但结冰风险越高。

综上,局部配水可改变冷却塔淋水密度,常用于解决冬季机组负荷小,出塔水温过低带来的防冻问题<sup>[23]</sup>。目前国内关于局部配水的研究多集中于常规湿冷却塔的内外围配水,配水方式单一。而高位塔可设置为六区域配水,且可以利用钢闸板单独控制,为其冬季防冻节能运行提供了更为灵活的控制方式,这种配水方式对高位塔防冻节能的优化机理也亟须研究。

文中以我国某火电厂 2×350 MW 两机一塔高位塔为原型,开发了适用于高位塔局部配水的三维数值计算模型。将能反映冷却塔防冻特性、冷却节能特性、水温分布均匀性及进风流场分布的参数具体细化为四个关键指标:填料底部最低温度、填料底部平均水温、填料底部水温偏差和迎风侧进风口空气流速分布。通过深入分析冬季低负荷局部配水运行条件下,不同配水方式、环境温度和环侧风对高位塔水温分布特征与防冻节能特性的影响,旨在为自然通风高位塔在冬季的节能安全运行提供研究基础。

## 1 研究模型

### 1.1 几何模型

所研究的高位塔几何结构参数详见表 1。

表 1 结构参数  
Table 1 Structural parameters

参数	数值
净淋水面积/m <sup>2</sup>	8 989.4
塔顶标高/m	158.22
喉部标高/m	126.58
填料顶部标高/m	18.05
填料底部标高/m	16.05
进风口高度/m	13.55
0 米层直径/m	121.66
喉部直径/m	71.68
塔顶出风口直径/m	73.57

高位塔特有的收水装置、反向收水斜板和十字挡风墙,如图1—图2所示。充分考虑以上结构特征,建立1:1的高位塔几何模型,如图3所示。

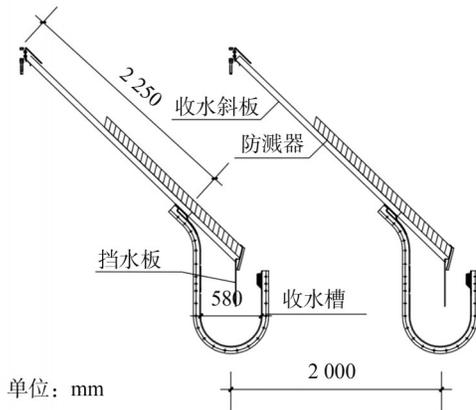


图1 收水装置结构及尺寸

Fig.1 Structural and dimensional drawings of the water collecting device

根据既有研究,为规避塔体自身对模拟边界的不利影响,计算域尺寸应至少为冷却塔体的五倍<sup>[24-28]</sup>。故以冷却塔为中心,设定计算域为半径700 m、高度1 000 m的圆柱空间。模型采用多尺度网格划分,冷却塔远处网格疏松,塔内主要传热传质区网格加密,如图4所示。

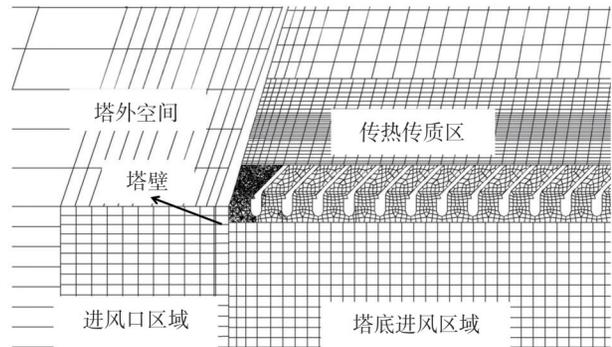


图4 网格划分示意图

Fig.4 Schematic diagram of grid demarcation

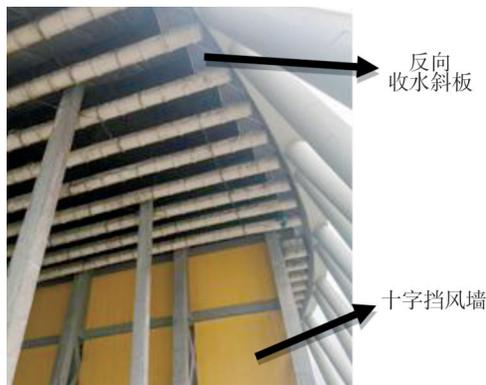


图2 反向收水斜板和挡风墙实物图

Fig.2 Physical map of the reverse water collection inclined plate and the windbreak wall

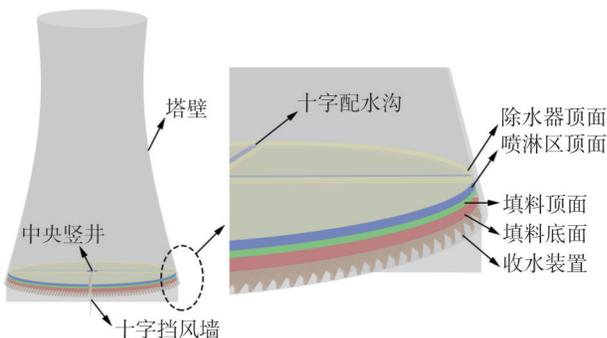


图3 几何模型示意图

Fig.3 Schematic of the geometric model

## 1.2 数学模型

在火电机组稳定运行、功率不变的情况下,机组在凝汽器中排放的热量变化较小<sup>[29]</sup>,且机组循环水在相当一段时间内保持相对稳定。数值计算中将空气视为不可压缩流体,忽略侧风对塔内循环水流动的影响,并将其简化为垂直向下流动。

### 1.2.1 湿空气连续相控制方程

将塔内湿空气流动视为连续介质运动,其质量守恒方程、动量守恒方程及能量守恒方程、组分平衡方程的一般形式为

$$\nabla(\rho \vec{u} \varphi - \Gamma_{\varphi} \nabla \varphi) = S_{\varphi_i} + S_{\varphi} \quad (1)$$

式中: $\rho$ 为湿空气密度; $\vec{u}$ 为速度矢量; $\varphi$ 为通用变量; $\Gamma_{\varphi}$ 为 $\varphi$ 对应的广义扩散系数; $S_{\varphi_i}$ 为 $\varphi$ 对应的源项; $S_{\varphi}$ 为控制方程中气相受到液相的影响。

### 1.2.2 离散相控制方程

循环水在喷淋区以液滴的状态存在,汽流中的蒸发过程以离散相模型进行描述。

$$dm_p = k_c A_p \rho_{\infty} \ln(1 + B_m) dt \quad (2)$$

式中: $m_p$ 为液滴质量; $k_c$ 为传质系数; $A_p$ 为液滴的表面积; $\rho_{\infty}$ 为空气密度; $B_m$ 为与液滴质量有关的经验系数; $t$ 为液滴温度。

### 1.2.3 阻力计算方程

高位塔填料阻力特性表达式<sup>[30]</sup>为

$$\frac{\Delta p}{\gamma} = \beta v^M \quad (3)$$

式中: $\Delta p$ 为淋水填料阻力; $\gamma$ 为空气重度; $v$ 为通过淋水填料的风速; $\beta$ 和 $M$ 为由试验确定的有关填料特性的经验系数。

计算采用的经验系数如下:

$$N = 2.17\lambda^{0.70} \quad (4)$$

$$\beta = 0.0021q^2 - 0.0064q + 1.76 \quad (5)$$

$$M = -0.0019q^2 + 0.02q + 2 \quad (6)$$

式中: $N$ 为淋水填料的冷却特性数; $\lambda$ 为气水比; $q$ 为淋水密度。

### 1.3 边界条件设置

如图5所示,无环境风时,设置圆柱计算域侧面为压力入口,计算域顶面为压力出口;侧风条件下,设置迎风面为速度入口,背风面及计算域顶面为压力出口。设置喷淋区顶面为循环水进水面,设定其水温为出塔水温与高位塔内循环水温降之和,并根据冬季实测循环水流量设置淋水密度。求解过程中,当比例残差均小于 $10^{-4}$ ,且连续200次迭代过程中出塔水温波动值小于 $0.01\text{ }^\circ\text{C}$ ,则认为迭代收敛。

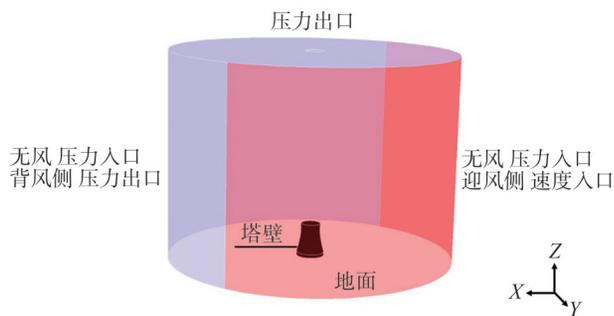


图5 计算域及边界条件

Fig.5 Calculation domain and boundary condition setting

### 1.4 模型验证

本文建立了总网格数分别为250万、350万和450万的三套网格系统,并基于表2所示的三个现场实测工况C1、C2和C3进行了模型验证和网格独立性验证。三个现场实测工况的机组运行参数、环境参数以及计算结果如表2所示。现场实测主要对机

组运行过程中的环境温度、环境气压以及两机组进口水温等参数进行了测量。两台机组共四个循环水泵均处于高速运行状态,计算时取全高速状态对应的循环水流量设计值为 $82\,776\text{ m}^3/\text{h}$ 。计算时进塔水温按照两机组平均进塔水温进行计算。

表2 实测工况参数

Table 2 Measured operating parameters

工况参数	C1	C2	C3
干球温度/ $^\circ\text{C}$	20.90	25.30	30.10
相对湿度/%	79.00	82.00	79.00
大气压/hPa	1 001.60	1 001.40	1 001.10
1号机组进塔水温/ $^\circ\text{C}$	32.04	34.51	39.27
2号机组进塔水温/ $^\circ\text{C}$	33.16	35.49	40.93
平均进塔水温/ $^\circ\text{C}$	32.60	35.00	40.10
实测出塔水温/ $^\circ\text{C}$	25.00	28.50	33.90

如表3所示,三套网格系统计算所得出塔水温与实测出塔水温的最大偏差分别为 $0.59\%$ 、 $0.53\%$ 和 $0.53\%$ ,误差均在 $1.0\%$ 之内,满足模型验证精度要求。为保证计算精度与计算效率,最终选择350万网格单元系统进行数值模拟。

表3 出塔水温计算结果

Table 3 Calculated results of water temperature from the tower

参数		不同网格总数下的结果		
		250万	350万	420万
计算出塔水温/ $^\circ\text{C}$	C1	24.85	24.86	24.86
	C2	28.33	28.35	28.36
	C3	33.70	33.72	33.72
绝对误差/ $^\circ\text{C}$	C1	0.15	0.14	0.14
	C2	0.17	0.15	0.14
	C3	0.20	0.18	0.18

### 1.5 配水方式

所研究的高位塔配水共分为6个区域,如图6所示,其中内区净淋水面积为 $3\,091.9\text{ m}^2$ ,外区净淋

水面积为 5 897.5 m<sup>2</sup>,内 1 区与内 2 区面积比为 1:1,外 1 区至外 4 区面积比为 1:1:1:1。分别设置三种高位塔局部配水方式:外圈配水(外 1 区至外 4 区配水)、1/2 外圈配水(外 1 区、外 3 区配水)、1/4 外圈配水(仅外 1 区配水)。

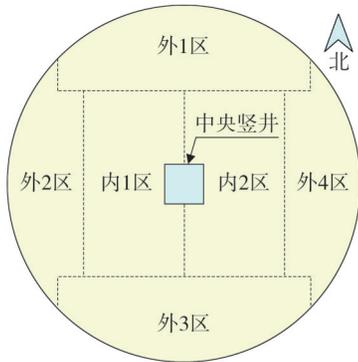


图6 局部配水示意图

Fig.6 Schematic diagram of local water distribution

## 2 高位塔防冻节能特性

探究局部配水对高位塔热力性能影响作用时,为避免环境侧风对其热力性能的大幅干扰,首先以无环境风作为防冻节能特性测试的理想条件,探究冬季低负荷运行下局部配水方式、环境温度对高位塔水温分布和进风口空气流场的影响,再结合电厂年均主导风向下的部分风速,进一步分析不同环境风速下高位塔填料区的防冻节能特性。数值模拟过程中将低于 0 °C 的循环水视为过冷水。

### 2.1 不同局部配水方式下的水温分布与空气流场

图 7 给出了不同配水方式下高位塔的填料底部平均水温、最低水温和水温偏差(填料底部平均水温与最低水温之差),图 8 展示了各配水方式对应的填料底层水温分布。图 9 给出了不同局部配水方式下,高位塔迎风侧进风口的空气流速等值线图,计算工况均为-10 °C 无风条件。

综合图 7、图 8 可知,当配水方式由外圈配水逐渐过渡到 1/4 外圈配水,高位塔配水面积逐渐缩小。填料底部最低水温从-2.93 °C 依次升高至 6.83 °C、10.85 °C,填料结冰风险大幅降低,高位塔防冻特性得到明显提升。由此可见,高位塔的防冻特性随配

水面积的缩小而升高,在局部配水尤其是 1/4 外圈配水下,填料底部最低水温高达 10.85 °C,局部配水方式下配水区最低水温的迅速升高有利于冬季工况下高位塔迎风侧防冻的灵活调控。

同时,填料底部平均水温逐步升高 9.29 °C、4.22 °C,说明高位塔的冷却节能特性随配水面积缩小而逐渐降低。而局部配水下填料底部水温偏差较小,稳定在 2 °C 以下,其水温分布具有较好的均匀性。

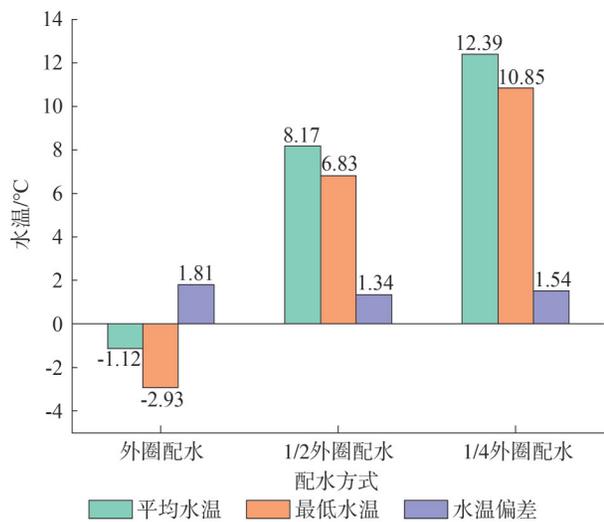
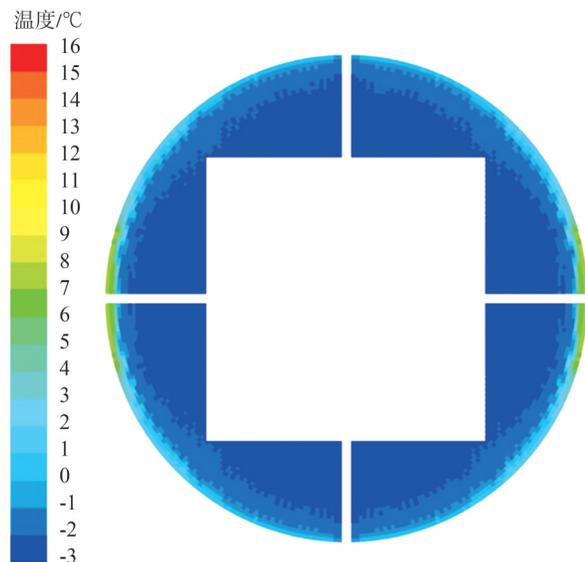


图7 不同局部配水方式下的水温变化

Fig.7 The variation trend of water temperature under different local water distribution modes



(a)外圈配水

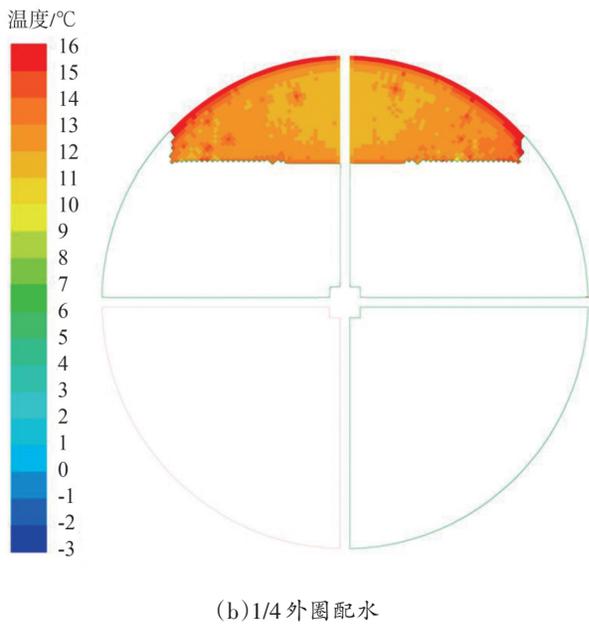
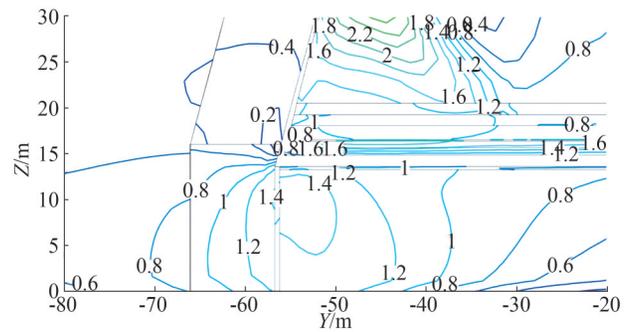
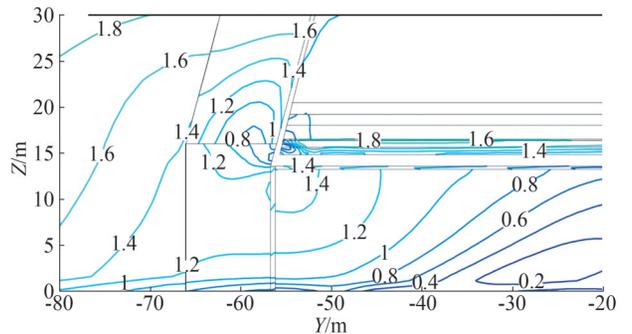


图8 不同配水方式下的填料底部水温分布  
Fig.8 Distribution of water temperature at the bottom of filler at different water distribution modes



(b) 1/2 外圈配水



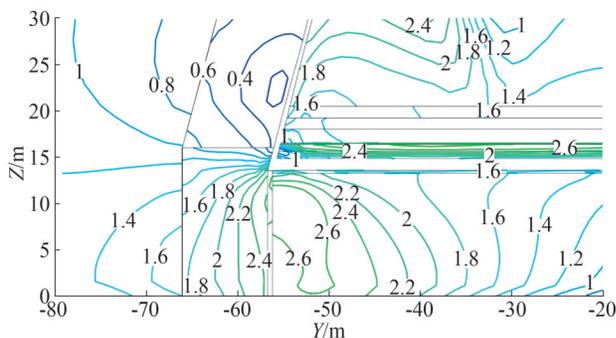
(c) 1/4 外圈配水

图9 不同配水方式下的迎风侧进风口空气流速等值线  
Fig.9 The contour map of air velocity at the windward side inlet under different water distribution modes

由图9可以看出,当局部配水方式从外圈配水过渡到1/2外圈配水、1/4外圈配水,最大空气流速分别从2.4 m/s减小至1.6 m/s、1.4 m/s,依次减小33%、12.5%。以1.4 m/s为例,各流速等值线范围均逐渐缩小,说明进风口空气流速随配水面积的缩小而减小,进而使得整塔通风量分别从16 948.49 kg/s降低至10 335.05 kg/s、9 242.56 kg/s,依次降低39%、10.6%。这是由于配水区上方热空气卷吸未配水区冷空气流向塔壁,导致塔内喉部位置形成漩涡,增大了环境风进入塔内的空气阻力。图9所得结论印证了图7中的变化规律,局部配水下高位塔通风散热量降低,导致填料底层平均水温、最低水温均随之升高,高位塔防冻特性得到提升的同时,冷却节能特性随之降低。

## 2.2 不同环境温度下局部配水的水温分布与空气流场

图10、图11分别给出了外圈配水方式在不同环境温度下的水温变化趋势和填料底部水温分布。



(a) 外圈配水

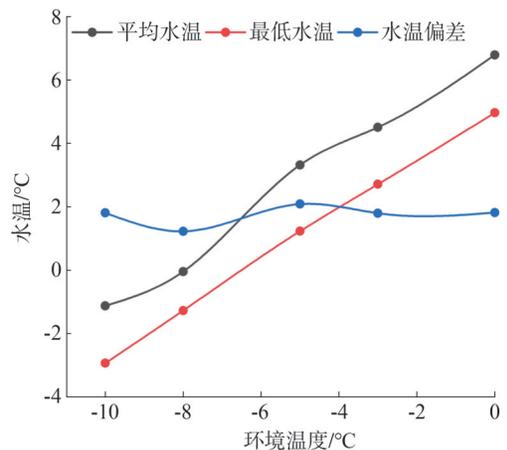


图10 不同环境温度的水温变化  
Fig.10 The variation trend of water temperature under different ambient temperatures

由图10可知,在配水方式不变的情况下,填料底部平均水温、最低水温均与环境温度呈正相关。

当环境温度自0℃依次降低至-5℃、-10℃,填料底部平均水温从6.79℃降低至3.32℃、-1.12℃,依次降低3.47℃、4.44℃,说明在局部配水下,高位塔的冷却节能特性随着环境温度的降低而改善。填料底部最低水温从4.97℃逐渐降低至1.23℃、-2.93℃,并在环境温度-6℃左右时降至零下,填料结冰风险增大,高位塔防冻特性显著降低。水温偏差受环境温度影响较小,在1.8~2.1℃区间小幅波动。

综合图8(a)和图11可知,不同环境温度下,填料底层水温均呈东西向对称分布,且外边缘水温始终高于内部,水温最高点出现在东西向配水沟末端位置,这是由于所研究的高位塔沿塔壁设置了反向收水斜板,阻拦了部分径向进风,降低了相应位置填料区的传热传质效率。

图12、图13分别给出了不同环境温度下外圈配水的迎风侧进风口空气流速等值线图和塔内压力变化。

综合图9(a)和图12可知,环境温度0℃、-5℃和-10℃下,最大空气流速均为2.6~2.8 m/s,变化较小。而以2 m/s为例,各流速等值线范围逐渐变大,说明环境温度越低,迎风侧进风口处空气流速越大。这使得整塔通风量从139 41.5 kg/s升高至15 295.49 kg/s、16 948.49 kg/s,依次升高9.7%、10.8%。该结论与图10所得规律相互印证,环境温度降低时,高位塔冷却节能特性的提升说明全塔通风量增大,即相同配水方式下进风口空气流速增大。

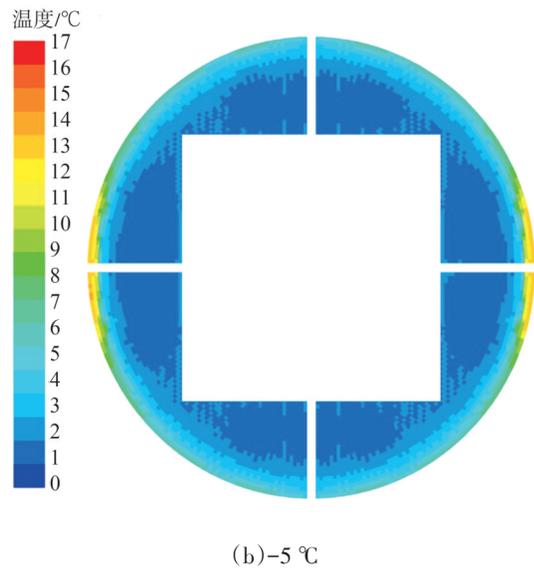
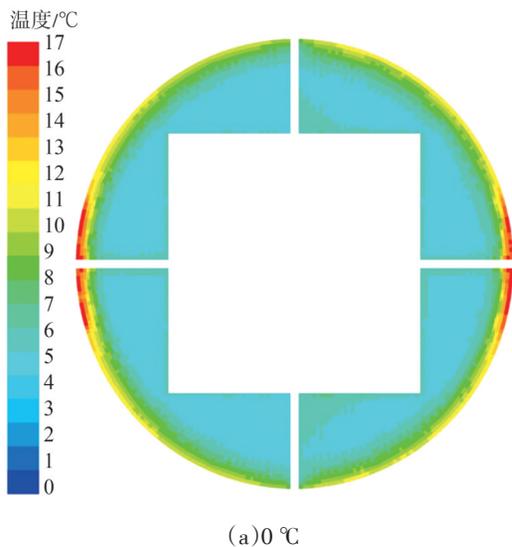


图11 不同环境温度下的填料底部水温分布  
Fig.11 Distribution of water temperature at the bottom of filler at different ambient temperatures

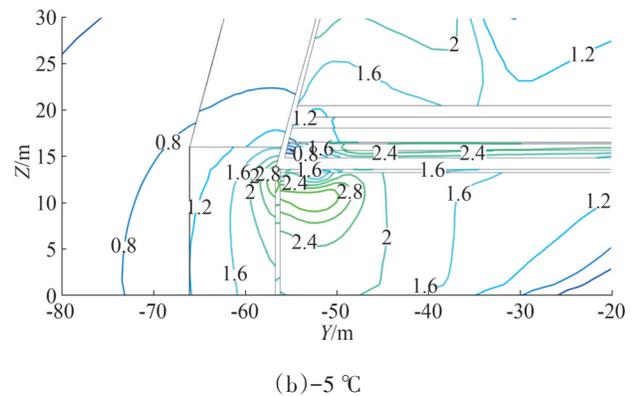
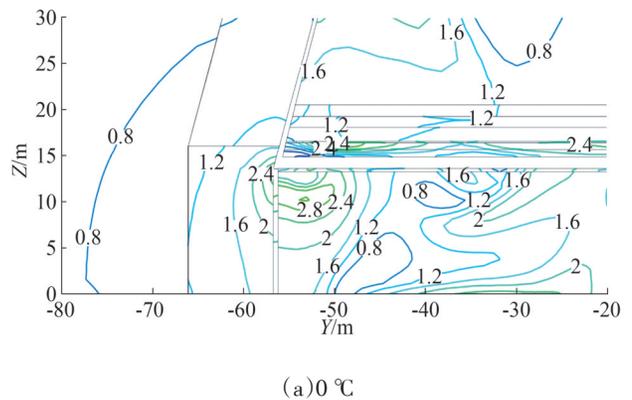


图12 不同环境温度下的迎风侧进风口空气流速等值线  
Fig.12 The contour map of air velocity at the windward side inlet at different ambient temperatures

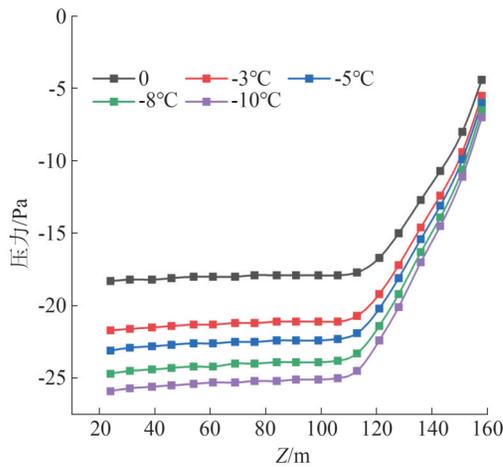


图 13 压力变化曲线

Fig.13 Pressure change curves

由图 13 可见,各环境温度下的压力变化趋势基本一致,在约 120 m 喉部位置附近,塔内压力值由平缓上升转为迅速攀升。随着塔内垂直高度的上升,0 °C 下的压力值由-18 Pa 升高至-4.5 Pa;-5 °C 下的压力值由-22.5 Pa 升高至-6 Pa;-10 °C 下的压力值由-25.5 Pa 升高至-7 Pa。这表明,随着环境温度降低,塔内下部压力值逐渐降低,压力随高度变化幅度逐渐增大。结合图 10、图 12 可知,由塔内压差带来的上升抽力随温度降低而增大,进而导致了空气流速提高,通风量增大,高位塔冷却节能特性随之升高。

### 2.3 不同环境风速下局部配水的水温分布与空气流场

图 14、图 15 分别为外圈配水、环境温度-5 °C、附加年主导东南风向环境侧风时的高位塔填料底部水温变化趋势和水温分布图。图 16 展示了外圈配水方式、环境温度-5 °C、不同环境侧风风速下的高位塔迎风侧进风口空气流速等值线和流线图。

由图 14 可知,在一定的局部配水方式下,随着环境风速的增大,填料底部平均水温先升后降,在 5~6 m/s 风速下达到最高,约为 6.0 °C,且该区间填料底部平均水温较高,高位塔冷却节能特性较差。风速越大,高位塔防冻特性越差,当环境风速从 0 增大至 5 m/s、10 m/s,填料底部最低水温依次降低 2.81 °C、2.42 °C,风速增至 2 m/s 左右时填料底部最低水温降至零下,防冻需求急剧上升,同时

5 m/s 以上大风速会导致填料底部水温偏差增大至 8 °C 以上。

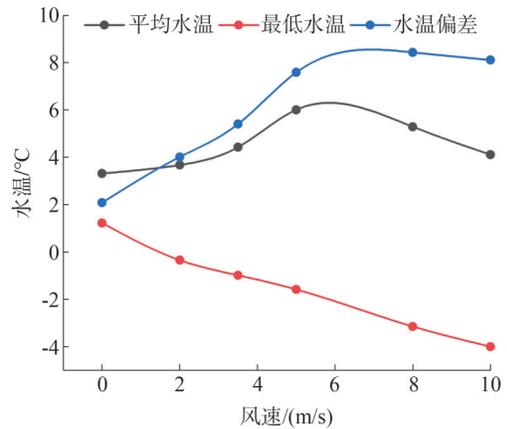
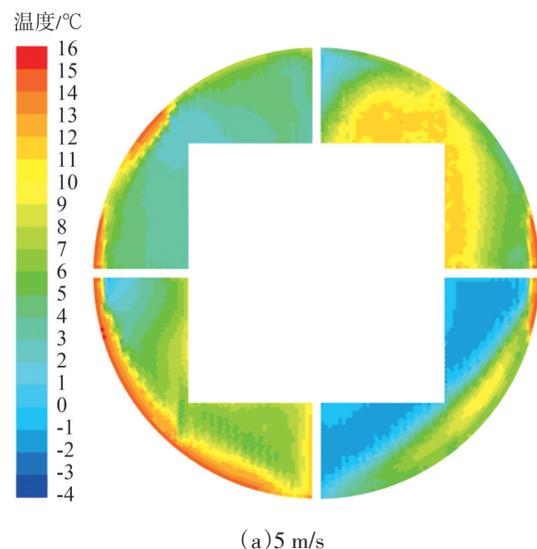


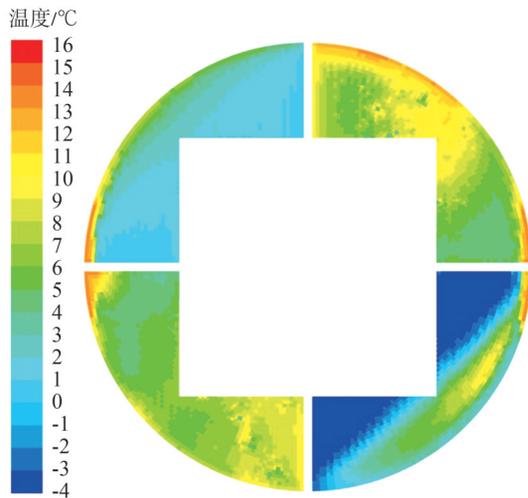
图 14 不同风速下的水温变化趋势

Fig.14 The variation trend of water temperature under different wind velocity

对比图 11(b)和图 15 可知,东南风向环境侧风引起了填料底层水温分布不均。其中,迎风侧配水区塔筒边缘、塔侧配水区对应位置的出塔水温升高,是因为十字挡风墙阻碍塔侧配水区进风,环境风形成漩涡干扰塔内汽-水两相传热传质。而迎风侧配水区内部、塔侧配水区配水沟附近对应位置的出塔水温急剧降低,说明环境侧风同时也会加大局部风速、增强局部换热,造成迎风侧防冻需求急剧升高,同时增大水温偏差,弱化填料底部水温均匀性。



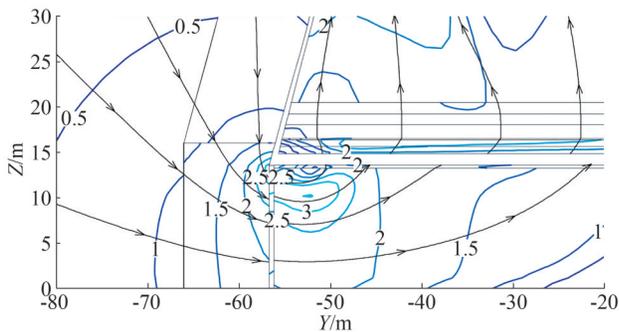
(a) 5 m/s



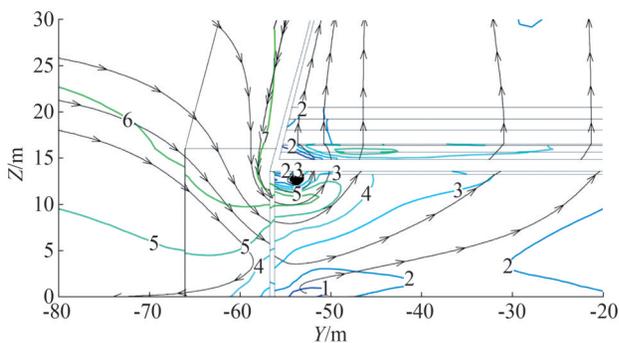
(b) 10 m/s

图 15 不同风速下的填料底层水温分布

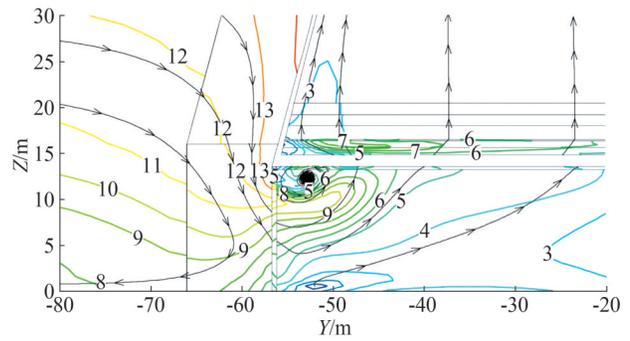
Fig.15 Distribution of water temperature at the bottom of filler under different wind velocity



(a) 0 m/s



(b) 5 m/s



(c) 10 m/s

图 16 不同风速下的迎风侧进风口空气流速等值线和流线图

Fig.16 Air flow velocity contour and streamline diagram of the windward side inlet at different wind velocity

由图 16 可以看出,在一定的局部配水方式下,进风口空气流速随环境风速的增大大幅升高,当环境风速由 0 增大至 5 m/s、10 m/s,高位塔迎风侧底部空气流速最大值从 3 m/s 升高至 6 m/s、10 m/s,最小值也从 1.5 m/s 升高至 2 m/s、3 m/s。结合流线分布可知,无风(风速为 0)时,高位塔迎风侧进风口的空气流线分布均匀,空气依次进入雨区、填料区和配水区内与冷却水传热传质,风速为 5 m/s、10 m/s 时,填料下方均出现一纵向旋涡,且旋涡面积随环境风速的增大而增大。由图 16(c)可见,因进塔空气在旋涡内不断旋转变为高温湿空气,妨碍汽水传热传质,使得该区域空气流速明显低于四周。

### 3 结论

文中建立了一套适用于高位收水冷却塔局部配水的三维数值计算模型,并结合实测工况验证了该模型的正确性。基于该模型,分析了高位塔低负荷局部配水时,不同局部配水方式、环境温度以及环境风速对填料底部平均水温、最低水温、水温偏差及迎风侧进风口空气流场的影响。主要结论如下:

1) 当局部配水方式从外圈配水逐渐过渡为 1/2 外圈配水、1/4 外圈配水,高位塔防冻特性逐渐改善,冷却节能特性逐渐变差。填料底部最低水温分别由 -2.93 °C 逐渐升高到 6.83 °C、10.85 °C,在局部配水尤其是 1/4 外圈配水下,局部配水方式下配水区最低水温的迅速升高有利于高位塔冬季工况下迎风侧防冻的灵活调控。平均水温逐步升高了 9.29 °C、4.22 °C,迎风侧进风口最大空气流速依次减小 33%、

12.5%,整塔通风量依次降低39%、10.6%。平均水温与最低水温的水温偏差较小,约为2℃。

2)随环境温度降低,高位塔局部配水下的防冻特性变差但冷却节能特性得到改善。环境温度自0℃降低至-5℃、-10℃,最低水温从4.97℃逐步降低至1.23℃、-2.93℃,进风口空气流速逐渐增大,整塔通风量从13941.5 kg/s逐渐升高至15295.49 kg/s、16948.49 kg/s,依次升高了9.7%、10.8%。

3)环境侧风风速过大时,会削弱高位塔局部配水下的防冻性能,增大水温偏差。当环境风速从0增大至5 m/s、10 m/s,填料底部最低水温依次降低2.81℃、2.42℃,5 m/s以上大风速下,填料底部水温偏差增大至8℃以上。

## 参考文献

[1] 陈广川,张国罡,张赢.高位收水机械通风冷却塔在电厂的应用[J].南方能源建设,2022,9(增刊2):24-30.  
CHEN Guangchuan, ZHANG Guogang, ZHANG Ying. Application of high level water collecting mechanical draft cooling tower in power plant [J]. Southern Energy Construction, 2022, 9 (S2): 24-30.

[2] 陈广安.环境风对高位收水冷却塔空气动力场和热力特性的影响及其优化机制[D].济南:山东大学,2020.

[3] 朱晓云,付猛.高位收水冷却塔与自然通风冷却塔比选[J].能源研究与管理,2021(4):106-109.  
ZHU Xiaoyun, FU Meng. Comparison and selection between high water collecting tower and conventional natural ventilation cooling tower[J]. Energy Research and Management, 2021(4): 106-109.

[4] 张林,李倩.浅谈高位收水塔在大型燃煤电站的应用[J].中国工程咨询,2018(4):66-69.  
ZHANG Lin, LI Qian. Discussion on the application of high water collecting tower in large coal-fired power station [J]. China Engineering Consultants, 2018(4): 66-69.

[5] ZHAO Y B, SUN F Z, LONG G Q, et al. Comparative study on the cooling characteristics of high level water collecting natural draft wet cooling tower and the usual cooling tower [J]. Energy Conversion and Management, 2016, 116: 150-164.

[6] CHEN G G, ZHAO Y B, GE W J, et al. Critical guidelines to cope with the adverse impacts of the inner peripheral vortex in the high-level water collecting natural draft wet cooling tower [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 168: 114819.

[7] 龙国庆,张国罡,陈学宏,等.侧风对机械通风高位收水冷却塔群三维热力特性的影响研究[J].热能动力工程,2024,39(4):96-103.  
LONG Guoqing, ZHANG Guogang, CHEN Xuehong, et al. Study on

the influence of crosswind on three-dimensional thermal characteristics of mechanical ventilation high-level water-collecting cooling tower group [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(4): 96-103.

[8] 李光日,郭鹏.自然通风逆流式冷却塔冬季结冰原因及处理[J].吉林电力,2003,31(4):19-21.  
LI Guangri, GUO Peng. Freeze of natural draft counter-flow cooling tower in winter and its treatment [J]. Jilin Electric Power, 2003, 31 (4): 19-21.

[9] 黄家运.直接空冷机组的防冻分析及研究[D].上海:上海交通大学,2009.

[10] 周重阳,黄杰.数据中心冷却塔冬季防冻措施的研究[J].通信电源技术,2019,36(增刊1):154-157.  
ZHOU Zhongyang, HUANG Jie. Research on winter anti-freeze measures of data center cooling tower [J]. Telecom Power Technology, 2019, 36(S1): 154-157.

[11] 杨嘉森,潘宏刚,陈平,等.600 MW 机组冷却塔防冻及防侧风一体化研究[J].沈阳工程学院学报(自然科学版),2023,19(3):34-39.  
YANG Jiasen, PAN Honggang, CHEN Ping, et al. Research on integration of anti-freezing and anti-crosswind of cooling tower of 600 MW unit [J]. Journal of Shenyang Institute of Engineering (Natural Science), 2023, 19(3): 34-39.

[12] 王勇,张磊,姚坤.国产大型海水高位收水冷却塔配水装置改造应用分析[J].节能技术,2020,38(5):468-471.  
WANG Yong, ZHANG Lei, YAO Kun. Research on the reformation of large-scale high-level seawater collecting cooling tower in domestic [J]. Energy Conservation Technology, 2020, 38 (5): 468-471.

[13] 王中华,石秀刚,岳增刚,等.基于定热负荷的自然通风湿式冷却塔防冻特性三维数值研究[J].热力发电,2024,53(6):132-141.  
WANG Zhonghua, SHI Xiugang, YUE Zenggang, et al. Three-dimensional numerical study on anti-freezing characteristics of natural draft wet cooling tower at constant heat load [J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(6): 132-141.

[14] 李永华,杨少波,李广,等.进风调节装置对自然通风冷却塔的性能影响[J].设备管理与维修,2021(7):17-19.  
LI Yonghua, YANG Shaobo, LI Guang, et al. Influence of air inlet regulating device on performance of natural ventilation cooling tower [J]. Plant Maintenance Engineering, 2021(7): 17-19.

[15] 王季夫.应用数值仿真技术设计火电站冷却塔智能调风帘防冻系统的研究[D].沈阳:沈阳工程学院,2022.

[16] WANG Z H, YUE Z G, WANG W, et al. Study on the influence of circulating water bypass on the thermal and anti-freezing characteristics of high-level wet cooling tower [J]. Energies, 2024, 17(9): 2073.

[17] 周晓慧.基于新型分区布水的自然通风湿式冷却塔冷却性能数值模拟研究[D].北京:华北电力大学,2022.

- [18] LI H W, DUAN W B, WANG S B, et al. Numerical simulation study on different spray rates of three-area water distribution in wet cooling tower of fossil-fuel power station [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 130: 1558-1567.
- [19] 王锁斌, 邓彤天, 王红波, 等. 深度调峰工况下外圈配水湿式冷却塔模拟研究[J]. 电力大数据, 2020, 23(8): 86-92.  
WANG Suobin, DENG Tongtian, WANG Hongbo, et al. Simulation study on water distribution in wet cooling tower under the deep peak load regulation condition [J]. Power Systems and Big Data, 2020, 23(8): 86-92.
- [20] 陈瑞. 侧风下填料布置和分区配水对湿式冷却塔冷却性能影响的模拟研究[D]. 济南: 山东大学, 2022.
- [21] 杨静, 王玉坤, 杨松, 等. 湿式冷却塔配水系统分区配水的数值模拟研究[J]. 汽轮机技术, 2020, 62(3): 182-186.  
YANG Jing, WANG Yukun, YANG Song, et al. Numerical simulation of different flow of water distribution in wet cooling tower [J]. Turbine Technology, 2020, 62(3): 182-186.
- [22] WANG Z H, YUE Z G, WANG W, et al. Anti-freezing study of high-level water-collecting natural draft wet-cooling tower based on its water temperature distribution characteristics [J]. Energies, 2024, 17(3): 651.
- [23] 王锁斌, 邓彤天, 钟晶亮, 等. 自然通风湿式冷却塔外围配水运行方式模拟研究[J]. 东北电力大学学报, 2021, 41(5): 60-67.  
WANG Suobin, DENG Tongtian, ZHONG Jingliang, et al. Numerical simulation of natural draft wet cooling tower with peripheral water distribution [J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2021, 41(5): 60-67.
- [24] 赵元宾, 孙奉仲. 环境侧风下间接空冷却塔水温分布特性的研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(18): 5367-5376.  
ZHAO Yuanbin, SUN Fengzhong. Study on water temperature distribution characteristics of dry cooling tower under crosswind impact [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(18): 5367-5376.
- [25] 王淼, 王锦, 杨新明. 高位收水冷却塔冷却性能的数值模拟研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(6): 1723-1731.  
WANG Miao, WANG Jin, YANG Xinming. Numerical simulation study on cooling performance of operating condition for high-level water collecting cooling tower [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(6): 1723-1731.
- [26] 王妮妮, 张政清, 邹健, 等. 雨区干湿混合模式对超大型湿式冷却塔传热传质性能影响的数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15): 4927-4935.  
WANG Nini, ZHANG Zhengqing, ZOU Jian, et al. Numerical simulation on the effect of dry-wet hybrid cooling in rain zone on heat and mass transfer performance for the super-large wet cooling towers [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4927-4935.
- [27] 陈瑞, 孙更生, 孙浩然, 等. 侧风下分区配水对冷却塔性能的影响研究[J]. 热力发电, 2022, 51(3): 36-42.  
CHEN Rui, SUN Gengsheng, SUN Haoran, et al. Effect of partition water distribution on cooling performance of wet cooling towers with cross wind [J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(3): 36-42.
- [28] 马鲲鹏. 高含盐量循环水对冷却塔热力特性的影响规律[D]. 济南: 山东大学, 2021.
- [29] VOSOUGH A, FALAHAT A, VOSOUGH S. Improvement power plant efficiency with condenser pressure [J]. International Journal of Multidisciplinary Sciences and Engineering, 2011, 2: 38-43.
- [30] 赵顺安. 冷却塔工艺原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.

收稿日期: 2024-09-29

修回日期: 2024-11-15

作者简介:

杨利(1982), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电站高效运行管理;

李旋(1982), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事电厂水工工艺设计和研究工作;

李禹江(1983), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电厂设计和研究工作;

韩强(1977), 男, 硕士, 教授级高级工程师, 主要从事电厂水工工艺设计和研究工作;

张智慧(1999), 女, 硕士, 主要研究方向为空调热湿传递理论;

赵元宾(1981), 通信作者(zhyb@sdu.edu.cn), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为高效能量转换及节能技术。

(责任编辑 车永强)





关注《山东电力技术》