

山东电力技术

SHANDONG ELECTRIC POWER

12

2024

第 51 卷

2024年12月



国网山东省电力公司电力科学研究院信息安全实验室

广告

ISSN 1007-9904



9 771007 990243



国网山东省电力公司主办

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

山东电力技术
SHANDONG DIANLI JISHU
（月刊）

1974 年创刊 2024 年第 12 期
第 51 卷（总第 325 期）
2024 年 12 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：济南康如印务有限公司
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 张洪利 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 姜婷婷 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*9000*11*2024-12*n

《山东电力技术》入选 中国科技核心期刊



《山东电力技术》**中国科技核心期刊**，创刊于 1974 年，月刊，是国网山东省电力公司主管、主办的中文科技期刊。期刊国内统一连续出版物号 CN37-1258/TM，国际标准连续出版物号 ISSN 1007-9904，是中华人民共和国国家新闻出版广电总局认定的第一批学术期刊。

期刊原名《电力技术情报》，季刊，1996 年 1 月改为双月刊，2015 年 1 月改为月刊，2022 年 7 月改由国网山东省电力公司主办。发行范围：上级有关的主管部门，电力系统发供电企业、高等院校、科研单位等。

稿酬丰厚 不收取作者任何费用

期刊内容：

主要刊登电力生产、科研、调试、设计、供用电及电力设备等方面的科研成果、专家观点、专题论述等，重点突出配电网、新能源、源网荷储等特色方向。文章内容注重技术的先进性、实用性及时效性，是电力领域科技交流的重要平台。



欢迎投稿、欢迎引用《山东电力技术》！



投稿网址：sddljs.cbpt.cnki.net

投稿邮箱：sddljs@sina.com

电话：0531-67982997

目次

电网运行与控制

- 考虑充电站无功支撑的城市电网动态无功电压优化 董 新,李 广,乔荣飞,刘 申,阚常涛(1)
- 电子式消弧线圈对接地故障谐波选线的影响 乔东伟,宫德锋,秦苏亚,杨 坤,薛永端(10)
- 基于Bhattacharyya系数和Pearson相关系数的交直流混联电网电压波形相似度纵联保护方法
..... 张弘喆,丛 伟,王瑞梅,古千硕,张永杰(19)
- 基于WOA-AM-GRU的短期电力负荷预测方法的研究 韩明冲,韩 杰,姜 超,苏本勇,韩 冰(27)

源网荷储协调互动

- 计及资源差异特性的分布式光伏与储能聚合运营优化方法 ... 关逸飞,王玥娇,刘奕元,孙树敏,杨 颂(34)
- 考虑调峰辅助服务的虚拟电厂日前运行优化研究 耿 健,金玉龙,杨宇峰,曹 敬,武锡锦(44)
- 基于时间序列数据挖掘的常规机组爬坡性能估计 刘恩仁,高 嵩,白 卓,杨子江,李乐蒙,李 军(53)

输变电

- SF₆/N₂混合气体隔离开关接触不良时的温度分布及诊断判据研究
..... 张丕沛,孙国峰,李 杰,汪 鹏,王江伟(61)
- 电导率对直流GIL绝缘子电荷积聚过程影响研究 李 杰,王 丹,汪 鹏,孙景文,辜 超(69)
- 基于数学形态学与希尔伯特-黄变换的线路故障测距方法研究
..... 张永东,陶伟叶,常欣丽,王云鹏,丛玉颀(78)
- 基于分形理论的闪络放电痕迹分析方法研究 师 伟,孙景文,任敬国,乔 木,戈 宁(84)

CONTENTS

•Power Grid Operation and Control•

- Urban Distribution Network Dynamic Reactive Power Optimization Considering Electrical Vehicle Station
..... DONG Xin, LI Guang, QIAO Rongfei, LIU Shen, KAN Changtao(1)
- Influence of Power Electronic Arc Suppression Coil on Harmonic Current Selection of Grounding Fault
..... QIAO Dongwei, GONG Defeng, QIN Suyu, YANG Kun, XUE Yongduan(10)
- Longitudinal Protection Method of AC/DC Hybrid Power Grid for Voltage Wave Similarity Using Bhattacharyya
Coefficient and Pearson Correlation Coefficient
..... ZHANG Hongzhe, CONG Wei, WANG Ruimei, GU Qianshuo, ZHANG Yongjie(19)
- Research on Short-term Electric Load Forecasting Method Based on WOA-AM-GRU
..... HAN Mingchong, HAN Jie, JIANG Chao, SU Benyong, HAN Bing(27)

•Source-Grid-Load-Storage Coordinated Interaction•

- Distributed Photovoltaic and Energy Storage Aggregation Operation Optimization Method for Resource Differences
..... GUAN Yifei, WANG Yuejiao, LIU Yiyuan, SUN Shumin, YANG Song(34)
- Virtual Power Plant Day-ahead Operation Optimization Considering Peak Shaving Auxiliary Service
..... GENG Jian, JIN Yulong, YANG Yufeng, CAO Jing, WU Xijin(44)
- The Climbing Performance Estimation of Conventional Power Units Based on Time Series Data Mining
..... LIU Enren, GAO Song, BAI Zhuo, YANG Zijiang, LI Lemeng, LI Jun(53)

•Power Transmission and Transformation•

- Research on Temperature Distribution and Diagnostic Criteria for Poor Contact of SF₆/N₂ Mixed Gas Disconnecter
..... ZHANG Pipei, SUN Guofeng, LI Jie, WANG Peng, WANG Jiangwei(61)
- Effect of Electric Conductivity on the Charge Accumulation Characteristics of DC-GIL Insulator
..... LI Jie, WANG Dan, WANG Peng, SUN Jingwen, GU Chao(69)
- Research on Line Fault Ranging Method Based on the Mathematical Morphology and Hilbert-Huang Transform
..... ZHANG Yongdong, TAO Weiye, CHANG Xinli, WANG Yunpeng, CONG Yudi(78)
- Investigation of Approach to Analyze the Tracking Property After Flashover Based on Fractal Theory
..... SHI Wei, SUN Jingwen, REN Jingguo, QIAO Mu, GE Ning(84)

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

考虑充电站无功支撑的城市电网动态无功电压优化

董新, 李广, 乔荣飞, 刘申, 阚常涛*

(国网山东省电力公司济南供电公司, 山东 济南 213000)

摘要:随着新能源发电、新能源汽车和电气化轨道交通的大规模接入,城市电网在实际运行过程中电压问题越来越突出。文中提出了一种考虑电动汽车集群充电无功支撑的城市电网无功电压优化控制方法。结合电动汽车运行特性,构建电动汽车有序充电功率控制模型,将充电桩的功率因素控制作为系统无功支撑,在长鼻浣熊算法(coati optimization algorithm, COA)中引入折射反向学习机制、Levy飞行机制和螺旋搜索机制,得到改进长鼻浣熊算法(improved coati optimization algorithm, ICOA),优化调节新能源发电输出功率、充电桩充电功率及无功补偿装置出力,实现城市电网无功电压的最优控制,提高城市电网电压的安全性和稳定性。通过仿真验证所提方法的有效性,为城市电网应对新能源发电、新能源汽车以及电气化轨道交通接入带来的电压问题提供解决思路。

关键词:新能源发电;充电桩功率因素;动态无功优化;城市电网

中图分类号:TM910.6;U491.8

文献标志码:A

文章编号:1007-9904(2024)12-0001-09

Urban Distribution Network Dynamic Reactive Power Optimization Considering Electrical Vehicle Station

DONG Xin, LI Guang, QIAO Rongfei, LIU Shen, KAN Changtao*

(State Grid Jinan Power Supply Company, Jinan 213000, China)

Abstract: With the large-scale access of renewable energy generation, renewable energy vehicles and electrified rail transit, the voltage problem of urban power grid is becoming more and more prominent in the actual operation process. In this paper, an optimal reactive voltage control method for urban power grid considering the reactive power support of electric vehicle cluster is proposed. The orderly charging power control model of electric vehicles is built based on the operation characteristics of electric vehicles, and the power factor control of charging piles is taken as the reactive power compensation for the system. The refraction reverse learning mechanism, Levy flight mechanism and spiral search mechanism are introduced in coati optimization algorithm (COA) to improve the convergence speed and accuracy, and the improved coati optimization algorithm (ICOA) is used to optimize and cooperate the output power of renewable energy generation, the charging power factor of charging piles and the output of reactive power compensation device. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by simulation, it provides a solution for the voltage problems caused by new energy power generation, new energy vehicles and electrified rail transit access in urban power grids.

Keywords: renewable generations; power factor of vehicle charging station; dynamic reactive power optimization; urban power system

0 引言

城市电网是新型电力系统建设的重要组成部分,面对新能源发电系统、电气化轨道交通以及新能源电动汽车的接入,城市电网安全稳定运行面临新的问题和挑战^[1-2]。一方面,由于城市电网线路电缆

产生大量充电无功功率,造成无功过剩,形成无功
基金项目:国网山东省电力公司科技项目(SGSDJN00FZJS2311055)。Science and Technology Project of State Grid Shandong Electric Power Company(SGSDJN00FZJS2311055)。

倒送,导致电网电压越限问题突出;另一方面,由于城市负荷运行特性以及新能源发电的大量接入,致使负荷低谷时有功功率过剩,造成有功功率倒送。针对城市电网新的运行特性,充分考虑电网现有资源,提高城市电网无功电压调节能力是城市电网实际运行过程中面临的主要问题^[3-5]。

无功优化是通过调节电网中无功补偿设备的无功出力,优化系统无功潮流从而达到调压和降损的目的。城市电网中,随着电动汽车、光伏发电等源荷

侧资源的大量接入,电网有功、无功潮流都发生明显的变化,此时城市电网的无功优化也需要调整^[6-7]。文献[8]结合电动汽车充电桩双向充电技术,通过控制充电桩功率因素实现电动汽车充电桩的无功支撑作用。文献[9]设计了一种可以向电网提供无功支撑的非车载充电桩,通过无功补偿策略的控制实现用户充电需求,同时向电网提供无功支撑补偿。文献[10]设计了一种考虑电动汽车时空特性的充电双层调度策略,通过实时滚动优化实现电动汽车充电的有序控制。文献[11]通过优化双向充电桩的功率因数角,从而控制电动汽车有序充放电及与电网间的无功交互。文献[12]提出了一种考虑不确定性和充电需求的电动汽车并网充电控制优化,通过合理控制电动汽车无功量,有效降低柴油机的燃料费用。文献[13]提出了一种基于电动汽车无功补偿的电压调控策略,通过调节充电机的运行功率因数对充电节点进行无功补偿,由此改变充电有功功率,提升充电节点的电压稳定及系统经济性。

电力系统无功优化由于其控制变量的特殊性使得其优化控制模型呈现高维、强非线性特性,针对无功优化求解包括解析方法和人工智能方法^[14-15]。长臂浣熊算法(coati optimization algorithm, COA)是一种仿生的元启发式算法,该算法是模拟长臂浣熊在自然环境中捕食和被捕食情况下的寻优过程^[16]。文献[17]提出了混合遗传-长鼻浣熊算法的维修资源优化调度,针对 COA 容易陷入局部最优解的特点,提出了将遗传算法的选择、交叉和变异引入到 COA 中,以此提高全局搜索能力。文献[18]提出了一种利用 COA 优化长短期记忆神经网络参数的碳价预测方法,基于优化后的长短期记忆神经网络能够显著提高碳价预测精度。

从电动汽车集群充电桩控制策略特性出发,考虑电动汽车参与系统无功电压调度,构建综合考虑电动汽车充电桩控制策略、新能源发电有功出力以及无功补偿设备补偿量的城市电网动态无功优化模型。针对 COA 在全局搜索的不足,将折射反向学习、Levy 飞行策略和螺旋搜索机制融入算法的不同阶段,实现在不同阶段的种群多样性和精英保留,提高算法的全局搜索能力和搜索精度。将电动汽车充电桩作为无功调压手段参与系统调压,通过用户侧和电网侧无功调压设备最优控制,实现电网运行的

经济性和稳定性。最后,通过仿真实验验证所提方法的有效性和合理性。

1 电动汽车集群充电桩无功电压特性模型

1.1 电动汽车负荷分布建模

电动汽车充放电过程受用户出行特性、充放电模式以及电池特性等多个随机变量的影响,而这些随机变量相对独立,因此,电动汽车充放电建模需要综合考虑随机变量间的相关性及联合随机过程。Copula 函数能够描述随机变量间的耦合特性,将任意维的边缘分布函数处理成联合分布过程。电动汽车充放电分布建模是以单台电动汽车为基础,通过对单台电动汽车各时段负荷叠加,获得多台电动汽车充放电的负荷曲线。

采用 Copula 函数建立多变量的充放电联合概率分布模型,降低电动汽车充放电负荷曲线拟合的误差。将所有变量随机过程 构建累积分布函数 $F_w(\cdot)$,从而得到均匀随机变量 $u_w = F_w(x_w)$,利用均匀随机变量的 n 元 Copula 函数 $C\{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 来描述随机变量间的关联性,其本质上是随机变量 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 的多元联合分布函数^[19]。

利用 Gaussian 函数作为电动汽车充放电概率分布模型,多元正态分布通过概率积分变换得到的 Gaussian Copula 的二维变量形式为

$$\begin{cases} C(u_1, u_2; \alpha) = \int_{-\infty}^{\varphi(u_1)} \int_{-\infty}^{\varphi(u_2)} \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\alpha^2}} \exp(W) du_1 du_2 \\ W = -\frac{u_1^2 - 2\alpha u_1 u_2 + u_2^2}{2(1-\alpha^2)} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $C(u_1, u_2; \alpha)$ 为 Gaussian Copula 二位变量; $\varphi(u_1)$ 和 $\varphi(u_2)$ 分别为变量 u_1, u_2 边缘分布函数的标准正态分布; α 为变量之间的关联参数。

建立概率分布模型的关键是获得估计相关参数 α ,极大似然估计是通过观察给定样本数据来评估模型参数,利用概率模型进行反复试验,得到样本出现概率最大的参数值。

若随机变量 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 的 Copula 函数为 $C\{u_1, u_2, \dots, u_n; \alpha\}$,则它们的边缘分布函数连续且不含未知参数,那么在 X 和 U 的样本空间上得到的参数 α 的极大似然估计相等。在 U 样本空间上可以计算出样本 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 的似然函数为

$$L(\alpha) = \prod_{w=1}^n C(u_w; \alpha) \prod_{w=1}^n f_w(x_w) \quad (2)$$

式中: u_w 为样本空间 U 上的一组样本观测值。

对式(2)两边取对数得

$$\ln L(\alpha) = \sum_{w=1}^n \sum_{v=1}^V \ln C(u_{w,v}; \alpha) + \sum_{w=1}^n \sum_{v=1}^V \ln f_w(x_{w,v}) \quad (3)$$

式中: V 为样本观测值的观测数量; $u_{w,v}$ 为在 U 样本空间上随机变量 u_w 的第 v 个样本观测值。然后对未知参数求导,令导数为0,求极大值点,则参数 α 的估计值为

$$\hat{\alpha} = \operatorname{argmax}_{\alpha} \sum_{w=1}^n \ln C(u_w; \alpha) \quad (4)$$

式中: $\hat{\alpha}$ 为 α 的极大似然估计值。

1.2 充电桩运行特性及控制策略

在电动汽车集群运行过程中,电动汽车和电网之间存在有功功率的交互和无功功率的交互^[20],其运行特性如图1所示,其中 $P_{ch,t}$ 和 $Q_{ch,t}$ 分别为 t 时刻有功功率和无功功率, $P_{ch,max}$ 和 $Q_{ch,max}$ 分别为有功功率和无功功率的最大值。

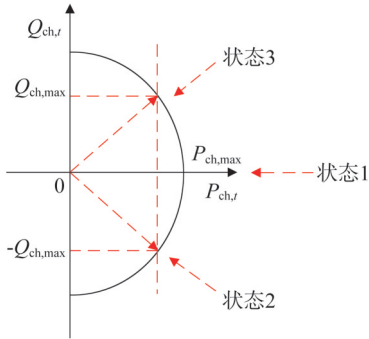


图1 充电桩工作状态

Fig.1 Charging pile working state diagram

电动汽车充电桩可工作在3种状态:状态1为充电桩工作在纯充电模式;状态2为充电桩减小了部分充电有功功率,向电网发出无功功率;状态3为充电桩减小了部分充电有功功率,从电网吸收无功功率。 t 时刻充电桩工作状态的变量 $S_{ch,t}$ 为

$$S_{ch,t} = \begin{cases} 1, & \text{状态2或状态3时} \\ 0, & \text{状态1时} \end{cases} \quad (5)$$

电动汽车参与电网无功优化调度,需要满足用户侧有功功率的充电要求和无功功率的调节需求。集群充电桩的荷电状态(state of charge, SOC)需要保证在合理范围内要达到用户的期望值。充电桩 SOC 的上限 $S_{OC,max}$ 和下限 $S_{OC,min}$ 分别为:

$$S_{OC,max} = S_{OC,cur} + \frac{P_{max} T_{\Delta t}}{C_{bat}} \quad (6)$$

$$S_{OC,min} = S_{OC,cur} + \frac{P_{min} T_{\Delta t}}{C_{bat}} \quad (7)$$

式中: $S_{OC,cur}$ 为充电桩荷电状态; P_{min} 和 P_{max} 分别为充电桩最小和最大充电功率; $T_{\Delta t}$ 为充放电时间; C_{bat} 为电池容量。

充电桩的无功支撑能力与充电桩现有充电状态密切相关,电动车集群充电时充电桩无功能力可表示为

$$Q_{EV}(t) = \sum_{p=1}^M M_p S_{ch,t} E_c \cos \varphi_t \quad (8)$$

式中: E_c 为充电桩的容量; $\cos \varphi_t$ 为 t 时刻充电桩的功率因数; $Q_{EV}(t)$ 为 t 时刻充电桩无功容量; M_p 为车辆 p 参与 t 时刻无功优化的概率; M 为车辆数量。

2 长鼻浣熊优化算法及其改进

2.1 标准长鼻浣熊优化算法

COA 是 Mohammad Dehghani 等人于 2022 年提出的一种模拟长鼻浣熊攻击、狩猎鬣蜥行为和逃离捕食者行为的元启发式算法。长鼻浣熊算法的基本步骤分为两个阶段,分别是勘探阶段和开发阶段。

勘探阶段:在搜索空间中,第一阶段更新熊种群是基于模拟它们攻击时的策略进行建模的。在勘探阶段,当前种群中的最佳个体的位置为假定位置,假设种群中最佳成员的位置为鬣蜥位置,其中一半长鼻浣熊爬上树,另一半在地面等待鬣蜥掉落。

开发阶段:更新长鼻浣熊在搜索空间中的位置。根据长鼻浣熊逃离捕食者的自然行为进行数学建模。长鼻浣熊的动作是尽量让自己处于安全位置,也就是在局部搜索中的开发能力。为模拟这种行为,在每个长鼻浣熊所处位置附近生成一个随机位置。

2.2 长鼻浣熊优化算法改进措施

在实际应用中发现 COA 具有早熟等收敛问题。比如,在勘探阶段,由于长鼻浣熊位置的更新依赖于每次迭代过程中群体的更新,选取群体最优适应度位置替代目标位置,并未主动对目标位置进行更新,易使算法陷入局部极值。在开发阶段模拟躲避捕食者,每只长鼻浣熊在当前位置附近随机生成一个新的位置,往往容易陷入局部最优解。因此,针对上述问题,文中通过引入折射反向学习、Levy 飞行策略和螺旋搜索行为,在不同阶段拓展算法,跳出局部最优

解,提高算法的能力。

1)在COA种群初始化阶段,为保证种群的多样性,引入折射反向学习扰动目标位置,增强算法的寻优能力。折射反向学习策略为

$$\begin{cases} x_{h,q} = l_{b_q} + r(u_{b_q} - l_{b_q}) \\ x_{h,q}^* = \frac{a_q + b_q}{2} + \frac{a_q + b_q}{2k} - \frac{x_{h,q}}{k} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $x_{h,q}$ 为第 q 个决策变量的值; r 为一个随机实数, $r \in [0,1]$; l_{b_q} 和 u_{b_q} 分别为第 q 个决策变量的下界和上界; $x_{h,q}^*$ 为 $x_{h,q}$ 的折射反向解; a_q 和 b_q 分别为搜索空间上第 q 维的最小值和最大值; k 为入射光线和折射光线的长度之比。

2)在种群更新中融合Levy飞行策略,扩大长鼻浣熊搜索区域,提高解空间范围,从而提高算法的寻优能力。Levy更新公式为:

$$X_h^p: x_{h,q}^p = x_{h+1,q} + r(\xi_q - l x_{h,q}) \quad (10)$$

$$\xi_q: \xi_q^c = l_{b_q} + r(u_{b_q} - b_q)$$

$$\begin{cases} x_{h,q} + r_1 \sin(r_2) |r_3 \xi_q - l x_{h,q}| & r_4 < 0.5 \\ x_{h,q} + r_1 \cos(r_2) |r_3 \xi_q - x_{h,q}| & r_4 \geq 0.5 \end{cases} \quad (11)$$

$$r_1 = a - \frac{ay}{Y} \quad (12)$$

式中: X_h^p 为长鼻浣熊在搜索空间的位置; $x_{h,q}^p$ 为第 h

个长鼻浣熊计算的第 q 维位置, $h = \left\lfloor \frac{H}{2} \right\rfloor + 1, \left\lfloor \frac{H}{2} \right\rfloor + 2, \dots, H$; $\lfloor \cdot \rfloor$ 为取整函数(也称为最大整数函数), H 为种群规模; ξ_q 为鬣蜥在搜索空间中的维数; l 为一个随机整数, $l \in \{1,2\}$; ξ_q^c 为鬣蜥在地面上随机生成的位置; ξ_q^c 为鬣蜥在第 q 维的位置; y 为当前迭代次数; Y 为最大迭代次数; a 为常量,通常取 $a=2$; r_2, r_3, r_4 均为随机数, $r_2 \in [0, 2\pi], r_3 \in [-2, 2], r_4 \in [0, 1]$ 。

3)在开发阶段,长鼻浣熊躲避捕食者策略中引入螺旋搜索行为,提升算法逃离局部最优解的能力,避免寻优落入局部最优解,改进具体措施为

$$\begin{cases} x_{h,q}^p = x_{h,q} + (1 - 2r)(l_{b_q}^{\text{local}} + r(u_{b_q}^{\text{local}} - l_{b_q}^{\text{local}})) + \\ D \cdot e^{b_q} \cos(2\pi l) \\ D = |2rx_{p,y} - x_{h,y}| \\ l_{b_q}^{\text{local}} = \frac{l_{b_q}}{y}, u_{b_q}^{\text{local}} = \frac{u_{b_q}}{y} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $l_{b_q}^{\text{local}}$ 和 $u_{b_q}^{\text{local}}$ 分别为第 q 个决策变量的局部下界和局部上界; D 为当前最优个体 $x_{p,y}$ 和当前个体 $x_{h,y}$ 两者之间的距离; $l \in [-1, 1]$ 。

在标准COA流程步骤的基础上,增加相应的改进策略,改进长鼻浣熊算法(improved coati optimization algorithm, ICOA)流程如图2所示。

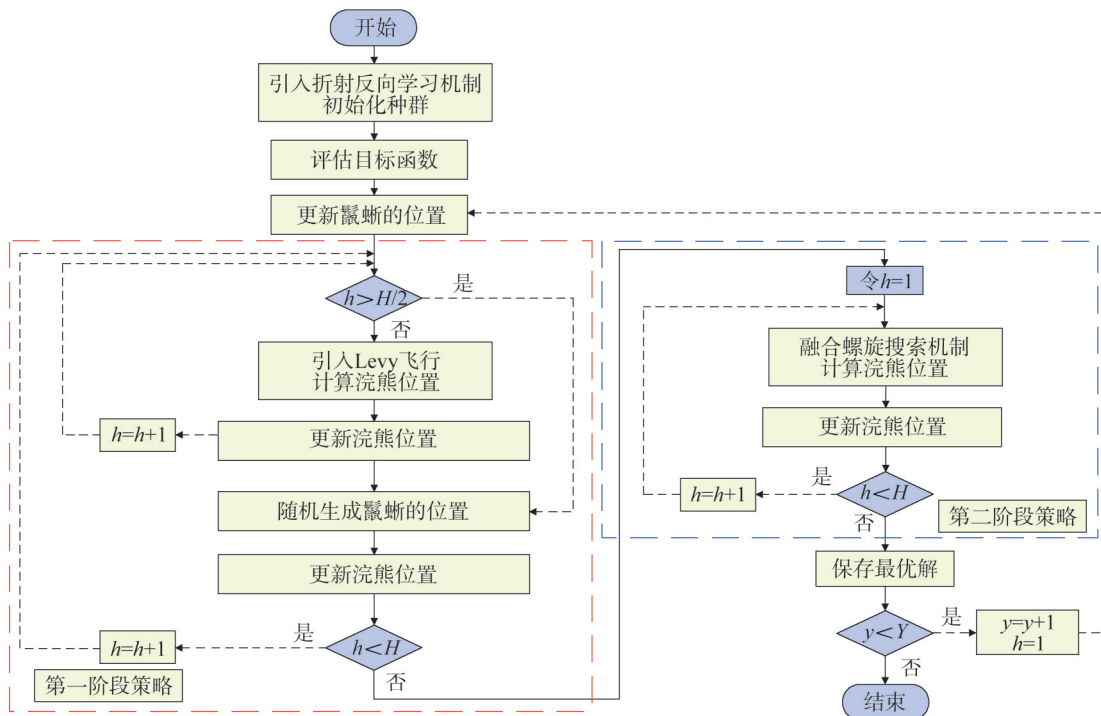


图2 ICOA流程

Fig.2 Flowchart of ICOA

3 基于改进长鼻浣熊算法的动态无功电压优化

为考虑城市电网中新能源发电、柔性负荷的动态运行特性,本文提出一种综合考虑充电桩功率因素、光伏并网接入的动态无功电压优化控制模型。通过协调充电桩功率因素、新能源发电出力、无功补偿设备等,实现城市电网无功电压的优化控制,最终实现用户侧和电网侧的最大效益。

3.1 城市电网无功优化模型

1)目标函数。

$$F_1 = \min \sum_{t=1}^{24} P_{\text{loss},t}$$

$$= \min \sum_{t=1}^{24} \left\{ \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N G_{ij} (U_{it}^2 + U_{jt}^2 - 2U_{it}U_{jt} \cos(\theta_{it} - \theta_{jt})) \right. \quad (14)$$

$$\left. + \lambda \sum_{i=1}^N \left(\frac{U_{it} - U_{i,\text{lim}}}{U_{i,\text{max}} - U_{i,\text{min}}} \right) \right\}$$

式中: $P_{\text{loss},t}$ 为 t 时刻系统总有功损耗; U_{it} 、 U_{jt} 为 t 时刻节点 i 、节点 j 的电压幅值; θ_{it} 、 θ_{jt} 分别为节点 i 、节点 j 电压相角; G_{ij} 为节点 i 、节点 j 之间的电导; $U_{i,\text{max}}$ 、 $U_{i,\text{min}}$ 分别为节点 i 的电压幅值及其上下限值; λ 为节点电压越界的惩罚因子; $U_{i,\text{lim}}$ 为节点电压越限时的设定值; F_1 为全天网损量; N 为系统节点数。

充电桩用户充电成本为

$$F_2 = \min \sum_{t=1}^{24} (P_{\text{ch},t} B_{\text{ch},t} \Delta t - B_{\text{p},t} \Delta P_{\text{loss}}) \quad (15)$$

式中: $B_{\text{ch},t}$ 为 t 时刻单位电量充电电价; Δt 为时间间隔,取1h; $B_{\text{p},t}$ 为 t 时刻充电站的单位购电价; ΔP_{loss} 为电动汽车(electric vehicle, EV)参与无功补偿后降低的线路损耗。

2)约束条件。

由于考虑了用户充电费用以及电网运行状态,因此约束条件包含系统稳定运行的潮流约束和各种控制设备安全运行的不等式约束。

系统潮流等式约束为:

$$P_{\text{pv},i,t} + P_{\text{ev},i,t} - P_{\text{Load},i,t}$$

$$= U_{it} \sum_{j=1}^N U_{jt} (G_{ij} \cos(\theta_{it} - \theta_{jt}) + B_{ij} \sin(\theta_{it} - \theta_{jt}))$$

$$Q_{\text{pv},i,t} + Q_{\text{ev},i,t} - Q_{\text{Load},i,t} \quad (16)$$

$$= U_{it} \sum_{j=1}^N U_{jt} (G_{ij} \sin(\theta_{it} - \theta_{jt}) - B_{ij} \cos(\theta_{it} - \theta_{jt}))$$

$$E_c^2 = P_{\text{ch},t}^2 + Q_{\text{ch},t}^2 \quad (17)$$

式中: $P_{\text{pv},i,t}$ 、 $P_{\text{ev},i,t}$ 、 $P_{\text{Load},i,t}$ 分别为 t 时刻节点 i 的光伏、

电动汽车和负荷的有功功率; $Q_{\text{pv},i,t}$ 、 $Q_{\text{ev},i,t}$ 、 $Q_{\text{Load},i,t}$ 分别为 t 时刻节点 i 的光伏、电动汽车和负荷的无功功率; B_{ij} 为节点 i 、节点 j 之间的电纳; E_c 为充电桩的容量。

不等式约束包括充电桩运行的功率约束、系统节点以及控制变量的限值约束。

$$0.9 \leq \cos \varphi_i \leq 1 \quad (18)$$

$$U_{i,\text{min}} \leq U_i \leq U_{i,\text{max}} \quad (19)$$

$$Q_{c,\text{min}} \leq Q_{c,i} \leq Q_{c,\text{max}} \quad (20)$$

$$U_{\text{pv},\text{min}} \leq U_{\text{pv},i} \leq U_{\text{pv},\text{max}} \quad (21)$$

$$T_{\text{min}} \leq T_i \leq T_{\text{max}} \quad (22)$$

$$\sum_{t=1}^{24} |T_{i,t+1} - T_{i,t}| \leq N_T \quad (23)$$

式中: $Q_{c,\text{max}}$ 、 $Q_{c,\text{min}}$ 分别为无功补偿节点输出补偿容量的上下限; $Q_{c,i}$ 为节点 i 的无功补偿量; $U_{\text{pv},\text{max}}$ 、 $U_{\text{pv},\text{min}}$ 分别为光伏发电电压上下限; $U_{\text{pv},i}$ 为节点 i 电压; T_{max} 、 T_{min} 分别为有载调压变压器分接头挡位的调节范围上下限; N_T 可调变压器分接头挡位的最大动作次数; $T_{i,t}$ 为 t 时刻分接头的位置。

3.2 基于改进长鼻浣熊算法的动态无功优化

城市电网动态无功优化需要充分考虑系统负荷变化形态、分布式电源出力、电动汽车运行特性、控制设备日动作次数约束以及运行状态下各控制设备之间的相关性。所构建的数学模型具有维数高、约束多、不连续等特点,导致求解非常困难。利用改进长鼻浣熊算法进行动态无功优化计算,最终确定未来一天设备的控制策略,实现系统经济稳定运行。将改进长鼻浣熊算法应用于城市电网无功优化计算过程,具体步骤如下。

步骤1:输入量测数据,输入网络拓扑数据,包括各节点负荷数据、发点数据、线路参数以及补偿节点数据。

步骤2:基于折射返回机制的种群位置,利用折射返回机制产生一定数量的长鼻浣熊位置,位置的维数为优化变量的个数,包括光伏发电出力、充电桩功率因素、并联电容器容量和可调变压器变比。将个体位置映射到优化变量中,将个体位置各维数据根据优化变量的上下限约束映射为优化变量。

步骤3:目标函数计算,将上述产生的种群个体位置进行优化计算,以网损最小和充电桩侧收益最大为目标,构建多目标函数进行无功优化计算,获得

对应的控制变量参数值。

步骤4:位置更新,结合第一阶段和第二阶段位置更新策略,引入Levy和螺旋搜索机制分别更新不同阶段长鼻浣熊、鬣蜥个体位置,提高个体在空间搜索能力。

步骤5:将最优解和最优值存储,判断是否满足输出要求,若满足终止迭代要求,输出最优结果。否则返回步骤3。

4 仿真分析

4.1 系统参数

以IEEE 33节点配电系统模拟城市电网进行仿真分析,验证所提方法的有效性,如图3所示。系统中静止无功补偿器(static var compensator, SVC)分别接入节点17、节点20、节点31母线,容量分别为900 kvar、600 kvar和800 kvar。有载变压器分接头(onload tap changer, OLTC)操作次数低于5次。针对城市电网的运行特性,EVS充电桩分别接入节点6、节点11、节点18、节点29,充电桩并网接入变压器容量为450 kW,功率因数安全可调范围为 $[0.9, 1]$ 。

4.2 无功优化结果分析

无功优化模型的计算通过ICOA进行,通过协调电动汽车充电桩有功充电功率、功率因素、无功补偿设备无功输出以及可调变压器变比。表1给出了各充电桩用户侧参与系统无功调压后其充电成本的变化。由表1可以看出,通过控制充电桩功率因素,各充电桩参与无功优化后的充电成本明显下降,用户集群参与优化能够获得显著效益。充电用户通过调节功率因素扩展充电时间为电网提供一定的无功支

撑,获得的收益可以抵消一部分有功充电费用。而电网利用用电高峰时刻的充电桩无功支撑,协调其他无功补偿设备实现电网侧无功潮流的优化分布,达到稳压和减损的目的。

表1 充电站用户平均充电成本

Table 1 Comparison of average charging cost

充电站 序号	优化前充 电成本/元	优化后/元			下降 率/%
		充电支出	无功补贴	充电成本	
1	52.04	57.46	14.81	42.65	18.04
2	46.73	51.16	10.54	40.62	13.08
3	58.41	61.68	12.67	49.01	16.09
4	48.76	52.97	11.76	41.21	15.48

电动汽车集群接入对于系统的无功电压支撑,以提高系统电压水平、减少系统网络损耗的方式得以体现。图4给出了节点30不同情况下系统电压波动情况。由图4可以看出,利用充电功率因素协调充电桩有功功率和无功功率的分配,为充电桩接入点的电压提供了有力的支撑。在充电桩充电高峰期10:00—15:00,传统无功优化方法只能在一定程度上提高电压的合格率,对于由电动汽车接入带来的电压波动并无更好的办法。通过电动汽车集群形式参与系统无功优化调度,从时空的角度为系统提供灵活的无功资源,但是在充电桩输出无功功率时,其充电有功功率将变小,也就是以牺牲充电时间来实现更高的充电质量。

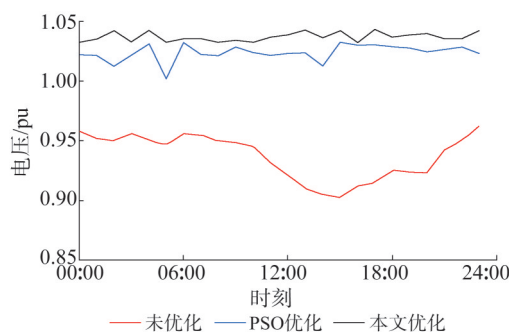


图4 节点30电压曲线对比

Fig.4 Comparison voltage in bus 30

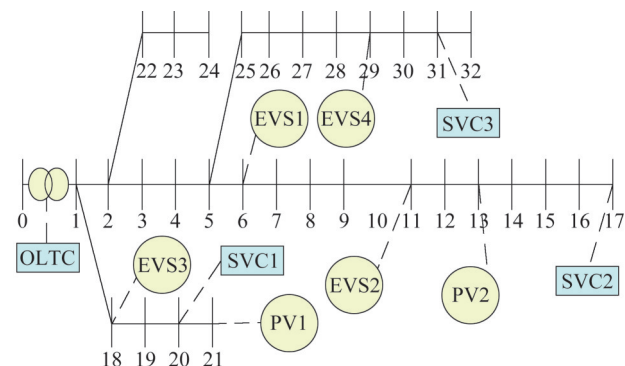


图3 网络系统图

Fig.3 Network system diagram

基于上述分析,图5给出了12:00时系统电压的变化情况。从图5中可以看出,在电动汽车接入

高峰期,系统的电压普遍降低,传统不考虑电动汽车接入优化的情况下,由于大量光伏系统的接入造成系统电压普遍偏高。当电动汽车接入后,一方面可以参与系统调压,另一方面光伏的就地消纳减少了功率流动,从而减少线路压降和系统线损,有效控制了有功倒送引起的电压偏高问题。

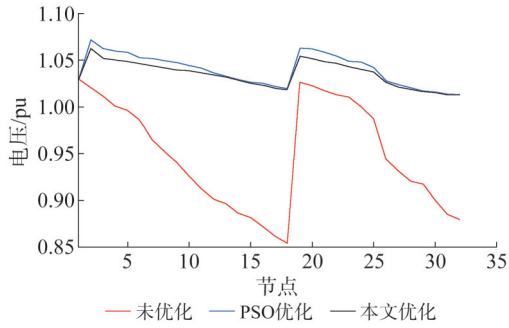


图5 12:00时系统各节点电压波动
Fig.5 Voltage profiles at 12:00

图6给出了不同运行情况下系统网损对比分析,可以看出,在电动汽车接入高峰期13:00充电桩未参与优化时系统网损为411 kW,而电动汽车参与无功优化后网损降低了10.5%。通过控制充电桩功率因素,协调分布式光伏、充电桩以及无功补偿设备的无功出力,实现无功功率的就近补偿,减少有功、无功电流,进一步降低线路有功损耗。

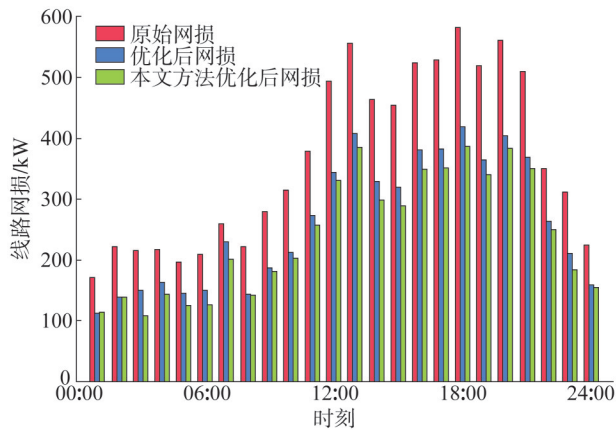


图6 系统网损对比
Fig.6 Comparison of power loss

无功裕度是指系统无功补偿设备的无功剩余容量,图7给出了电动汽车、分布式光伏参与无功优化

后系统无功裕度的变化。从图7中可以看出,当电动汽车、光伏发电参与系统调压时,节点31无功补偿设备的补偿量在24 h均有所减少,在实际运行过程中,无功补偿设备的无功出力跟随电动汽车负荷变化,保证不同负荷场景下的系统电压水平和电压稳定。表2给出了不同情况下系统无功补偿量的变化情况,选取上午、中午和晚上3个时刻进行了对比。从表2中可以看出,通过协调充电桩无功出力、光伏系统发电功率,SVC在不同时刻的无功补偿量均有所降低,无功裕度平均提高了19.69%。在中午时刻,无功裕度变化较明显的主要原因是由于光伏发电功率的消纳减少了系统电压合格对于无功功率的需求。

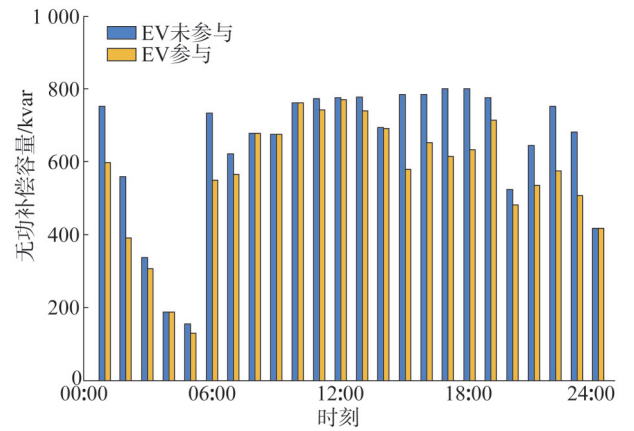


图7 节点31无功补偿设备补偿量对比
Fig.7 Comparison of compensation devices in bus 31

4.3 算法对比及消融实验分析

为验证所提算法的优越性,对ICOA、COA和粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法进行无功优化收敛性和优化结果对比分析,以IEEE 33节点系统和IEEE 30节点系统为研究对象进行仿真分析。同时,为验证本文改进措施对算法性能提高的有效性,分别就不同措施的改进策略进行消融实验。表3给出了不同算法分别在IEEE 33节点系统和IEEE 30节点系统的优化结果对比分析。从表3中可以看出,ICOA相对COA具有更快的收敛速度和精度,相对PSO算法来说具有更高的精度。

ICOA收敛性较传统COA有很大提高。针对提出的3种改进策略分别进行消融实验,将上述三种改进策略逐一增加进行优化计算,其中,策略1为引

表2 无功补偿设备输出功率
Table 2 Reactive power compensates device output

参数	SCV1			SVC2			SVC3		
	09:00	15:00	22:00	09:00	15:00	22:00	09:00	15:00	22:00
传统方法/kvar	520	840	680	450	560	540	705	800	780
本文方法/kvar	310	530	460	330	375	410	705	600	590
裕度提高/%	23.30	34.40	24.40	20.00	30.80	21.60	0	25.00	23.75

入折射反向学习,策略2为融合 Levy 飞行,策略3为引入螺旋搜索行为,分析算法精度和收敛时间如表4所示。从表4中可以看出,针对上述改进策略,本文提出的方法通过不同阶段的搜索策略调整提高算法的收敛精度和收敛速度得到的网损均值最小。其中,策略1的折射反向扰动初始种群生成对计算时间和线损精度的改善较大,其他策略也在一定程度上提高了算法的收敛速度和精度。

表3 不同算法的优化结果线损对比
Table 3 The comparison of different algorithms

系统	参数	PSO	COA	ICOA
IEEE 33	平均网损/kW	202.3	198.5	187.6
	平均收敛时间/s	3.454	2.765	1.654
IEEE 30	平均网损/MW	16.43	15.65	15.43
	平均收敛时间/s	15.113	10.785	8.568

表4 ICOA的消融实验
Table 4 Ablation study of ICOA

方法	平均网损/kW	平均收敛时间/s
COA	198.5	2.765
ICOA(增加策略1)	189.3	1.876
ICOA(增加策略2)	187.6	1.756
ICOA(本文方法)	187.6	1.654

5 结束语

城市电网由于新能源汽车、新能源发电等大量接入造成系统潮流波动突出,给无功电压优化控制带来挑战。文中通过分析充电站电压无功特性及并网充放电的无功支撑能力,提出了综合考虑电动汽车有功/无功特性、新能源发电消纳的城市电网动态无功优化模型。针对传统 COA 的不足,通过在算法不同阶段融入折射反向学习机制、Levy 飞行机制和

螺旋搜索机制,提升算法的收敛性和收敛精度,并将其用于求解动态无功优化问题。最后,通过不同网络的仿真结果验证了所提方法的有效性和合理性。

COA 是一种仿生算法,其本身存在随机性强、结果不稳定等不足。另外,由于以电动汽车集群的形式进行充电桩无功功率因素控制,这必然会涉及电动车个体的协调问题。因此,下一阶段研究工作主要从建模的角度考虑电动车个体间的协调和博弈,以期从个体角度和集群角度都获得相对合理优化的结果。

参考文献

- [1] 翟苏巍,李银银,杜凡,等.考虑海量分布式能源接入的配电网分布式无功控制策略[J].中国电力,2024,57(8):138-144.
ZHAI Suwei, LI Yinyin, DU Fan, et al. Distributed reactive power control strategy of distribution network considering massive distributed energy access[J]. Electric Power, 2024, 57(8): 138-144.
- [2] 郭琦,卢远宏.新型电力系统的建模仿真关键技术及展望[J].电力系统自动化,2022,46(10):18-32.
GUO Qi, LU Yuanhong. Key technologies and prospects of modeling and simulation of new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(10): 18-32.
- [3] 高久国,赵艳龙,朱司丞,等.考虑光伏并网的电力系统无功优化[J].电测与仪表,2020,57(14):69-73.
GAO Jiuguo, ZHAO Yanlong, ZHU Sicheng, et al. Optimal reactive power dispatch considering photovoltaic integration[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(14): 69-73.
- [4] BIDGOLI H S, VAN CUTSEM T. Combined local and centralized voltage control in active distribution networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2): 1374-1384.
- [5] 乔春雨,易建波,谷宇杰,等.基于虚拟同步机技术的光储协同无功优化策略[J].电网与清洁能源,2022,38(6):129-136.
QIAO Chunyu, YI Jianbo, GU Yujie, et al. Reactive power optimization strategy of photovoltaic and energy storage co-control based on virtual synchronous generator [J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(6): 129-136.
- [6] 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.
- [7] 李彦君,刘友波,冉金周,等.深度学习驱动的电网无功-电压优化控制策略模型[J].电测与仪表,2023,60(11):165-173.
- LI Yanjun, LIU Youbo, RAN Jinzhou, et al. Optimal control strategy model of reactive power-voltage in power grid driven by deep learning [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(11):165-173.
- [8] 闫志杰,张蕊萍,董海鹰,等.基于需求响应的电动汽车充放电电价与时段研究[J].电力系统保护与控制,2018,46(15):16-22.
- YAN Zhijie, ZHANG Ruiping, DONG Haiying, et al. Price and period research of electric vehicles charging and discharging based on demand response [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(15):16-22.
- [9] 张良,孙成龙,蔡国伟,等.基于PSO算法的电动汽车有序充电两阶段优化策略[J].中国电机工程学报,2021,39(22):86-103.
- ZHANG Liang, SUN Chenglong, CAI Guowei, et al. Two-stage optimization strategy for coordinated charging and discharging of EVs based on PSO algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 39(22):86-103.
- [10] 张丙旭,许刚.计及需求差异的电动汽车并网滚动时域优化[J].电力系统自动化,2020,44(13):106-114.
- ZHANG Bingxu, XU Gang. Rolling horizon optimization for grid-connected electric vehicles considering demand difference [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(13):106-114.
- [11] 高爽,原凯,孙充勃,等.电动汽车集群优化充电多时段有功无功混合控制策略[J].电力系统及其自动化学报,2018,30(4):1-6.
- GAO Shuang, YUAN Kai, SUN Chongbo, et al. Multi-stage active and reactive mixed power control strategy for optimal charging of aggregated electric vehicles [J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2018, 30(4):1-6.
- [12] 占恺峤,宋永华,胡泽春,等.以降损为目标的电动汽车有序充电优化[J].中国电机工程学报,2012,32(31):11-18.
- ZHAN Kaiqiao, SONG Yonghua, HU Zechun, et al. Coordination of electric vehicle charging to minimize active power losses [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(31):11-18.
- [13] 程杉,王贤宁,冯毅焜.电动汽车充电站有序充电调度的分散式优化[J].电力系统自动化,2018,42(1):39-46.
- CHENG Shan, WANG Xianning, FENG Yichen. Decentralized optimization of ordered charging scheduling in electric vehicle charging station [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(1):39-46.
- [14] CAO D, ZHAO J B, HU W H, et al. Data-driven multi-agent deep reinforcement learning for distribution system decentralized voltage control with high penetration of PVs [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(5):4137-4150.
- [15] JIAO W S, CHEN J, WU Q W, et al. Distributed coordinated voltage control for distribution networks with DG and OLTC based on MPC and gradient projection [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(1):680-690.
- [16] DEGHANI M, MONTAZERI Z, TROJOVSKÁ E, et al. Coati Optimization Algorithm: a new bio-inspired metaheuristic algorithm for solving optimization problems [J]. Knowledge-Based Systems, 2023, 259:110011.
- [17] 秦敏敏,刘立芳,齐小刚.面向维修资源分配调度的遗传-长鼻浣熊混合优化算法[J].智能系统学报,2023,18(6):1322-1335.
- QIN Minmin, LIU Lifang, QI Xiaogang. Hybrid genetic long-nosed raccoon optimization algorithm for maintenance resource allocation and scheduling [J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2023, 18(6):1322-1335.
- [18] 樊围国,陈珂翰.基于浣熊算法优化双向长短期记忆网络的碳价预测[J].电力科学与工程,2023,39(7):34-41.
- FAN Weiguo, CHEN Kehan. Carbon price prediction of bidirectional long short term memory network optimized by coati optimization algorithm [J]. Electric Power Science and Engineering, 2023, 39(7):34-41.
- [19] 肖宇华,殷勇,焦系泽.含分布式电源场景下的充电设施建设策略研究[J].电器与能效管理技术,2021(10):83-91.
- XIAO Yuhua, YIN Yong, JIAO Xize. Research on construction strategy of charging facilities in scenario with distributed generation [J]. Electrical & Energy Management Technology, 2021(10):83-91.
- [20] 贾巍,方兵华,雷才嘉,等.一流城市配电网“源网荷储充”协调优化控制策略[J].机电工程技术,2021,50(6):93-97.
- JIA Wei, FANG Binghua, LEI Caijia, et al. Coordinated and optimized control strategy of “source network load storage and charging” for first-class urban distribution network [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2021, 50(6):93-97.

收稿日期:2023-12-13

修回日期:2024-03-01

作者简介:

董新(1990),女,硕士,工程师,主要研究方向为电力系统无功电压控制、电网规划;

李广(1986),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为电力系统运行与控制;

乔荣飞(1988),男,硕士,工程师,主要研究方向为电力系统优化运行与控制、新能源并网发电及调度运行技术;

刘申(1990),男,硕士,工程师,主要研究方向为电力系统运行与控制;

阚常涛(1992),通信作者(fload_cai@163.com),男,博士,工程师,主要研究方向为电力系统运行与控制。

(责任编辑 车永强)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2024.12.002

电子式消弧线圈对接地故障谐波选线的影响

乔东伟¹, 官德锋¹, 秦苏亚^{2*}, 杨 坤¹, 薛永端²

(1. 国网山东省电力公司泰安供电公司, 山东 泰安 271000; 2. 中国石油大学(华东)新能源学院, 山东 青岛 266580)

摘要:随着“双高”电网的普及和电力电子技术的发展,电子式消弧线圈在现场中大量应用,使得谐振接地系统中谐波分量不断增加,故障过程更加复杂。针对含电子式消弧线圈的谐振接地系统,分析了发生接地故障后线路上谐波电流的分布情况、谐波电流与过渡电阻以及线路参数之间的关系,明确了电子式消弧线圈对故障谐波选线技术的影响。分析和仿真均表明,在含电子式消弧线圈的谐振接地系统中,无论过渡电阻大小,基于极性的故障谐波选线技术均不适用;当故障电阻较大或故障线路对地分布电容并非最大时,基于幅值的故障谐波选线技术也不再适用。

关键词:电子式消弧线圈;接地故障;谐波分布;谐波特征;过渡电阻;谐波选线

中图分类号:TM933

文献标志码:A

文章编号:1007-9904(2024)12-0010-09

Influence of Power Electronic Arc Suppression Coil on Harmonic Current Selection of Grounding Fault

QIAO Dongwei¹, GONG Defeng¹, QIN Suya^{2*}, YANG Kun¹, XUE Yongduan²

(1. State Grid Tai'an Power Supply Company, Tai'an 271000, China;

2. College of New Energy, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: With the popularization of “double-high” power grid and the development of power electronic technology, power electronic arc suppression coils are widely used in the field, which makes the harmonic components in the resonant grounding system continue to increase and the fault process becomes more complicated. Aiming at the resonant grounding system including power electronic arc suppression coil, the distribution of harmonic current on the line after grounding fault, the relationship between harmonic current and transition resistance as well as line parameters is analyzed. The influence of power electronic arc suppression coil on fault harmonic line selection technology is clarified. The analysis shows that in resonant grounding system including power electronic arc suppression coil, no matter the size of the transition resistance, the fault harmonic line selection technology based on polarity is not applicable; when the fault resistance is large or the distributed capacitance of the fault line is not the largest, the fault harmonic line selection technology based on amplitude is also not suitable. The correctness of the analysis result is verified by simulation.

Keywords: power electronic arc suppression coil; grounding fault; harmonic distribution; harmonic characteristics; transition resistance; harmonic line selection

0 引言

近年来,随着“双高”(高比例清洁能源、高比例电力电子装置)电网^[1-2]的普及以及电力电子技术的发展,配电网呈现出复杂多变的趋势,谐振接地的运

行方式也不断演变,由早期的皮得生线圈^[3-4]、手动调匝式消弧线圈^[5-6]到后来的自动跟踪补偿消弧线圈装置^[7-8],消弧线圈在不断发展的过程中逐渐衍生出搭配电力电子开关形式的新型消弧线圈,其中典型代表是高短路阻抗变压器式消弧线圈^[9-10]。与传统消弧线圈相比,这种电子式消弧线圈补偿速度快、可实现连续无级调节、运行维护方便,在一定范围内得到推广应用。

消弧线圈目前存在两种控制和调整失谐度的方

基金项目:国网山东省电力公司科技项目“基于接地故障信息的消弧线圈补偿状态在线评估项目”(520609220005)。

Science and Technology Project of State Grid Shandong Electric Power Company “On-line Evaluation of Petersen's Coil Compensation State Based on Grounding Fault Information”(520609220005)。

法,即“预调式”^[11-12]和“随调式”^[13-14],前者主要用于机械式消弧线圈,后者主要用于电子式消弧线圈。机械式消弧线圈正常运行时已经调整到合理的补偿状态,接地故障前后,除切除阻尼电阻外,不需要其他动作,主要补偿接地故障的工频电容电流。电子式消弧线圈正常运行时处于远离谐振点的某个补偿状态,在接地故障后再调整到预定的补偿状态;同时,电子式消弧线圈主要通过调控二次侧绕组的双向可控硅晶闸管(silicon controlled rectifier, SCR)来自跟踪调节补偿电流大小,可控硅晶闸管每周分别导通关断两次^[15-16],因此输出电流中会产生暂态分量和一定的谐波分量,该谐波分量在特征频段内的部分属于特殊的暂态信号,如果其含量太大,将会使得故障过程更加复杂,必定影响谐波选线技术^[17-19]的可靠性。因此,有必要分析电子式消弧线圈补偿谐波电流的分布特征,并明确其对谐波选线方法适用性的影响。

提出含电子式消弧线圈的谐振接地系统的接地故障等值电路,给出故障时电子式消弧线圈补偿谐波电流的谐波特征及分布规律随过渡电阻、线路参数的变化情况,以及其对谐波选线方法的影响,并利用 MATLAB 仿真验证了分析结果的准确性。

1 电子式消弧线圈基本结构与特性

与传统消弧线圈相比,电子式消弧线圈的主要特点在于其二次侧采用一组或几组双向可控硅控制回路,典型代表是可控硅晶闸管控制的高短路阻抗变压器式消弧线圈,本文的研究也以此为分析对象。

电子式消弧线圈本体作为一个高短路阻抗变压器,其结构如图 1 所示。其中, N_w 为一次侧绕组(即工作绕组), C_w 为二次侧绕组(即控制绕组),SCR 为两个反向并联的可控硅晶闸管。

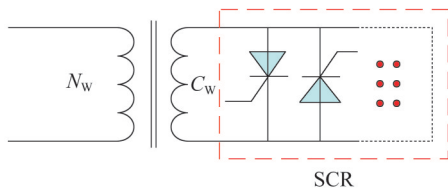


图 1 电力电子式消弧线圈等效电路

Fig.1 Equivalent circuit diagram of power electronic arc suppression coil

调节 SCR 的通断可以将控制绕组 C_w 短路,从而调节二次侧控制绕组 C_w 是否投入使用, C_w 是否投入使用关乎中性点接地电感的大小,当调节 SCR 使二次侧控制绕组两端短路,这时 C_w 投入使用并流过电流,工作侧绕组 N_w 两端受到感应后等效电感的数值随之发生改变,即系统的中性点接地电感的数值发生变化;当调节 SCR 使二次侧控制绕组回路开路,此时消弧线圈等效阻抗无穷大,表现为 C_w 未投入,中性点接地电感只含有一次侧工作绕组 N_w 的部分。

通过调节 SCR 可控硅晶闸管导通角的大小,来控制中性点经消弧线圈接地电感数值的大小,表现为电子式消弧线圈二次侧控制绕组 C_w 产生间歇性电流,同样在其一次侧工作绕组 N_w 对应地感应出间歇性分量,该间歇性电流分量存在非线性变化且伴随着“时有时无”的现象,因此电子式消弧线圈就会输出大量的谐波电流,并对接地故障特征产生影响。

文献[8]和文献[9]指出,电子式消弧线圈输出电流的谐波分量主要以 3、5、7、9 次谐波为主,并且各次谐波含量并非随导通角增大线性变化,而是随着导通角增大呈波浪形减小,且 3 次谐波含量最大。即由于受到 SCR 通断的影响,在晶闸管周期性的通断期间电子式消弧线圈将输出大量的谐波电流,这些谐波电流在系统各出线中的分布规律可能不同于接地故障产生的谐波电流,从而对谐波选线产生负面影响。

2 含电子式消弧线圈的谐振接地故障谐波等值电路

2.1 零序谐波网络等效电路

在工频正弦电压作用下,电子式消弧线圈作为一个非线性元件,其产生的谐波电流主要取决于消弧线圈本体的性质,与系统结构参数、接地故障类型无关,因此可把该谐波源看作恒流源^[20]。

含电子式消弧线圈的谐振接地系统接地故障等值电路如图 2 所示,其中, i 为电子式消弧线圈等效的谐波电流源,A、B、C 为三相线, $L_i(i=1,2,\dots,n-1)$ 是健全线路, L_n 是故障线路, $C_i(i=1,2,\dots,n)$ 是线路对地分布电容, R_f 为故障点过渡电阻。

当系统 A、B、C 各相之间的非线性条件相同时,分析电力系统内生成的谐波电流可以只分析其零序谐波,其单相接地故障零序谐波网络等效电路如图 3

所示,电子式消弧线圈等效的谐波电流源产生的谐波将流入健全线路和故障线路,其中, C_{n1} 和 C_{n2} 为故障线路故障点两侧对地分布电容。

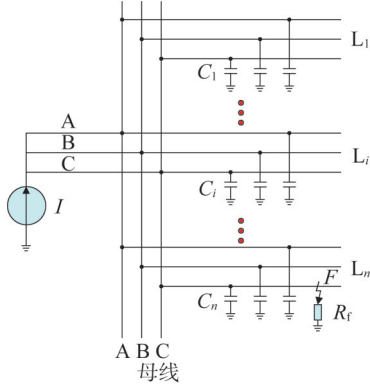


图2 含电子式消弧线圈的谐振接地系统接地故障等值电路
Fig.2 Equivalent diagram of single-phase grounding fault in resonant grounding system including power electronic arc suppression coil

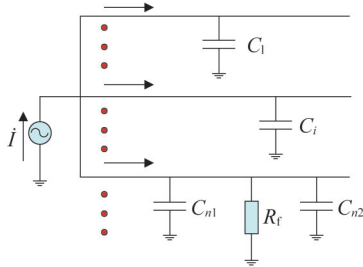


图3 单相接地故障零序谐波网络等效电路
Fig.3 Equivalent diagram of zero-sequence harmonic network in single-phase grounding fault

为了方便计算线路阻抗与线路谐波电流之间的关系,可将图3简化为零序谐波等效电路,如图4所示。

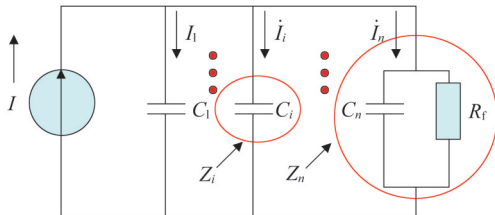


图4 简化的零序谐波网络等效电路
Fig.4 Simplified equivalent diagram of zero-sequence harmonic network including power electronic arc suppression coil

图4中, Z_i 为第 i 条健全线路阻抗, Z_n 为故障线路的线路阻抗, i_1 、 i_i 为电力电子式消弧线圈补偿到健全线路的谐波电流, i_n 为电力电子式消弧线圈补偿到故障线路谐波电流。为分析计算方便起见,设图中的 $i = I \angle 0^\circ$, I 为电力电子式消弧线圈补偿的总谐波电流的幅值,初相角为 0° 。对于以上三种谐波电流,以下简称为健全线路的谐波电流、故障线路谐波电流和总谐波电流。

谐波选线技术主要是根据故障产生的零序电流中谐波分量在故障线路与健全线路中的幅值、极性(流向)差异确定故障线路,而当电子式消弧线圈也作为谐波源时,将影响原有的谐波特征,从而对基于幅值、极性的谐波选线技术产生影响,具体分析如下。

2.2 线路阻抗分析

由图4可知, $Z_i(i \neq n)$ 和 Z_n 分别为:

$$Z_i = \frac{1}{j\omega C_i} = \frac{1}{\omega C_i} \angle (-90^\circ) = \frac{1}{2\pi f C_i} \angle (-90^\circ) \quad (1)$$

$$Z_n = \frac{1}{j\omega C_n + \frac{1}{R_f}} = \frac{R_f}{\sqrt{1 + (\omega R_f C_n)^2}} \angle (-\beta_n) \quad (2)$$

式中: ω 和 f 分别为角频率和频率,可根据计算的谐波次数确定; β_n 为故障线路阻抗角,取值为 $\beta_n = \arctan(2\pi f R_f C_n)$,且 $0^\circ < \beta_n < 90^\circ$ 。

因此,出线总阻抗 Z_Σ 为

$$Z_\Sigma = \frac{1}{j\omega C_\Sigma + \frac{1}{R_f}} = \frac{R_f}{\sqrt{1 + (\omega R_f C_\Sigma)^2}} \angle (-\beta_\Sigma) \quad (3)$$

式中: C_Σ 为系统中全部线路对地分布电容之和; β_Σ 为出线总阻抗的阻抗角,取值为 $\beta_\Sigma = \arctan(2\pi f R_f C_\Sigma)$,且 $0^\circ < \beta_\Sigma < 90^\circ$ 。

电子式消弧线圈产生的谐波电流中三次谐波含量最大,因此本文对线路中的谐波电流分量的分析主要以三次谐波为例,则式(1)一式(3)可分别写为:

$$Z_i = \frac{1}{2\pi f_3 C_i} \angle (-90^\circ) \quad (4)$$

$$\begin{cases} Z_n = \frac{R_f}{\sqrt{1 + 4\pi^2 f_3^2 R_f^2 C_n^2}} \angle (-\beta_n) \\ \beta_n = \arctan(2\pi f_3 R_f C_n), 0^\circ < \beta_n < 90^\circ \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} Z_{\Sigma} = \frac{R_f}{\sqrt{1 + 4\pi^2 f_3^2 R_f^2 C_{\Sigma}^2}} \angle(-\beta_{\Sigma}) \\ \beta_{\Sigma} = \arctan(2\pi f_3 R_f C_{\Sigma}), 0^\circ < \beta_{\Sigma} < 90^\circ \end{cases} \quad (6)$$

式中: f_3 为三次谐波的频率,当基波频率为 50 Hz 时, $f_3=150$ Hz。

3 谐波电流与过渡电阻的关系

3.1 金属性接地

当系统的接地故障方式为金属性接地时,此时过渡电阻 $R_f=0$,则式(2)中故障线路的对地阻抗 $Z_n=0$,谐波电流源的电流全部流入故障线路,其余健全线路流过的谐波电流源的电流为 0,从而有:

$$\begin{cases} \dot{I}_n = \dot{I} \\ \dot{I}_1 = \dots = \dot{I}_i = \dots = \dot{I}_{n-1} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

由式(7)可知,当系统中性点接地方式采用电子式消弧线圈,总谐波电流均流入故障线路,而健全线路谐波电流为零。

因此,对于金属性单相接地故障,总谐波电流中,故障线路的谐波电流幅值最大,仍然适用于基于幅值的谐波故障选线方法;由于健全线路谐波电流为零,此时健全线路与故障线路的谐波电流的极性无法进行比较。

3.2 非金属性接地

由图 4 可知,故障线路的谐波电流为

$$\dot{I}_n = \dot{I} \frac{Z_{\Sigma}}{Z_n} = \dot{I} \frac{\sqrt{1 + 4\pi^2 f_3^2 R_f^2 C_n^2}}{\sqrt{1 + 4\pi^2 f_3^2 R_f^2 C_{\Sigma}^2}} \angle(\beta_n - \beta_{\Sigma}) \quad (8)$$

健全线路 i 的谐波电流为

$$\dot{I}_i = \dot{I} \frac{Z_{\Sigma}}{Z_i} = \dot{I} \frac{2\pi f_3 R_f C_i}{\sqrt{1 + 4\pi^2 f_3^2 R_f^2 C_{\Sigma}^2}} \angle(90^\circ - \beta_{\Sigma}) \quad (9)$$

当系统发生非金属性接地故障时,过渡电阻 $R_f \neq 0$,此时健全线路的谐波电流不再为零,谐波电流在健全线路和故障线路上均流通。

为了直观比较幅值极性关系,对比式(8)和式(9),可得到故障线路与任意一条健全线路谐波电流幅值相位关系,即

$$\frac{\dot{I}_n}{\dot{I}_i} = \frac{\sqrt{1 + 4\pi^2 f_3^2 R_f^2 C_n^2}}{2\pi f_3 R_f C_i} \angle(\beta_n - 90^\circ) \quad (10)$$

根据式(10)可以得到故障线路与健全线路出线口谐波电流的幅值极性关系。

3.2.1 极性关系

由式(8)可知,故障线路谐波电流 $\dot{I}_n$ 与总谐波电流 $\dot{I}$ 之间的相角差为 $\beta_{\Sigma} - \beta_n$,且 $0^\circ < \beta_{\Sigma} - \beta_n < 90^\circ$;由式(9)可知,各条健全线路谐波电流与总谐波电流 $\dot{I}$ 之间相角差相差 $90^\circ - \beta_{\Sigma}$,且 $0^\circ < 90^\circ - \beta_{\Sigma} < 90^\circ$,同时各条健全线路谐波电流极性相同。

一般地,当两个相量的相位相差不小于 180° 时,认为相量反极性,但从式(10)可以看出,故障线路的谐波电流与任意一条健全线路谐波电流相角差小于 90° (由于 $0^\circ < \beta_n < 90^\circ$,那么 $-90^\circ < \beta_n - 90^\circ < 0^\circ$),即, $\dot{I}_n$ 和 $\dot{I}_i$ 这两个相量同极性。

因此,各线路的谐波电流极性关系为:若系统发生金属性接地故障,过渡电阻近似为 0,谐波电流近乎全部流入故障线路,而流入健全线路的几乎为零,此时极性关系很难比较;若系统发生非金属性接地故障,过渡电阻偏小,故障线路与健全线路的谐波电流极性相同;随着过渡电阻增大到几百上千欧姆甚至几千欧姆(即发生高阻接地故障)时,故障线路的谐波电流会发生相位上的偏移,但其相位偏移不会超过 90° (即 $-90^\circ < \beta_n - 90^\circ < 0^\circ$),故障线路与健全线路出线口谐波电流的极性相同。此时基于谐波电流极性关系的故障选线方法不再适用。

3.2.2 幅值关系

根据式(10),可得故障线路谐波电流幅值与健全线路谐波电流幅值之比,为了分析方便将式(7)中的幅值之比设为 λ ,即为

$$\lambda = \left| \frac{\dot{I}_n}{\dot{I}_i} \right| = \frac{\sqrt{1 + 4\pi^2 f_3^2 R_f^2 C_n^2}}{2\pi f_3 R_f C_i}, i \neq n \quad (11)$$

由式(11)可得, λ 的大小取决于故障线路与健全线路对地分布电容 C_n 、 C_i 的大小,而 C_n 、 C_i 的大小不仅与线路长度有关,还与线路参数相关。

为进一步分析过渡电阻 R_f 对二者幅值关系的影响,令

$$\lambda = \left| \frac{\dot{I}_n}{\dot{I}_i} \right| = \frac{\sqrt{1 + 4\pi^2 f_3^2 R_f^2 C_n^2}}{2\pi f_3 R_f C_i} = 1 \quad (12)$$

则临界过渡电阻 R_{fc} 为

$$R_{fc} = \frac{1}{2\pi f_3 \sqrt{C_i^2 - C_n^2}}, i \neq n \quad (13)$$

由式(13)可以得出,当过渡电阻 $R_f < R_{fc}$ 时,有

$|i_n| > |i_i|$, 故障线路的谐波电流幅值大于任意一条健全线路的谐波电流幅值; 当 $R_f = R_{fc}$ 时, 有 $|i_n| = |i_i|$, 故障线路 n 的谐波电流幅值等于第 i 条健全线路的谐波电流幅值; 当 $R_f > R_{fc}$ 时, 有 $|i_n| < |i_i|$, 即在所有健全线路中至少存在一条出线的谐波电流幅值大于故障线路的谐波电流幅值, 即故障线路的故障谐波电流不再是最大, 此时基于谐波电流幅值故障选线方法不再适用。

上述分析都是基于电子式消弧线圈产生的三次谐波电流而言的, 当故障选线方法采用的谐波频次不同, 临界过渡电阻 R_f 的取值也会相应发生变化。

4 谐波电流与线路参数的关系

4.1 纯架空或电缆线路

当系统所有出线的线路参数均相同时, 即所有出线全部采用架空线或电缆, 各出线的单位线路对地分布电容相同, 此时故障线路与健全线路对地分布电容 C_n 、 C_i 取决于线路长度。

当所有母线出线中最长的线路是故障线路时, 有 $C_n > C_i$, 此时总会有 $\lambda > 1$, 即故障线路谐波电流幅值比任意一条健全线路谐波电流幅值都要大。与之相反, 当所有母线出线中最长的线路不是故障线路时, 则所有健全线路中, 至少存在一条出线的线路对地分布电容大于故障线路对地分布电容。设某条健全线路 i' 的线路长度大于非健全线路 n 的线路长度, 此时有 $C_n < C_{i'}$, 此时式(11)变为

$$\lambda' = \frac{\sqrt{1 + 4\pi^2 f_3^2 R_f^2 C_n^2}}{2\pi f_3 R_f C_i} \quad (14)$$

由式(14)可知, 此时 λ' 不一定仍然存在恒大于 1 的情况, 即不能保证故障线路的谐波电流幅值在所有母线出线中仍然最大, 基于谐波电流幅值以及零序幅值关系的故障选线方法不再适用, 从而加大了故障诊断与检测的难度, 对于故障识别产生了负面影响。

4.2 架空电缆混合线路

现场实际系统中线路参数结构大多比较复杂, 呈现架空线路和电缆线路混合的形式, 此时 C_n 、 C_i 的大小不仅与相关线路的参数有关, 也与相关线路的长度有关, 但只要确定好线路的线路参数和长度, 其

对地分布电容也容易计算得到。

因此, 若计算得到 $C_n > C_i$, 此时总会有 $\lambda > 1$, 即故障线路谐波电流幅值比任意一条健全线路谐波电流幅值都要大; 与之相反, 若计算得到 $C_n < C_i$, 此时式(11)分子分母的大小关系不能确定, λ 不一定存在恒大于 1 的情形, 此时不能保证故障线路的谐波电流幅值在所有母线出线中仍然最大, 基于谐波电流幅值以及零序幅值关系的故障选线方法不再适用, 同样增加了故障诊断与检测的难度。

5 仿真实验

5.1 仿真系统基本设置

利用 MATLAB 搭建的 110 kV/10 kV 含电子式消弧线圈的谐振接地系统接地故障仿真模型如图 5 所示, 线路系统共 6 条线路 L_1 — L_6 , 长度分别为 4 km、6 km、8 km、12 km、16 km、18 km, 各条线路末端负载如图中所示, k 为控制开关, F 为故障点位置, R_f 为故障点过渡电阻。

主变压器参数为原边电压 110 kV, 副边电压 10.5 kV, 额定容量 100 MVA; 电子式消弧线圈本体变压器参数: 额定容量 115 kVA, 空载损耗 0.001 5 pu, 铜耗 0.037 pu, 可控硅晶闸管的参数: 内电阻 0.001 Ω , 正向管压降 0.8 V, 缓冲电阻 500 Ω , 缓冲电容 0.25 μ F; 额定频率 50 Hz。

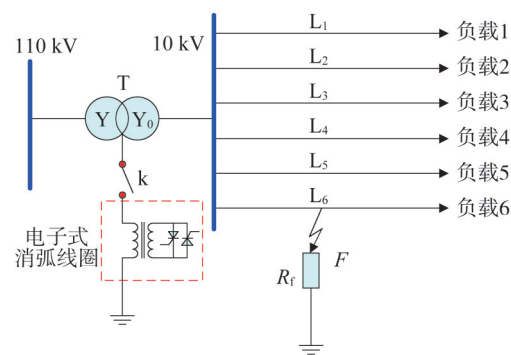


图5 含电子式消弧线圈的谐振接地系统仿真模型

Fig.5 Simulation model of resonant grounding system including power electronic arc suppression coil

5.2 仿真验证 1: 系统仅包含纯架空或电缆线路

所有线路均为架空线或电缆时, 分别在 18 km

线路 L_6 和 4 km 线路 L_1 上设置故障点,记为故障 1 和故障 2,过渡电阻 R_f 分别设为 $10\ \Omega$ 、 $100\ \Omega$ 、 $1\ 000\ \Omega$,故障初相角设为 90° 。纯架空线或纯电缆情形下,取其中一种情况即可。本文以纯架空线为例进行仿真,架空线路参数如表 1 所示,其中 R_{0u} 、 L_{0u} 、 C_{0u} 分别为线路分布参数零序电阻、零序电感、零序电容; R_{1u} 、 L_{1u} 、 C_{1u} 分别为线路分布参数正序电阻、正序电感、正序电容。仿真得到的故障 1 各条出线零序电流波形如图 6 所示,其局部放大图如图 7 所示。

表 1 架空线路分布参数

Table 1 Distribution parameters of overhead line

参数	数值
零序参数	$R_{0u}/(\Omega/\text{km})$ 0.346
	$L_{0u}/(\text{mH}/\text{km})$ 4.787
	$C_{0u}/(\mu\text{F}/\text{km})$ 0.004 035
正序参数	$R_{1u}/(\Omega/\text{km})$ 0.121
	$L_{1u}/(\text{mH}/\text{km})$ 1.019
	$C_{1u}/(\mu\text{F}/\text{km})$ 0.011 48

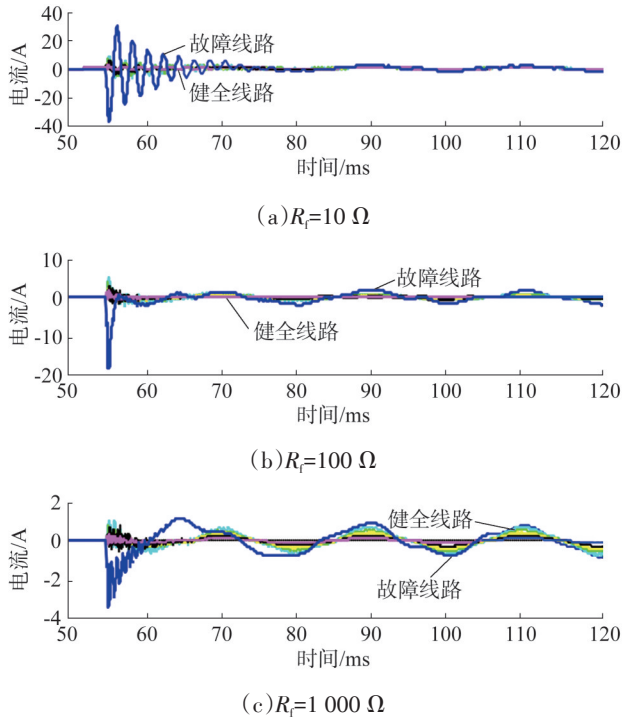


图 6 仿真验证 1:各条线路零序电流波形(故障 1)

Fig.6 Simulation verification 1: zero-sequence current waveform of each line (fault point 1)

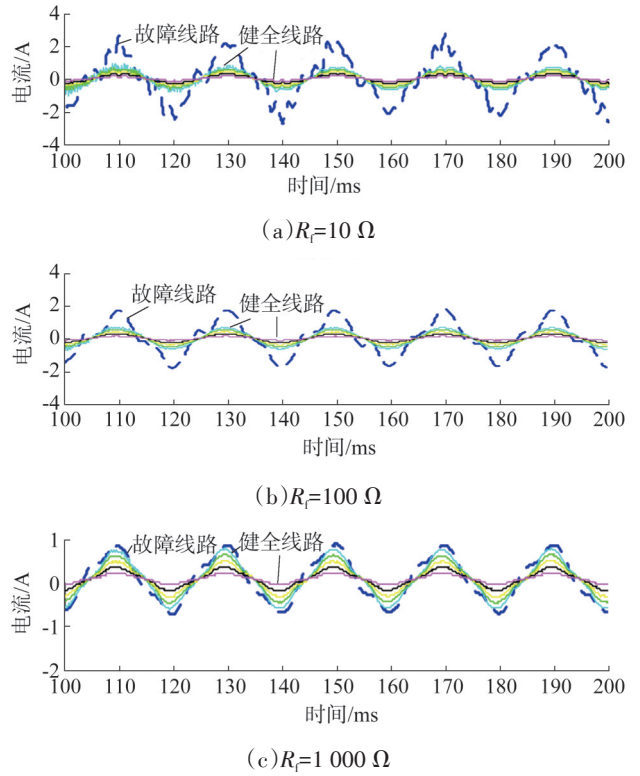
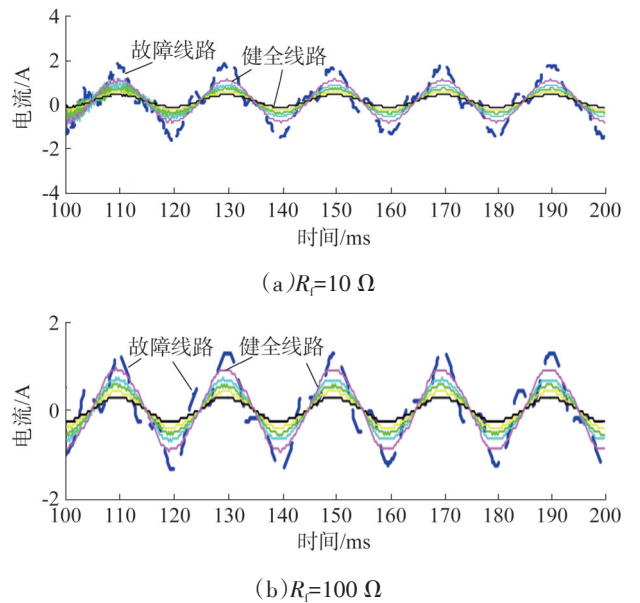

 图 7 仿真验证 1:各条线路零序电流波形局部放大图
(故障 1)

Fig.7 Simulation verification 1: magnified zero-sequence current waveform of each line (fault 1)

仿真得到的故障 2 各条出线零序电流波形局部放大图如图 8 所示。



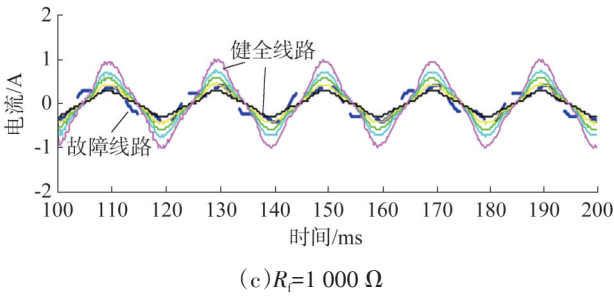


图8 仿真验证1:各条线路零序电流波形局部放大图
(故障2)

Fig.8 Simulation verification 1:magnified zero-sequence current waveform of each line (fault 2)

对上述两种故障情形各线路中120~160 ms区段的零序电流波形分别进行快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)分析,得到各条线路零序电流3次谐波电流幅值如表2和表3所示。文中表格数据中,标红数据为同行中3次谐波电流幅值的最大值,其对应的线路为利用基于谐波电流幅值故障选线方法选出的故障线路。

表2 仿真验证1:各条线路3次谐波电流幅值(故障1)

Table 2 Simulation verification 1:the amplitude of the 3rd harmonic current of each line (fault 1)

过渡电阻/ Ω	3次谐波电流幅值/mA					
	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6
0	17.3	23.2	42.8	67.7	116.5	304.8
100	15.7	21.7	32.7	51.2	98.7	228.4
1000	13.2	19.4	27.6	46.4	86.6	115.9

表3 仿真验证1:各条线路3次谐波电流幅值(故障2)

Table 3 Simulation verification 1:the amplitude of the 3rd harmonic current of each line (fault 2)

过渡电阻/ Ω	3次谐波电流幅值/mA					
	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6
0	214.3	38.2	63.0	0.0846	102.4	133.8
100	157.4	26.7	48.6	0.0748	84.5	119.4
1000	51.4	21.9	36.1	63.2	76.3	110.4

可见,当所有线路为纯架空线或纯电缆时,若最长线路(L_6)故障时,故障线路零序电流谐波分量幅值均大于健全线路;当最短线路(L_1)故障时,过渡电

阻较小,仍有上述规律,过渡电阻较大时健全线路的零序电流谐波分量的幅值比故障线路稍大(如表3中 L_4 、 L_5 、 L_6 线路的3次谐波电流幅值均大于故障线路),此时基于谐波电流幅值以及零序幅值关系的故障选线方法将误选线路 L_6 为故障线路,因此不再适用,与前文理论分析相同。

5.3 仿真验证2:系统包含纯架空电缆混合线路

当系统结构为架空电缆混合线路时,六条线路 L_1 — L_6 的线路结构为:2 km 电缆线路、4 km 电缆线路、8 km 架空线路、12 km 架空线路、18 km 架空线路、20 km 架空线路,电缆参数如表4所示。

表4 电缆线路分布参数

Table 4 Distribution parameters of cable line

类别	参数	数值
零序参数	$R_{0u}/(\Omega/\text{km})$	0.797 0
	$L_{0u}/(\text{mH}/\text{km})$	0.956 3
	$C_{0u}/(\mu\text{F}/\text{km})$	0.470 0
正序参数	$R_{1u}/(\Omega/\text{km})$	0.079 7
	$L_{1u}/(\text{mH}/\text{km})$	0.273 9
	$C_{1u}/(\mu\text{F}/\text{km})$	0.470 0

根据表1和表4,可得6条线路的对地分布电容分别为: $C_1=0.94 \mu\text{F}$ 、 $C_2=1.88 \mu\text{F}$ 、 $C_3=0.032 \mu\text{F}$ 、 $C_4=0.056 \mu\text{F}$ 、 $C_5=0.073 \mu\text{F}$ 、 $C_6=0.081 \mu\text{F}$ 。在线路 L_5 (18 km 架空线路)上设置故障点,该线路既不是最长线路,也不是对地分布电容最大的线路。仿真得到的各条线路零序电流3次谐波含量如表5所示。

表5 仿真验证2:各条线路3次谐波电流幅值

Table 5 Simulation verification 2:the amplitude of the 3rd harmonic current of each line

过渡电阻/ Ω	3次谐波电流幅值/mA					
	L_1	L_2	L_3	L_4	L_5	L_6
0	325.2	361.1	77.6	158.5	494.7	236.4
100	299.6	328.5	61.4	133.0	388.9	175.8
1000	259.1	280.4	55.6	93.4	247.4	117.4

由表5可知,当线路为架空线电缆混合时,对地分布电容关系着故障线路零序电流谐波分量幅值的

大小。若故障线路的对地分布电容不是所有线路中最大而过渡电阻较小时,谐波电流的分布规律与纯架空线或纯电缆线结构线路故障时分布规律相同;当过渡电阻较大时,健全线路 L_1 (2 km 电缆线路) 和线路 L_2 (4 km 电缆线路) 的 3 次谐波电流幅值比故障线路 L_5 (18 km 架空线路) 的幅值都要大,此时不能保证流入故障线路的谐波电流幅值在所有线路中仍然最大,基于谐波电流幅值故障选线方法将误选线路 L_2 为故障线路,因此不再适用,加大了故障诊断与检测的难度,与理论分析也相同。

6 结论

电子式消弧线圈的大量应用,使得谐振接地系统中谐波分量不断增加,故障过程更加复杂。通过分析含电子式消弧线圈的谐振接地系统的接地故障等值电路,给出了故障时电子式消弧线圈补偿谐波的谐波特征及分布规律随过渡电阻、线路参数的变化情况,以及其对谐波选线方法的影响,得到如下结论。

1) 过渡电阻:无论过渡电阻大小,基于谐波电流极性的选线方法均不适用;当过渡电阻较大时,基于谐波电流幅值的选线方法也不再适用。

2) 线路参数:线路参数决定了线路对地分布电容,当故障线路的对地分布电容并非最大且过渡电阻较大时,故障线路的谐波电流幅值可能不再最大,基于谐波电流幅值大小的故障谐波选线方法不再适用。

利用 MATLAB 仿真验证了该结论。本文的主要研究明确了电子式消弧线圈对故障谐波选线技术的影响,从而可以避免谐波选线方法的失效和误选造成故障危害的扩大,对于配电网中接地故障处理工作具有指导意义。目前已在含电子式消弧线圈的实际谐振接地系统中开展故障录波收集工作,下一步拟将利用收集到故障波形进行验证,并研究适用于含电子式消弧线圈的谐振接地系统的接地故障选线方法。

参考文献

[1] 李建文,杨瑞卿,李戎,等.“双高”配电网下变电站并联电容器灵活投切[J].电力系统及其自动化学报,2023,35(2):132-139.
LI Jianwen, YANG Ruiqing, LI Rong, et al. Flexible switching of

shunt capacitors in highly renewable and highly power electronics distribution network [J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2023, 35 (2):132-139.

[2] 杜庆秀,刘益青,薛嘉慧,等.基于逆变型分布式电源阻抗特征的有源配电网线路保护[J].山东电力技术,2023,50(7):1-12.
DU Qingxiu, LIU Yiqing, XUE Jiahui, et al. Line protection for active distribution network based on impedance characteristics of inverter interfaced distributed generation [J]. Shandong Electric Power, 2023, 50(7):1-12.

[3] TIAN M X, LI Q F, LI Q F. A controllable reactor of transformer type [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19 (4) : 1718-1726.

[4] SUGIMOTO S, NEO S, ARITA H, et al. Thyristor controlled ground fault current limiting system for ungrounded power distribution systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11 (2) : 940-945.

[5] LI X B, WEI L S, WANG C L, et al. Review on the arc suppression coil with automatic tracking and compensation in China [J]. Australian Journal of Electrical and Electronics Engineering, 2010, 7(3):289-297.

[6] CONG W, KONG J, XUN T S, et al. Arc suppression coil preset compensation method by using injection signal [C] // 11th IET International Conference on Developments in Power Systems Protection (DPSP 2012). IET, 2012.

[7] 李佳琦. TSC/TCR 组合式消弧线圈控制器开发[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2010.

[8] 张宗杰. 高短路阻抗变压器式消弧线圈谐振接地系统的研究[D]. 北京:华北电力大学, 2011.

[9] 常会军,曹廷根. 高短路阻抗变压器式消弧线圈滤波参数的计算[J]. 变压器, 2014, 51(8):16-20.
CHANG Huijun, CAO Tinggen. Filter parameter calculation of high short-circuit impedance transformer type arc-suppression reactor [J]. Transformer, 2014, 51(8):16-20.

[10] 田铭兴,杨秀川,原东昇. 多并联支路型可控电抗器短路电抗对支路电抗和电流的影响[J]. 电工技术学报, 2014, 29 (7) : 237-243.
TIAN Mingxing, YANG Xiuchuan, YUAN Dongsheng. Short - circuit reactances of a controllable reactor of multi-parallel branch type's influence on its branch reactances and currents [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29 (7) : 237-243.

[11] 程云祥. 智能化配电网线路状态监测系统设计与应用[D]. 济南:山东大学, 2017.

[12] 林凡勤,杨晶晶,孙华忠,等. 基于信号注入法的主从式消弧线圈柔性补偿控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34 (12):10-17.
LIN Fanqin, YANG Jingjing, SUN Huazhong, et al. Flexible compensation control strategy for master-slave arc suppression coil

- based on signal injection method [J]. Proceedings of the CSU - EPSA, 2022, 34(12): 10-17.
- [13] KUZMIN A A. Development of the intelligent single phase-to-ground-fault current compensation system for 6-35 kV networks [C] // 2016 11th International Forum on Strategic Technology (IFOST). IEEE, 2016: 266-270.
- [14] 朱珂, 倪建, 张荣华. 基于主动扰动技术的谐振接地系统单相接地故障测距方法[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1881-1887.
- ZHU Ke, NI Jian, ZHANG Ronghua. A new approach for fault location in resonant grounded system based on active disturbance technology [J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1881-1887.
- [15] 要焕年, 曹梅月. 谐振接地技术新发展[J]. 中国电力, 2000, 33(10): 55-57.
- YAO Huannian, CAO Meiyue. New development of resonance neutral earthing technology [J]. Electric Power, 2000, 33(10): 55-57.
- [16] 刘味果, 师冬霞, 李彦明. 消弧线圈响应时间的探讨[J]. 高电压技术, 2008, 34(7): 1353-1357.
- LIU Weiguo, SHI Dongxia, LI Yanming. Discussion on response time of arc suppression coil [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(7): 1353-1357.
- [17] 韦明杰, 石访, 张恒旭, 等. 基于同步零序电流谐波群体比相的谐振接地系统高阻故障选线及区段定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(24): 8358-8372.
- WEI Mingjie, SHI Fang, ZHANG Hengxu, et al. Feeder selection and section location of high impedance fault at resonant networks based on the phase differences between the synchronous harmonics of the zero sequence currents [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(24): 8358-8372.
- [18] 韦莉珊, 贾文超, 焦彦军. 基于5次谐波与导纳不对称度的配电网单相接地选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(15): 77-83.
- WEI Lishan, JIA Wenchao, JIAO Yanjun. Single-phase fault line selection scheme of a distribution system based on fifth harmonic and admittance asymmetry [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(15): 77-83.
- [19] 李琰, 赵莹, 杜磊, 等. 计及分布式电源注入谐波的单相接地故障联合选线[J]. 电力工程技术, 2023, 42(4): 113-121.
- LI Yan, ZHAO Ying, DU Lei, et al. Combined line selection of single-phase grounding faults considering harmonic injection of distributed powers [J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(4): 113-121.
- [20] 薛永端, 李长安, 徐丙垠. 非线性负荷对小电流接地故障谐波选线的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2): 44-49.
- XUE Yongduan, LI Chang'an, XU Bingyin. Influences of non-linear load to harmonic-based earth fault protection in non-solidly earthed network [J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(2): 44-49.
- 收稿日期: 2023-12-13
修回日期: 2024-04-29
- 作者简介:
乔东伟(1985), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为继电保护及配电自动化;
宫德锋(1973), 男, 高级工程师, 主要研究方向为继电保护及配电自动化;
秦苏亚(1995), 通信作者(3065373499@qq.com), 男, 硕士在读, 主要研究方向为配电网接地故障分析与保护;
杨 坤(1987), 男, 高级工程师, 从事变电设备运检技术工作;
薛永端(1970), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为配电网接地故障分析与保护、配电网触电与电气火灾安全防护、配电网自动化。
- (责任编辑 郑天茹)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2024.12.003

基于 Bhattacharyya 系数和 Pearson 相关系数的交直流混联电网电压波形相似度纵联保护方法

张弘喆^{1*}, 丛伟², 王瑞梅², 古千硕², 张永杰²

(1. 国网山东省电力公司济南供电公司, 山东 济南 250012;

2. 电网智能化调度与控制教育部重点实验室(山东大学), 山东 济南 250061)

摘要:当交直流混联电网的联络线中有故障发生时,直流逆变侧电气故障特征和无穷大交流电源截然不同,难以保证传统交流保护方法的可靠与灵敏。因此提出了一种基于 Bhattacharyya 系数和 Pearson 相关系数的交直流混联电网电压波形相似度纵联保护方法,线路两侧的保护单元对各自的测量电压和通过计算得到的参考点参考电压波形相似性进行比较。综合 Pearson 相关系数和 Bhattacharyya 系数对待判断的两电压波形相似度进行判断,此后对线路两端保护装置的故障区域相似性判断结果采用纵联保护逻辑进行比较,从而实现对全线范围内区内外故障进行可靠识别与判断。PSCAD 仿真结果表明,所提方法可以准确识别交直流混联电网联络线故障,具有较高的可靠性和良好的适用性。

关键词: Bhattacharyya 系数; Pearson 相关系数; 电压波形相似度; 纵联保护; 参考电压

中图分类号: TM744

文献标志码: A

文章编号: 1007-9904(2024)12-0019-08

Longitudinal Protection Method of AC/DC Hybrid Power Grid for Voltage Wave Similarity Using Bhattacharyya Coefficient and Pearson Correlation Coefficient

ZHANG Hongzhe^{1*}, CONG Wei², WANG Ruimei², GU Qianshuo², ZHANG Yongjie²

(1. State Grid Jinan Power Supply Company, Jinan 250012, China;

2. Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control (Shandong University), Jinan 250061, China)

Abstract: When a fault occurs on the tie line of AC/DC hybrid power system, the electrical fault characteristics on the DC inverter side are different from those of an infinite AC power supply. The sensitivity and reliability of traditional protection methods will be hard to guarantee. In this paper, a longitudinal protection method of AC/DC hybrid power grid for voltage wave similarity based on Bhattacharyya coefficient and Pearson correlation coefficient is proposed. The wave similarity of the measuring voltage and the calculated reference point reference voltage on both sides is compared. The voltage wave similarity is judged by combining Pearson correlation coefficient and Bhattacharyya coefficient. After that, the longitudinal comparison of the similarity judgment results on both sides will be conducted. The identification and judgment of internal and external faults in the entire line can be achieved reliable. The PSCAD simulation results demonstrate that the proposed method can accurately identify faults on the tie line of the AC/DC hybrid power system, exhibiting high reliability and applicability.

Keywords: Bhattacharyya coefficient; Pearson correlation coefficient; voltage waveform similarity; longitudinal protection; reference voltage

0 引言

随着电力技术的日益发展,交直流混联电网以其独特的输电距离长、成本低等优势被我国广泛采用,在电压等级和电网规模方面我国处于世界前列,电网形态已经发生了极大变化。当故障发生在这种

新形态的交直流混联电网中时,交直流联络处的直流逆变侧受到直流控制策略等影响,其电气量变化特征与传统的无穷大交流电源存在较大差异^[1-4],对于电流差动保护而言,由于两端电源输出特性不同,可能会导致区内故障时差动电流下降、保护灵敏度不足的情况出现^[5]。对于距离保护而言,在确保足够灵

敏度的前提下,选择性和速动性可能会存在矛盾^[6]。此外由于在直流系统中大量采用的电力电子器件的脆弱性,承受较长时间的短路故障电流会对直流系统造成一系列严重的后果,在换相换流器高压直流输电(line-commutated converter high-voltage direct current, LCC-HVDC)中易发生换相失败,因此对故障判断的可靠与快速提出了更高的要求。对新形态的交直流混联系统而言,传统交流系统的保护原理在新形态交直流混联电网中的可靠性和灵敏度不足与新形态的交直流混联电网直流逆变侧对故障判断较高的快速及可靠要求之间存在矛盾,且需要迫切解决。

当下,国内外学者已经开展了大量对新形态交直流混联电网保护原理的研究工作,主要提出了行波保护原理、电流差动保护原理和基于故障测距的保护原理等。对于行波保护原理,文献[7]对故障行波的时间常数进行计算,从而区分区内外故障。文献[8]为了提高行波保护在交直流混联电网中的灵敏度,采用小步长方法对行波进行采样。但是该类保护原理要求保护装置具有较高的采样频率以对故障行波进行捕捉,且在某些特殊情况下行波难以捕捉。对于电流差动保护原理,文献[9]为了消除分布电容电流对差动保护的影响,采用线路的 Bergeron 分布参数模型进行计算。文献[10]采用基于单相电流暂降监测的保护自适应改进方法,提高电流差动保护在交直流混联电网的适应性和灵敏度。为了防止区内故障灵敏度下降及区外故障的误动作,电流差动保护要求线路两侧的双电源故障特性一致,但交直流混联电网联络线两端分别为直流逆变电源和交流电源,两者故障特性截然不同,电流差动保护已不再适用。此外,电流差动保护需要对两端的电流采样点进行大量交互计算,对通信的要求较高,且难以保证故障判断的快速性。对于基于故障测距的保护原理,文献[11]采用微分方程的方式通过保护安装处电压、电流计算出线路末端的电压、电流,再通过两组数据进一步计算出故障距离来判断故障位置。文献[12]则在文献[11]的基础上进一步结合了实际工程情况,考虑了线路频变参数的影响,使测距与故障判断结果更加准确。但是基于故障测距的保护原理需要对故障距离进行计算,一方面其精度受模型的影响较大,另一方面该保护原理无法判断线路末端故障时故障确切位置,无法保护线路全长。

本文提出了一种基于 Bhattacharyya 系数和 Pearson 相关系数的交直流混联电网电压波形相似度纵联保护方法,通过对保护安装处的电压波形相似性进行比较来判断故障位置。结合测量电压与本文定义的参考点参考电压在不同故障位置时波形存在的差异性特点,综合采用 Bhattacharyya 系数和 Pearson 相关系数对相似性进行判断,对故障位置做出大致判断,然后通过纵联保护的逻辑对故障位置做出可靠判断。以 LCC-HVDC 为例搭建交直流混联电网仿真模型,对本文所提故障判断方法的有效性进行仿真验证。

1 电压波形相似度保护原理

以典型单线交直流混联电网为例,介绍本文所述测量电压和参考电压,以及其在故障位置不同时波形体现出的差异性特点,如图1所示。

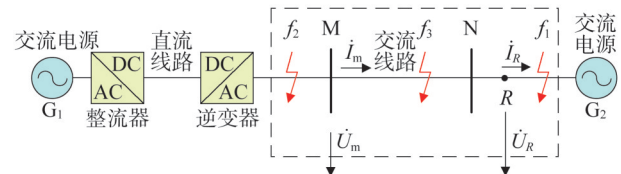


图1 单线交直流混联电网模型

Fig.1 Single-line AC/DC hybrid power grid model

图1中,M和N是本文的保护范围两端的母线,是交直流混联电网联络线之间在母线M和母线N处分别安装保护装置。M侧为逆变侧,以该侧为例对本文保护原理进行说明。其中 $\dot{U}_m$ 和 $\dot{i}_m$ 分别是M侧保护装置测量到的电压和电流,记作测量电压和测量电流,然后在线路上任意位置设置一个参考点R。

当线路没有故障,或在点 f_1 、 f_2 发生故障时,母线M与点R之间的线路完好无损,通过M侧的测量量和一定的线路模型可以建立双端口网络方程。

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_R \\ \dot{i}_R \end{bmatrix} = \mathbf{A} \cdot \begin{bmatrix} \dot{U}_m \\ \dot{i}_m \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{A}$ 为双端口网络参数矩阵。

理论上可以通过使用测量电气量计算线路上任何位置的电气量。以R-L模型为例,式(1)可以改写为

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_R \\ \dot{I}_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_m \\ \dot{I}_m \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: Z 为母线 M 与点 R 之间的阻抗。

通过式(2)计算任意参考点 R 处的参考电压。在不考虑线路模型对电压计算造成影响的情况下,计算得到的参考点 R 电压即为此时参考点 R 的实际电压。此时已经得到了测量电压与参考电压的波形特征,此后对不同故障位置,两波形的差异性特征进行分析。

当故障点位置不在母线 M 与点 R 之间,即在点 f_1 或 f_2 发生故障时,如果存在金属短路故障,可以推算得到此时的测量电压为

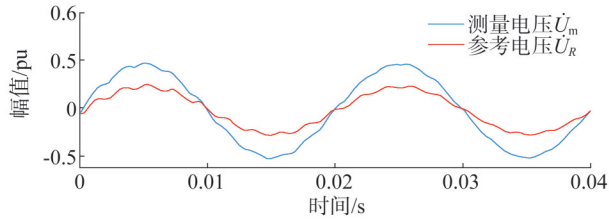
$$\dot{U}_m = Z_f \dot{I}_m \quad (3)$$

式中: Z_f 为母线 M 到短路点的线路阻抗。

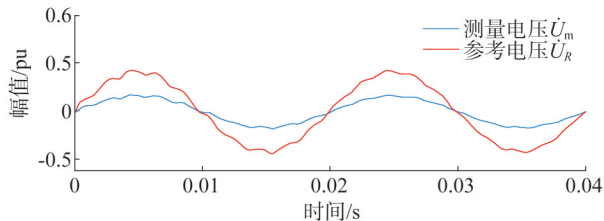
结合式(2)、式(3)和图 1,可以推算得到参考点 R 的电压为

$$\begin{cases} \dot{U}_R = (Z_{f_1} - Z) \dot{I}_m \\ \dot{U}_R = (Z_{f_2} + Z) \dot{I}_m \end{cases} \quad (4)$$

从上述两种情况中可以看出,测量电压 $\dot{U}_m$ 和参考电压 $\dot{U}_R$ 的相位相同但幅值不同。此时测量电压和参考电压如图 2 所示。



(a) 故障点为 f_1



(b) 故障点为 f_2

图2 线路区外故障时电压波形图

Fig.2 Voltage waveform diagram during faults outside the line area

当母线 M 与点 R 之间线路内部即点 f_3 处发生故障时,通过式(2)可以推算得到参考点电压为

$$\dot{U}_R = -(Z - Z_{f_3}) \dot{I}_m \quad (5)$$

此时计算得到的测量电压 $\dot{U}_m$ 和参考电压 $\dot{U}_R$ 的相位相反,参考点实际电压不能通过式(1)计算。测量电压和参考电压如图 3 所示。

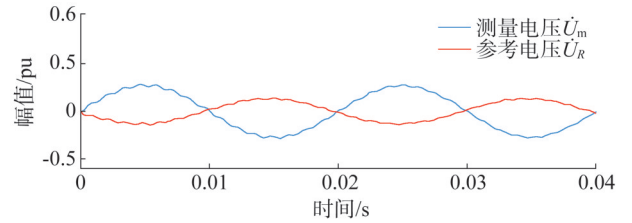


图3 线路区内故障时电压波形图

Fig.3 Voltage waveform diagram during faults in the line area

由图 2 和图 3 可知,故障位置和电压相位之间的关系可以概括为:当发生线路区外故障时,测量电压与参考电压相位相同;当发生线路区内故障时,测量电压与参考电压相位相反。

实际中,逆变侧会有谐波产生,对信号的周期性产生影响,使基于傅里叶算法的相量计算方法出现问题。本文将两电压相位关系转换为波形的相似性关系,以采样值和微分方程代替相量和代数方程。定义相位相同的关系为波形相似,相位相反的关系为波形不相似。以 $R-L$ 型模型为例,参考电压的表达式为

$$u_R = u_m - (ri_m + l \frac{di_m}{dt}) \quad (6)$$

式中: u_R 、 u_m 、 i_m 分别为参考点电压、测量电压及电流的采样值; r 和 l 分别为线路的电阻及电感。

综上所述,可以通过计算波形相似性的关系判断故障位置,从而完成故障判断^[13]。

2 波形相似度判断方法

2.1 Bhattacharyya 距离

Bhattacharyya 距离作为统计学中的常用概念,常用于对 2 个离散概率分布函数进行测量。这种相似性计算方法已广泛应用于模式识别、图像处理和信号分析等领域。假设 $p_1(x)$ 和 $p_2(x)$ 是两个独立离散随机变量的概率分布函数。使用 Bhattacharyya 距离的两个独立离散随机变量的相似性为

$$B(p_1, p_2) = \sum_{x \in X} \sqrt{p_1(x) p_2(x)} \in [0, 1] \quad (7)$$

式中: $B(p_1, p_2)$ 为 Bhattacharyya 系数; X 为 x 的集合。

国内外学者经过研究探索发现 Bhattacharyya 距离方法也可以对两个图像的相似性特征进行匹配计算^[14-15],但是需要对图像进行数字化处理后才可以通过计算 Bhattacharyya 距离来对两图像相似性特征进行判断。本文将两电压的采样值转换为两个离散概率分布函数 $p_1(x)$ 和 $p_2(x)$ 。取两波形的最大值与最小值,将间隔分为 n 个子间隔(本文取 $n=10$),根据落在子间隔内的采样点数量与数据窗口内采样点数量的比例建立波形直方图。直方图的重叠程度越高,两波形的相似性越高, $B(p_1, p_2)$ 越趋近于 1;相反则相似度越低, $B(p_1, p_2)$ 越趋近于 0。

2.2 Pearson 相关系数

Pearson 相关系数基于两组数据的集中度来对两条离散数据的相似度进行度量,对两条离散数据细节处相似性的判断更加精确,但是计算方法较 Bhattacharyya 系数复杂,计算时间较长。计算式^[16]为

$$P(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^N \left(x_i - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j \right) \left(y_i - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j \right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \left(x_i - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j \right)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(y_i - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j \right)^2}} \quad (8)$$

式中: N 为任意正整数,代表两组数据的数量; $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ 和 $\{y_1, y_2, \dots, y_N\}$ 分别为待比较的两组数据, x_i, x_j 与 y_i, y_j 分别为两组数据中的任意数据。分子部分为 $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ 和 $\{y_1, y_2, \dots, y_N\}$ 两组数据的协方差。

从式(8)中可以看出,当 x_i 与 y_i 与其自身的平均值之差同时为正或者为负时,两组数据的协方差为正,此时两组数据呈正相关的关系;反之若两组数据的协方差为负,即两组数据不同时大于或小于其平均值,则两者呈负相关的关系。通过 $\{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ 和 $\{y_1, y_2, \dots, y_N\}$ 两组数据的标准差做乘积从而对两组数据的协方差进行归一化即可得到两组数据的 Pearson 相关系数。两组数据之间的正相关性越高, Pearson 相关系数越趋近于 1,反之则趋近于 -1^[17]。因此, Pearson 相关系数可以用于判断本文所得到两组波形数据的相关性即波形相

似性。

2.3 波形相似性判断方法

Bhattacharyya 距离具有计算简单和对波形趋势敏感的优点,但是对细节处的相似性衡量不足且受幅值影响较大; Pearson 相关系数对波形细节处的相似性更为敏感,可以进行更精细判断且方法本身不受幅值影响。因此本文采用先对波形进行“归一化对齐”处理后^[18],对两波形计算 Bhattacharyya 系数大致判断两波形相似性。如果判断为相似,为保证判断的准确性,进一步采用 Pearson 相关系数对两波形的相似性进行细致判断。判断方法流程如图 4 所示。

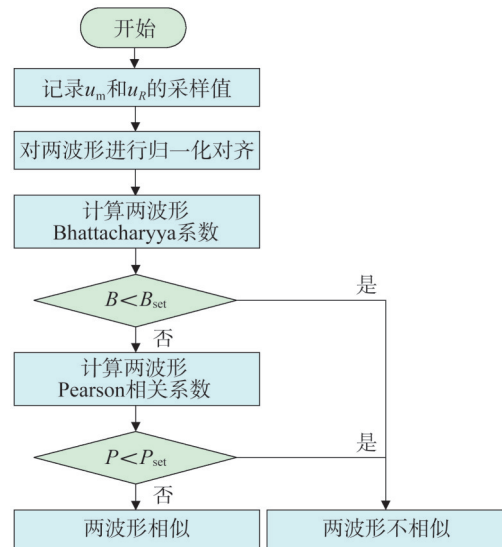


图4 波形相似度判断方法流程

Fig.4 Process flow of waveform similarity judgment method

本文波形相似度判断具体方法为:

1)保护装置记录故障发生后一定时间内的测量电压和电流的采样值共 J 个采样点,分别记为 $u_m(t_i)$ 和 $i_m(t_i)$ (i 为小于 J 的任意正整数),本文保护方法取故障后 10 个采样点进行计算。

2)根据式(6)计算参考电压 $u_R(t_i)$ 。

3)对测量电压和参考电压波形进行归一化处理。设待处理波形为 $y(i)$,取采样区间内波形最大值 $y_{\max}$ 和最小值 $y_{\min}$,则经过归一化处理后的波形为

$$y'(i) = \frac{y(i)}{y_{\max} - y_{\min}} \quad (9)$$

4)对两波形进行归一化处理后,将两波形首部

对齐。设两波形分别为 $y_1'(i)$ 和 $y_2'(i)$, 首先求得两波形首部差值为

$$d = y_1'(1) - y_2'(1) \quad (10)$$

经过对齐后两波形分别为

$$\begin{cases} y_1''(i) = y_1'(i) \\ y_2''(i) = y_2'(i) + d \end{cases} \quad (11)$$

5) 经归一化对齐后, 对两波形计算 Bhattacharyya 系数, 本文取阈值 B_{set} 为 0.5^[19], 计算值大于阈值则进入下一步处理, 小于阈值则判断为两波形不相似。

6) 若 Bhattacharyya 系数大于阈值 B_{set} , 则进一步采用 Pearson 相关系数对两波形的相似性进行计算, 本文取阈值 P_{set} 为 0.5, 计算值大于阈值则判断为两波形相似, 小于阈值则判断为两波形不相似。

3 电压波形相似度纵联保护方法

3.1 纵联保护逻辑

线路两端保护单元分别计算得到本端相似度判断结果后, 将判断结果进行纵联比较, 即可对区内外故障进行可靠判断与区分。为了方便使用, 本文将参考点 R 设置在 1.3 倍线路全长的位置, 采用本文所述方法, 被保护线路两端的保护装置保护范围分别如图 5 所示。

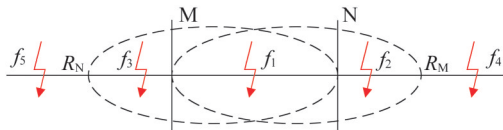


图5 两端保护元件保护范围

Fig.5 Protection range of two end protection components

当故障发生在点 f_1 处时, 故障点处在 M 侧和 N 侧保护装置保护范围内, 此时即发生区内故障; 当故障发生在点 f_2 或 f_3 处时, M 侧和 N 侧保护单元有且仅有一个会判断为波形不相似, 此时即发生区外故障; 而当故障发生在点 f_4 或 f_5 处时, M 侧和 N 侧保护单元均会判断为波形相似, 此时即发生区外故障。综上所述, 总结纵联保护逻辑如表 1 所示。

本文纵联比较的对象是两端保护单元波形相似性判断结果, 传输数据少, 对通信系统要求低。

表1 纵联保护逻辑

Table 1 Longitudinal protection logic

M 侧判断结果	N 侧判断结果	保护判断结果
两波形不相似	两波形不相似	区内故障(点 f_1 处故障)
两波形不相似	两波形相似	区外故障(点 f_2 处故障)
两波形相似	两波形不相似	区外故障(点 f_3 处故障)
两波形相似	两波形相似	区外故障(点 f_4 或 f_5 处故障)

3.2 特殊情况的处理

1) 电压死区的影响。

电压死区指金属性三相短路发生在线路出口附近处时, 三相的测量电压很低无法对故障进行判断的问题^[20]。当交直流混联电网的直流逆变侧出口附近处发生金属性三相短路故障时, 不仅测量电压不再显著, 对于 LCC-HVDC 这种换流形式还可能会导致连续换相失败等严重故障情况, 影响故障特征判断。逆变侧电源将被阻隔, 进一步增加了故障检测的难度。

在测量电压死区时, 测量电流仍然明显, 仍可以计算得到清晰准确的参考电压, 两电压波形经过归一化后消除了幅值的影响, 因此电压死区的情况不会对保护方法造成影响。

2) 过渡电阻的影响。

过渡电阻的存在将改变波形相似性的规则。当过渡电阻足够大时, 区内故障时两电压波形可能相似, 保护失效。本文解决方案是对参考点 R 的位置进行灵活调整从而对保护的灵敏度进行灵活调整。参考点 R 的位置可以选在大于线路全长的任意位置。但如果选取的参考点 R 距离母线 M 太远, 由于模型误差等造成的计算误差会增加, 不利于保护判断的可靠性。因此, 参考点 R 的位置选取与保护的灵敏性和可靠性密切相关, 需要在对灵敏度性和可靠性的综合考虑下合理调整参考点 R 的位置。

4 仿真分析

采用 PSCAD/EMTDS 构建如图 1 所示的单线交直流混联电网模型。逆变侧采用 LCC-HVDC, 参数设置如下。

采样频率为 4 kHz。线路正序参数为 $r=0.08 \Omega/\text{km}$ 、 $l=0.001328 \text{ H}/\text{km}$ 、 $c=0.010414 \mu\text{F}/\text{km}$, 线路零序参数

为 $r=0.16\ \Omega/\text{km}$ 、 $l=0.002\ 656\ \text{H}/\text{km}$ 、 $c=0.007\ 395\ \mu\text{F}/\text{km}$ ，母线 M 和 N 之间线路长 100 km。故障发生时间设置为 1 s，故障持续 40 ms。

4.1 发生区内故障的仿真

为了对区内故障的情况进行仿真模拟，母线 M 和 N 之间线路中设置一个单相接地短路故障。故障点 f_3 与母线 M 的距离为 50 km，设置过渡电阻为 $10\ \Omega$ 。电压如图 6 所示。

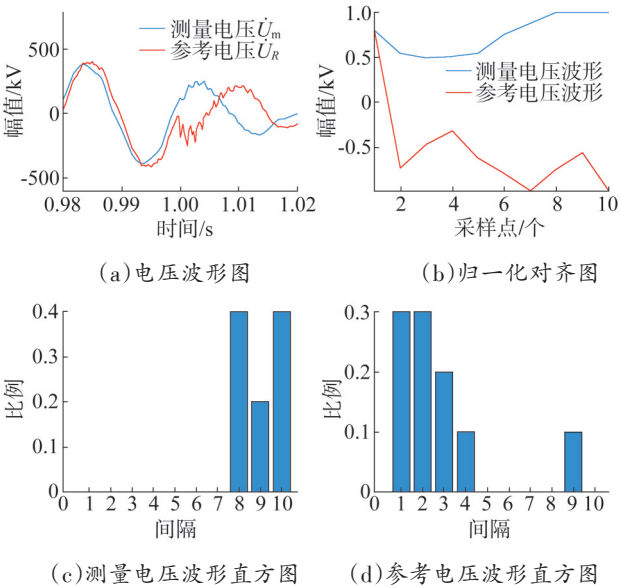


图6 区内故障时电压波形和波形直方图
Fig.6 Voltage waveform and waveform histogram during faults in the area

从图 6 可以看出，两电压波形变化趋势相反，波形直方图差异较大，M 侧和 N 侧计算结果如表 2 所示。

表2 区内故障保护计算结果

Table 2 Calculation results of fault protection in the area

项目	M 侧	N 侧
Bhattacharyya 系数	0.223 6	0.141 4
Pearson 相关系数	—	—
保护判断结果	两波形不相似	两波形不相似
纵联比较结果	区内故障	

从表 2 可以看出，M 侧和 N 侧计算得到的 Bhattacharyya 系数均小于阈值 B_{set} ，此时不需要计算

两侧两波形 Pearson 相关系数即可判断两波形不相似，结合表 1 的纵联保护逻辑可以判断此故障为区内故障，应该动作于跳闸，本文保护方法逻辑判断正确。

4.2 发生区外故障的仿真

为了对区内故障的情况进行仿真模拟，本文在母线 M 和 N 之外设置一个正向区外单相接地短路故障。故障点 f_1 距离母线 N 80 km，设置过渡电阻为 $10\ \Omega$ 。M 侧的两个电压如图 7 所示。

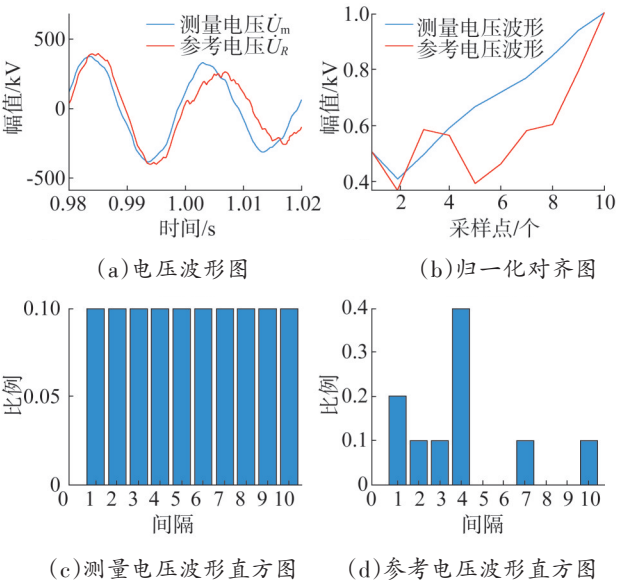


图7 区外故障时电压波形和波形直方图
Fig.7 Voltage wave and distribution waveform histogram during external faults

从图 7 可以看出，两电压波形变化趋势相同，波形直方图差异较小，M 侧和 N 侧计算结果如表 3 所示。

表3 区外故障保护计算结果

Table 3 Calculation results of external fault protection

项目	M 侧	N 侧
Bhattacharyya 系数	0.741 4	0.814 6
Pearson 相关系数	0.778 6	0.947 8
保护判断结果	两波形相似	两波形相似
纵联比较结果	区外故障	

从表 3 可以看出，M 侧和 N 侧计算得到的

Bhattacharyya 系数均大于阈值 B_{set} , 计算两侧两波形 Pearson 相关系数均大于阈值 P_{set} , 可判断两波形相似, 结合表 1 的纵联保护逻辑可以判断此故障为区外故障, 应该闭锁保护, 本文保护方法逻辑判断正确。

5 结论

提出一种基于 Bhattacharyya 系数和 Pearson 相关系数的交直流混联电网电压波形相似度纵联保护方法。线路两端的保护装置分别对本端测量和计算得到的测量电压和参考电压的波形相似性进行判断, 纵联比较两端保护波形相似性判断结果得到故障判断结果, 从而做到对区内外故障进行可靠快速的判断识别。结论如下。

1) 根据测量电压和测量电流计算得到的参考电压只与线路模型和参数有关, 不受电源输出特性的影响。因此本方法适用于不同形式的电网, 尤其适用于交直流混联电网。

2) 本文方法通过采样值进行波形的相似性判断从而得到故障位置信息, 在保证保护速动性的同时保证良好的可靠性。

3) 对两侧保护单元的相似度判断结果进行纵联比较, 对通信系统的要求不高。

4) 采用 Bhattacharyya 距离判断波形整体的相似性, 具有计算简单、逻辑清晰的特点。

5) 采用 Pearson 相关系数对待计算波形细节处的相似性进行计算, 与 Bhattacharyya 距离优势互补。

6) 归一化对齐方法可以消除波形幅值差异的影响, 适用于本文相似度判断方法。

此外, 参考点 R 的位置可以根据需要灵活设置, 以提高在高过渡电阻故障下的灵敏度。电压死区时归一化对齐后波形相似性关系仍然成立。因此, 该方法具有逻辑清晰、动作速度快、可靠性高等特点, 具有良好的应用前景。

参考文献

[1] 董新洲, 汤涌, 卜广全, 等. 大型交直流混联电网安全运行面临的问题与挑战[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(11): 3107-3119.
DONG Xinzhou, TANG Yong, BU Guangquan, et al. Confronting problem and challenge of large scale AC-DC hybrid power grid

operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(11): 3107-3119.
[2] 孙天甲, 刘海洋. 大规模交直流混联电网送端交流故障对受端电网的影响[J]. 浙江电力, 2022, 41(7): 18-24.
SUN Tianjia, LIU Haiyang. Influence of AC fault at sending end on receiving-end networks of large-scale AC/DC hybrid power grid[J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(7): 18-24.
[3] 王卉. 交直流混联电网换相失败及对交流保护的影响研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
[4] 梁营玉, 许冠军, 李武林, 等. 柔性直流换流站对传统选相方法的影响分析及对策[J]. 电工技术学报, 2020, 35(1): 201-212.
LIANG Yingyu, XU Guanjuan, LI Wulin, et al. Influence of the integration of MMC-HVDC station on traditional phase selection method and the countermeasure [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(1): 201-212.
[5] 王童辉. 特高压直流分层接入方式下系统故障对交流保护的影响[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
[6] WANG Y, FAN R Q, FANG G H, et al. A method of distance protection setting calculation for AC/DC hybrid receiving-end power grid[C]//2018 2nd IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). IEEE, 2018: 1-5.
[7] SALEH K A, HOOSHYAR A, EL-SAADANY E F. Ultra-high-speed traveling-wave-based protection scheme for medium-voltage DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(2): 1440-1451.
[8] 李爱民, 徐敏, 蔡泽祥, 等. 小步长采样的新型直流输电线路行波保护[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 90-96.
LI Aimin, XU Min, CAI Zexiang, et al. A small sampling interval based new traveling wave protection scheme for HVDC transmission lines[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 90-96.
[9] GAO S P, LIU Q, SONG G B. Current differential protection principle of HVDC transmission system [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2017, 11(5): 1286-1292.
[10] 杨子荷, 李永丽, 宋金钊, 等. 直流馈入下交流系统故障特性分析及故障分量电流差动保护改进[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 3-10.
YANG Zhihe, LI Yongli, SONG Jinzhao, et al. Fault characteristics analysis and fault component current differential protection improvement of AC system with infeed DC [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9): 3-10.
[11] 索南加乐, 侯卓, 宋国兵, 等. 基于分布参数模型的高压直流输电线路距离保护[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(8): 53-57.
SUO Nanjiale, HOU Zhuo, SONG Guobing, et al. Distance protection for HVDC transmission line based on distributed parameter model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(8): 53-57.
[12] SUONAN J L, ZHANG J K, JIAO Z B, et al. Distance protection for HVDC transmission lines considering frequency-dependent

- parameters [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28 (2):723-732.
- [13] ZHANG H Z, CONG W, KONG H, et al. Longitudinal protection method based on voltage waveform comparison for AC/DC hybrid system [C] // 2020 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power System Asia (I&CPS Asia). IEEE, 2020:937-942.
- [14] 黄昱皓. 基于 Bhattacharyya 距离的小电流接地故障选线[J]. 东北电力技术, 2021, 42(1):36-40.
- HUANG Yuhao. Fault line selection of small current grounding system based on bhattacharyya distance [J]. Northeast Electric Power Technology, 2021, 42(1):36-40.
- [15] 杜茂康, 王忠思, 宋强. 基于 Bhattacharyya 系数的改进相似度量方法[J]. 重庆邮电大学学报: 自然科学版, 2018, 30(5): 699-704.
- DU Maokang, WANG Zhongsi, SONG Qiang. Research of improving similarity measure based on Bhattacharyya coefficient [J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications: Natural Science Edition, 2018, 30(5): 699-704.
- [16] 徐岩, 程姝, 薛艳静. 基于故障暂态电流 Pearson 相关系数的直流配电网保护[J]. 华北电力大学学报: 自然科学版, 2021, 48(4):11-19.
- XU Yan, CHENG Shu, XUE Yanjing. Protection of DC distribution network based on Pearson correlation coefficient of fault transient current [J]. Journal of North China Electric Power University: Natural Science Edition, 2021, 48(4):11-19.
- [17] 李斌, 张纪航, 刘海金, 等. 基于波形相似度分析的直流输电线路故障测距[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9):27-32.
- LI Bin, ZHANG Jihang, LIU Haijin, et al. Fault location of HVDC transmission lines based on waveform similarity analysis [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9):27-32.
- [18] 张弘喆. 基于电压波形相似性比较的交直流混联电网纵联保护方法[D]. 济南: 山东大学, 2022.
- [19] 翁汉琨, 陈皓, 万毅, 等. 基于 Bhattacharyya 距离算法的线路纵联保护新判据[J]. 电网技术, 2020, 44(2):751-760.
- WENG Hanli, CHEN Hao, WAN Yi, et al. Novel criterion applicable to transmission line pilot protection based on bhattacharyya distance algorithm [J]. Power System Technology, 2020, 44(2):751-760.
- [20] 杨凡. 超高压电网站域保护构建模式及断路器保护研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- 收稿日期: 2023-08-08
修回日期: 2024-04-12
作者简介:
张弘喆(1997), 通信作者(hongzhez@126.com), 男, 硕士, 研究方向为电力系统继电保护;
丛伟(1978), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统继电保护;
王瑞梅(1999), 女, 硕士, 主要研究方向为电力系统继电保护;
古千硕(1998), 男, 硕士, 主要研究方向为电力系统继电保护;
张永杰(1999), 男, 硕士在读, 主要研究方向为电力系统继电保护。
(责任编辑 郑天茹)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2024.12.004

基于WOA-AM-GRU的短期电力负荷预测方法的研究

韩明冲^{1*}, 韩杰², 姜超¹, 苏本勇¹, 韩冰³

(1. 国网山东省电力公司曹县供电公司, 山东 菏泽 274400; 2. 北京师范大学, 北京 100875;

3. 国网山东省电力公司济宁供电公司, 山东 济宁 272008)

摘要:当代社会发展迅速, 电力系统愈加复杂, 为确保电力系统经济安全高效可靠运行, 短期电力负荷预测方面的研究必不可少。针对短期电力负荷数据具有的复杂性、多样性和一定规律性的特点, 提出一种基于鲸鱼优化算法-注意力机制-门控逻辑单元(whale optimization algorithm-attention mechanism-gated recurrent unit, WOA-AM-GRU)模型的短期电力负荷预测模型。首先, 门控逻辑单元(gated recurrent unit, GRU)可挖掘历史负荷数据间的隐藏规律, 为实现负荷预测打下基础; 其次, 模型融合注意力机制, 可发现数据间隐藏的关联程度, 得到特征信息的贡献比重, 以此对数据进行加权处理, 凸显影响大的特征值, 提高模型运行效率; 再次, 针对注意力机制-门控逻辑单元(attention mechanism-gated recurrent unit, AM-GRU)模型超参数选择困难问题, 利用鲸鱼优化算法对其进行参数寻优, 提高模型的预测精度。最后, 构建基于反向传播(back propagation, BP)神经网络、长短期记忆神经网络(long short-term memory, LSTM)、GRU、AM-GRU 和 WOA-AM-GRU 的短期负荷预测模型, 结合实例进行对比试验分析, 结果证实了基于 WOA-AM-GRU 的短期电力负荷预测模型的优越性。

关键词:短期电力负荷预测; 门控循环单元; 注意力机制; 鲸鱼优化算法; WOA-AM-GRU

中图分类号: TM732

文献标志码: A

文章编号: 1007-9904(2024)12-0027-07

Research on Short-term Electric Load Forecasting Method Based on WOA-AM-GRU

HAN Mingchong^{1*}, HAN jie², JIANG Chao¹, SU Benyong¹, HAN Bing³

(1. State Grid Caoxian Electric Power Supply Company, Heze 274400, China;

2. Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

3. State Grid Jining Electric Power Supply Company, Jining 272008, China)

Abstract: The rapid development of contemporary society has led to increasingly complex electricity systems. To ensure the economic security, efficiency, and reliability of electricity systems, research in short-term electricity load forecasting is indispensable. Considering the complexity, diversity, and certain regularities inherent in short-term electricity load data, we propose a short-term electricity load forecasting model based on the whale optimization algorithm-attention mechanism-gated recurrent unit (WOA-AM-GRU) model. Firstly, the gated recurrent unit (GRU) can excavate the hidden laws among the historical load data, laying the foundation for realizing load forecasting. Secondly, the model integrates the attention mechanism, which can discover the degree of hidden correlation among the data and get the contribution proportion of the feature information so as to weight the data, highlight the feature values with large influence, and improve the model operation efficiency. Furthermore, for the problem of difficult selection of hyperparameters of the attention mechanism-gated recurrent unit (AM-GRU) model, the whale optimization algorithm is used to optimize its parameters and improve the prediction accuracy of the model. Finally, the short-term load forecasting model based on back propagation (BP), long short-term memory (LSTM), GRU, AM-GRU, and WOA-AM-GRU is constructed, and the comparative experimental analysis is carried out in combination with examples, and the results confirm the superiority of the short-term power load forecasting model based on WOA-AM-GRU.

Keywords: short-term power load forecasting; gated recurrent unit; attention mechanism; whale optimization algorithm; WOA-AM-GRU

基金项目:恩施州科技计划项目“台区计量及安防治理大数据分析”(D20180017)。

Enshi Prefecture Science and Technology Program Project "Big Data Analysis for Station Metering and Security Governance" (D20180017).

0 引言

当代社会发展迅速,电力系统愈加复杂,为确保电力系统经济安全高效可靠运行,短期电力负荷预测方面的研究必不可少^[1]。以精确的负荷预测结果为依据,可使电能的生产和消费达到一种动态平衡,不仅降低了发电成本,还减少了资源浪费,响应了国家提出的“双碳”号召,同时提高了系统的稳定性^[2]。

科学技术发展至今,国内外研究短期负荷预测方法主要分为涉及数学统计和涉及机器学习两类。前者包括时间序列、线性回归、卡尔曼滤波等方法^[3],此类方法对于非线性因素所产生的影响表现能力不强,且要求数据具有较高平稳性,但其较为简单。对于后者,人工神经网络(artificial neural network, ANN)^[4]和支持向量机(support vector machine, SVM)^[5]方法较为常用。对于现有浅层经典预测模型,循环神经网络(recurrent neural network, RNN)^[6]、深度神经网络(deep neural networks, DNN)^[7]、卷积神经网络(convolutional neural networks, CNN)^[8]和深度置信网络(deep belief networks, DBN)^[9]等深度学习预测方法弥补了第一类方法的缺陷。神经网络因其具有自调节、自组织以及非线性拟合能力,应用最为广泛。长短期记忆神经网络(long short-term memory, LSTM)是一种改进后的时间递归神经网络,具有记忆长短期信息的能力。该网络的提出,解决了神经网络对于长时间序列预测能力受限的问题^[10]。

近年来,采取多种算法组合实现负荷预测已成为一种趋势,利用算法间的优缺点进行互补,提高了模型的性能。文献[11]以历史负荷值和气象数据为依据,基于反向传播(back propagation, BP)神经网络构建负荷预测模型,结合实例证明其有效性,但其存在模型预测精度低、搜索时间长的缺陷。针对该问题,文献[12]利用粒子群算法对BP网络中的权值和阈值进行寻优,提升了模型的收敛速度和预测效果。文献[13]考虑气象因素对电力负荷的影响,基于LSTM构建了负荷预测模型,并结合实例验证了其有效性,但因LSTM的超参数需要手动设置,选取合适的超参数较为困难,进而影响预测结果的准确性。文献[14]采用麻雀搜索算法对LSTM进行超参数寻

优,将寻优结果数值赋给LSTM,最后结合实例证明了其优越性。门控逻辑单元(gated recurrent unit, GRU)不仅保留了LSTM的优点,且减少了网络的可调参数的数量,提高了模型的性能^[15]。

研究发现,超参数的选择会直接影响预测模型的性能和预测效果。针对模型超参数选择困难问题,提出一种将鲸鱼优化算法与GRU相结合,同时融合注意力机制提高模型性能的方法。利用鲸鱼优化算法寻优GRU的隐含藏节点数、迭代次数和学习率,提高模型预测效果;融合注意力机制,可发现数据间隐藏的关联程度,得到特征信息的贡献比重,以此对数据进行加权处理,凸显影响大的特征值,进一步提升模型性能。

1 基本原理

1.1 GRU神经网络

RNN网络结构中存在循环单元,且允许隐藏单元间的内部连接,因此RNN在处理时间序列问题时有着良好效果,但其存在着梯度消失的缺陷,因此在RNN基础上进行改进的LSTM被提出。在RNN的隐藏层神经元中,LSTM新增记忆细胞结构存储历史信息,增加输入门、输出门和遗忘门来实现历史信息的控制和使用。LSTM可对长期依赖信息进行学习,同时消除了梯度消失的不良隐患,因此现已被广泛应用于时间序列预测。GRU在LSTM基础上进行改进,在保留LSTM性能的同时,还对网络结构进行了优化^[16]。

GRU网络结构中设有重置门和更新门,前者可实现忽略前一时刻信息功能,后者可将前一时刻信息传递给当前时刻。相对于LSTM,GRU工作所占内存减少,训练速度提高。其网络结构如图1所示。

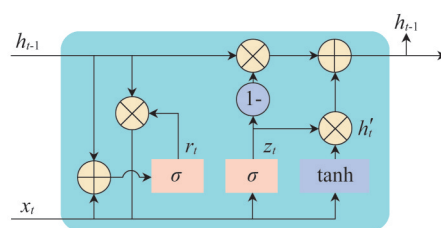


图1 GRU的网络结构

Fig.1 Network structure of GRU

GRU 原理所涉及计算过程为:

$$r_t = \sigma(W_r \cdot [h_{t-1}, x_t]) \quad (1)$$

$$z_t = \sigma(W_z \cdot [h_{t-1}, x_t]) \quad (2)$$

$$h'_t = \tanh(W_h \cdot [r_t h_{t-1}, x_t]) \quad (3)$$

$$h_t = (1 - z_t) h_{t-1} + z_t h'_t \quad (4)$$

$$\hat{y}_t = \sigma(W_o \cdot h_t) \quad (5)$$

式中: x_t 为 t 时刻的输入; r_t 和 z_t 分别为重置门和更新门在 t 时刻的输出; h_{t-1} 和 h_t 分别为 $t-1$ 和 t 时刻的隐藏状态; h'_t 为 t 时刻候选隐藏状态; σ 为 Sigmoid 函数; W_r 、 W_z 、 W_h 、 W_o 为不同变量的权重矩阵; $\hat{y}_t$ 为 t 时刻网络预测值。

1.2 注意力机制

注意力机制(attention mechanism, AM)是受人类大脑专注于某事件时会忽略其他事情启发而提出的一种机制。AM 聚焦于对目标关联程度更高的信息,从而提高解决问题的效率。将 AM 表示为一组函数,并计算其概率分布,进而得到影响目标关键因素的权重值。权重值的大小代表影响因素对目标关联程度的大小^[17]。

设 $z_1, z_2, \dots, z_p$ 为 AM 的输入序列, $h_1, h_2, \dots, h_p$ 为其相应隐藏层状态,则有:

$$e_i = v \tanh(W h_i + b) \quad (6)$$

$$a_i = \exp(e_i) / \sum_{j=1}^m e_j \quad (7)$$

$$C_t = \sum_{j=1}^m a_j h_j \quad (8)$$

式中: e_i 为网络在 t 时刻的概率分布; v 和 W 分别为求取网络权重过程中多层感知机的权重值; b 为偏置参数; a_i 、 a_j 分别为网络 t 时刻和 j 时刻权重; m 为输入向量维度; h_j 为 j 时刻隐藏层状态; C_t 为模型 t 时刻输出结果。AM 结构如图 2 所示,其中, softmax 表示归一化指数函数。

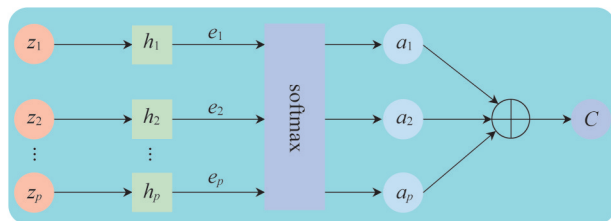


图2 注意力机制结构

Fig.2 Structure of the attention mechanism

AM 可将与原始输入特征相对的隐藏层状态进行自适应调整和求取,凸显与目标相关程度更高的特征,然后将加权处理的隐藏层状态导入进 GRU 网络,以进一步挖掘数据间潜藏的内部规律。

1.3 鲸鱼优化算法

座头鲸存在一种特殊捕猎方法,被称为气泡网觅食法。自然界中座头鲸常集体觅食,发现猎物后,座头鲸在猎物下方做螺旋状运动,同时吐出气泡形成气泡网,座头鲸以气泡网将猎物困住后,加速上升吞下猎物,该狩猎方法如图 3 所示。

鲸鱼优化算法是受上述狩猎行为启发提出的一种新型智能优化算法。其中,每只座头鲸的位置即为一个可行解^[18]。

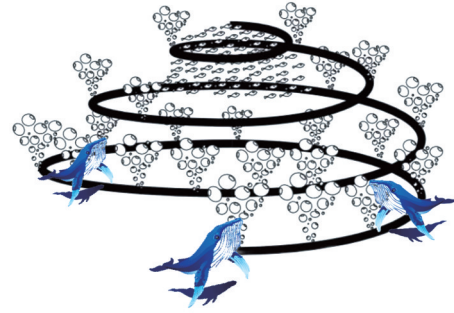


图3 座头鲸捕食行为

Fig.3 Prey behavior of humpback whales

1) 搜寻猎物。座头鲸的搜索范围为全局解空间,需要先搜寻猎物。狩猎时,座头鲸通过随机更新彼此间位置实现猎物搜寻,其数学表达式为:

$$D = |CX_{\text{rand}} - X| \quad (9)$$

$$X(T+1) = X_{\text{rand}} - A \cdot D \quad (10)$$

$$A = 2a \cdot r - a \quad (11)$$

$$C = 2r \quad (12)$$

式中: D 为捕食者与被捕食者间的距离; X 为位置向量; T 为迭代次数; $X(T+1)$ 为 $T+1$ 迭代时的位置向量; X_{rand} 为捕食者的随机位置向量; A 和 C 为两个系数向量; a 为一个在迭代过程中,从 2 线性降到 0 的参数; r 为一个 $[0, 1]$ 间的随机向量。

2) 包围捕食。座头鲸发现猎物后集体将其包围。将种群当前最优座头鲸位置作为捕获猎物的位置,其他座头鲸向其靠拢,该行为的数学表达式为:

$$D = |C \cdot X^*(T) - X(T)| \quad (13)$$

$$\mathbf{X}(T+1) = \mathbf{X}^*(T) - \mathbf{A} \cdot \mathbf{D} \quad (14)$$

式中: $\mathbf{X}(T)$ 和 $\mathbf{X}^*(T)$ 分别为座头鲸第 T 次迭代时的位置向量和最优解位置向量。

3) 气泡网捕食。发现猎物后, 座头鲸先以螺旋状气泡对其位置进行标记, 然后逐渐向该位置靠拢, 数学表达式为:

$$\mathbf{X}(T+1) = \mathbf{D}' \cdot e^{dl} \cdot \cos(2\pi l) + \mathbf{X}^*(T) \quad (15)$$

式中: $\mathbf{D}'$ 为第 T 次迭代中, 座头鲸当前个体与最优个体间的距离; d 为影响对数螺线形状的常数; l 为 $[-1, 1]$ 间的随机数。

座头鲸捕食机制有包围捕食和气泡网捕食两种, 设定座头鲸在两者间各有一半的选择概率, 则其数学表达式为:

$$\mathbf{X}(T+1) = \begin{cases} \mathbf{X}^*(T) - \mathbf{A} \cdot \mathbf{D}, & P < 0.5 \\ \mathbf{D}' \cdot e^{dl} \cdot \cos(2\pi l) + \mathbf{X}^*(T), & P \geq 0.5 \end{cases} \quad (16)$$

式中: P 为选择概率, 是 $[0, 1]$ 间的随机数。

2 基于WOA-AM-GRU的短期负荷预测模型

电力负荷数据具有复杂性、非线性, 同时又具有一定规律性。其既包括历史功率信息, 又蕴藏着历史负荷与未来负荷信息之间的映射关系。为深入挖掘影响负荷的复杂特征信息, 并以此为依据实现高精度负荷预测, 提出基于鲸鱼优化算法-注意力机制-门控逻辑单元 (whale optimization algorithm-attention mechanism-gated recurrent unit, WOA-AM-GRU) 的短期电力负荷预测模型, 结构如图4所示。

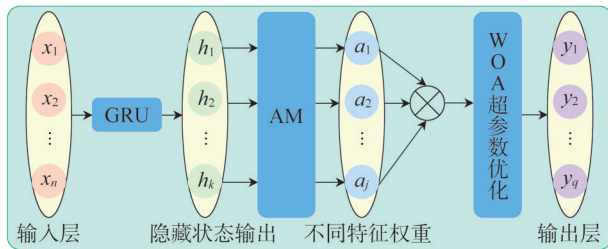


图4 WOA-AM-GRU模型结构

Fig.4 WOA-AM-GRU model structure diagram

将历史负荷数据集 $\mathbf{X} = [x_1, x_2, \dots, x_{m_1}]^T$ 作为预测模型输入层, 利用GRU网络挖掘出数据中的隐藏特征信息, 得到隐藏状态行向量 $\mathbf{H} = [h_1, h_2, \dots, h_k]$ 。AM自动根据所得隐藏状态的重要程度进行赋值, 凸

显对电力负荷影响大的特征。将不同特征结合对应的权重进行加权求和, 模型进行计算后, 得到输出层 $\mathbf{Y} = [y_1, y_2, \dots, y_q]$, 即模型预测结果。

然而, 因AM-GRU模型的超参数是根据经验设定的, 很难达到理想的预测效果。为解决模型超参数选择困难的问题, 同时进一步提高模型预测效果。在最小化AM-GRU模型基础上, 将均方差作为算法适应度函数, 即为

$$\begin{cases} F = \frac{1}{2} (\delta_{\text{MSE}(\text{train})} + \delta_{\text{MSE}(\text{test})}) \\ \delta_{\text{MSE}(\text{train})} = \frac{1}{n} (y_{\text{train}} - \hat{y}_{\text{train}})^2 \\ \delta_{\text{MSE}(\text{test})} = \frac{1}{n} (y_{\text{test}} - \hat{y}_{\text{test}})^2 \end{cases} \quad (17)$$

式中: F 为算法适应度函数; $\delta_{\text{MSE}(\text{train})}$ 和 $\delta_{\text{MSE}(\text{test})}$ 分别为训练集和测试集的均方差; y_{train} 和 y_{test} 分别为训练集和测试集的实际值; $\hat{y}_{\text{train}}$ 和 $\hat{y}_{\text{test}}$ 分别为训练集和测试集的预测值。

利用WOA对AM-GRU模型中的学习率、迭代次数和两个隐藏层节点数进行参数寻优, 算法寻优步骤如图5所示。

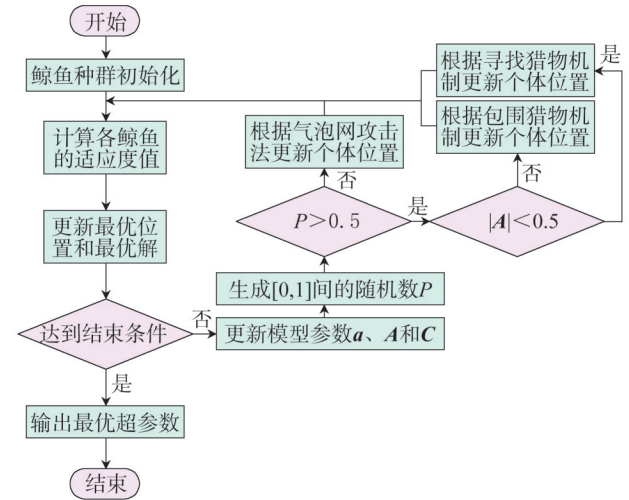


图5 鲸鱼优化算法流程

Fig.5 Flowchart of whale optimization algorithm

3 算例分析

选取2014年的负荷历史数据和与之相对应的气象数据进行试验, 气象数据包括最低温度、最高温度、平均温度、相对湿度和降雨量。数据采样间隔为15 min, 每日有96个采样点。

3.1 数据处理

用于负荷预测试验的数据量通常较大,影响算法的运行速度。将数据做归一化处理,算法的收敛速率得到提升^[19]。

1) 负荷值预处理。负荷值处理方式

$$x' = \lg(x) \quad (18)$$

式中: x 为原始数值; x' 为归一化后的结果。

2) 温度值预处理。温度值处理方式

$$T' = \frac{T - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} \quad (19)$$

式中: $T_{\min}$ 、 $T_{\max}$ 分别为最低、最高温度; T 、 T' 分别为归一化前和归一化后的温度。

3) 日类型预处理。日类型处理方式如表1所示。

表1 日类型处理

Table 1 Day type processing

日类型	归一化
周一至周五	0.8
周六	0.3
周日	0.2
节假日	0.1

4) 湿度值预处理。将湿度值归一化至 $[0, 1]$ 。将以上数据先转化至 $[0, 1]$,使其具备一致的量纲,以便于模型的训练。之后再预测结果进行反归一化,获得含有量纲的数据。

3.2 评价指标

为评价模型预测效果,需要引入评价指标。负荷预测试验过程共用到四个评价指标:平均绝对百分比误差(mean absolute percentage error, MAPE) δ_{MAPE} 、均方根误差(root mean square error, RMSE) δ_{RMSE} 、 R^2 (R-square, R^2)决定系数 δ_{R^2} 和平均绝对误差(mean absolute error, MAE) δ_{MAE} 。其表达式分别如下:

$$\delta_{\text{MAPE}} = \frac{100}{q} \sum_{i=1}^q \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} \quad (20)$$

$$\delta_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{q} \sum_{i=1}^q (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (21)$$

$$\delta_{R^2} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^q (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^q (y_i - \bar{y})^2} \quad (22)$$

$$\delta_{\text{MAE}} = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q |y_i - \hat{y}_i| \quad (23)$$

式中: q 为待预测的数据个数; y 为实际值; $\bar{y}$ 为实际值的平均值; $\hat{y}$ 为预测值。

上述指标中 δ_{MAPE} 、 δ_{RMSE} 和 δ_{MAE} 的数值越接近0越好,而 δ_{R^2} 则越接近1越好。

3.3 仿真分析

分别构建基于BP、LSTM、GRU、AM-GRU和WOA-AM-GRU的短期负荷预测模型进行对比试验分析。将数据前364天的负荷数据用于各模型训练,最后一天数据用作各模型输出测试。重复3次预测试验,计算其平均值,并以此绘制模型预测曲线图,如图6所示。

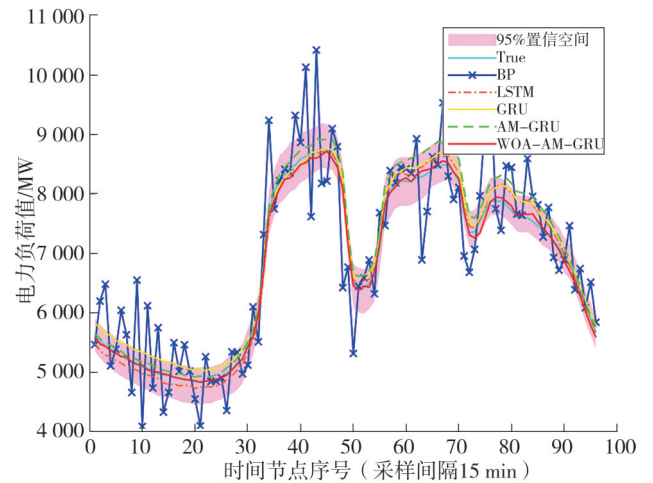


图6 模型负荷预测曲线对比

Fig.6 Comparison of modeled load forecast curves

从图6能明显发现,单BP模型的预测曲线偏离蓝色的真实负荷数据曲线较大,且波动性较强,所以其拟合效果最差。其余4个模型中,除了AM-GRU模型在第75~85时间节点区间内的预测结果略超出95%置信空间,其他3个模型的预测曲线基本全日都在95%置信空间内,其中以WOA-AM-GRU模型的预测曲线最接近真实值。

根据GRU、AM-GRU和WOA-AM-GRU3种短期电力负荷预测模型的负荷预测结果绘制相对误差

曲线,如图7所示。

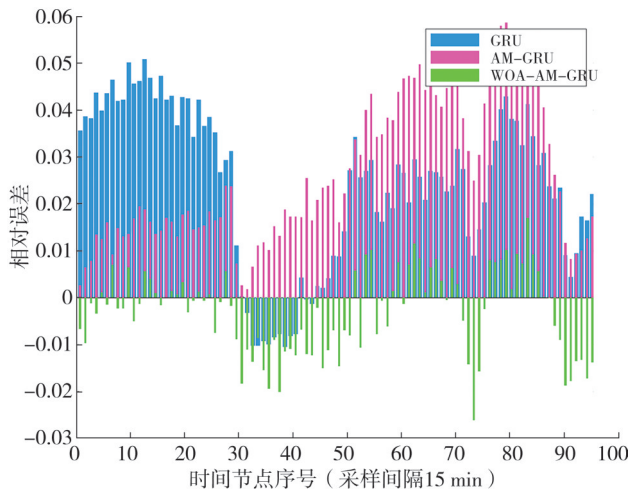


图7 模型负荷预测结果的相对误差

Fig.7 Relative error in modeled load forecast results

由图7可知,代表WOA-AM-GRU预测模型输出预测结果相对误差的绿色柱状图面积最小,即WOA-AM-GRU预测模型短期电力负荷预测效果相对最好。而分别代表GRU和AM-GRU预测模型输出预测结果相对误差的柱状图面积都很大,不能通过图像明显判断两者预测效果的好坏,需要进一步计算各自的评价指标来进行判断。

进行3次试验,计算出每次试验中各短期电力负荷预测模型评价指标的平均值,计算结果如表2所示。

表2 模型评价指标平均值
Table 2 Average of model evaluation indicators

模型	δ_{MAPE}	δ_{MASE}	δ_{MAE}	δ_{R^2}
BP	1.208 0	0.340 9	0.257 5	0.763 0
LSTM	0.264 8	0.070 9	0.062 1	0.989 7
GRU	0.269 7	0.093 0	0.083 8	0.982 3
AM-GRU	0.304 5	0.119 3	0.098 0	0.971 0
WOA-AM-GRU	0.202 2	0.035 2	0.027 4	0.997 5

通过表2可知,对于由各模型负荷预测输出结果计算得出的 δ_{R^2} ,从小到大依次为BP模型、LSTM模型、GRU模型、AM-GRU模型和WOA-AM-GRU模型;而对于 δ_{MAPE} 、 δ_{MAE} 和 δ_{MASE} 从小到大排序则与之相

反。其中,单BP模型的 δ_{R^2} 在5种模型中最小,且其余指标数值最大,由此证明在进行短期电力负荷预测时,单BP模型的预测效果最差。对于WOA-AM-GRU模型,其 δ_{R^2} 在以上模型中的数值最大,且 δ_{MAPE} 、 δ_{MAE} 和 δ_{MASE} 3个指标数值最小。由此证明,在进行短期电力负荷预测时,其预测结果相比其他4个模型更贴近负荷真实数据,即WOA-AM-GRU模型在进行短期电力负荷预测时具有更好的预测效果。

4 结束语

基于WOA-AM-GRU构建短期电力负荷预测模型,将电力负荷历史数据及气象因素作为模型训练集,通过GRU学习数据内部动态特征的变化规律。将模型融合注意力机制,根据隐藏信息的重要程度进行加权处理,凸显数据中的关键信息,忽略不重要信息,提高模型的运行效率。使用WOA对AM-GRU进行超参数寻优,解决了模型超参数选择困难的问题,且明显降低了模型的预测误差,进一步提高了模型预测精度。结合实例将WOA-AM-GRU模型与其他4种预测模型进行对比试验,证明了WOA-AM-GRU模型在短期电力负荷预测上的优越性。

参考文献

- [1] 朱耿,王波,贺旭,等.基于关键特征优化的电力系统短期负荷预测方法[J].浙江电力,2023,42(8):46-53.
ZHU Geng, WANG Bo, HE Xu, et al. Short-term load forecasting method for power system based on key feature optimization [J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(8): 46-53.
- [2] 张大海,孙锴,和敬涵.基于相似日与多模型融合的短期负荷预测[J].电网技术,2023,47(5):1961-1970.
ZHANG Dahai, SUN Kai, HE Jinghan. Short-term load forecasting based on similar day and multi-model fusion [J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 1961-1970.
- [3] 徐先峰,赵依,刘状壮,等.用于短期电力负荷预测的日负荷特性分类及特征集重构策略[J].电网技术,2022,46(4):1548-1556.
XU Xianfeng, ZHAO Yi, LIU Zhuangzhuang, et al. Daily load characteristic classification and feature set reconstruction strategy for short-term power load forecasting [J]. Power System Technology, 2022, 46(4): 1548-1556.
- [4] 侯颖君,黄民翔.ANN负荷预测数据样本集产生方法的研究[J].机电工程,2007,24(9):105-108.
HOU Yingjun, HUANG Minxiang. Study on the approach of forming data set for ANN in load forecasting [J]. Mechanical &

- Electrical Engineering Magazine, 2007, 24(9): 105-108.
- [5] 赵佩. 基于SVM与智能算法的智能电网电力负荷预测研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2021.
- [6] 白芬玉. 基于RNN神经网络的短期电力负荷预测模型研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2019.
- [7] 杨洋, 谷震浩. 基于XGBOOST-DNN的中期电力负荷预测[J]. 计算机系统应用, 2021, 30(9): 186-191.
YANG Yang, GU Zhenhao. Mid-term power load forecasting based on XGBoost-DNN[J]. Computer Systems & Applications, 2021, 30(9): 186-191.
- [8] 刘小超. 基于改进CNN-SVM的短期电力负荷预测[D]. 大庆: 东北石油大学, 2023.
- [9] 石天, 梅飞, 陆继翔, 等. 基于PSR和DBN的超短期母线净负荷预测[J]. 电力工程技术, 2020, 39(1): 178-183.
SHI Tian, MEI Fei, LU Jixiang, et al. Ultra-short-term bus net load forecasting based on phase space reconstruction and deep belief network[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(1): 178-183.
- [10] HAN M C, TAN A G, ZHONG J W. Application of particle swarm optimization combined with long and short-term memory networks for short-term load forecasting[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2203(1): 012047.
- [11] 苏颜, 张珍, 林庆达, 等. 基于BP神经网络算法的短期电力负荷预测研究[J]. 电子设计工程, 2022, 30(12): 167-170.
SU Yan, ZHANG Zhen, LIN Qingda, et al. Research on short-term power load forecasting based on BP neural network algorithm[J]. Electronic Design Engineering, 2022, 30(12): 167-170.
- [12] 范国松, 齐正. PSO-BP神经网络的电力负荷预测研究[J]. 微型电脑应用, 2022, 38(10): 130-133.
FAN Guosong, QI Zheng. Research on power load forecasting based on PSO-BP neural network[J]. Microcomputer Applications, 2022, 38(10): 130-133.
- [13] 吴岳鹏. 基于LSTM模型的电力负荷预测[J]. 自动化应用, 2023(10): 76-78.
WU Yuepeng. Power load forecasting based on LSTM model[J]. Automation Application, 2023(10): 76-78.
- [14] 高犁. 基于SSA-LSTM模型的短期电力负荷预测研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2022.
- [15] 刘林虎. 基于深度神经网络的短期电力负荷预测[D]. 大庆: 东北石油大学, 2023.
- [16] 王悦如, 王盛宇. 基于GRU神经网络的电力负荷预测[J]. 电工技术, 2022(10): 123-125.
WANG Yueru, WANG Shengyu. Power load forecasting based on GRU neural network [J]. Electric Engineering, 2022 (10): 123-125.
- [17] 韩明冲. 基于ISSA-AM-BiLSTM的短期电力负荷预测模型的研究[D]. 恩施: 湖北民族大学, 2023.
- [18] 李鹏, 常思婕. 鲸鱼优化算法下气体泄漏源波达方向估计法[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(3): 19-27.
LI Peng, CHANG Sijie. DOA method of gas leakage source based on WOA[J]. China Safety Science Journal, 2021, 31(3): 19-27.
- [19] 刘文翰. 基于机器学习的电力负荷预测方法与智慧校园应用研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2020.
- [20] 殷豪, 丁伟锋, 陈顺, 等. 基于长短时记忆网络-纵横交叉算法的含高比例新能源电力市场日前电价预测[J]. 电网技术, 2022, 46(2): 472-480.
YIN Hao, DING Weifeng, CHEN Shun, et al. Day-ahead electricity price forecasting of electricity market with high proportion of new energy based on LSTM-CSO model[J]. Power System Technology, 2022, 46(2): 472-480.

收稿日期: 2023-11-09

修回日期: 2024-02-29

作者简介:

韩明冲(1997), 通信作者(1031406416@qq.com), 男, 硕士, 主要研究方向为电力系统及其自动化;

韩杰(1995), 女, 硕士, 主要研究方向为智能测控与大数据处理;

姜超(1980), 女, 工程师, 主要研究方向为电力系统及其自动化;

苏本勇(1995), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统及其自动化;

韩冰(1968), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统及其自动化。

(责任编辑 郑天茹)

计及资源差异特性的分布式光伏与储能聚合运营优化方法

关逸飞*, 王玥娇, 刘奕元, 孙树敏, 杨 颂

(国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250003)

摘要: 分布式光伏高渗透率接入导致电网容量波动, 给电网安全稳定运行及供电带来巨大压力。针对上述问题, 提出计及资源差异特性的分布式光伏与储能聚合运营优化方法。在构建分布式光伏与储能聚合运营优化系统模型的基础上, 考虑储能资源及其消纳模式的差异性, 将分布式光伏与储能聚合优化问题转化为最小化联合运营成本问题。针对光伏出力及储能充放电功率不确定性、优化约束复杂、可行域分裂等问题, 提出分布式光伏与储能聚合运营自适应演进策略, 引入自适应缩放参数控制差分矢量缩放, 提高算法性能, 提升配电网光伏消纳能力, 改善电网运行状态。仿真结果表明, 相较于单一储能运营模式, 所提算法的聚合运营商收益分别提升45.66%和23.03%。

关键词: 分布式光伏; 储能; 聚合运营; 资源差异性; 自适应演进

中图分类号: TM615

文献标志码: A

文章编号: 1007-9904(2024)12-0034-10

Distributed Photovoltaic and Energy Storage Aggregation Operation Optimization Method for Resource Differences

GUAN Yifei*, WANG Yuejiao, LIU Yiyuan, SUN Shumin, YANG Song

(State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250003, China)

Abstract: The high penetration rate of distributed photovoltaics leads to fluctuations in power grid capacity, which brings enormous pressure to the safe and stable operation and power supply of the power grid. To address the above issues, a distributed photovoltaic and energy storage aggregation operation optimization method for resource differences is proposed. On the basis of constructing the distributed photovoltaic and energy storage aggregation operation optimization system model, the differences in energy storage resources and their consumption modes are considered. The optimization problem of distributed photovoltaic and energy storage aggregation is transformed into a problem of minimizing joint operation costs. In response to the uncertainty of photovoltaic output, energy storage charging and discharging power, as well as the complexity of optimization constraints and feasible domain splitting, a distributed photovoltaic and energy storage aggregation operation adaptive evolution strategy is proposed. The adaptive scaling parameter is introduced to control differential vector scaling, which can improve the algorithm performance, enhance the photovoltaic absorption capacity of the distribution network, and make the operation status of the power grid better. The simulation results show that, compared to the single energy storage operation mode, the proposed algorithm improves the overall optimization performance by 45.66% and 23.03%.

Keywords: distributed photovoltaic; energy storage; aggregation operation; resource differentiation; adaptive evolution

0 引言

“双碳”目标是我国基于推动构建人类命运共同体的责任担当和实现可持续发展的内在要求而做出的重大战略决策, 以光伏发电等新能源为主体的新

基金项目: 国网山东省电力公司科技项目“面向分布式光伏消纳和主动支撑的储能运行和运营技术研究与应用”(520626230017)。

Science and Technology Project of State Grid Shandong Electric Power Company "Research and Application of Energy Storage Operation and Operation Technology for Distributed Photovoltaic Consumption and Active Support"(520626230017)。

型电力系统更是未来清洁低碳的重要组成部分^[1-2]。然而, 光伏出力存在波动性和随机性, 其高渗透率接入易造成电网容量波动, 增加供电中断风险^[3-4]。因此, 需要对电网光伏消纳能力提升策略进行研究, 改善电网运行状态, 保障高比例光伏接入背景下电网运行的稳定性。

当前国内外相关研究团队在分布式光伏消纳领域已积累了一定的研究基础。文献[5]提出以弃风弃光最小化为目标的主动配电网柔性开关和网络重

构的协调优化方法,有效提升配电网对分布式光伏的消纳能力。文献[6]提出一种电压降控制方法,考虑有源变压器运行与光伏逆变器无功功率吸收之间的潜在干扰,在高光伏发电周期实现对有源变压器的有效控制,同时增加电网的光伏容量。文献[7]构建城市电网转供双层优化模型,提出网络拓扑风险分析新方法,解决电网局部消纳与阻塞问题,提升光伏消纳率。然而,在实际电网规划与运行过程中,光伏消纳涉及差异化资源优化配置与调度,上述文献仅从配电网单一角度进行优化,光伏消纳能力提升空间有限。

储能作为可调负荷接入电网,能够提供快速响应的调节能力,根据电网功率储存和释放电能^[8-9]。光储协同可实现分布式光伏与储能聚合运营优化,将光伏产量与储能容量相匹配,根据光伏运行状态和负荷需求对储能进行自适应充放电控制。光储聚合运营可平抑电网负荷曲线,显著提升电网消纳能力。文献[10]针对低压配电网光伏消纳场景,提出一种面向高比例光伏消纳的低压交直流混合配电网时-空协调优化方法,在分析电压源型换流器(voltage source converter, VSC)和储能在空间和时间层面的功率转移特性的基础上,有效改善光伏并网导致的电压问题和功率倒送问题,提升低压配电网的光伏消纳能力。文献[11]考虑园区光储及负荷侧的功率约束,提出了平抑波动、能量时移、调频市场等光储协同优化策略,最大化运营商收益,减小园区内用户的支出,并提高光伏消纳率。文献[12]面向光伏接入配电网的消纳问题,计及光伏出力的不确定性和时序相关性,提出一种光储协同分布鲁棒优化配置方法,提高光伏消纳率。然而,现有光储协同优化方法仍面临以下挑战。

首先,在实际电网规划和运行过程中,光伏消纳与电力系统综合经济效益直接相关,因此,构建分布式光伏与储能聚合运营模型,最小化光伏消纳运营成本,成为当前所需要解决的问题。其次,不同类型储能消纳模式存在差异,考虑储能资源参与光伏消纳时的差异化运营成本与功率约束,优化额定容量和功率,成为亟须解决的另一问题。最后,分布式光伏与储能聚合运营优化需要同时考虑光伏出力、储能充放电功率等不确定因素,导致问题复杂度随储能规模增加而指数级增长,传统凸优化方法难以进行求解。

随着智能计算的发展,启发式方法受到广泛关注,并已具体应用于工程优化,特别是在高度非线性和复杂问题中^[13-15]。启发式方法的突出优点是简单、有效、易于实现,且不依赖于所研究系统的数学模型的特征,被广泛应用于光伏消纳领域问题的求解。文献[16]同时使用确定性和启发式算法对分布式光伏进行位置、尺寸等优化,确保光伏系统可靠消纳,研究表明启发式算法更为优越,可以快速发现分布式光伏系统的最优解。文献[17]考虑柔性负荷需求侧响应下配电网光伏消纳评估方法和光储充配置的配电网联合优化策略,通过改进粒子群算法进行模型的求解寻优,在确保光伏消纳水平的同时,提出配电网综合成本最优的光储充配置和运行方案。但是,以上研究工作的实验参数过于固定,没有考虑差异化储能消纳模式对电网运行状态产生的影响。

基于上述问题,文中提出计及资源差异特性的分布式光伏与储能聚合运营优化方法。首先,建立分布式光伏与储能聚合运营优化系统及模型,并提出分布式光伏出力、储能系统(energy storage system, ES)充放电、柔性ES充电等模型。其次,考虑储能资源差异特性,构建分布式光伏与储能聚合运营成本模型,并将优化目标设为最小化联合运营成本。最后,提出分布式光伏与储能聚合运营自适应演进策略,充分考虑出力、容量、荷电状态、功率等约束条件,使算法跳出局部最优,求解最优运营决策。算例分析验证了所提方法在收敛效率方面的优越性能。文中贡献归纳总结如下:

1)构建分布式光伏与储能聚合运营优化系统,考虑储能资源及其消纳模式的差异性,将储能划分为ES和电动汽车(electric vehicle, EV)两种类型,通过充放电时间规划与行为引导,精细化整合储能资源,提高系统运营效率。

2)构建聚合运营优化模型,引入概率密度函数与波动区间,量化光伏出力、用户行为和储能充放电功率不确定性,制定激励电价,引导储能聚合商的购电行为,构建针对光伏消纳与储能成本回收的聚合运营优化模型。

3)针对优化变量可行域分裂导致算法易陷入局部最优问题,提出基于差分进化的演进策略,引入自适应缩放参数,控制差分矢量缩放,平衡全局与局部搜索;引入基于个体记忆的种群进化策略,提高算法

收敛速度,提高系统整体聚合运营收益。

1 光伏与储能聚合运营优化系统

所提光伏与储能聚合运营优化系统如图1所示,主要包括电网、控制中心、分布式光伏、光伏直流/交流(direct current/alternating current, DC/AC)逆变器、储能聚合商。储能聚合商由ES、柔性储能EV和充电桩组成,其中,ES主要包括蓄电池组和超级电容。另外,储能聚合商通过储能双向AC/DC变流器连接在直流母线上,实现与负荷的能量双向流动。

由于分布式光伏大规模接入配电网,其出力的不确定性给配电网带来不小冲击,存在消纳不足、弃光严重等问题。在配电网中配置合理容量的储能与负荷,是促进分布式光伏就地消纳、提高光伏系统效能的有效方式^[18-19]。在优化系统中,存在EV与ES两种差异化消纳模式,ES储能效率高、响应时间快,能够满足大部分光伏的消纳,但存在颗粒度大、无法进行用户需求响应等问题;EV更加灵活,能够作为ES的补充,帮助电网应对突发事件,并进行需求响应,但资源分散,难以形成规模储能平抑电网波动。电网差异化储能消纳模式可使各资源之间互动密切,综合衡量分布式光伏运营方式及储能聚合容量,为提高电网实际运行适应能力提供重要依据。

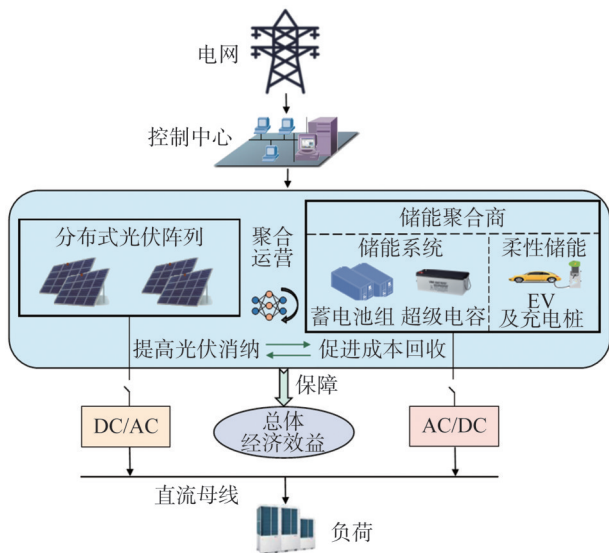


图1 光伏与储能聚合运营优化系统

Fig.1 Aggregation operation optimization system of photovoltaic and energy storage

2 光伏与储能聚合运营优化模型

将分布式光伏与储能聚合运营优化时间划分为 T 个等长的时间间隔,时隙长度为 τ ,即集合 $\mathcal{T}=\{1,2,\dots,T\}$ 。假设所有的模型参数在单个时隙内是保持不变的,在时隙间动态变化。所考虑分布式光伏与储能聚合运营优化场景包括 I 个分布式光伏、 M 个ES、 N 个配套的EV及充电桩,其集合分别表示为 $\mathcal{I}=\{1,2,\dots,I\}$ 、 $\mathcal{M}=\{1,2,\dots,M\}$ 、 $\mathcal{N}=\{1,2,\dots,N\}$ 。

2.1 分布式光伏出力模型

采用基于Beta分布的光伏外特性概率模型来描述分布式光伏发电过程。因此,光伏输出功率 $P_{i,out}^{PV}(t)$ 的概率密度函数为

$$\begin{cases} f[r_i(t)] = \frac{1}{B(\alpha, \beta)} [r_i(t)]^{\alpha-1} [1-r_i(t)]^{\beta-1} \\ r_i(t) = \frac{\bar{P}_i^{PV}(t) - P_{i,min}}{P_{i,max} - P_{i,min}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $B(\alpha, \beta) = \int_0^1 x^{\alpha-1} (1-x)^{\beta-1} dx$; α 和 β 为Beta分布的形状参数; $\bar{P}_i^{PV}(t)$ 、 $P_{i,max}$ 和 $P_{i,min}$ 分别为第 i 个分布式光伏的平均出力值及上下限。

2.2 ES充放电模型

在配电网中,储能聚合商接收控制中心信息,并对ES充放电进行合理规划,能够平滑新能源出力,提高光伏消纳率。储能资源差异特性体现在ES与柔性储能充放电能力和控制方式上的不同。普通ES在响应电网调度时的荷电状态可表示为

$$S_{OC,m}^{ES}(t) = \begin{cases} S_{OC,m}^{ES}(t-1) + \frac{\tau_m^{cES}(t)}{\eta_m^{cES}} P_m^{cES}(t), \text{充电} \\ S_{OC,m}^{ES}(t-1) - \frac{\tau_m^{dES}(t)}{\eta_m^{dES}} P_m^{dES}(t), \text{放电} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $P_m^{cES}(t)$ 、 $P_m^{dES}(t)$ 分别为第 m 个ES的充放电功率,受分布式光伏出力、用户需求、设备状态等因素影响, $P_m^{cES}(t)$ 、 $P_m^{dES}(t)$ 在一定区间内呈现波动性特点,其波动区间上限分别为 ρ_m^{cES} 、 ρ_m^{dES} ,下限为0; η_m^{cES} 和 η_m^{dES} 分别为第 m 个ES的充放电效率; $\tau_m^{cES}(t)$ 、 $\tau_m^{dES}(t)$ 分别为第 m 个储能系统在优化时间内的充放电时间。

为防止电池过充或过空,ES累积充放电时间小于于时隙长度 τ ,ES充放电时长约束为

$$\tau_m^{cES}(t) + \tau_m^{dES}(t) \leq \tau \quad (3)$$

2.3 EV充电模型

1) 无序充电。

“双碳”目标下, EV 渗透率不断提高, 其可以作为一种特殊的柔性 ES 以实现分布式光伏的就近消纳。EV 无序充电为满足其出行时长而进行, 主要涉及日行驶里程、充电时长和起始充电时间三方面。对 EV 行驶数据进行拟合, 得到 EV 行驶里程的概率密度函数为

$$f_n^s(x) = \frac{1}{x\sigma_n^s\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln x - \mu_n^s)^2}{2(\sigma_n^s)^2}\right] \quad (4)$$

式中: μ_n^s 、 σ_n^s 分别为第 n 辆 EV 行驶里程概率密度函数的期望和标准差, 根据文献[20]可知, 其值分别为 8.92 和 3.24。

通过式(4)可以得出日行驶里程 S_n 。

定义 EV 起始充电时间为其返程时间 $t_{0,n}$, 服从正态分布 $t_{0,n} \sim N(\mu_n^{\text{ch}}, (\sigma_n^{\text{ch}})^2)$, 并假设充电时间范围为 0~24 h, 其概率密度函数为

$$f_n^{\text{ch}}(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sigma_n^{\text{ch}}\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x - \mu_n^{\text{ch}})^2}{2(\sigma_n^{\text{ch}})^2}\right], & \mu_n^{\text{ch}} - 12 \leq x \\ \frac{1}{\sigma_n^{\text{ch}}\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x - (24 - \mu_n^{\text{ch}}))^2}{2(\sigma_n^{\text{ch}})^2}\right], & x < \mu_n^{\text{ch}} - 12 \end{cases} \quad (5)$$

式中: μ_n^{ch} 、 σ_n^{ch} 分别为第 n 辆 EV 起始充电时间概率密度函数的期望和标准差, 根据文献[20]可知, 其值分别为 17.47 和 3.41。

EV 的无序充电, 即根据用户的个人习惯及突发情况, 在不采取任何管理措施的情况下进行充电的充电模式。无序充放电取决于 EV 自身特性, 属于 EV 正常行驶过程, 不参与优化目标的构建, 因此无序充放电过程与时隙长度 τ 无关, 但却是必须考虑到的一种 EV 充放电模型。假设每辆 EV 均为私家车, 具有较规律的出行模式, 电池容量均相同, EV 无序充电所需的日充电时长 $\tau_{n,1}^{\text{cEV}}$ 的计算公式为

$$\tau_{n,1}^{\text{cEV}} = \frac{S_n W_n}{100 P_n^{\text{cEV}}(t) \eta_n^{\text{cEV}}} \quad (6)$$

式中: S_n 为第 n 辆 EV 的行驶里程; W_n 为第 n 辆 EV 行驶百公里的耗电量; $P_n^{\text{cEV}}(t)$ 为第 n 辆 EV 充电功率, 其波动区间为 $[0, \rho_n^{\text{cEV}}]$, 其中 P_n^{cEV} 为波动区间上

限; η_n^{cEV} 为第 n 辆 EV 充电效率。

2) 有序充电。

有序充电是指通过制定激励电价引导储能聚合商的购电行为。假设峰谷电价政策不影响 EV 的日出行距离, 当电价处于谷电价时, 储能聚合商有意愿进行购电进行 EV 充电; 峰电价时, 储能聚合商也会期望收到电网调度进行 EV 放电。在实际场景中, 有序充电仅发生在每天的固定时段, 因此仅有已经满足无序充电时长要求的 EV 才会参与有序充放电过程, EV 有序充放电时长约束为

$$\begin{cases} (t-1)\tau - t_{0,n} \geq \tau_{n,1}^{\text{cEV}} \\ \tau_{n,2}^{\text{cEV}}(t) + \tau_{n,2}^{\text{dEV}}(t) \leq \tau \end{cases} \quad (7)$$

式中: $\tau_{n,2}^{\text{cEV}}(t)$ 为峰谷电价下第 n 辆 EV 充电时长; $\tau_{n,2}^{\text{dEV}}(t)$ 为峰谷电价下第 n 辆 EV 放电时长。

则 EV 有序充电模型可表示为

$$\tau_{n,2}^{\text{cEV}}(t) \leq \begin{cases} T_n^{\text{cEV}}, T_n^{\text{cEV}} \in [0, \Delta t_g] \\ \Delta t_g, T_n^{\text{cEV}} \geq \Delta t_g \end{cases} \quad (8)$$

式中: Δt_g 为单个时隙内谷电价持续时长; T_n^{cEV} 为第 n 辆 EV 充电所需时长。

EV 有序放电模型可表示为

$$\tau_{n,2}^{\text{dEV}}(t) \leq \begin{cases} T_n^{\text{dEV}}, T_n^{\text{dEV}} \in [0, \Delta t_f] \\ \Delta t_f, T_n^{\text{dEV}} \geq \Delta t_f \end{cases} \quad (9)$$

式中: Δt_f 为单个时隙内峰电价持续时长; T_n^{dEV} 为第 n 辆 EV 放电所需时长。同样, 电动车累积充放电时长小于单个时隙长度。

2.4 聚合运营优化模型构建

光伏接入场景下, 储能可通过有序的充放电控制实现可再生能源的就地消纳, 减少弃光现象发生, 并通过与电网之间的电能交易获取收益。因此本文进行分布式光伏与储能聚合运营优化研究, 将场景内 I 个分布式光伏, 以及两种类型储能 (M 个 ES 与 N 辆 EV) 进行聚合。

考虑 EV 与 ES 充放电模式差异性, 本文将优化问题建模为充放电功率与荷电状态约束下, 最大化储能聚合商运营收益的问题, 即最大化售电盈利 $C_B(t)$ 与从电网购电成本 $C_G(t)$ 加权差。

$$C_B(t) = \left[\sum_{n=1}^N 100 P_n^{\text{dEV}}(t) \eta_n^{\text{dEV}} (\tau_{n,1}^{\text{dEV}}(t) + \tau_{n,2}^{\text{dEV}}(t)) + \sum_{m=1}^M \eta_m^{\text{dES}} P_m^{\text{dES}}(t) \tau_m^{\text{dES}}(t) \right] p_G(t) \quad (10)$$

$$C_G(t) = \max \left\{ \sum_{n=1}^N 100P_n^{\text{cEV}}(t)\eta_n^{\text{cEV}}(\tau_{n,1}^{\text{cEV}}(t) + \tau_{n,2}^{\text{cEV}}(t)) + \sum_{m=1}^M \eta_m^{\text{cES}} P_m^{\text{cES}}(t)\tau_m^{\text{cES}}(t) - \int_{t=0}^{\tau} P_{i,\text{out}}^{\text{PV}}(t)dt \right\}, 0 \Big\} p_G(t) \quad (11)$$

式中: $p_G(t)$ 为电价; $P_n^{\text{dEV}}(t)$ 为第 n 辆 EV 放电功率; η_n^{dEV} 为第 n 辆 EV 放电效率; $\tau_{n,1}^{\text{cEV}}(t)$ 、 $\tau_{n,2}^{\text{cEV}}(t)$ 分别为第 n 辆 EV 无序充放电时间; $P_{i,\text{out}}^{\text{PV}}(t)$ 为第 i 个分布式光伏出力功率。此外,光伏发电视为一种无需成本的购电行为,因此在光伏发电时间段内,ES 会优先消纳光伏产能。最终的优化问题为

$$\max_{\{\tau_m^{\text{cES}}(t), \tau_m^{\text{dES}}(t), \tau_{n,1}^{\text{cEV}}(t), \tau_{n,2}^{\text{cEV}}(t)\}} C_B(t) - C_G(t) \quad (12)$$

$$\text{s.t. } P_{n,\min}^{\text{cEV}} \leq P_n^{\text{cEV}}(t) \leq P_{n,\max}^{\text{cEV}}, \forall n \in \mathcal{N} \quad (13)$$

$$P_{n,\min}^{\text{dEV}} \leq P_n^{\text{dEV}}(t) \leq P_{n,\max}^{\text{dEV}}, \forall n \in \mathcal{N} \quad (14)$$

$$S_{\text{OC},n,\min}^{\text{EV}} \leq S_{\text{OC},n}^{\text{EV}}(t) \leq S_{\text{OC},n,\max}^{\text{EV}}, \forall n \in \mathcal{N} \quad (15)$$

$$P_{m,\min}^{\text{cES}} \leq P_m^{\text{cES}}(t) \leq P_{m,\max}^{\text{cES}}, \forall m \in \mathcal{M} \quad (16)$$

$$P_{m,\min}^{\text{dES}} \leq P_m^{\text{dES}}(t) \leq P_{m,\max}^{\text{dES}}, \forall m \in \mathcal{M} \quad (17)$$

$$S_{\text{OC},m,\min}^{\text{ES}} \leq S_{\text{OC},m}^{\text{ES}}(t) \leq S_{\text{OC},m,\max}^{\text{ES}}, \forall m \in \mathcal{M} \quad (18)$$

$$P_i^{\text{PV}}(t) + P_m^{\text{dES}}(t) + P_n^{\text{dEV}}(t) = P_{\text{load}}(t) + P_m^{\text{cES}}(t) + P_n^{\text{cEV}}(t), \forall m \in \mathcal{M}, \forall n \in \mathcal{N} \quad (19)$$

$$\tau_m^{\text{cES}}(t) + \tau_m^{\text{dES}}(t) \leq \tau, \forall m \in \mathcal{M} \quad (20)$$

$$\tau_{n,2}^{\text{cEV}}(t) + \tau_{n,2}^{\text{dEV}}(t) \leq \tau, \forall n \in \mathcal{N} \quad (21)$$

$$(t-1)\tau - t_{0,n} \geq \tau_{n,1}^{\text{cEV}}, \forall n \in \mathcal{N}$$

式中:式(13)一式(14)为 EV 充放电功率约束; $P_{n,\max}^{\text{cEV}}$ 、 $P_{n,\min}^{\text{cEV}}$ 分别为第 n 辆 EV 充电功率的上下限; $P_{n,\max}^{\text{dEV}}$ 、 $P_{n,\min}^{\text{dEV}}$ 分别为第 n 辆 EV 放电功率的上下限;式(15)为 EV 荷电状态约束; $S_{\text{OC},n}^{\text{EV}}(t)$ 为第 n 辆 EV 的荷电状态; $S_{\text{OC},n,\max}^{\text{EV}}$ 、 $S_{\text{OC},n,\min}^{\text{EV}}$ 分别为第 n 辆 EV 荷电状态上下限;式(16)一式(17)为 ES 充放电功率约束; $P_{m,\max}^{\text{cES}}$ 、 $P_{m,\min}^{\text{cES}}$ 分别为第 m 个 ES 充电功率的上下限; $P_{m,\max}^{\text{dES}}$ 、 $P_{m,\min}^{\text{dES}}$ 分别为第 m 个 ES 放电功率的上下限;式(18)为 ES 荷电状态约束; $S_{\text{OC},m,\max}^{\text{ES}}$ 、 $S_{\text{OC},m,\min}^{\text{ES}}$ 分别为第 m 个 ES 荷电状态上下限;式(19)为系统功率平衡约束; $P_i^{\text{PV}}(t)$ 为第 i 个光伏功率; $P_{\text{load}}(t)$ 为 t 时刻用电负荷功率;式(20)为 ES 充放电时长约束;式(21)为 EV 有序充放电时长约束。

3 聚合运营自适应演进策略

遗传算法模拟自然界种群优胜劣汰以及遗传中

发生的复制、交叉、变异等现象,从任意初始种群出发,使群体进化到搜索空间中更好的区域,求取问题最优解。然而,分布式光伏与储能运营场景下,运行决策优化需要考虑出力、容量、功率、荷电状态等一系列约束,造成可行域割裂。传统遗传进化方法基于固定参数,从局部出发,演进求解最优运营决策,容易陷入局部最优,且基于贪心策略的迭代无法帮助算法跳出局部最优。因此,本文提出分布式光伏与储能聚合运营自适应演进策略,采用改进差分进化算法,将每个时间间隔内光伏与储能聚合运营决策向量编码为个体,多个个体组成种群。引入自适应缩放参数控制差分矢量缩放,并采用基于个体记忆的种群进化策略,引导种群跳出局部最优,提升算法收敛性能。

3.1 基因编码

分布式光伏与储能聚合运营决策向量为各 EV 和 ES 在当前时间间隔内的充放电时长,各类型储能充放电时长为大于零且小于时间间隔长度的实数。因此,分布式光伏与储能聚合运营决策向量可表示为

$$D(t) = [D^{\text{ES}}(t), D^{\text{EV}}(t)] \quad (22)$$

$$D^{\text{ES}}(t) = [\tau_{1,2}^{\text{cES}}(t), \tau_{1,2}^{\text{dES}}(t), \dots, \tau_{N,2}^{\text{cES}}(t), \tau_{N,2}^{\text{dES}}(t), \dots, \tau_{N,2}^{\text{cES}}(t), \tau_{N,2}^{\text{dES}}(t)] \quad (23)$$

$$D^{\text{EV}}(t) = [\tau_{1,2}^{\text{cEV}}(t), \tau_{1,2}^{\text{dEV}}(t), \dots, \tau_{n,2}^{\text{cEV}}(t), \tau_{n,2}^{\text{dEV}}(t), \dots, \tau_{N,2}^{\text{cEV}}(t), \tau_{N,2}^{\text{dEV}}(t)] \quad (24)$$

初始种群生成策略为

$$D_{u,0}(t) = \text{rand}(D^{\text{lb}}(t), D^{\text{ub}}(t)) \quad (25)$$

式中: $D_{u,0}(t)$ 为初始种群的第 u 个个体; $D^{\text{ub}}(t)$ 、 $D^{\text{lb}}(t)$ 分别为分布式光伏与储能聚合运营决策的上限值向量和下限值向量。

每个个体初始化为上下限向量范围内的随机向量,共考虑 U 个个体构成种群,集合为 $\mathcal{U} = \{1, 2, \dots, U\}$ 。迭代计算过程中,种群中每个个体执行交叉、变异操作,并基于进化策略选取适应度高的个体进入子代,共考虑 E 次迭代,集合为 $\mathcal{E} = \{1, 2, \dots, E\}$ 。迭代计算过程中个体基因可表示为 $D_{u,e}(t) = [d_{u,1,e}(t), \dots, d_{u,v,e}(t), \dots, d_{u,V,e}(t)]$,其中, V 为聚合运营决策向量的维度。每个个体的适应度函数为

$$\psi(D_{u,e}(t)) = E[(C_B(t) - C_G(t)) | D_{u,e}(t)] \quad (26)$$

式(26)为执行个体 $D_{u,e}(t)$ 所对应分布式光伏与储能聚合运营决策向量的情况下,储能聚合商运营

收益的期望值。

3.2 算法步骤

1)初始化。初始化种群个体数量 U 、最大迭代次数 E , 根据式 (25) 生成初始种群 $D_0(t) = \{D_{1,0}(t), D_{2,0}(t), \dots, D_{U,0}(t)\}$ 。

2)变异操作。将种群中每个个体 $D_{u,e}(t)$ 作为目标向量, 进行变异操作。变异操作方程为

$$H_{u,e}(t) = D_{u,e}(t) + \chi_{u,e}^1 (\omega D_e^{\text{best}}(t) - D_{u,e}(t)) + \chi_{u,e}^2 (D_{u_1,e}(t) - D_{u_2,e}(t)) \quad (27)$$

式中: $H_{u,e}(t)$ 为个体 $D_{u,e}(t)$ 的变异向量; $D_e^{\text{best}}(t)$ 为第 e 次迭代时种群的最优个体, 代表当前迭代情况下储能聚合商的最大收益; $D_{u_1,e}(t)$ 、 $D_{u_2,e}(t)$ 为种群中两个随机个体, 用于增加种群进化的随机性; ω 为种群最优个体调节因子, 服从均值为 $\chi_{u,e}^3$ 、方差为 1 的正态分布; $\chi_{u,e}^1$ 、 $\chi_{u,e}^2$ 、 $\chi_{u,e}^3$ 为自适应缩放参数, 用于权衡最优个体引导和随机搜索对种群进化的影响。上述参数的更新方式相似, 以 $\chi_{u,e}^1$ 为例表示为

$$\chi_{u,e+1}^1 = \begin{cases} (1 - r_1) \chi_{\min}^1 + r_1 \chi_{\max}^1, & r_2 < 0.1 \\ \chi_{u,e}^1, & \text{其他} \end{cases} \quad (28)$$

式中: r_1 、 r_2 为 $[0, 1]$ 范围内的随机数; $\chi_{\max}^1$ 、 $\chi_{\min}^1$ 分别为缩放参数上下限, 通过调整上下限控制个体的变异概率, 从而调整各类型储能充放电时长变化的随机性, 缩放参数上下限常取 0.9 和 0.1。

3)交叉操作。将个体 $D_{u,e}(t)$ 的部分变异数值与目标向量进行交叉, 其交叉操作方程为

$$\gamma_{u,v,e} = \begin{cases} D_{u,v,e}(t), & \rho_v < \bar{\omega}_{u,e} \\ H_{u,v,e}(t), & \text{其他} \end{cases} \quad (29)$$

式中: $\gamma_{u,v,e}$ 为个体 $D_{u,e}(t)$ 交叉后的第 v 维数值; $D_{u,v,e}(t)$ 、 $H_{u,v,e}(t)$ 分别为某一储能的原始充放电时长与变异后的充放电时长; ρ_v 为 $[0, 1]$ 范围内的随机数; $\bar{\omega}_{u,e}$ 为基因自适应变异参数。 $\bar{\omega}_{u,e}$ 的更新公式为

$$\bar{\omega}_{u,e+1} = \begin{cases} r_3, & r_4 < p_2 \\ \bar{\omega}_{u,e}, & \text{其他} \end{cases} \quad (30)$$

式中: p_2 为概率因子, 常取 0.1; r_3 、 r_4 为 $[0, 1]$ 范围内随机数。

4)种群进化。当算法陷入局部最优时, 变异后个体 $H_{u,e}(t)$ 适应度往往劣于 $D_{u,e}(t)$, 此时变异后个体无法进入下一代, 各类型储能充放电时长不再变化。针对上述问题, 提出一种基于个体记忆的种群

进化策略, 当变异后个体 $H_{u,e}(t)$ 适应度劣于 $D_{u,e}(t)$ 时, 选取个体记忆集合 $\mathcal{A}$ 存储的个体进入下一代, 引导种群脱困。

5)迭代。重复执行步骤 2)~步骤 4), 直至 $e = E$, 储能聚合商选取适应度最高的个体所对应的聚合运营决策进行各类型储能的充放电控制。

4 算例分析

4.1 算例介绍

为探究所提分布式光伏与储能聚合运营自适应演进策略有效性, 本文模拟分布式光伏与储能聚合运营优化场景, 进行 5 台分布式光伏、1 个蓄电池组、1 个超级电容、120 辆 EV 及其配套充电桩的聚合运营优化。某光伏微网典型日出力数据如表 1 所示, ES 选取超级电容与蓄电池组^[21-22], 其出力特性与荷电状态参照式 (2), EV 充放电特性参照式 (4)~式 (9)。电网峰谷电价随时刻变化情况如图 2 所示^[23]。分布式光伏和各类型储能随机部署在 IEEE 33 节点标准测试系统中, 能量交互满足系统潮流约束和变压器容量约束, 以小时为单位进行充放电时长优化。其余仿真参数如表 2 所示。

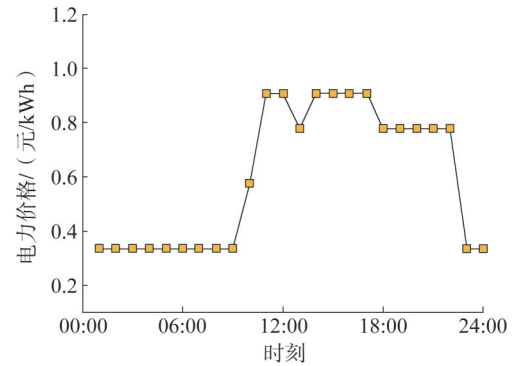


图2 电网峰谷电价

Fig.2 Timepeak-valley prices of power grid

将所提算法与两种现有分布式光伏和储能聚合运营策略进行对比, 分别是基于遗传的分布式光伏与储能聚合运营优化 (genetic based - distributed photovoltaic and energy storage aggregation operation optimization, G-PEAOO)^[24]策略以及基于差分进化的分布式光伏与储能聚合运营优化 (differential evolution - based distributed photovoltaic and energy storage aggregation operations optimization, D -

PEAOO)^[25]策略,对比算法优化目标与本文一致。G-PEAOO 采用传统遗传算法优化光伏与储能运营决策,不考虑储能资源差异特性,仅考虑 ES 接入电网场景下运营策略优化。D-PEAOO 考虑储能资源差异特性,采用传统差分进化算法优化光伏与储能聚合运营决策。此外,上述两种对比算法均基于贪婪策略进行个体筛选,基于固定参数进行种群遗传迭代。算法种群规模设置为 1000,进化代数 200,交叉率 0.55,变异率 0.3。

表1 光伏出力数据

Table 1 Output data of photovoltaic capacity 单位: kW

光伏容量	典型日出力
550	505.22
500	431.87
400	357.44
400	349.44
250	213.76

表2 仿真参数

Table 2 Simulation parameters

参数	数值	参数	数值
α	2.1	$ A $	20
β	2.8	η_m^{cES}	1.1
η_m^{dES}	1.2	ρ_m^{dES}/kW	3 000
ρ_m^{cES}/kW	3 000	W_n/kWh	15
S_n/km	40	ρ_n^{cEV}/kW	14
η_n^{cEV}	0.9		

4.2 仿真结论

图3和图4分别为峰值电价阶段电网购电成本与售电盈利随迭代次数变化情况。定义收敛迭代误差为当前迭代次数电网购电成本或售电盈利与上一次迭代结果的差相对于当前迭代结果的比值。由图3和图4可知,所提算法的成本与盈利的变化幅度均随迭代次数的增加而降低,并在迭代次数大于100次时保持稳定收敛趋势;当迭代次数大于150次后,收敛迭代误差均小于0.1%,算法达到收敛状态。仿真结果表明,在迭代次数小于100时,3种算法的成本与盈利随迭代次数的增加呈指数变化趋势;当迭

代次数大于100时,3种算法均稳定收敛。购电成本降低说明所提算法能够促进峰电价阶段光伏消纳,降低聚合商向电网的购电需求。相比于G-PEAOO和D-PEAOO,所提算法分别降低电网购电成本41.39%和26.09%,增加售电盈利54.57%和24.50%。原因在于,所提算法考虑配网储能资源差异化消纳模式,动态调整储能充放电策略,同时通过差分矢量缩放提升算法的收敛效率,从而最大化储能聚合商运营收益。D-PEAOO未考虑EV可作为一种特殊的柔性储能,参与储能聚合商的购电售电行为,优化效果不如所提算法。G-PEAOO忽略储能充放电总时间不应超过优化时间长度约束,导致陷入局部最优解,优化效果最差。

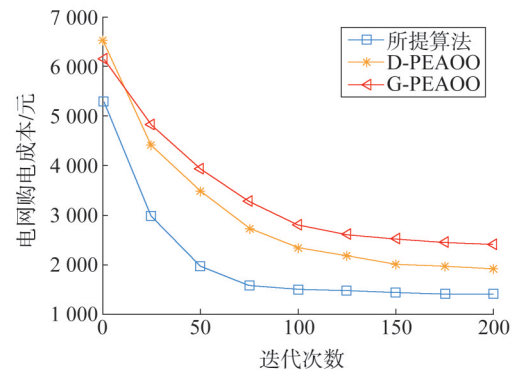


图3 电网购电成本随迭代次数变化情况对比

Fig.3 Comparison of electricity purchasing cost versus iterations

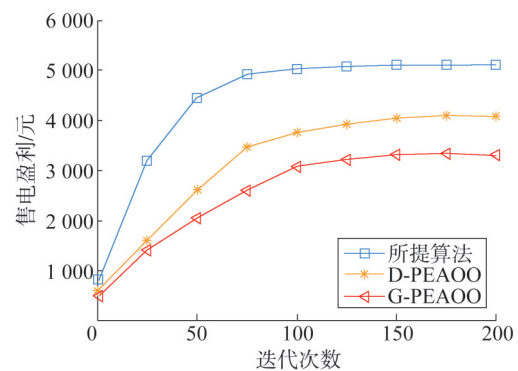


图4 售电盈利随迭代次数变化情况对比

Fig.4 Comparison of electricity sales profit versus iterations

图5和图6分别为ES充放电功率与电量随时间变化情况,其中图5数值结果为充电功率与放电功率的差值。仿真结果表明,在00:00—08:00谷电价时

段,3种算法均呈现缓慢充电趋势且所提算法累积电量更高;09:00—11:00,随着EV用电需求提高,ES放电;12:00—15:00峰电价时段,光伏出力较高,且所提算法充电功率最高,说明所提算法光伏消纳更充分;16:00—20:00峰电价时段,光伏出力能力下降,所提算法放电功率最高,说明所提算法能够充分利用ES出力满足EV晚高峰用电需求,同时尽量向电网售电提高运营收益;21:00—24:00谷电价时段,所提算法加大电网购电量,维持较低放电功率,说明所提算法能够有效降低电网购电成本。相比于G-PEAOO和D-PEAOO,所提算法能够更灵活响应电价激励政策,最大程度上平衡ES的出力与售电收益的博弈。其原因在于,所提算法在搜索空间中拥有良好的全局与局部的开拓、利用能力。G-PEAOO和D-PEAOO未能综合释放不同储能系统消纳能力,尤其G-PEAOO算法下的储能系统易造成弃光现象,导致资源浪费。

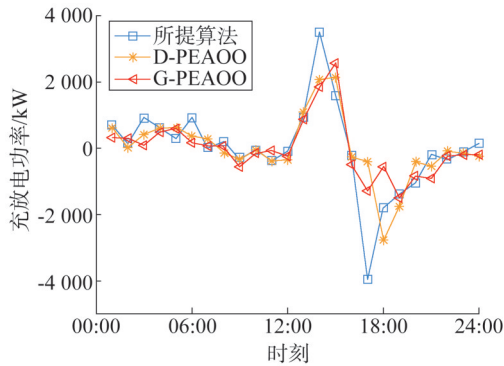


图5 ES充放电功率随时间变化情况对比

Fig.5 Comparison of energy storage system charging and discharging power versus time slots

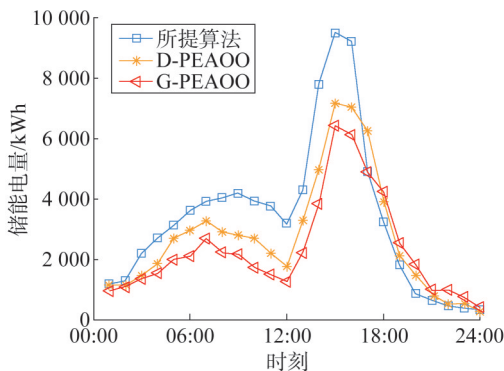


图6 ES电量随时间变化情况对比

Fig.6 Comparison of energy storage system load versus time slots

图7为聚合商运营收益随EV数量变化情况。仿真结果表明,在光伏出力和储能不变的情况下,随EV数量的增加,用电需求的上升,导致三种算法的聚合商运营收益均呈现下降趋势。这是由于EV数量的增加导致配套充电桩用电需求上升,加大了储能资源出力竞争力度,从而导致呈现下降趋势。当EV数量从60增加达到180时,相较于D-PEAOO和G-PEAOO,所提算法的聚合商运营收益下降幅度分别降低了45.18%和64.08%。所提算法的聚合商运营收益下降趋势最慢,D-PEAOO次之,G-PEAOO最快。其原因在于,所提算法通过考虑储能资源差异特性和遗传博弈,按照电网峰谷电价情况调整储能聚合商购电售电决策,使其运营收益达到全局最优。在EV不断增加时,G-PEAOO和D-PEAOO优化效果并不佳,说明均无法摆脱种群停滞的问题。

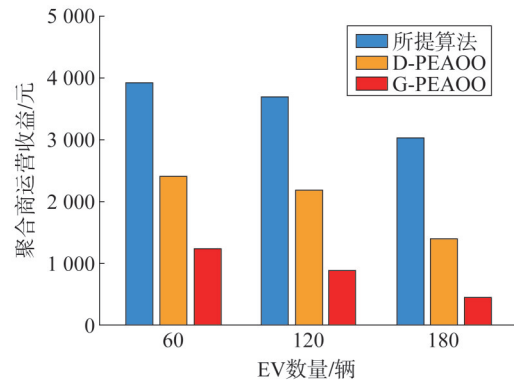


图7 聚合商运营收益随EV数量变化情况对比

Fig.7 Aggregator operating income versus numbers of EV

图8为聚合商运营收益随储能类型变化情况。

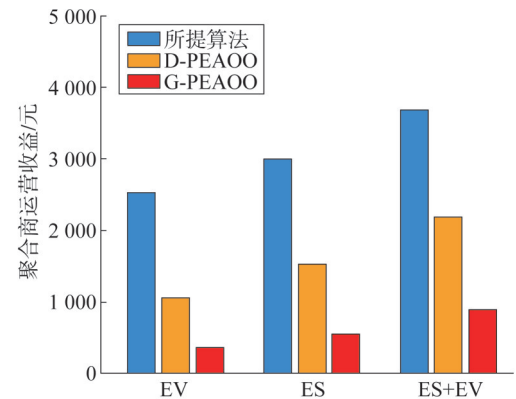


图8 聚合商运营收益随储能类型变化情况对比

Fig.8 Aggregator operating income versus energy storage types

仿真结果表明,在全部为EV或全部为ES时,单一的储能消纳模式无法兼顾光伏出力与用户需求波动,系统适应性差,聚合运营收益低。可以看出,在EV和ES同时存在时,即使不采用所提算法,G-PEAOO的聚合商运营收益相较于仅存在EV或ES时也分别提升143.29%和61.75%,充分说明本文考虑差异化储能消纳模式的优越性。

5 结论

高比例新能源广泛接入背景下,面向分布式光伏出力波动导致的电网运行状态不稳定问题,文中提出了一种计及资源差异特性的分布式光伏与储能聚合运营优化方法。通过构建分布式光伏与储能聚合运营优化系统模型,在考虑储能及其消纳模式差异性的基础上,提出分布式光伏与储能聚合运营自适应演进策略,引入自适应缩放参数控制差分矢量缩放,实现联合运营成本的最小化,提升配电网光伏消纳能力,改善电网运行状态。仿真结果表明,所提算法相较于G-PEAOO和D-PEAOO算法,分别降低电网购电成本41.39%和26.09%,增加售电盈利54.57%和24.50%,且相较于单一EV或ES的储能运营模式,所提算法的聚合运营商收益分别提升45.66%和23.03%。在未来研究中,将进一步考虑其他新能源参与聚合运营优化的可行性,提出更为高效的光伏消纳方法。

参考文献

- [1] 董军,彭诗程.双碳目标下我国储能发展及市场参与激励政策建议[J].华北电力大学学报(社会科学版),2023(3):19-27.
DONG Jun, PENG Shicheng. Suggestions on incentive policies for energy storage development and market participation under double carbon targets in China[J]. Journal of North China Electric Power University(Social Sciences), 2023(3):19-27.
- [2] 葛罗,冯焯,胡凯,等.新型电力系统下空调负荷聚合建模及可调控潜力评估[J].浙江电力,2023,42(4):45-53.
GE Luo, FENG Xuan, HU Kai, et al. Air conditioning load aggregation modeling and the schedulable potential evaluation in the context of new-type power system[J]. Zhejiang Electric Power, 2023,42(4):45-53.
- [3] KIM G G, LEE W, BHANG B G, et al. Fault detection for photovoltaic systems using multivariate analysis with electrical and environmental variables[J]. IEEE Journal of Photovoltaics, 2021, 11(1):202-212.
- [4] 陈文进,朱峰,张童彦,等.基于AFSA-BP神经网络的光伏功率预测方法[J].浙江电力,2022,41(4):7-13.
CHEN Wenjin, ZHU Feng, ZHANG Tongyan, et al. A photovoltaic power prediction method based on AFSA-BP neural network[J]. Zhejiang Electric Power, 2022,41(4):7-13.
- [5] 丛鹏伟,唐巍,娄铨伟,等.含高渗透率可再生能源的主动配电网两阶段柔性软开关与联络开关协调优化控制[J].电工技术学报,2019,34(6):1263-1272.
CONG Pengwei, TANG Wei, LOU Chengwei, et al. Two-stage coordination optimization control of soft open point and tie switch in active distribution network with high penetration renewable energy generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019,34(6):1263-1272.
- [6] HASHEMI S, ØSTERGAARD J, DEGNER T, et al. Efficient control of active transformers for increasing the PV hosting capacity of LV grids[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(1):270-277.
- [7] 刘芳芳,吕林,刘友波,等.高渗透清洁能源的城市高压配电网转供调度策略[J].电力系统保护与控制,2020,48(11):1-9.
LIU Fangfang, LÜ Lin, LIU Youbo, et al. Transfer scheduling strategy for urban high-voltage distribution network with highly-penetrated renewable energy[J]. Power System Protection and Control, 2020,48(11):1-9.
- [8] 李洁,孙宏宇,许椿凯,等.参与新型电力系统需求响应的分布式储能资源管理与策略研究[J].供用电,2022,39(2):29-35.
LI Jie, SUN Hongyu, XU Chunkai, et al. Research on distributed energy storage resource management and strategy participating in demand response of new power systems[J]. Distribution & Utilization, 2022,39(2):29-35.
- [9] SHI Z D, WANG W S, HUANG Y H, et al. Simultaneous optimization of renewable energy and energy storage capacity with the hierarchical control[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2022, 8(1):95-104.
- [10] 付宇,白浩,李跃,等.面向高比例光伏消纳的低压交直流混合配电网时-空协调优化方法[J].南方电网技术,2023,17(1):84-93.
FU Yu, BAI Hao, LI Yue, et al. Spatial-temporal coordinated optimization method of low voltage hybrid AC/DC distribution network for accommodation of high-proportion PVs[J]. Southern Power System Technology, 2023,17(1):84-93.
- [11] 宋欣睿,贾燕冰,韩肖清,等.园区光储多场景协同优化运行策略[J].现代电力,2022,39(6):720-729.
SONG Xinrui, JIA Yanbing, HAN Xiaoqing, et al. Cooperative optimization control method for photovoltaic and energy storage in photovoltaic zone to participate in multiple application scenarios[J]. Modern Electric Power, 2022,39(6):720-729.
- [12] 叶琳浩,申展,许峰,等.考虑光伏不确定性和时序相关性的分布鲁棒光储协同优化配置方法[J].南方电网技术,2023,17(4):132-143.

- YE Linhao, SHEN Zhan, XU feng, et al. Distributionally robust collaborative optimal allocation method of photovoltaic and energy storage considering photovoltaic uncertainty and temporal correlation[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17 (4): 132-143.
- [13] 杨龙, 张沈习, 程浩忠, 等. 区域低碳综合能源系统规划关键技术与挑战[J]. 电网技术, 2022, 46(9): 3290-3304.
- YANG Long, ZHANG Shenxi, CHENG Haozhong, et al. Regional low-carbon integrated energy system planning: key technologies and challenges[J]. Power System Technology, 2022, 46(9): 3290-3304.
- [14] ZANDAVI S M, CHUNG V Y Y, ANAISSI A. Stochastic dual simplex algorithm: a novel heuristic optimization algorithm [J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2021, 51(5): 2725-2734.
- [15] 刘斌, 谈竹奎, 唐赛秋, 等. 基于数据预测启发式算法的光伏电池参数识别[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(23): 72-79.
- LIU Bin, TAN Zhukui, TANG Saiqiu, et al. Photovoltaic cell parameter extraction using data prediction based on a meta-heuristic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(23): 72-79.
- [16] DEMOLLI H, DOKUZ A S, ECEMIS A, et al. Location-based optimal sizing of hybrid renewable energy systems using deterministic and heuristic algorithms[J]. International Journal of Energy Research, 2021, 45(11): 16155-16175.
- [17] 徐同庆, 王树彪, 赵浩君. 计及光伏消纳与光储充配置的配电网联合优化策略[J/OL]. 电气工程学报: 1-10 [2024-02-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1289.TM.20230531.2203.008.html>.
- XU Tongqing, WANG Shubiao, ZHAO Haojun. The predictive-control optimization method for park integrated energy system considering the high penetration of photovoltaics and deep reinforcement learning[J/OL]. Journal of Electrical Engineering: 1-10 [2024-02-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1289.TM.20230531.2203.008.html>.
- [18] 孙丰杰, 汲广军, 撤奥洋, 等. 考虑安全约束的地区电网精益化源网荷柔性互动控制系统[J]. 山东电力技术, 2022, 49(10): 31-37.
- SUN Fengjie, JI Guangjun, HAN Aoyang, et al. Flexible interactive control system for source-grid-load in regional power grid considering security constraints [J]. Shandong Electric Power, 2022, 49(10): 31-37.
- [19] 谭笑, 华栋. 源荷协同下计及电转氢和电动汽车的含风电配电网日前优化调度[J]. 南方电网技术, 2023, 17(4): 144-155.
- TAN Xiao, HUA Dong. Day-ahead optimal dispatch of wind power distribution network with P2H and EVs in consideration of source-load coordination [J]. Southern Power System Technology, 2023, 17 (4): 144-155.
- [20] 邵嗣杨, 马翔, 袁伟, 等. 含电动汽车的不确定性微电网鲁棒优化调度方法[J]. 电气工程学报, 2023, 18(2): 201-209.
- SHAO Siyang, MA Xiang, YUAN Wei, et al. Robust optimal dispatching method for uncertain microgrid including electric vehicles [J]. Journal of Electrical Engineering, 2023, 18 (2): 201-209.
- [21] 彭春华, 余愿, 孙惠娟. 基于源网荷协同优化的配电网光储联合系统规划[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 3944-3951.
- PENG Chunhua, YU Yuan, SUN Huijuan. Planning of combined PV-ESS system for distribution network based on source-network-load collaborative optimization [J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 3944-3951.
- [22] CAI D F, WANG Z W, MIAO S H, et al. Wind-photovoltaic-energy storage system collaborative planning strategy considering the morphological evolution of the transmission and distribution network[J]. Energies, 2022, 15(4): 1481.
- [23] 陈明昊, 孙毅, 胡亚杰, 等. 基于纵向联邦强化学习的居民社区综合能源系统协同训练与优化管理方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(15): 5535-5549.
- CHEN Minghao, SUN Yi, HU Yajie, et al. The collaborative training and management-optimized method for residential integrated energy system based on vertical federated reinforcement learning[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(15): 5535-5549.
- [24] 何欣, 黄扬, 王维洲, 等. 基于改进遗传算法的区域性光伏消纳优化策略研究[J]. 电子设计工程, 2022, 30(2): 28-32.
- HE Xin, HUANG Yang, WANG Weizhou, et al. Research on optimal strategy of regional photovoltaic consumption based on improved genetic algorithm [J]. Electronic Design Engineering, 2022, 30(2): 28-32.
- [25] 张子恒, 吴定会, 杨朝辉, 等. 基于改进差分进化算法的微网容量优化配置[J]. 控制工程, 2023, 30(1): 90-97.
- ZHANG Ziheng, WU Dinghui, YANG Zhaozhui, et al. Optimal configuration of microgrid capacity based on improved differential evolution algorithm [J]. Control Engineering of China, 2023, 30 (1): 90-97.

收稿日期: 2023-12-22

修回日期: 2024-04-28

作者简介:

关逸飞(1994), 通信作者(Paris1994@vip.qq.com)男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为配电网调度优化运行;

王玥娇(1989), 女, 硕士, 工程师, 主要从事配电网运行管理与电力工程管理工作;

刘奕元(1996), 女, 硕士, 工程师, 主要从事电力系统运行与安全管理等工作;

孙树敏(1968), 男, 硕士, 教授级高工, 主要研究方向为配电网优化运行与控制技术;

杨 颂(1997), 女, 硕士, 工程师, 主要研究方向为新能源并网控制技术。

(责任编辑 车永强)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2024.12.006

考虑调峰辅助服务的虚拟电厂日前运行优化研究

耿 健^{1,2*}, 金玉龙^{1,2}, 杨宇峰^{1,2}, 曹 敬^{1,2}, 武锡锦^{1,2}

(1.南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司,江苏 南京 211106;2.国电南瑞科技股份有限公司,江苏 南京 211106)

摘要:随着可再生能源大规模发展,电网安全保供压力愈发严峻,亟须充分挖掘用户侧可调资源,以市场化手段积极引导发、用、储侧资源通过虚拟电厂方式参与电网友好互动运行,提升电力系统整体可靠性及灵活性。首先,分析虚拟电厂作为新型市场主体参与调峰辅助服务交易的运行方式,提出了虚拟电厂此场景下运行模式架构和业务流程。其次,基于用户侧分布式储能、冷热电三联供系统、可调电负荷特性,构建了虚拟电厂典型可调节聚合资源模型。然后,以虚拟电厂综合收益最优为原则,构建了日前运行优化目标函数模型,在计及冷热电平衡约束、设备运行限制约束条件下,对运行优化目标高效快速求解。最后,利用某虚拟电厂夏季典型日、考虑分时电价进行算例分析,在满足冷热电多元用能需求下实现了综合效益最大化,验证了采用优化策略运行方式的普遍适用性。

关键词:虚拟电厂;市场交易;运行优化;综合效益

中图分类号:TM73

文献标志码:A

文章编号:1007-9904(2024)12-0044-09

Virtual Power Plant Day-ahead Operation Optimization Considering Peak Shaving Auxiliary Service

GENG Jian^{1,2*}, JIN Yulong^{1,2}, YANG Yufeng^{1,2}, CAO Jing^{1,2}, WU Xijin^{1,2}

(1.NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China;

2.NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

Abstract: With the large-scale development of renewable energy, pressure on the safety and supply power grid is becoming increasingly severe. It is urgent to fully tap into user-side adjustable resources, actively guide the generation, consumption, and storage to participate in friendly interactive power grid operation through VPP, and improve the power system flexibility and reliability. Firstly, the operation mechanism of VPP participating in peak shaving auxiliary service transactions was analyzed, and the operation architecture and business processes were proposed. Secondly, based on the characteristics of storage, CCHP, and adjustable electrical load, a typical controllable resource model for VPP was established. Then, the day-ahead optimization objective model was constructed based on the comprehensive income principle. In view of cold-heat, -power balance and equipment operation constraints, the optimization objective was efficiently and quickly solved. Finally, using a VPP typical summer day and considering the time-use electricity price for case analysis, the comprehensive benefits were maximized while meeting the diverse energy demands and verifying the effectiveness of the proposed optimization strategy.

Keywords: virtual power plant; market transaction; operation optimization; comprehensive benefit

0 引言

在倡导绿色低碳、环保经济的新时代能源高效利用的前提下,大力发展可再生能源及建设新型电

力系统是重要的能源转型发展实施路径^[1]。随着用户侧分布式光伏及风力发电机组设备容量持续快速增加,集中/分散式电化学储能设备、充电桩、电动汽车、海量用户侧多种形态可调负荷资源的迅速发展和不断接入,使得电力系统整体越发凸显出高度不确定性与复杂性,亟须通过虚拟电厂(virtual power plant, VPP)这一技术手段,实现对各类可调负荷资源灵活控制,用以满足电网差异化调控需求^[2]。对

基金项目:南瑞集团有限公司科技项目“现货市场环境虚拟电厂运营管控关键技术及系统研发”(SGNRGFNKKXS2235582)。
Science and Technology Foundation of NARI Group Corporation “Key Technology and System Research and Development of VPP Operation Control under Spot Market Environment”(SGNRGFNKKXS2235582). ”

电力系统来说,能够将用户侧可调资源潜力充分挖掘出来,助力源网荷储多种资源协同利用、科学发展及减少电网建设投资,有助于提升系统整体运行效率和设备利用率^[3],对实现削峰填谷、提升间歇性分布式新能源消纳水平^[4]、源荷友好互动平衡具备重要作用。

VPP 的概念最早出现在欧美,国内外尚缺乏统一完整的定义与规范。文献[5]认为 VPP 是与自治微网相类似的网络。文献[6-9]认为 VPP 是发电资源的组合,可基于互联网通信,通过中央控制系统管理这些发电资源。文献[10-11]认为 VPP 是负荷侧资源组合,通过多样调控方式及先进网络通信技术等将任一接入配电网资源构成。在国内,比较权威的定义有两个规范,文献[12]定义 VPP 是利用信息通信、控制、物联网、数字等相关前沿技术,将用户侧储能、可调节负荷等分散式资源聚合控制,同时参与到电网互动运行与市场化交易。文献[13]定义 VPP 是一种聚合电网传统调度不可观、不可测及不可控的用户侧可调资源,进而构成可参与电网互动调节、各类市场化交易及获得收益的结合。大体来说,VPP 就是对于可调节的电源或负荷在一定区域内进行聚合,以结算主体身份参与市场交易,同时其聚合资源内部具备分时计量及数据传输条件的系统/运营实体。

针对 VPP 参与市场化交易运行优化策略应用,大多集中在运营机制和优化调度方面,缺少综合考虑包含冷热电气多种能源类型下的 VPP 运行优化策略研究。文献[14]建立了 VPP“批发-零售”两级市场交易方式和考虑聚合、经济、运营三个因素协调优化机理模型;文献[15-18]考虑不同的资源类型,针对不同的市场架构,提出了 VPP 在市场中的竞价策略;文献[19]建立了一种计及 VPP 可调节能力的综合需求响应市场应用模式;文献[20]计及电价、风电出力、需求响应不确定性特征,构建了自适应鲁棒-随机优化运行模型,求解得出 VPP 日前优化调度策略;文献[21]设计了云-群-端递阶协同的调度技术框架和考虑差异化调峰需求的 VPP-电网交互调度模式;文献[22]基于 Frank-Copula 理论,计及最大碳排放限额,VPP 运行优化更加环保经济;文献[23]计及电网调控需要和用户可调资源协同,综合 VPP 环保、经济、可再生能

源消纳,构建 VPP 源荷协同运行优化模型;文献[24]考虑含电动汽车的气电互联 VPP,构建区间多目标优化调度方案;文献[25]基于长短期记忆神经网络获取源荷预测值,建立含储能系统的 VPP 多元可调资源协同优化策略。

在制定 VPP 日前运行优化策略时,不仅需要考虑 VPP 自身聚合可调资源运行情况,也应考虑参与市场化交易情况,用以充分发挥源荷双向调节作用,提高源网荷互动能力,缓解电网峰谷差大、局部电力供应紧张、新能源消纳能力不足等问题。本文分析了 VPP 参与调峰辅助服务交易的运行框架及业务流程,建立了 VPP 典型可控资源模型,提出了日前运行优化模型及求解约束条件,最后以仿真算例进行分析,验证了计及调峰辅助交易的 VPP 日前运行优化策略的有效性。

1 VPP 参与调峰辅助服务的运行机制

1.1 VPP 运行框架

VPP 运行框架从下至上划分为设备层、单元层、聚合层、平台层 4 个层级,采用集中式控制架构,如图 1 所示。

设备层主要指 VPP 运营商所代理并聚合的广大用户侧可调资源,包括分布式光伏、电储能、冷热电三联供(combined cooling heating and power, CCHP)、可控负荷、可中断负荷、充电桩等;单元层主要指将一定范围内或具有物理连接关系的设备聚合起来,形成一个可控单元,设备层与单元层与测控装置进行连接,使用 RS485、局域网、无线公网、互联网等通信方式,遵循 Modbus、https、MQTT 等规约,负责对上对接聚合层,上送运行数据,并接收下发调控指令;聚合层由 VPP 聚合运营系统组成,VPP 运营商通过此系统具备对所代理用户侧可调资源的聚合管理能力,并与平台层对接,在完成市场主体注册后,上报模型数据、运行数据、聚合数据等信息并可以报量报价的方式参加调峰辅助服务市场交易,同时接受平台层下发的调控需求信息、交易出清数据等信息。平台层由调度源网荷储平台组成,负责组织调峰辅助服务市场运行,生成市场调峰调控需求、出清结果及交易结算依据。

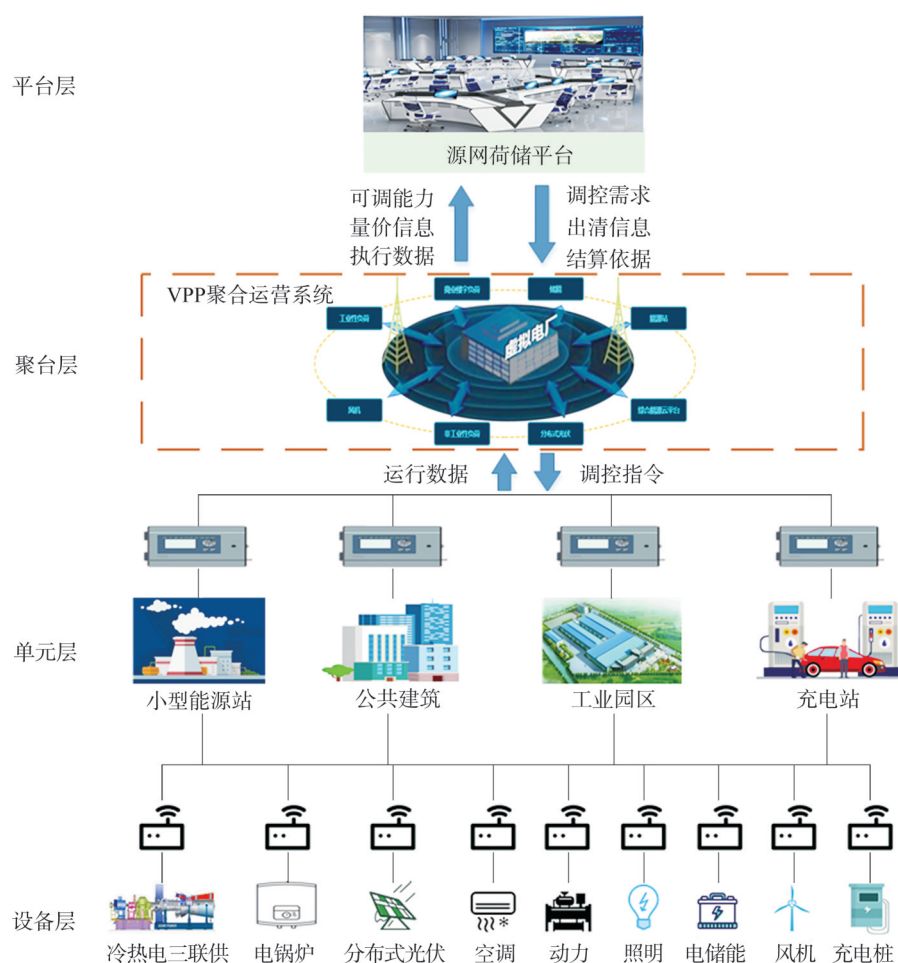


图1 VPP运行框架

Fig.1 VPP operation framework

1.2 VPP参与调峰辅助市场业务流程

调峰辅助服务主要是指为维护电力系统安全稳定运行,保证电力平衡,由发电侧并网主体、新型储能或包含分布式电源、可控负荷和储能装置等在内的VPP提供的市场化调峰服务。现阶段,江苏、河北、山西、浙江等多个省份已出台用户侧参与辅助服务市场专项政策,采用集中竞价的方式,统一出清,按需调用,统一结算。以某省独立储能和用户可控负荷参与电力调峰市场交易为例^[26],交易流程大致分为日常报送、市场交易、交易执行、交易结算4个环节,具体步骤如图2所示。其中,虚拟电厂应具备电力、电量数据分时计量与传输条件,能够将实时用电量测数据上传至电力调度机构且采集周期不大于60s,具备可调节电力不低于10MW、连续调节时间不低于2h能力。

2 VPP典型可控资源模型

2.1 电化学储能模型

电化学储能是VPP聚合参与电网互动运行较为优质的资源,电网负荷高时,能进行放电,可认为是分布式电源;电网负荷低时,能进行充电,可认为是电负荷。并可根据VPP运行需求,一定范围内进行调控,建立电化学储能模型为

$$E_{st}(t) = E_{st}^0 + \sum_{t \in \Phi_{in}} P_{st}(t) \eta_{in} \Delta t + \sum_{t \in \Phi_{out}} \frac{-P_{st}(t)}{\eta_{out}} \Delta t \quad (1)$$

式中: Φ_{in} 、 Φ_{out} 分别为电化学储能充能、放能时间段集合; E_{st}^0 、 $E_{st}(t)$ 分别为初始时段、 t 时段电化学储能运行容量,MWh; $P_{st}(t)$ 为 t 时段电化学储能充电、放电功率,MW; η_{in} 、 η_{out} 分别为电化学储能充电、放电效率,%; Δt 为相邻时段的时间间隔,h。

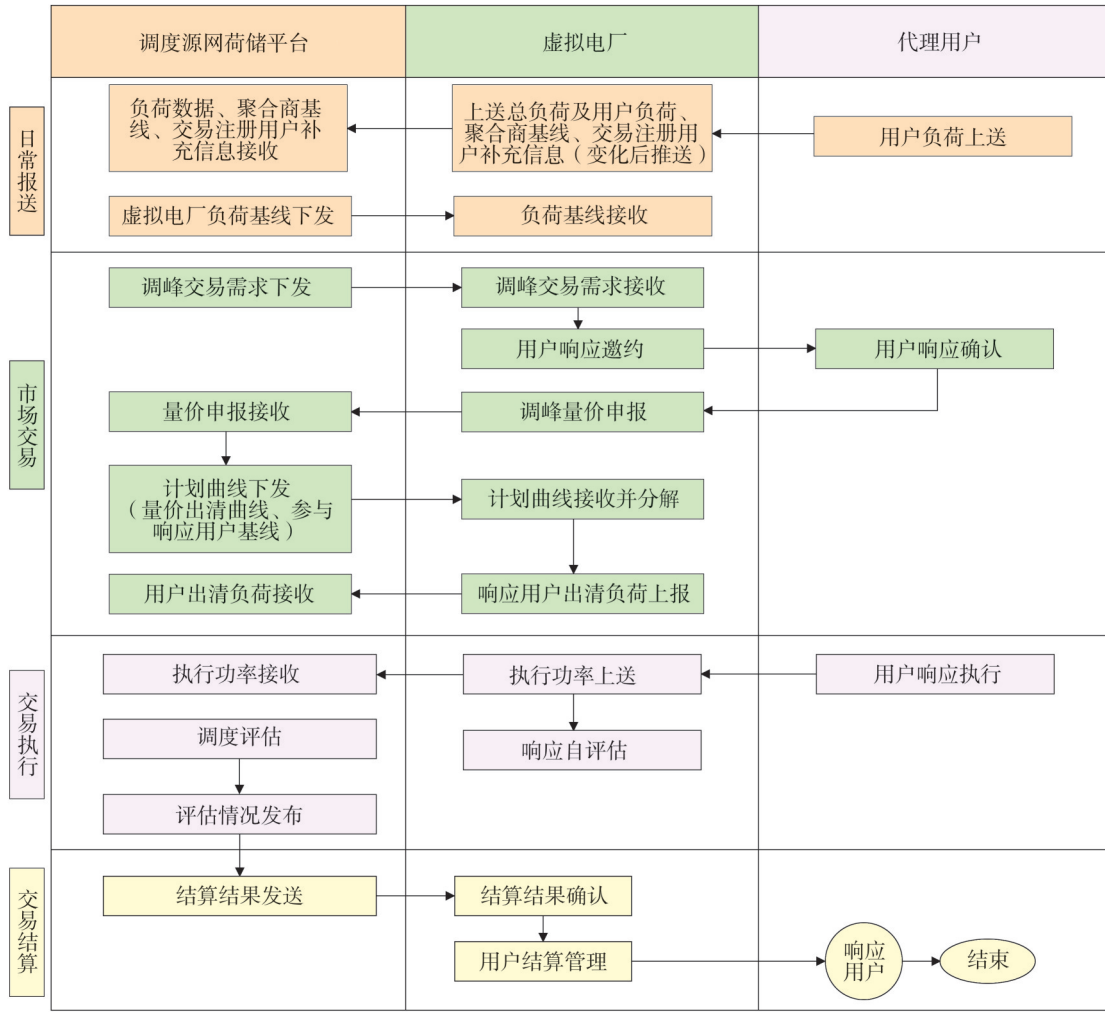


图2 虚拟电厂参与调峰辅助服务业务流程

Fig.2 Business process of VPP participation in peak shaving auxiliary service

2.2 CCHP 模型

CCHP 作为分布式电源的典型代表之一,天然气经燃气轮机充分燃烧和能量转化后转变成电能,排放低品位热能的烟气。余热锅炉和余热吸收式制冷机分别将排烟废热能量用于供热、生活热水、制冷等,在发电的同时还能实现能源的梯级利用,提高了能源的综合使用效率,经济和环保效益显著。建立的 CCHP 模型为

$$\begin{cases}
 \eta_{gt}^E = (aP_{lr}^3 + bP_{lr}^2 + cP_{lr} + d) \eta_{gt}^{nom-E} \\
 P_{ex} = P_{gt} \eta_r \eta_{gt}^{nom-H} / \eta_{gt}^E \\
 F_{GT} = P_{gt} / \eta_{gt}^E / H_{NG} \\
 Q_e = Q_h \eta_{heat} \\
 P_{ex_heat} = \alpha_1 \eta_{heat} P_{ex} \\
 Q_{ar} = Q_c \eta_{cool} \\
 P_{ex_cool} = \alpha_2 \eta_{cool} P_{ex}
 \end{cases} \quad (2)$$

式中: η_{gt}^E 、 P_{lr} 、 η_{gt}^{nom-E} 分别为燃气轮机发电效率、负荷率、额定发电效率,%; a 、 b 、 c 、 d 均为工况效率系数,一般取值为 $a=0.8264$ 、 $b=-2.334$ 、 $c=2.329$ 、 $d=0.1797$; η_{gt}^{nom-H} 为燃气轮机额定制热效率,%; η_r 为 CCHP 余热利用效率,%; P_{gt} 为燃气轮机发电功率, MW; P_{ex} 为 CCHP 可利用排烟热功率, MW; F_{GT} 为天然气消耗量, m^3 ; H_{NG} 为天然气热值, MJ/m^3 ; Q_e 、 Q_h 分别为余热锅炉输出、输入的热能量, MJ; η_{heat} 为余热锅炉热转换效率,%; α_1 、 α_2 分别为余热锅炉、余热吸收式制冷机得到燃气轮机废热能量的比例,%; P_{ex_heat} 为余热锅炉热转换功率, MW; Q_{ar} 、 Q_c 分别为余热吸收式制冷机输出冷能量、输入热能量, MJ; η_{cool} 为余热吸收式制冷机制冷转换系数,%; P_{ex_cool} 为余热吸收式制冷机转换功率, MW。

2.3 可调电负荷模型

电制冷水机、电锅炉等可调节电负荷,主要是利用电能转化成冷能或热能,在正常工作情况下,可认为输出制冷/热功率与电功率呈线性关系,建立的可调节负荷模型为

$$\begin{cases} Q_{eh} = 0.278Q_{eth}\eta_{eh} \\ P_{eh} = \eta_{eh}P_{eth} \\ Q_{ec} = 0.278Q_{etc}\eta_{ec} \\ P_{ec} = \eta_{ec}P_{etc} \end{cases} \quad (3)$$

式中: Q_{eh} 为电锅炉输出热量,MJ; Q_{eth} 为电锅炉耗电量,kWh; η_{eh} 为电锅炉制热效率,%; P_{eh} 为电锅炉制热功率,MW; P_{eth} 为电锅炉耗电功率,MW; Q_{ec} 为电制冷水机输出冷量,MJ; Q_{etc} 为电制冷水机耗电量,kWh; η_{ec} 为电制冷水机制冷性能系数,%; P_{ec} 为电制冷水机制冷功率,MW; P_{etc} 为电制冷水机耗电功率,MW。

3 日前优化模型

建立考虑调峰辅助服务的VPP日前优化模型,主要的原则是实现VPP经济效益最大化。基于蒙特卡洛抽样法和太阳辐照度Beta分布的参数拟合法,生成VPP所聚合的分布式光伏发电曲线^[21]。

3.1 运行优化目标

VPP在1天的调度运行周期 T 内的经济性运行优化目标 F_{total} 由VPP运行费用 C_{total} 和参与调峰辅助服务收益 C_{if} 两部分组成。

$$F_{total} = C_{total} - C_{if} \quad (4)$$

C_{total} 主要由从电网购买电量的电费、消耗天然气费用两部分构成,即为

$$C_{total} = \sum_{t=1}^T [p_{grid}(t)G_{grid}(t) + p_{gas}(t)G_{gas}(t)] \quad (5)$$

C_{if} 计算是以参与调峰辅助服务 t 时段内的调峰电量 $G_{if}(t)$ 为结算依据,具体为:

$$G_{if}(t) = \begin{cases} G_{if_{cq}}(t), & G_{if_{yx}}(t) \geq G_{if_{cq}}(t) \\ G_{if_{yx}}(t), & 0 \leq G_{if_{yx}}(t) < G_{if_{cq}}(t) \end{cases} \quad (6)$$

$$C_{if} = \sum_{t=1}^T p_{if}(t)G_{if}(t) \quad (7)$$

式中: $G_{if_{cq}}(t)$ 为 t 时段日前市场交易出清调峰电量,MWh; $G_{if_{yx}}(t)$ 为 t 时段的有效调峰电量,MWh; $p_{if}(t)$ 为 t 时段的日前市场交易调峰结算价格,元/MWh。

针对优化目标 F_{total} 的求解,采用成熟的Cplex软

件求解器,对高维度多约束的动态规划问题求解精度高且速度快,目前已有相关优化调度软件产品中商业化应用。

3.2 运行优化约束条件

1)平衡约束条件。

$$\begin{cases} P_{pv}(t) + P_{gt}(t) + P_{st}(t) + P_{grid}(t) = P_{load}(t) + P_{eth}(t) + P_{etc}(t) \\ P_{eh}(t) + P_{ex_{heat}}(t) = P_{heat}(t) \\ P_{ec}(t) + P_{ex_{cool}}(t) = P_{cool}(t) \end{cases} \quad (8)$$

式中: $P_{pv}(t)$ 为 t 时段光伏发电功率,MW; $P_{grid}(t)$ 为 t 时段系统从电网购电功率,MW; $P_{load}(t)$ 为 t 时段不可控用电负荷需求,MW; $P_{heat}(t)$ 为 t 时段热负荷需求,MW; $P_{cool}(t)$ 为 t 时段冷负荷需求,MW。

2)电网传输功率约束。

$$P_{grid}^{min}(t) \leq P_{grid}(t) \leq P_{grid}^{max}(t) \quad (9)$$

式中: P_{grid}^{min} 和 P_{grid}^{max} 为VPP与电网并网点允许传输最小和最大功率,MW。

3)CCHP功率约束。

$$\begin{cases} P_{gt}^{min}(t) \leq P_{gt}(t) \leq P_{gt}^{max}(t) \\ P_{ex_{heat}}^{min}(t) \leq P_{ex_{heat}}(t) \leq P_{ex_{heat}}^{max}(t) \\ P_{ex_{cool}}^{min}(t) \leq P_{ex_{cool}}(t) \leq P_{ex_{cool}}^{max}(t) \end{cases} \quad (10)$$

式中: P_{gt}^{min} 和 P_{gt}^{max} 为燃气轮机最小、最大发电功率,MW; $P_{ex_{heat}}^{min}$ 和 $P_{ex_{heat}}^{max}$ 为余热锅炉最小、最大热转换功率,MW; $P_{ex_{cool}}^{min}$ 和 $P_{ex_{cool}}^{max}$ 为余热吸收式制冷机最小、最大冷转换功率,MW。

4)电化学储能设备运行约束。

$$\begin{cases} E_{st}(t_0) = E_{st}(t_0 + T/\Delta t) = E_{st}^0 \\ E_{st}^{min}(t) \leq E_{st}(t) \leq E_{st}^{max}(t) \\ P_{st}^{min}(t) \leq P_{st}(t) \leq P_{st}^{max}(t) \end{cases} \quad (11)$$

式中: t_0 为电化学储能设备在调度运行周期内起始工作时间段; E_{st}^{min} 和 E_{st}^{max} 为电化学储能最小、最大运行容量,MWh; P_{st}^{min} 和 P_{st}^{max} 为电化学储能设备充/放电最小、最大功率,MW。

5)可调电负荷运行约束。

$$\begin{cases} P_{eth}^{min}(t) \leq P_{eth}(t) \leq P_{eth}^{max}(t) \\ P_{etc}^{min}(t) \leq P_{etc}(t) \leq P_{etc}^{max}(t) \\ P_{eh}^{min}(t) \leq P_{eh}(t) \leq P_{eh}^{max}(t) \\ P_{ec}^{min}(t) \leq P_{ec}(t) \leq P_{ec}^{max}(t) \end{cases} \quad (12)$$

式中: P_{eth}^{min} 和 P_{eth}^{max} 为电锅炉最小、最大耗电功率,MW; P_{etc}^{min} 和 P_{etc}^{max} 为电制冷水机最小、最大耗电功率,MW; P_{eh}^{min} 和 P_{eh}^{max} 为电锅炉最小、最大热转换功率,

MW; $P_{ec}^{\min}$ 和 $P_{ec}^{\max}$ 为电制冷水机最小、最大冷转换功率, MW。

4 算例分析

4.1 研究案例参数

选取某 VPP 作为研究对象^[27], 仅研究 1 天夏季典型日参与日前调峰辅助服务, 取 1 h 为一个时段, 聚合的资源为分布式光伏、电化学储能、CCHP、用户侧可调负荷资源, 设备基本参数如表 1 所示。燃气轮机废热能量输入余热锅炉比例 $\alpha_1=20\%$, 则废热能量输入余热式吸收制冷机比例 $\alpha_2=80\%$; 电化学储能设备额定运行容量 2 MWh, 最大充电和放电功率为 0.5 MW, 运行容量区间为 [0.1 MWh, 1.9 MWh], 初始容量为 1 MWh。天然气价格不存在分时属性为 2.4 元/m³, 且低位热值为 36 MJ/m³, 分时电价存在尖峰电价, 如图 3 所示, 夏季典型日负荷曲线和用户侧分布式光伏发电曲线分别如图 4 和图 5 所示。

表 1 设备基本参数
Table 1 Basic parameters of equipment

设备名称	最大出力/MW	最小出力/MW	其他参数
分布式光伏	0.8	0	
燃气轮机	3.0	0.8	热电比 1.85, 发电效率 30%
余热锅炉	1.0	0	制热效率 85%
电锅炉	1.5	0	制热效率 96%
余热吸收式制冷机	4.0	0	制冷性能系数 1.50
电制冷水机	3.0	0	制冷性能系数 3.25

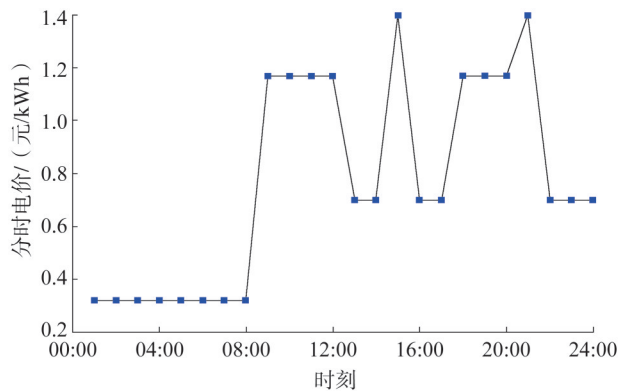


图 3 分时电价曲线

Fig.3 Time of use electricity price curve

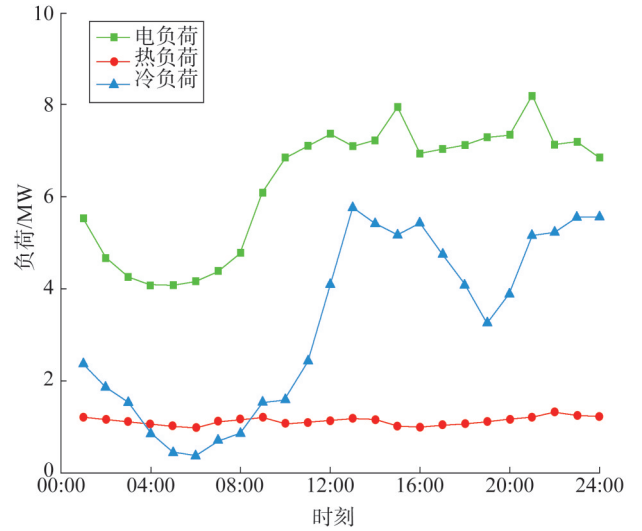


图 4 夏季典型日负荷曲线

Fig.4 Typical daily load curves in summer

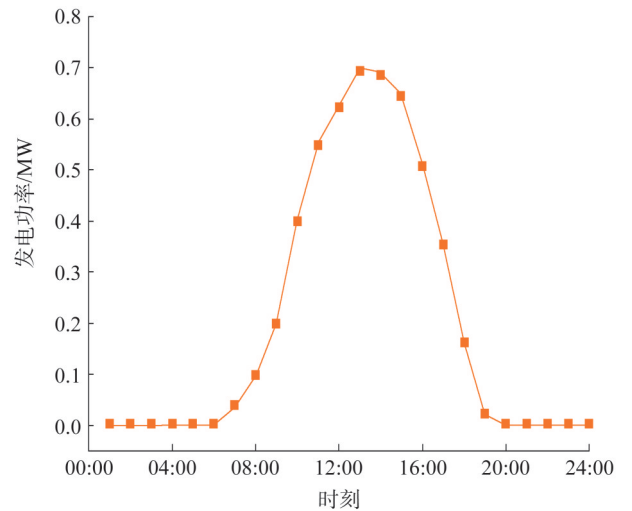


图 5 夏季典型日分布式光伏发电曲线

Fig.5 Typical daily PV power generation curve in summer

4.2 参与调峰分析

为研究 VPP 参与调峰辅助服务对日前协同优化策略的影响, 选取某次参与调峰辅助服务市场化交易出清结果作为对比分析, 市场化出清结果如图 6 所示。设置场景 1: 未参与市场化交易; 场景 2: 参与调峰辅助服务。比较 2 种情景的优化结果, 各个设备协同调控策略的情况如图 7—图 9 所示。

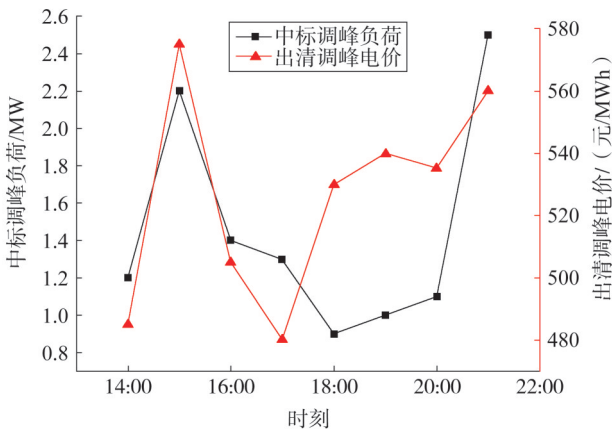


图6 调峰辅助服务出清曲线

Fig.6 Peak shaving auxiliary service clearance curve

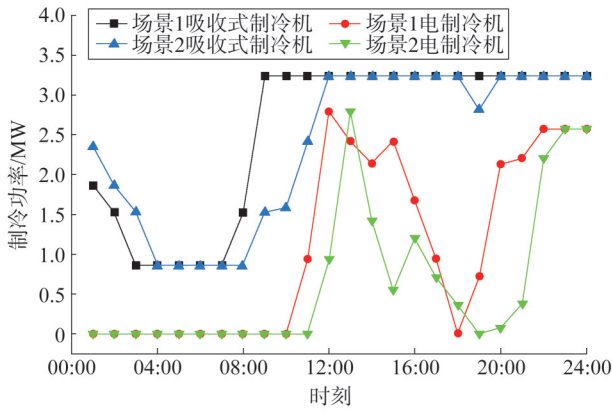


图9 制冷设备出力曲线

Fig.9 Refrigeration equipment output curve

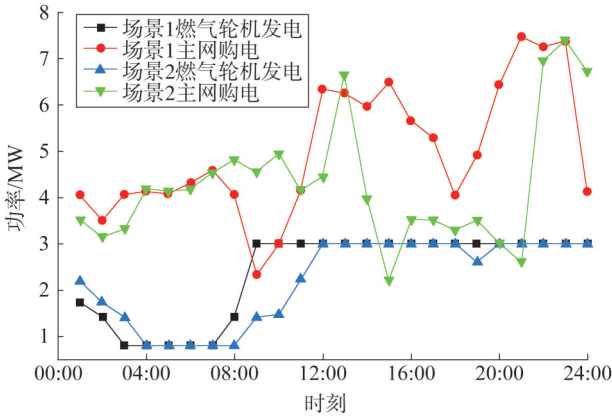


图7 发电设备出力曲线

Fig.7 Power generation equipment output curve

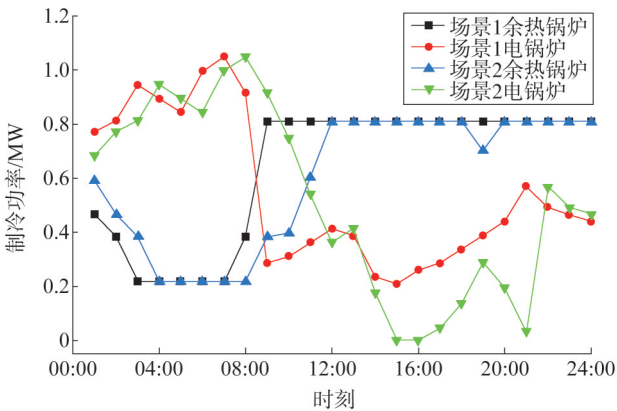


图8 制热设备出力曲线

Fig.8 Heating equipment output curve

图7表明在参与调峰辅助服务交易的13:00—21:00,场景2从主网购电功率明显小于场景1,特别是在14:00—15:00和20:00—21:00存在尖峰电价,差距最为明显;从08:00开始的峰电价时段,燃气轮机发电出力逐渐升高,用以满足逐渐升高的用电及用冷负荷需求。图8和图9表明余热锅炉、吸收式制冷机与燃气轮机变化曲线相一致,但是场景2的电锅炉、电制冷水机的制热、制冷功率在参与调峰时段比场景1的整体要低,用以满足调峰负荷压降的需求。表2表明不同运行场景下一个运行周期优化目标情况,在未参与市场化交易时,市场交易收益0元,购气费用40 819.83元,购电费用95 825.35元,优化目标136 645.18元;在参与调峰辅助服务市场交易时,市场交易收益6 183.50元,购气费用41 376.78元,购电费用70 139.22元,优化目标105 332.50元,比场景1累计节约运行成本31 312.68元,在支撑大电网安全稳定运行的同时获得经济性收益,进一步兼顾了VPP冷热电负荷需求和运行成本收益。

表2 一个运行周期优化目标情况

Table2 Optimization results in one cycle of operation.

情景	优化目标/元	购电费用/元	购气费用/元	市场交易收益/元
1	136 645.18	95 825.35	40 819.83	0.00
2	105 332.50	70 139.22	41 376.78	6 183.50

5 结束语

针对 VPP 参与调峰辅助服务市场,如何制定日前运行优化运行策略的问题进行了研究,提出了 VPP 参与调峰辅助服务运行架构,在考虑 VPP 典型可控资源特性基础上,建立了电化学储能、CCHP、可调电负荷运行优化模型。以综合经济性效益最优原则,引入“有效/出清调峰电量”作为衡量各调控时段内 VPP 调控成效的结算依据,构建了考虑调峰辅助服务的 VPP 日前优化模型,计及平衡约束、设备运行约束条件并对优化模型求解。未考虑电能量与辅助服务市场之间衔接机制,特别是调峰辅助服务与现货电能量交易之间的衔接,未来将进一步研究 VPP 参与多市场交易品种融合场景下的运行优化,并进一步建立“日前计划、日内滚动、实时校正”调控滚动优化机制。

参考文献

- [1] 王永真,潘崇超,韩恺,等.“双碳”目标下中国综合能源服务的态势辨析与理论架构[J].全球能源互联网,2023,6(4):379-389.
WANG Yongzhen, PAN Chongchao, HAN Kai, et al. Situation identification and theory architecture of integrated energy services under dual carbon goal in China [J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(4): 379-389.
- [2] 康重庆,陈启鑫,苏剑,等.新型电力系统规模化灵活资源虚拟电厂科学问题与研究框架[J].电力系统自动化,2022,46(18):3-14.
KANG Chongqing, CHEN Qixin, SU Jian, et al. Scientific problems and research framework of virtual power plant with enormous flexible distributed energy resources in new power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 3-14.
- [3] 高洪超,陈启鑫,金泰,等.考虑虚拟电厂灵活调节特性的现货市场出清模型及灵活性溢价评估方法[J].电网技术,2023,47(1):194-207.
GAO Hongchao, CHEN Qixin, JIN Tai, et al. Spot market clearing model and flexible premium evaluation method considering flexible regulation of virtual power plant [J]. Power System Technology, 2023, 47(1): 194-207.
- [4] 弭轍,胡健祖,郭珍妮,等.新型电力系统体系下新能源发展态势及市场化消纳研究[J].山东电力技术,2023,50(10):1-8.
MI Zhe, HU Jianzu, GUO Zhenni, et al. Research on the development situation and market-oriented consumption of renewable energy under new power system architecture [J]. Shandong Electric Power, 2023, 50(10): 1-8.
- [5] PUDJANTO D, RAMSAY C, STRBAC G. Virtual power plant and system integration of distributed energy resources [J]. IET Renewable Power Generation, 2007, 1(1): 10.
- [6] SCHULZ C, RÖDER G, KURRAT M. Virtual power plants with combined heat and power micro-units [C] // 2005 International Conference on Future Power Systems. IEEE, 2006: 204-232.
- [7] DONDI P, BAYOUMI D, HAEDERLI C, et al. Network integration of distributed power generation [J]. Journal of Power Sources, 2002, 106(1/2): 1-9.
- [8] MORAIS H, KADAR P, CARDOSO M, et al. VPP operating in the isolated grid [C] // 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. IEEE, 2008: 1-6.
- [9] PANDŽIĆH, KUZLE I, CAPUDER T. Virtual power plant mid-term dispatch optimization [J]. Applied Energy, 2013, 101: 134-141.
- [10] LOMBARDI P, POWALKO M, RUDION K. Optimal operation of a virtual power plant [C] // 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting. IEEE, 2009: 1-6.
- [11] MORAIS H, CARDOSO M, CASTANHEIRA L, et al. VPPs information needs for effective operation in competitive electricity markets [C] // 2007 5th IEEE International Conference on Industrial Informatics. IEEE, 2007: 1183-1188.
- [12] 国家电网有限公司. 虚拟电厂建设运营技术规范: Q/GDW 12286—2022 [S]. 北京: 中国电力出版, 2023.
- [13] International Electrotechnical Commission. Virtual Power Plants - Part 2: Use Cases; IEC TS 63189-2 [S]. London: Bsigroup, 2018.
- [14] 王宣元,刘敦楠,刘秦,等.泛在电力物联网下虚拟电厂运营机制及关键技术[J].电网技术,2019,43(9):3175-3183.
WANG Xuanyuan, LIU Dunnann, LIU Zhen, et al. Operation mechanism and key technologies of virtual power plant under ubiquitous Internet of Things [J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3175-3183.
- [15] 何奇琳,艾芊.售电侧放开环境下含需求响应虚拟电厂的电力市场竞价策略[J].电力建设,2019,40(2):1-10.
HE Qilin, AI Qian. Bidding strategy of electricity market including virtual power plant considering demand response under retail power market deregulation [J]. Electric Power Construction, 2019, 40(2): 1-10.
- [16] 杨甲甲,赵俊华,文福拴,等.含电动汽车和风电机组的虚拟发电厂竞价策略[J].电力系统自动化,2014,38(13):92-102.
YANG Jiajia, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. Development of bidding strategies for virtual power plants considering uncertain outputs from plug-in electric vehicles and wind generators [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(13): 92-102.
- [17] 周亦洲,孙国强,黄文进,等.计及电动汽车和需求响应的多类电力市场下虚拟电厂竞标模型[J].电网技术,2017,41(6):1759-1767.
ZHOU Yizhou, SUN Guoqiang, HUANG Wenjin, et al. Strategic

- bidding model for virtual power plant in different electricity markets considering electric vehicles and demand response [J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 1759-1767.
- [18] 方燕琼,甘霖,艾芊,等.基于主从博弈的虚拟电厂双层竞标策略[J].电力系统自动化,2017,41(14):61-69.
- FANG Yanqiong, GAN Lin, AI Qian, et al. Stackelberg game based bi-level bidding strategy for virtual power plant [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(14): 61-69.
- [19] 龚超,张轩,赵越,等.考虑虚拟电厂可调能力的综合需求响应市场出清策略[J].南方电网技术,2021,15(12):56-65.
- GONG Chao, ZHANG Xuan, ZHAO Yue, et al. Market clearing strategy of integrated demand response considering adjustable capacity of virtual power plant [J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(12): 56-65.
- [20] 林毓军,苗世洪,杨炜晨,等.面向多重不确定性环境的虚拟电厂日前优化调度策略[J].电力自动化设备,2021,41(12):143-150.
- LIN Yujun, MIAO Shihong, YANG Weichen, et al. Day-ahead optimal scheduling strategy of virtual power plant for environment with multiple uncertainties [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(12): 143-150.
- [21] 赵昊天,王彬,潘昭光,等.支撑云-群-端协同调度的多能园区虚拟电厂:研发与应用[J].电力系统自动化,2021,45(5):111-121.
- ZHAO Haotian, WANG Bin, PAN Zhaoguang, et al. Research and application of park-level multi-energy virtual power plants supporting Cloud-Cluster-End multi-level synergetic dispatch [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(5): 111-121.
- [22] 梅光银,龚锦霞,郑元黎.考虑风光出力相关性和碳排放限额的多能互补虚拟电厂的调度策略[J].电力系统及其自动化学报,2021,33(8):62-69.
- MEI Guangyin, GONG Jinxia, ZHENG Yuanli. Scheduling strategy for multi-energy complementary virtual power plant considering the correlation between wind and solar output and carbon emission quota [J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2021, 33(8): 62-69.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 汪洋叶,赵力航,常伟光,等.基于模型预测控制的虚拟电厂储能系统能量协同优化调控方法[J].智慧电力,2021,49(7):16-22.
- WANG Yangye, ZHAO Lihang, CHANG Weiguang, et al. Model predictive control based energy collaborative optimization control method for energy storage system of virtual power plant [J]. Smart Power, 2021, 49(7): 16-22.
- [26] 国家能源局山西监管办公室.山西独立储能和用户可控负荷参与电力调峰市场交易实施细则(试行)[EB/OL].(2021-02-19)[2023-08-28]. <http://sxb.nea.gov.cn/adminContent/initViewContent.do?pk=297eb7f4768960110176978828db0006>.
- [27] 耿健,杨冬梅,高正平,等.含储能的冷热电联供分布式综合能源微网优化运行[J].电力工程技术,2021,40(1):25-32.
- GENG Jian, YANG Dongmei, GAO Zhengping, et al. Optimal operation of distributed integrated energy microgrid with CCHP considering energy storage [J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(1): 25-32.

收稿日期:2024-01-19

修回日期:2024-06-11

作者简介:

耿健(1991),通信作者(657345910@qq.com),男,硕士,工程师,研究方向为虚拟电厂运行优化、综合能源仿真建模;

金玉龙(1995),男,硕士,工程师,研究方向为电力市场、电网企业代理购售电;

杨宇峰(1983),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统自动化;

曹敬(1983),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力系统自动化;

武锡锦(1995),女,硕士,工程师,研究方向为电力市场。

(责任编辑 郑天茹)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2024.12.007

基于时间序列数据挖掘的常规机组爬坡性能估计

刘恩仁¹, 高 嵩^{1*}, 白 卓², 杨子江³, 李乐蒙⁴, 李 军¹

(1. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250003; 2. 国网天津市电力公司城南供电分公司 天津 300201;
3. 山东科技大学电气与自动化工程学院, 山东 青岛 266590; 4. 国网山东省电力公司建设公司 山东 济南 250000)

摘要:随着新能源发电并网规模以及电网负荷峰谷差的不断扩大, 电网电力平衡难度日益增加。火电等常规机组的爬坡性能是电网调节机组出力、维护电力平衡的重要参数。提出一种基于时间序列数据挖掘的常规机组爬坡性能估计方法。首先, 利用均值变化检测方法确定机组自动发电控制(automatic generation control, AGC)指令中的同向大范围连续调节数据段, 并得到对应时间段的机组实发功率数据段; 其次, 在对机组实发功率数据段进行分段线性表示的基础上, 采用加权平均的方式得到机组在该时段的爬坡性能值; 最后, 通过对由多组爬坡性能值和AGC指令变化值构成的二维样本集合进行密度峰值挖掘及线性回归分析, 得到机组的爬坡性能估计值及置信区间。所提方法能有效避免机组启停等非正常运行状态造成的爬坡性能估计误差, 对电网利用常规机组的爬坡性能维护电力平衡具有重要意义。

关键词:常规机组; 爬坡性能; 密度峰值挖掘; 线性回归分析

中图分类号: TM614

文献标志码: A

文章编号: 1007-9904(2024)12-0053-08

The Climbing Performance Estimation of Conventional Power Units Based on Time Series Data Mining

LIU Enren¹, GAO Song^{1*}, BAI Zhuo², YANG Zijiang³, LI Lemeng⁴, LI Jun¹

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

2. State Grid Tianjin Electric Power Company Chengnan Power Supply Branch, Tianjin 300201, China;

3. College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China;

4. State Grid Shandong Electric Power Construction Company, Jinan 250000, China)

Abstract: With the continuous expansion of renewable energy generation and the peak-valley differences of power grids, it is difficult to keep power balance in power grids. The climbing performance of conventional generation units is an important parameter, and it is used to regulate unit output and keep power balance. A climbing performance estimation method of conventional generation units is proposed based on time series data mining technique. Firstly, a step-change detection method is adopted to determine the co-directional, large scale changed, continuous adjustment data segment in the automatic generation control (AGC) instructions of the units, and the actual power data segment is obtained in the corresponding time period; Secondly, based on the piece-wise linear representation of the actual power data segments, the climbing performance value is calculated through a weighted average method during the period; Finally, by performing density peak mining and linear regression analysis on the two-dimensional sample set which is composed by multiple sets of climbing performance values and AGC instruction values, the estimated climbing performance and confidence intervals can be obtained. The proposed method can avoid the estimation error of climbing performance caused by the startup and shutdown of the units, as well as other abnormal conditions, and it is of great significance for power grids to keep power balance by utilizing the climbing performance of conventional units.

Keywords: conventional power units; climbing performance; density peak mining; linear regression analysis

基金项目:国家自然科学基金项目(62273214); 国网山东省电力公司电力科学研究院自主研发项目(520626230084)。

National Natural Science Foundation of China (62273214); Independent Research and Development Project of State Grid Shandong Electric Power Research Institute (520626230084).

0 引言

在电力系统中新能源发电占比迅猛提高、电网负荷峰谷差日益加大的新形势下,电网电力平衡面临源-荷两端不确定性的严峻挑战。由于风电、光伏等新能源发电具有无污染、可再生等显著优势,近年来得到了大规模建设和快速发展。2022年我国并网风电和太阳能发电总量已达11 900亿kWh,约占全国总发电量的13.68%^[1]。尽管新能源发电具有自身的固有优势,但其波动性、间歇性和周期性给电网的电力平衡造成了巨大冲击^[2]。另外,受用电需求和季节性因素的影响,电网负荷峰谷差不断扩大,例如2022年我国省级电网日最大错避峰负荷已超过5 000万kW^[1],电网系统中净负荷呈现出日益显著的“鸭型曲线”(Nessie curve)。电网系统中用电负荷的快速变化,也导致了电网电力平衡难度不断加大。因此,当前电网电力平衡面临严峻挑战。

火电等常规机组快速调节出力是电网维护电力平衡的主要手段。为应对新能源发电波动和电网负荷“鸭型曲线”带来的电力平衡挑战,电网调度一般采取快速改变并网常规机组出力来弥补电力不平衡。此种调节措施依靠并网常规机组的快速出力调节,形成电网的灵活负荷调节能力,实现快速弥补新能源发电出力波动和负荷变化导致的电力缺额。常规机组的快速出力调节能力一般称为机组爬坡性能,是衡量机组性能的重要指标,已经成为有功平衡服务内容之一^[3],对电网调度工作具有重要意义^[4-7]。

当前,关于机组爬坡性能的研究主要集中在电网调度运行、性能监测与优化两方面。在电网调度方面,文献[8]在考虑新能源发电不确定性带来的电力系统不确定性的基础上,提出了一种基于数据驱动分布鲁棒机会约束的灵活爬坡备用经济调度模型。文献[9]在考虑火电机组深度调峰运行特性的基础上,建立了可再生能源与火力发电耦合系统的优化调度模型。文献[10]提出了一种考虑机组爬坡能力的能源枢纽低碳经济调度模型。文献[11]针对含确定性爬坡需求调度模型存在的可行性难以保证等问题,提出了一种两阶段鲁棒调度模型。文献[12]考虑爬坡约束严格程度与系统灵活性之间的关系,提出了计及场景覆盖指数与需求侧参与的日内灵活性资源平衡策略。文献[13]以快速消除新能源

机组带来的电网频率偏差为目标,提出了一种基于火电-风电机组调节速率的自动发电控制(automatic generation control, AGC)指令分配方法。文献[14]提出了风电机组的调节速率估计方法。文献[15]研究了应对极端天气情况下风电波动的爬坡备用容量估计方法。文献[16]提出了基于像素重构的数据驱动型爬坡事件识别框架。

在性能监测与优化方面,文献[17]在建立机组理想输出参考模型的基础上,通过对比参考模型输出与机组实际输出,以监测调节周期内机组实发功率的变化速率。文献[18]以实发功率指令跟踪等性能指标,对机组的爬坡性能进行评价。文献[19]以总发电成本等为约束条件,提出了一种实时最优里程调度算法,提高了电网的爬坡性能。文献[20]提出了一种基于深度强化学习的风电场发电控制方法,对风电功率调整速率进行优化。文献[21]讨论了智慧电厂建设背景下的常规机组爬坡性能的优化问题。文献[22]通过采用控制策略优化等方式,提高了机组的爬坡性能。文献[23]将储能的有功功率爬坡率和有功功率基点作为控制变量,提出了一种考虑爬坡率的储能辅助单台常规机组协调控制策略。文献[24]根据新形势下电网平稳运行的实际需求,通过对锅炉主控器参数进行动态调整优化等,使得机组在一定时间内具备较好的爬坡性能。

尽管机组爬坡性能在电网运行中具有重要的意义,尤其是火电等常规机组的爬坡性能,已经成为电网应对源-荷两端不确定性的重要技术参数。当前的相关研究和调度工作中均采用机组的静态爬坡性能值,未充分考虑机组因设备老化、机械部件磨损、机组蓄热量、主蒸汽压力变化等因素导致的运行性能与设计性能之间的差异,制约了电网通过精确调度实现电力平衡。火电等常规机组的爬坡性能估计方法研究结果目前较少,已成为电网调度利用常规机组快速调节出力实现电力平衡的瓶颈问题。

以新形势下电网调度运行的技术需求为出发点,结合山东省网源技术监督服务平台功能深化的需求,以火电机组的历史运行数据为基础,采用时间序列数据挖掘方法估计机组的爬坡性能。所提方法能有效反映机组在日常运行状态下的爬坡性能,对支撑新形势下的电网实时功率平衡与大规模新能源消纳有重要意义。

1 常规机组爬坡性能估计

为便于表述所提出的常规机组爬坡性能估计方法,以 $X_p = \{x_p(n)\}$ 和 $X_c = \{x_c(n)\}$ 分别表示所得到的机组实发功率和 AGC 指令历史数据序列。其中, $n = 1, 2, \dots, N$, n 为样本序数, N 为所得到的数据长度, $x_p(n)$ 和 $x_c(n)$ 为第 n 个数据样本点。

1.1 连续调节数据段查找

为应对新能源发电和用电负荷的快速变化,电网调度中心通过下达 AGC 指令的方式调整并网常规机组的出力。在电网负荷大幅变化的情况下,电网调度中心需要向并网机组连续下达数个增加出力或减少出力指令,以实现电网电力平衡。所以常规机组对连续同向 AGC 指令的响应过程,是对机组爬坡性能的有效反映。

为避免机组启停过程等特殊运行状态带来的爬坡性能估计偏差,需要先准确找出常规机组连续同向 AGC 调节指令数据段,然后以这些数据段的样本索引确定对应的机组实发功率数据段。文中采用均值变化检测的方法找到 AGC 指令连续同向变化数据段。

对 AGC 指令历史数据序列 X_c 进行连续同向变化数据段确定。统计量 $U(n)$ 更新公式为^[25]

$$\begin{cases} U(n) = U(n-1) + V(n) \\ V(n) = \sum_{j=1}^N \text{sign}(x_c(n) - x_c(j)) \end{cases} \quad (1)$$

式中: sign 为符号函数; $V(n)$ 为构成 $U(n)$ 的统计量,其值为 $x_c(n)$ 与所有其他数据样本点 $x_c(j)$ 差值的符号之和, $j = 1, 2, \dots, N$ 且 $j \neq n$ 。当 $n = 1$ 时,统计量 $U(1)$ 初始化为 $U(1) = V(1)$ 。根据所得到的 $U(n)$ 序列确定样本序数 n_s ,使得 $U(n)$ 在 n_s 处取得极大值,对应的 P 值为

$$P = 2\exp\left(\frac{-6 \max_{1 \leq n \leq N} |U(n)|^2}{N^2 + N^3}\right) \quad (2)$$

以得到的 P 为基础进行假设检验,判断 n_s 是否为均值变化点,其中原假设 H_0 和备择假设 H_1 分别为

$$\begin{cases} H_0: P < \alpha \\ H_1: P \geq \alpha \end{cases} \quad (3)$$

式中:参数 α 为检验水准,建议值为 $\alpha = 0.01$ 。当原

假设 H_0 被接受时,则 n_s 为一个阶跃变化点。此时,将 X_c 分为 $X_{c1} = \{x_c(n_1)\}$, $n_1 = 1, 2, \dots, n_s$ 与 $X_{c2} = \{x_c(n_2)\}$, $n_2 = n_s + 1, n_s + 2, \dots, N$ 两个子数据段。

对得到的子数据段 X_{c1} 和 X_{c2} 再分别按照式(1)~式(3)确定其阶跃变化点。重复上述步骤,直到 X_c 中再无新的阶跃变化点被发现,将所得到的所有阶跃变化点及数据段 X_c 的起始与结束样本点位置记为 $N_s = \{n_{s,0}, n_{s,1}, n_{s,2}, \dots, n_{s,M}, n_{s,M+1}\}$,其中, $n_{s,0} = 1, n_{s,M+1} = N$,参数 M 为 X_c 中全部阶跃变化点的数量。

当得到 X_c 的所有均值变化点后,将相邻两个均值变化数据段的均值进行比较,判断 AGC 指令发生增出力调整还是减出力调整,并将判定结果及数据段的起始与结束分段点位置记为三元数组

$$R(m) = \{\delta_m, n_{s,m-1}, n_{s,m+1}\}, m = 1, 2, \dots, M-1 \quad (4)$$

式中: m 为三元数组的序数; δ_m 为 0-1 变量,表示 AGC 指令发生变化的方向, $\delta_m = 1$ 表示 AGC 指令发生非负向变化, $\delta_m = 0$ 表示 AGC 指令发生负向变化。

δ_m 的值按式(5)确定。

$$\delta_m = \begin{cases} 1, & \bar{x}_{s,m} - \bar{x}_{s,m+1} \geq 0 \\ 0, & \bar{x}_{s,m} - \bar{x}_{s,m+1} < 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\bar{x}_{s,m}$ 和 $\bar{x}_{s,m+1}$ 分别为数据段 $\{x_c(n_3)\}$, $n_3 = n_{s,m-1}, n_{s,m-1} + 1, \dots, n_{s,m}$ 与数据段 $\{x_c(n_4)\}$, $n_4 = n_{s,m} + 1, n_{s,m} + 2, \dots, n_{s,m+1}$ 的样本均值。当 $R(m)$ 至 $R(m+z)$ 连续 z 个数据段具有相同 δ_m 取值时,依据 $R(m)$ 的起始样本位置和 $R(m+z)$ 的结束样本位置,从 X_p 中提取机组实发功率数据段,并记为

$$X_{p,g} = \{x_p(n_5)\}, n_5 = n_{s,m-1}, n_{s,m-1} + 1, \dots, n_{s,m+z+1} - 1 \quad (6)$$

式中: g 为所提取实发功率数据段的计数序数, $g = 1, 2, \dots, G$, G 为从 X_p 中提取机组实发功率数据段总数量; z 为正整数变量,其值根据连续具有相同取值的 δ_m 数量确定。

1.2 数据的分段线性表示

对式(6)中得到的机组实发功率数据段 $X_{p,g}$ 进行分段线性表示。分段线性表示的基本思想是用若干直线段对数据序列进行近似表示,进而获得数据序列的量化信息。对所得到的数据序列 $X_{p,g}$,采用滑动窗口方式获得其分段线性表示。假设 $X_{p,g}$ 在第 k 个窗口内的数据段 $B_k = \{x_p(w)\}$ 可以由直线段近似表示, w 为 B_k 中的数据样本点序数, $w = 1, 2, \dots, L_w$, L_w 为窗口内数据的长度, $L_w \leq W$, W 为预先设定的滑动

窗口宽度,则数据段 B_f 的近似直线段方程为

$$\hat{x}_p(w) = \hat{b}_k w + \hat{a}_k, w \in [1, L_w] \quad (7)$$

式中: k 为滑动窗口的序数,取值为正整数 $\hat{a}_k$ 、 $\hat{b}_k$ 分别为拟合直线的截距和斜率。参数 $\hat{a}_k$ 、 $\hat{b}_k$ 满足 B_f 与其近似数据段 $\hat{B}_f(\hat{B}_f = \{\hat{x}_p(w)\}, w = 1, 2, \dots, L_w)$ 之间的误差平方和最小化,即

$$(\hat{a}_k, \hat{b}_k) = \arg \min_{\hat{a}_k, \hat{b}_k} \sum_{w=1}^{L_w} (x_p(w) - \hat{a}_k - \hat{b}_k w)^2 \quad (8)$$

参数 $\hat{a}_k$ 、 $\hat{b}_k$ 可按照式(9)一式(10)估计得到。^[26]

$$\hat{b}_k = \frac{\sum_{w=1}^{L_w} (w \cdot x_p(w)) - \sum_{w=1}^{L_w} w \sum_{w=1}^{L_w} x_p(w)}{L_w \sum_{w=1}^{L_w} w^2 - \left(\sum_{w=1}^{L_w} w \right)^2} \quad (9)$$

$$\hat{a}_k = \bar{x}_p(w) - \hat{b}_k w \quad (10)$$

式中: $\bar{x}_p(w) = \sum_{w=1}^{L_w} \hat{x}_p(w) / L_w$ 。由于 X_p 为随机变化数据序列,因此对于数据段 B_f 是否可以由单个直线段进行近似表示需要进行判断,具体可按照式(11)进行。

$$\begin{cases} d(w) < \eta_{th}, & \forall w \in [1, L_w - 1] \\ d(w) \geq \eta_{th}, & \exists w \in [1, L_w] \end{cases} \quad (11)$$

式中:参数 η_{th} 为分段阈值; $d(w)$ 为样本点到拟合直线的欧式距离,即

$$d(w) = \frac{|\hat{b}_k \cdot w + \hat{a}_k - x_p(w)|}{\sqrt{\hat{b}_k^2 + 1}} \quad (12)$$

当 B_f 的前 $L_w - 1$ 个样本点的线性表示结果 $\hat{x}_p(w)$ 到拟合直线段的距离 $d(w)$ 均小于给定的分段阈值 η_{th} , 而第 L_w 个数据点计入窗口时,存在数据样本点 $x_p(w)$, 其线性表示结果 $\hat{x}_p(w)$ 距离拟合直线段的距离大于分段阈值 η_{th} 时,则将 $\{x_p(w)\}$ 作为一个新的分段, $w = 1, 2, \dots, L_w - 1$, 并根据式(7)得到其分段线性表示,然后将窗口移动至第 L_w 个数据样本 $x_p(L_w)$, 即令 $x_p(L_w)$ 作为当前窗口的第 1 个数据样本。重复上述操作,得到 $X_{p,g}$ 的全部分段线性表示结果。

假设根据式(7)一式(10)分别得到所有 $X_{p,g}$ 的 K_g 个分段线性表示结果,并将各个分段中实发功率的幅值变化量记为 $\hat{\Delta}_k$, 则 $\hat{\Delta}_k$ 的取值为

$$\hat{\Delta}_k = \hat{b}_k (L_k - 1) \quad (13)$$

式中: L_k 为 $X_{p,g}$ 中第 k 个分段线性表示数据段的长度, $k = 1, 2, \dots, K_g$ 。其中, K_g 为 $X_{p,g}$ 的分段线性表示

数据段数量。

由于机组在连续的负荷调整过程中,爬坡性能会受机组蓄热量、主蒸汽压力变化等影响,出现较大的波动变化,因此,采用各 $X_{p,g}$ 中各分段线性表示结果的斜率 $\hat{b}_k$ 的平均值作为机组在 $X_{p,g}$ 时的爬坡性能,即

$$\hat{r}_g = \frac{1}{K_g} \sum_{k=1}^{K_g} \hat{b}_k \quad (14)$$

式中: $\hat{r}_g$ 为机组在 $X_{p,g}$ 时的爬坡性能。相应地,机组在 X_{ps} 时的实发功率变化量为各分段线性表示结果的变化量之和,即

$$\hat{\Delta}_g = \sum_{k=1}^{K_g} \hat{\Delta}_k \quad (15)$$

式中: $\hat{\Delta}_g$ 为机组在 X_{ps} 时的实发功率变化量。以所有 $X_{p,g}$ 的爬坡性能估计值 $\hat{r}_g$ 和实发功率幅值变化量 $\hat{\Delta}_g$ 构成的二维样本点记为集合 S , 并将 S 记为

$$S = \{(\hat{\Delta}_g, \hat{r}_g)\}, g = 1, 2, \dots, G \quad (16)$$

式中:参数 G 为从 X_p 中提取机组实发功率数据段总数量。

1.3 爬坡性能估计

对集合 S , 在以幅值变化量 $\hat{\Delta}_g$ 为横轴、以爬坡性能值 $\hat{r}_g$ 为纵轴的二维平面上,绘制其散点图,则图中样本点密集的区域表明机组在该区域内多次以类似爬坡性能进行功率调整。换言之,在该区域临近的幅值变化量下,机组大概率会以类似爬坡性能进行功率调整。相反,密度较低的点则表示在该区域内机组会小概率表现出类似的爬坡性能。基于上述一般性原理,采用密度峰值聚类方法^[27]对 S 的散点分布进行密度峰值挖掘,所得到的密度峰值点表示机组在该点临近区域将会最大概率以类似爬坡性能进行功率调整。

为计算集合 S 中样本点的密度,先对二维平面的横轴(幅值变化量)和纵轴(爬坡性能值)进行等间隔网格化,其中纵轴网格化间隔宽度记为 Δ_H ,横轴网格化间隔宽度记为 Δ_V 。然后,定义样本点落入各个网格内的数量作为该区间内的样本密度值 $\rho_{h,v}$ 。

$$\rho_{h,v} = C \{(\hat{\Delta}_g, \hat{r}_g) | \Delta_H(h-1) < \hat{\Delta}_g \leq \Delta_H h \text{ 且 } \Delta_V(v-1) < \hat{r}_g \leq \Delta_V v\}, h = 1, 2, \dots, H, v = 1, 2, \dots, V \quad (17)$$

式中: $C\{\cdot\}$ 为求取集合中的元素数量; h 、 v 分别为纵轴、横轴网格化区间序号; H 、 V 分别为纵轴和横轴的

量化区间数量。最后,依次选择横轴各区间内密度最大值的网格内的样本点作为密度峰值样本点集 $S_{\max}$ 。

$$S_{\max} = \{(\hat{\Delta}_i, \hat{r}_h) | i = \arg \max_v \{\rho_{h,v}\}, v = 1, 2, \dots, V\} \quad (18)$$

$$h = 1, 2, \dots, H$$

式中: i 为在第 h 个纵向量化区间中使得样本密度值 $\rho_{h,v}$ 取最大值的横向量化区间序数; $\hat{\Delta}_i$ 为实发功率幅值变化量。

由于机组的出力调节分为增出力与减出力两种情况,故将密度峰值样本点集 $S_{\max}$ 依据 $\hat{\Delta}_i$ 的正负划分为增出力密度峰值样本点集 $S_{\max}^+$ 和减出力密度峰值样本点集 $S_{\max}^-$ 。

$$\begin{cases} S_{\max}^+ = \{(\hat{\Delta}_i, \hat{r}_h) | (\hat{\Delta}_i, \hat{r}_h) \in S_{\max} \text{ 且 } \hat{\Delta}_i > 0\} \\ S_{\max}^- = \{(\hat{\Delta}_i, \hat{r}_h) | (\hat{\Delta}_i, \hat{r}_h) \in S_{\max} \text{ 且 } \hat{\Delta}_i < 0\} \end{cases} \quad (19)$$

考虑到习惯以直线段表述机组的爬坡特性^[18],故采用线性回归对 $S_{\max}^+$ 和 $S_{\max}^-$ 进行拟合。以点集 $S_{\max}^+$ 为例,其线性回归值为

$$\tilde{r}_h = \hat{a}_{\max}^+ \hat{\Delta}_i + \hat{b}_{\max}^+ \quad (20)$$

式中:参数 $\hat{a}_{\max}^+$ 与 $\hat{b}_{\max}^+$ 可按照式(9)一式(10)确定; $\tilde{r}_h$ 的 $(1 - \alpha)\%$ 置信区间为

$$[\tilde{r}_h - t_{\alpha/2} \sigma_{\tilde{r}_h}, \tilde{r}_h + t_{\alpha/2} \sigma_{\tilde{r}_h}] \quad (21)$$

式中: $+t_{\alpha/2}$ 、 $-t_{\alpha/2}$ 分别为 t 分布的 $(1 - \alpha)\%$ 置信区间上界、下界。

$$\sigma_{\tilde{r}_h} = \sigma_{\tilde{r}} \sqrt{1 + \frac{1}{I} + \frac{(\hat{\Delta}_i + \bar{\Delta})^2}{\sum_{i=1}^I (\hat{\Delta}_i + \bar{\Delta})^2}} \quad (22)$$

式中: $\sigma_{\tilde{r}} = \sqrt{\sum_{h=1}^H (\tilde{r}_h - \hat{r}_h)^2 / (I - 2)}$; $\bar{\Delta}$ 为 $\hat{\Delta}(i)$ 的样本均值; I 为集合 $S_{\max}^+$ 中的样本数量。对减出力密度峰值样本点集 $S_{\max}^-$,可类似地得到式(20)中的线性方程。式(20)中的线性回归方程是对式(15)中机组单次爬坡性能的综合,避免机组因蓄热量多等特殊情形导致的爬坡性能虚高,从宏观上揭示机组爬坡性能与实发功率幅值变化量之间的关系。

2 应用案例

以山东某 300 MW 火电机组爬坡性能估计为例,说明所提出方法的具体应用流程。

首先,采集该机组 AGC 指令和实发功率测点 6

个月的历史数据,数据采样周期为 1 s。根据式(1)一式(3)对 AGC 指令数据进行阶跃数据段识别,并根据式(4)中 δ_m 的取值对连续同向数据段进行合并,得到 AGC 指令连续同向功率调节数据段。图 1 中给出了选择到的部分 AGC 指令连续同向功率调节数据段。

其次,依据所得到的 AGC 指令连续同向功率调节数据段索引,提取相应位置的实发功率数据,如图 1(a)、图 1(b)中浅红色和浅绿色背景所标记的红色虚线数据段,并对这些数据段进行分段线性表示。为说明分段线性表示的效果,图 2 给出了 8 组实发功率数据段及其分段线性表示结果,图中的黑色虚线表示分段位置。

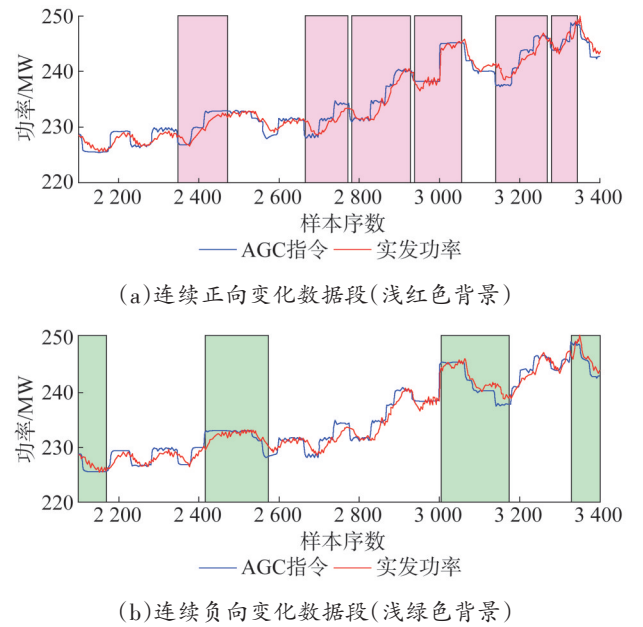


图 1 部分连续调节数据段

Fig.1 Several continuous regulating data segments

最后,对所选择的机组实发功率连续同向变化数据段,利用式(14)一式(15)分别计算其爬坡性能估计值和实发功率幅值变化量。图 2 中给出了 8 组所选数据的爬坡性能估计值。取 $\Delta_H = 2$ 、 $\Delta_V = 0.8$,依据式(17)一式(18),对由所有幅值变化量和爬坡性能值构成的二维样本点集合 S 进行密度峰值挖掘,得到集合 S 中密度峰值样本点,图 3 中给出了所得到的密度峰值样本点。依据式(20)一式(22)对增出力与减出力密度峰值点分别进行线性回归分析,

得到的线性回归程为

$$\begin{cases} \hat{r}_h = 0.0214\hat{\Delta}_i + 2.0832, & \forall \hat{\Delta}_i \in S_{\max}^+ \\ \hat{r}_h = 0.0161\hat{\Delta}_i - 2.0533, & \forall \hat{\Delta}_i \in S_{\max}^- \end{cases} \quad (23)$$

图4分别给出了增出力和减出力密度峰值样本点的线性回归结果及其置信区间。

由增出力回归系数(0.0214)大于减出力回归系

数(0.0161)可知,该机组的增出力爬坡性能要优于该机组的减出力爬坡性能。但通过观察图4可知,在同一置信水平下,该机组的增出力爬坡性能的置信区间明显宽于减出力爬坡性能置信区间,因此该机组的增出力爬坡性能所具有的不确定性要高于减出力爬坡性能。

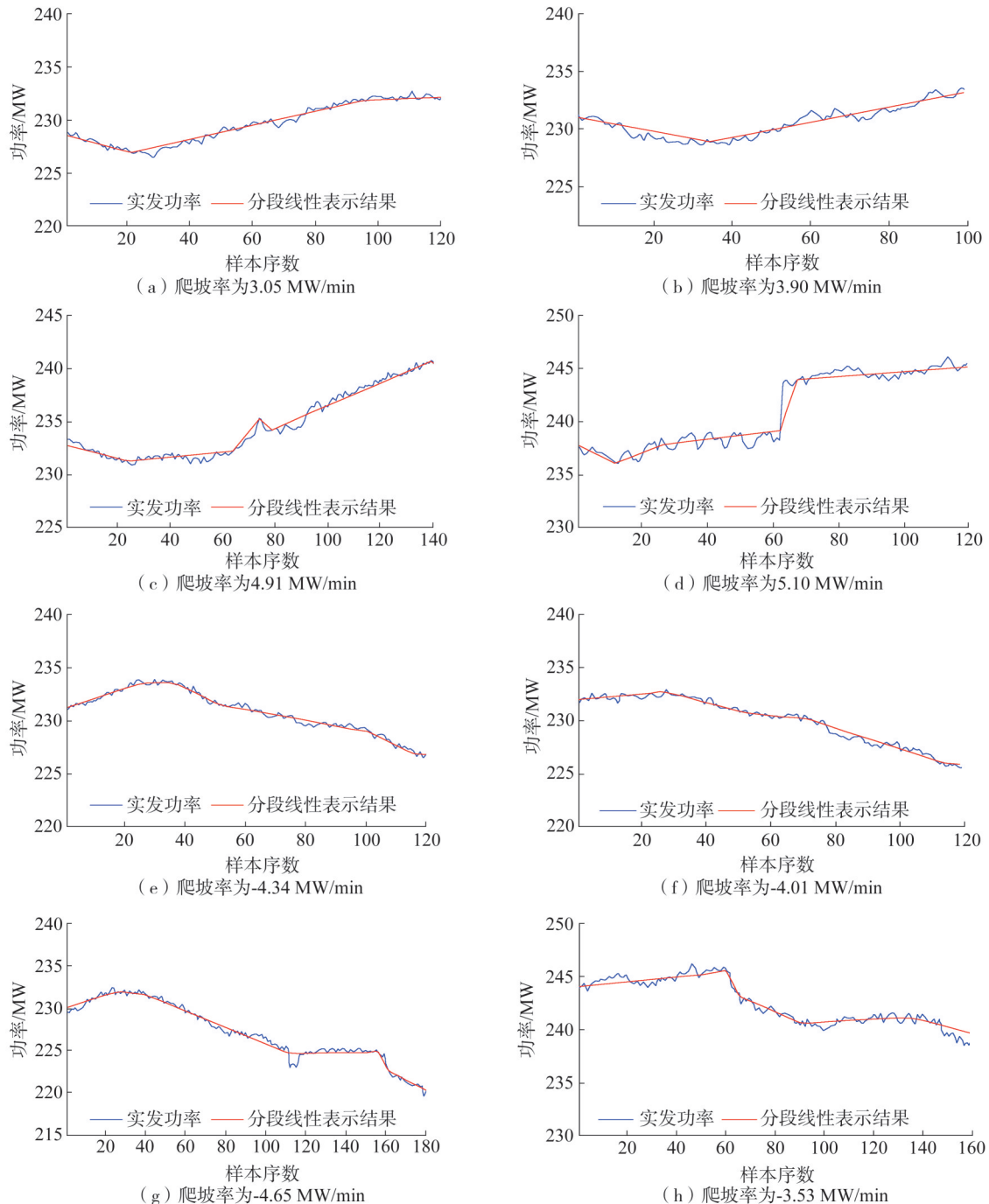


图2 部分实发功率数据段及其分段线性表示

Fig.2 Data segments of the actual power and the corresponding piecewise linear representation

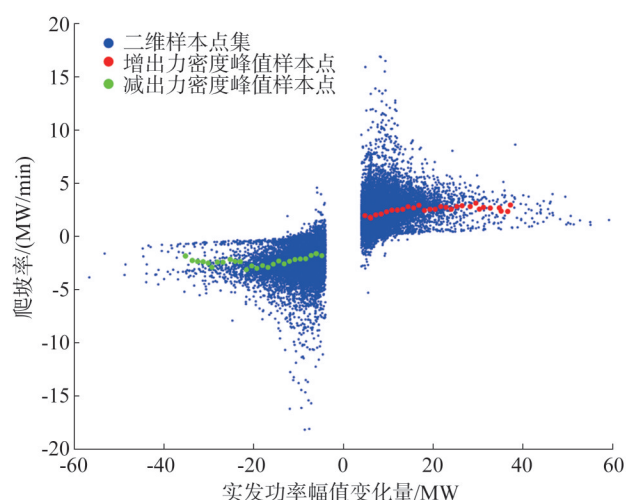
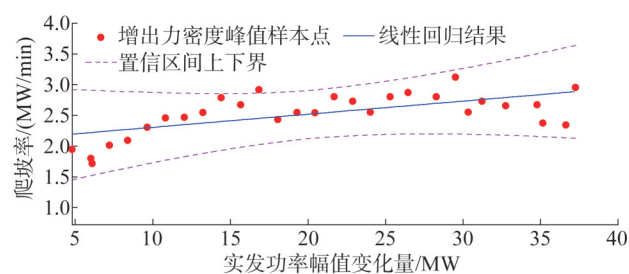
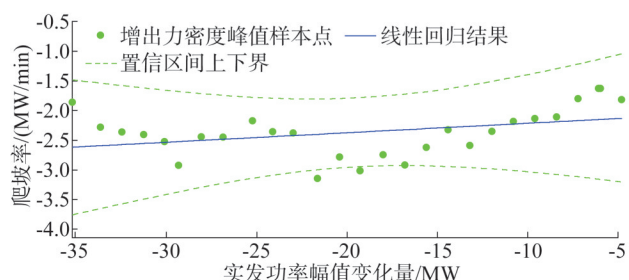


图3 二维样本点集 S 以及增、减出力密度峰值样本点

Fig.3 The two dimensional sample data sets, as well as the increasing and decreasing load points with the density peak values.



(a) 增出力密度峰值样本点回归分析结果



(b) 减出力密度峰值样本点回归分析结果

图4 密度峰值点的线性回归结果

Fig.4 The linear regression results of the points with the density peak values.

3 结束语

提出一种基于时间序列数据挖掘的常规机组爬坡性能估计方法。该方法以机组运行数据为基础,通过挖掘可反映机组爬坡性能的连续同向负荷调节数据段,得到机组单次爬坡性能值及实发功率幅值变化量等信息,再对单次爬坡性能和实发功率幅值

变化量进行回归关系建模,以所得到的回归模型系数作为机组爬坡性能的度量。

所提方法对历史数据量要求较大,且得到的爬坡性能估计结果为统计意义上的结论,对于机组单次爬坡性能而言,具有潜在的保守性。因此,后续可结合机组工况划分等策略,开展机组的单次爬坡性能预测等问题研究。

参考文献

- [1] 中国电力企业联合会. 中国电力行业年度发展报告 2023[EB/OL]. (2023-07-07)[2023-09-20]. <https://www.cec.org.cn/detail/index.html?3-322625>.
- [2] VEERS P, DYKES K, LANTZ E, et al. Grand challenges in the science of wind energy[J]. Science, 2019, 366(6464): 443-452.
- [3] 国家能源局. 电力辅助服务管理办法[EB/OL]. (2021-12-21)[2023-09-20]. http://zfxxgk.nea.gov.cn/2021-12/21/c_1310391161.htm.
- [4] HASAN F, KARGARIAN A. Topology-aware learning assisted branch and ramp constraints screening for dynamic economic dispatch[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(5): 3495-3505.
- [5] 何成明, 杨金刚, 王洪涛, 等. 应对风电功率爬坡事件备用需求分析和预防控制[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 51-57.
- [6] LEI C, BU S Q, WANG Q G, et al. Look-ahead rolling economic dispatch approach for wind-thermal-bundled power system considering dynamic ramping and flexible load transfer strategy[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(1): 186-202.
- [7] HE Chengming, YANG Jingang, WANG Hongtao, et al. Reserve demand analysis and preventive control strategy to deal with wind power ramp[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 51-57.
- [8] 李明节, 陈国平, 董存, 等. 新能源电力系统电力电量平衡问题研究[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 3979-3986.
- [9] LI Mingjie, CHEN Guoping, DONG Cun, et al. Research on power balance of high proportion renewable energy system[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 3979-3986.
- [10] 王浩元, 别朝红. 考虑不确定性物理边界的灵活爬坡备用分布鲁棒经济调度[J/OL]. 电力自动化设备: 1-11 [2023-09-20]. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202308032>.
- [11] WANG Haoyuan, BIE Zhaohong. Distributionally robust economic dispatch of flexible ramping reserve considering physical boundaries of uncertainty[J/OL]. Electric Power Automation Equipment: 1-11 [2023-09-20]. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202308032>.
- [12] 杨龙杰, 周念成, 胡博, 等. 计及火电阶梯式爬坡率的耦合系统优化调度方法[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 153-164.
- [13] YANG Longjie, ZHOU Niancheng, HU Bo, et al. Optimal scheduling method for coupled system based on ladder-type ramp

- rate of thermal power units[J].Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1):153-164.
- [10] 朱西平,罗健,李姿霖,等.考虑灵活爬坡产品的能源枢纽低碳经济调度[J].电力自动化设备,2023,43(1):9-15.
ZHU Xiping, LUO Jian, LI Zilin, et al. Low-carbon economic dispatching of energy hub considering flexible ramping product[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(1):9-15.
- [11] 马洪艳,负靖洋,严正.基于分布鲁棒优化的灵活爬坡备用调度方法[J].中国电机工程学报,2020,40(19):6121-6132.
MA Hongyan, YUN Jingyang, YAN Zheng. Distributionally robust optimization based dispatch methodology of flexible ramping products[J].Proceedings of the CSEE, 2020, 40(19):6121-6132.
- [12] 亢丽君,王蓓蓓,薛必克,等.计及爬坡场景覆盖的高比例新能源电网平衡策略研究[J].电工技术学报,2022,37(13):3275-3288.
KANG Lijun, WANG Beibei, XUE Bike, et al. Research on the balance strategy for power grid with high proportion renewable energy considering the ramping scenario coverage[J].Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(13):3275-3288.
- [13] 高嵩,路宽,张琳,等.基于火电—风电机组调节速率的电网AGC指令分配方法[J].山东电力技术,2022,49(2):41-46.
GAO Song, LU Kuan, ZHANG Lin, et al. AGC command allocation method based on ramp rates of thermal power generating units and wind turbines[J].Shandong Electric Power, 2022, 49(2):41-46.
- [14] 李军,刘恩仁,王敏,等.基于时间序列分段的风电机组调节速率估计[J].科学技术与工程,2021,21(27):11609-11614.
LI Jun, LIU Enren, WANG Min, et al. Ramp rate estimation of wind power generation units based on time series segmentation [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(27):11609-11614.
- [15] 王康,张青蕾,王泽,等.高比例风电系统的爬坡备用需求评估[J].电网与清洁能源,2022,38(8):94-101.
WANG Kang, ZHANG Qinglei, WANG Ze, et al. Evaluation of ramping reserve requirement for high-proportion wind power systems[J].Power System and Clean Energy, 2022, 38(8):94-101.
- [16] 卢楠滢.风电功率爬坡事件识别技术研究[D].北京:华北电力大学,2022.
- [17] LOBATO E, EGIDO I, ROUCO L. Monitoring frequency control in the Turkish power system[J].Electric Power Systems Research, 2012, 84(1):144-151.
- [18] BONDY D E M, THAVLOV A, TOUGAARD J B M, et al. Performance requirements modeling and assessment for active power ancillary services[C]// 2017 IEEE Manchester PowerTech. IEEE, 2017:1-6.
- [19] ZHANG X S, XU Z, YU T, et al. Optimal mileage based AGC dispatch of a GenCo[J].IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(4):2516-2526.
- [20] VIJAYSHANKAR S, STANFEL P, KING J, et al. Deep reinforcement learning for automatic generation control of wind farms[C]// 2021 American Control Conference (ACC). IEEE, 2021:1796-1802.
- [21] 赵俊杰,冯树臣,孙同敏,等.基于ICS和弹性运行控制技术在燃煤智慧电厂AGC优化应用[J].能源科技,2020,18(3):1-6.
ZHAO Junjie, FENG Shuchen, SUN Tongmin, et al. AGC optimization application of coal-fired intelligent power plants based on ICS and elastic operation control technology[J].Energy Science and Technology, 2020, 18(3):1-6.
- [22] 沈乾坤,吴恒运,杨涛,等.超临界350 MW循环流化床机组模拟量控制系统及AGC优化[J].热力发电,2020,49(5):126-131.
SHEN Qiankun, WU Hengyun, YANG Tao, et al. Optimization of analog control system and AGC for a supercritical 350 MW circulating fluidized bed unit[J].Thermal Power Generation, 2020, 49(5):126-131.
- [23] 赵源筱,耿光超,江全元,等.考虑功率变化速率的储能辅助单机调频控制策略[J].电力自动化设备,2020,40(1):141-147.
ZHAO Yuanxiao, GENG Guangchao, JIANG Quanyuan, et al. Frequency control strategy of single-generator supporting by energy storage considering power change rate[J].Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1):141-147.
- [24] 尚洪奎,赵博,朱志军,等.考虑电网运行备用的火电机组负荷快速调节研究与实施[J].工程技术研究,2020,2(9):31-32.
SHANG Hongkui, ZHAO Bo, ZHU Zhiyun, et al. Research and implementation of fast load regulation of thermal power units considering standby operation of power grid[J].Engineering and Technological Research, 2020, 2(9):31-32.
- [25] XU J W, WANG J D, IZADI I, et al. Performance assessment and design for univariate alarm systems based on FAR, MAR, and AAD [J].IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2012, 9(2):296-307.
- [26] CHATTERJEE S, HADI A S. Regression Analysis by Example [M].5th ed. New York: Wiley, 2012.
- [27] RODRIGUEZ A, LAIO A. Clustering by fast search and find of density peaks[J].Science, 2014, 344(6191):1492-1496.

收稿日期:2023-09-26

修回日期:2024-03-20

作者简介:

刘恩仁(1992),男,硕士,工程师,主要从事火电机组调频性能优化工作;

高嵩(1980),通信作者(13573158636@163.com),男,硕士,高级工程师,主要从事发电机组技术监督、发电机组控制并网性能优化研究;

白卓(1997),女,主要从事电力系统自动化运行及输配电工程管理工作;

杨子江(1981),男,博士,讲师,主要从事发电系统性能评价、工业生产过程异常监测研究;

李乐蒙(1991),男,硕士,工程师,主要从事输变电工程前期及建设管理工作;

李军(1979),男,正高级工程师,主要从事发电机组控制性能优化与技术监督工作。

(责任编辑 车永强)

SF₆/N₂混合气体隔离开关接触不良时的温度分布及诊断判据研究

张丕沛^{1*}, 孙国峰², 李杰¹, 汪鹏¹, 王江伟¹

(1. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250003; 2. 国网山东省电力公司烟台供电公司, 山东 烟台 264000)

摘要:含SF₆/N₂混合气体的气体绝缘金属封闭开关设备(gas insulated switchgear, GIS)可有效降低环境污染,目前已逐渐在220 kV及以下GIS中推广应用。由于混合气体的对流换热特性不同于纯SF₆气体, GIS内部的温度分布规律也不同,而目前混合气体已应用于隔离开关气室,考虑到隔离开关接触不良引起发热是较为常见的缺陷,因此有必要对SF₆/N₂混合气体隔离开关接触不良时的温度分布开展研究。建立国内典型型号220 kV SF₆/N₂混合气体隔离开关三维等比例的温度场仿真计算模型,对不同接触电阻、不同运行电流时混合气体隔离开关的温度分布规律开展计算分析。结果显示,当接触电阻逐渐增大时,导体最高温度增长速度较快,且始终位于动静触头插接处;罐体表面最高温度始终位于动静触头插接处正上方,变化趋势较慢。梳理不同运行电流下、触头插接处温度达到90℃时的罐体表面温差,将其作为诊断内部严重发热缺陷的判据值,有助于混合气体隔离开关因接触不良引起严重发热缺陷的现场快速诊断。

关键词:混合气体;接触不良;温度分布;多物理场耦合;缺陷诊断

中图分类号:TM216

文献标志码:B

文章编号:1007-9904(2024)12-0061-08

Research on Temperature Distribution and Diagnostic Criteria for Poor Contact of SF₆/N₂ Mixed Gas Disconnecter

ZHANG Pipei^{1*}, SUN Guofeng², LI Jie¹, WANG Peng¹, WANG Jiangwei¹

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

2.State Grid Yantai Power Supply Company, Yantai 264000, China)

Abstract: GIS containing SF₆/N₂ mixed gas can effectively reduce environmental pollution and has gradually been applied in GIS at 220 kV and below, including disconnector chamber. Considering that poor contact of disconnector is a common defect, it is necessary to study the temperature distribution of SF₆/N₂ mixed gas disconnector during poor contact. This article established a 3D simulation model of a typical model of 220 kV SF₆/N₂ mixed gas disconnector, and calculated the temperature distribution law of the mixed gas disconnector under different contact resistances and operating currents. The results showed that when the contact resistance increases, the highest temperature of the conductor was always located at the insertion point of the moving and stationary contacts, and the growth rate was faster with the increase of contact resistance. The highest temperature on the surface of the shell was always located directly above the insertion point, and the trend of change was relatively slow. Further the temperature difference on the shell surface when the temperature at the insertion point reached 90℃ was sort out, and serving as a criterion value for diagnosing severe internal heating defects using the shell surface temperature difference, which was helpful for the on-site rapid diagnosis of severe heating defects caused by poor contact in mixed gas disconnector.

Keywords: mixed gas; poor contact; temperature distribution; multi-physical coupling; defect diagnosis

0 引言

传统的气体绝缘金属封闭开关设备(gas insulated

switchgear, GIS)将断路器、隔离开关、母线等设备封闭在金属罐体内部,并充入具有高绝缘强度的SF₆气体,减小了设备的占地面积,提高了设备的运行可靠性^[1-3]。虽然SF₆气体具有较强的绝缘性能,但当GIS设备发生气体泄漏时,进入空气中的SF₆气体带来的环境污染和温室效应不可忽略^[4-8]。新兴的SF₆/N₂混

基金项目:国家电网有限公司科技项目(520626220048)。
Science and Technology Project of State Grid Corporation of China
(520626220048)。

合气体 GIS 通过充入混合比为 $\text{SF}_6:\text{N}_2=3:7$ 、气压为 0.6 MPa 的混合气体,在保证气体绝缘性能的同时,大大减少了 SF_6 气体使用量,目前已在 220 kV 及以下电压等级的 GIS 设备母线气室、隔离开关气室试点应用^[9-13]。

对于 GIS 隔离开关气室内部接触不良这一常见缺陷,通常采用 GIS 罐体表面温度测试的方式,对气室内部触头插接处的温度进行间接计算,进而开展接触不良的诊断分析,但 SF_6/N_2 混合气体的传热能力与纯 SF_6 气体必然存在一定程度的差异,混合气体隔离开关气室的温度分布规律也与传统 GIS 隔离开关气室不同,因此有必要对混合气体隔离开关,特别是隔离开关存在接触不良缺陷时的温度分布开展计算分析。

文献[14-17]对不同电压等级 GIS 的隔离开关接触不良时的温度分布进行了仿真计算,研究了动静触头间不同接触电阻时触头温度和罐体温度的变化规律,总结了接触不良缺陷的诊断分析方法,但研究均在纯 SF_6 气体隔离开关设备上开展,无法应用于混合气体隔离开关的缺陷诊断。文献[18-20]采用仿真和试验相结合的方式,研究了 SF_6/N_2 混合气体在 GIS 内部的传热特性,但仿真和试验只针对母线气室,未考虑隔离开关气室以及接触不良的影响。

根据国内在运 220 kV 典型型号的 SF_6/N_2 混合气体 GIS 隔离开关气室的实际结构原理及尺寸大小,搭建了考虑电磁场-流体场-温度场耦合的有限元仿真模型,通过对仿真模型施加不同大小的触头接触电阻和运行电流,计算分析隔离开关接触不良时的触头温度及罐体表面温度的变化规律,并对利用罐体表面温差进行接触不良缺陷的诊断方法进行研究总结。

1 混合气体隔离开关温度场计算方法

220 kV SF_6/N_2 混合气体隔离开关气室通常为三相分箱布置,其温度场的计算过程较为复杂,既要考虑电磁场-温度场之间的耦合,也要分析流体场-温度场之间的耦合过程。

1.1 电磁场与温度场的耦合

结合电磁场基本理论和隔离开关设备运行特点,混合气体隔离开关内部的热源以导体焦耳发热和罐体环流发热为主。导体和罐体均为铝合金材

质,其电阻率与温度为负相关,关系式为

$$\rho_m(T) = \rho_{m20} [1 + \alpha(T - 20)] \quad (1)$$

式中: $\rho_m(T)$ 为温度 T 时铝合金的电阻率; ρ_{m20} 为 20 °C 时铝合金的电阻率,本文取 $1.41 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$; α 为铝合金电阻率的温度系数,本文取 $3.89 \times 10^{-3}/\text{K}$ 。由于温度 T 为待求量,因此需对温度 T 赋初值(本文取 20 °C),在迭代计算过程中反复求解更新电阻率 $\rho_m(T)$,直至温度场计算结果收敛。

焦耳发热为运行电流流过隔离开关内部空心导体产生的热量。由于趋肤效应的影响,交流电流主要分布在空心导体表面,而在导体内部电流密度较小,此时发热功率不能直接用导体的电阻率进行计算。引入导体单位长度上的交流阻抗 Z_{AC} ,则空心导体的焦耳发热功率可以表示为

$$P_d = I^2 \text{real}(Z_{AC}) \quad (2)$$

$$Z_{AC} = \frac{k \rho_m(T)}{2\pi d_2} \cdot \frac{I_0(kd_2)K_1(kd_1) + K_0(kd_2)I_1(kd_1)}{I_1(kd_2)K_1(kd_1) - K_1(kd_2)I_1(kd_1)} \quad (3)$$

式中: P_d 为单位长度空心导体的焦耳发热功率; I 为导体运行电流的有效值; $\text{real}(Z_{AC})$ 为导体交流阻抗的实部; d_1 和 d_2 分别为空心导体的内径和外径,相关尺寸参数在下文建模过程中给出; $k = [j\omega\mu_L/\rho_m(T)]^{1/2}$, $\omega = 100\pi \text{ rad/s}$ 为角频率, μ_L 为磁导率,铝合金材质的导体和罐体均取 $1.4 \times 10^{-6} \text{ H/m}$; I_0 、 I_1 、 K_0 、 K_1 为分别为一类零阶贝塞尔函数、一类一阶贝塞尔函数、二类零阶贝塞尔函数、二类一阶贝塞尔函数^[21]。

罐体环流发热是由于罐体交链了导体电流激发的工频磁场,在罐体内部产生感应电动势进而产生环流。考虑到罐体较薄,可忽略趋肤效应的影响,因此可近似认为环流在罐体横截面上为均匀分布,交流电阻与直流电阻相等。从而利用同轴导体磁场分布经验公式及法拉第电磁感应定律,计算得到罐体环流大小 I_k 为

$$I_k = \frac{\omega\mu_L I (D_2^2 - D_1^2)}{\rho_m(T)} \cdot \ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right) \quad (4)$$

式中: D_1 和 D_2 分别为罐体的内径和外径。

进一步计算得到罐体单位长度上的环流发热功率为

$$P_k = \frac{\omega^2 \mu_L^2 I^2 (D_2^2 - D_1^2)}{\pi \rho_m(T)} \ln^2\left(\frac{D_2}{D_1}\right) \quad (5)$$

在对导体电流 I 、初始温度 T 、导体和罐体尺寸

赋值后,式(3)和式(5)中,等号右侧各变量均为已知量,可直接计算导体焦耳发热功率 P_d 、罐体环流发热功率 P_k ,作为热源激励施加于导体和罐体温度场计算过程中,如式(6)所示。

$$q_m = \begin{cases} P_d, \text{导体内部} \\ P_k, \text{壳体内部} \end{cases} \quad (6)$$

式中: q_m 为单位长度导体和罐体自身发热产生的热量。

此时导体和罐体的温度分布可以用能量守恒方程来计算,即内能变化量等于内部热源产生的能量加上外部物质输入的能量,表达式为

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

式中: ρ_m 和 C_m 分别为铝合金的密度和比热容; q_c 和 q_r 分别为相邻固体单元间热传导传输的能量和导体、罐体之间的热辐射传输的能量,其计算公式可进一步表示为:

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

$$q_r = \frac{\sigma \pi D_1 \left(\left(\frac{T_d}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_b}{100} \right)^4 \right)}{\frac{1}{\varepsilon} + \frac{D_2}{D_1} \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)} \quad (9)$$

式中; λ_m 为铝合金的导热系数,本文取 $1500 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; σ 为斯蒂芬玻尔兹曼常数,取值为 $5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$; T_d 和 T_b 分别为迭代计算中读取的导体外表面温度和罐体内表面温度; ε 为铝合金的表面辐射率,本文取 $0.88^{[22]}$ 。

1.2 流体场与温度场的耦合

SF₆/N₂混合气体隔离开关导体与罐体的温度分布计算,不能忽略混合气体的对流传热作用。对流传热过程同样需要用能量守恒方程来计算,不同的是混合气体内部无发热源,因此能量守恒方程表示为内能变化量等于外界输入的能量,即

$$\rho_g C_g \mathbf{u} \nabla T = \nabla(\lambda_g \nabla T) \quad (10)$$

混合气体对流传热还需满足流体质量守恒方程和动量守恒方程,即

$$\nabla(\rho \mathbf{u}) = 0 \quad (11)$$

$$\rho(\mathbf{u} \nabla) \mathbf{u} = \nabla \left\{ -p \mathbf{I} + \mu \left[\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T \right] - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} \right\} + g \Delta \rho \quad (12)$$

式(10)一式(12)中: ρ_g 、 C_g 、 λ_g 、 p 、 μ 、 $\Delta \rho$ 分别为混合

气体的密度、比定压热容、导热系数、压强、气体动力黏度、气体热膨胀引起的密度差,上述参数的赋值方法将在下文中具体列出; $g=10 \text{ m/s}^2$,为重力加速度; $\mathbf{u}$ 和 $\mathbf{I}$ 分别为速度矢量和单位矩阵; ∇ 为拉普拉斯算子^[23]。

求解式(7)一式(10)构成的偏微分方程组,需明确不同物质交界面上的边界条件,包括罐体-外界空气交界面 S_1 、导体-混合气体交界面 S_2 、罐体-混合气体交界面 S_3 。

对于罐体外表面与外界空气的交界面 S_1 来说,当外界环境温度在计算过程中可以视为恒定不变,此时罐体-外界空气交界面 S_1 满足对流传热边界条件为

$$\lambda_m \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}_1} \bigg|_{S_1} = h(T - T_a) \quad (13)$$

式中: T_a 为外界空气温度,本文取 $25 \text{ }^\circ\text{C}$; h 为罐体与外界空气间的对流传热系数,本文取 $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; $\mathbf{n}_1$ 为交界面 S_1 的法向量。

式(13)所示的对流传热边界条件仅适用于界面处流体温度为已知量的情形,而交界面 S_2 、 S_3 处混合气体的温度为未知量,故仅能用接触面边界条件来表征:

$$\begin{cases} T_d|_{S_2} = T_{g2}|_{S_2} \\ \lambda_m \frac{\partial T_d}{\partial \mathbf{n}_2} \bigg|_{S_2} = \lambda_g \frac{\partial T_{g2}}{\partial \mathbf{n}_2} \bigg|_{S_2} \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} T_b|_{S_3} = T_{g3}|_{S_3} \\ \lambda_m \frac{\partial T_b}{\partial \mathbf{n}_3} \bigg|_{S_3} = \lambda_g \frac{\partial T_{g3}}{\partial \mathbf{n}_3} \bigg|_{S_3} \end{cases} \quad (15)$$

式中: T_{g2} 和 T_{g3} 分别为混合气体在交界面 S_2 和 S_3 处的温度; $\mathbf{n}_2$ 和 $\mathbf{n}_3$ 分别为交界面 S_2 和 S_3 的法向量。

2 混合气体隔离开关温度场仿真模型

2.1 隔离开关接触不良的模拟

参照 220 kV SF₆/N₂混合气体隔离开关气室的构造原理和实际尺寸,在有限元仿真软件 Comsol 中搭建三维等比例的仿真模型,如图1所示。隔离开关气室总长为 1200 mm ,罐体的外直径、内直径分别为 162 mm 、 150 mm ,空心导体的外直径、内直径分别为 70 mm 、 64 mm 。

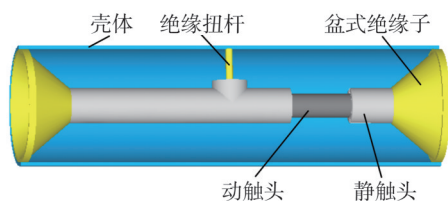


图1 混合气体隔离开关仿真模型

Fig.1 Mixed gas disconnector Simulation Model

隔离开关在长期运行过程中,其传动机构容易出现锈蚀卡涩等异常,从而导致隔离开关分合闸不到位,若动触头合闸后的位置未能与静触头良好接触,则会造成接触不良的缺陷,动、静触头之间的接触电阻会随着两者之间接触面积的减小产生不同程度的增大。

为模拟动、静触头之间的接触不良状态,在动、静触头搭接处增设厚度为1 mm、电阻率可调的电阻膜,如图2所示,从而可以对动、静触头间的接触电阻进行任意调整,实现不同程度接触不良的模拟。

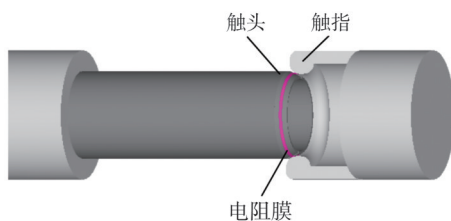


图2 电阻膜示意图

Fig.2 Schematic diagram of resistance film

2.2 隔离开关温度分布的迭代计算

式(10)~式(12)中所涉及的混合气体热特性参数,包括密度、比定压热容、导热系数、气体动力黏度,均与混合气体的温度和气压的相关。鉴于混合气体隔离开关气室气压恒定为0.6 MPa,故上述热特性参数只受温度 T 的影响,从而与式(1)中的电阻率 $\rho_m(T)$ 相同,需要在迭代计算过程中不断求解更新。

表1给出了 SF_6 、 N_2 及混合气体在初始温度 $T=20\text{ }^\circ\text{C}$ 时的热特性参数值^[24],其中混合气体的相关参数由文献[25]中提出的多组分气体参数计算公式求得。每一步迭代计算后的气体参数,需使用有限元仿真软件Comsol中内置的函数计算当前温度下的 SF_6 、 N_2 气体的参数,再代入多组分气体参数计算公

式计算混合气体参数。

表1 气体热特性参数

Table1 Gas thermal characteristic parameters

气体	密度/ (kg/m^3)	动力黏度/ ($10^{-5}\text{Pa}\cdot\text{s}$)	导热系数/ [$\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$]	比定压热容/ [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]
SF_6	5.988	1.582	0.012 88	625.3
N_2	1.162	1.794	0.025 15	1 003
混合气体	4.245	1.916	0.011 79	808.1

混合气体隔离开关温度场的整体仿真计算流程如图3所示。

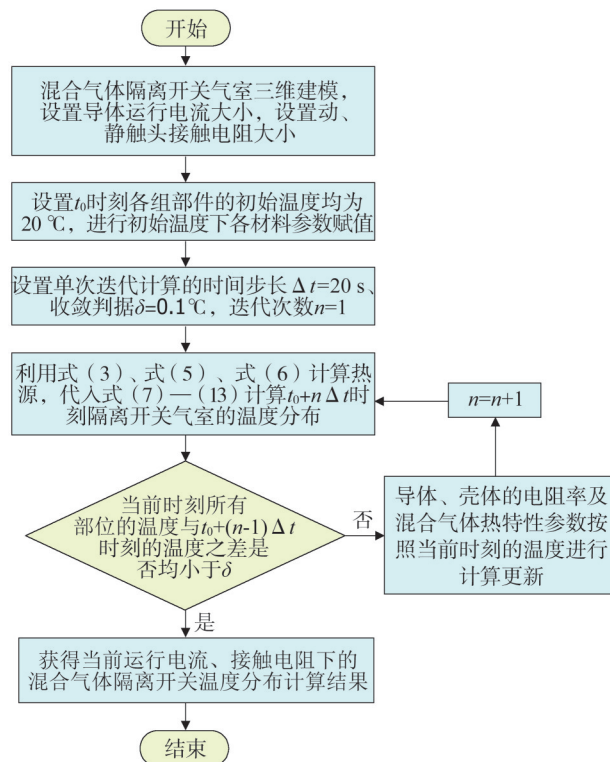


图3 温度场仿真计算流程

Fig.3 Temperature field calculation flowchart

3 混合气体隔离开关温度场计算结果

本文开展的混合气体隔离开关温度场仿真计算,均在额定气体混合比 $\text{SF}_6:\text{N}_2$ 为3:7、额定气压0.6 MPa下开展。考虑到运行电流的大小是影响导体及罐体发热程度的主要因素,故主要针对不同运行电流时混合气体隔离开关导体和罐体的温度分布

开展计算研究。

3.1 额定电流 3 150 A 时的温度分布

将动静触头接触电阻分别设置为 50 $\mu\Omega$ (正常接触)、200 $\mu\Omega$ 、400 $\mu\Omega$ 时,导体和罐体的温度分布如图 4—图 6 所示。

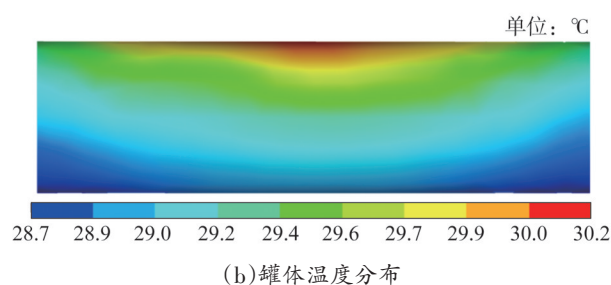
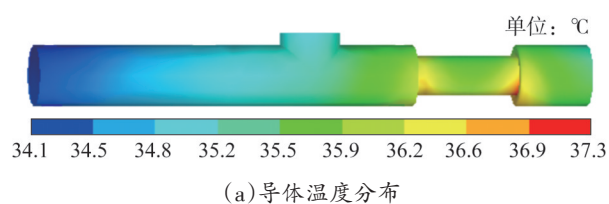


图 4 正常接触时的温度分布

Fig.4 Temperature distribution during normal contact

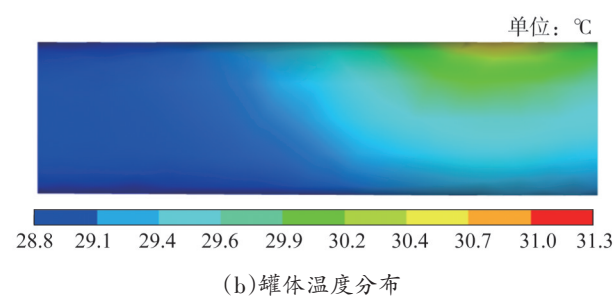
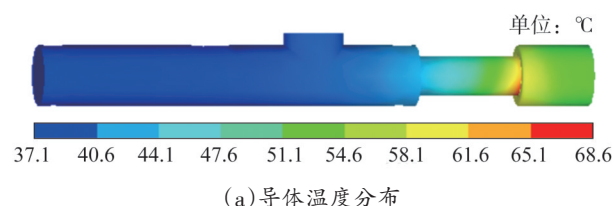


图 5 接触电阻 200 $\mu\Omega$ 时的温度分布

Fig.5 Temperature distribution at resistance of 200 $\mu\Omega$

可以看出,当隔离开关动静触头正常接触时,导体最高温度为 37.3 $^{\circ}\text{C}$,位于动静触头插接的位置,导体其余位置的温度在 35 $^{\circ}\text{C}$ 左右;由于气体的对流作用,罐体表面的最高温度出现在顶部,为 30.2 $^{\circ}\text{C}$,罐体底部温度最低,为 28.7 $^{\circ}\text{C}$ 。

当动静触头接触电阻为 200 $\mu\Omega$ 时,导体动静触

头插接处的温度已达 68.6 $^{\circ}\text{C}$,将当前温度最高点的温度与正常运行时相同位置的温度差简记为温差,则相对正常运行时相同位置的温差为 31.3 K;罐体表面的最高温度出现在动静触头插接处正上方,为 31.3 $^{\circ}\text{C}$,温差仅为 1.1 K。

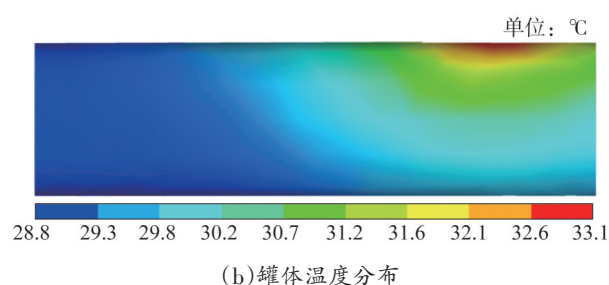
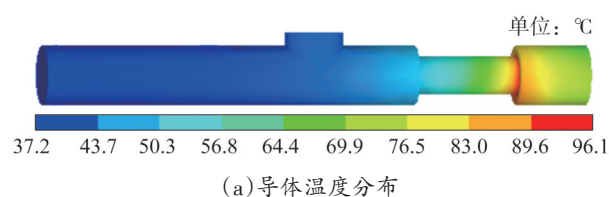


图 6 接触电阻 400 $\mu\Omega$ 时的温度分布

Fig.6 Temperature distribution at resistance of 400 $\mu\Omega$

便于对比,接触电阻为 400 $\mu\Omega$ 时的导体最高温度、温差及罐体最高温度、温差,与正常接触、接触电阻为 200 $\mu\Omega$ 时计算结果共同列于表 2,可见对于混合气体 GIS 隔离开关,当动静触头接触不良而发热时,罐体表面的温度变化并不明显,温差仅为 1~10 K。

表 2 不同接触电阻时导体和罐体温度对比

Table2 Comparison of conductor and shell temperatures under different contact resistances

接触电阻	导体		罐体	
	最高温度/ $^{\circ}\text{C}$	温差/K	最高温度/ $^{\circ}\text{C}$	温差/K
正常接触	37.3		30.2	
200 $\mu\Omega$	68.6	31.3	31.3	1.1
400 $\mu\Omega$	96.1	58.8	33.1	2.9

继续计算运行电流为 3 150 A、不同接触电阻时的导体和罐体温度分布,可以得出导体表面最高温度和罐体表面最高温度随接触电阻的变化情况

如图7所示。可以看出,导体表面最高温度在随接触电阻的增大而升高的同时,其变化曲线的斜率却逐渐变小,这是由于导体温度越高,导体周围气体受到加热后温度也越高,气体密度和比定压热容均随着温度升高而增大,而这两个参数的增大意味着气体对流传热能力的增强,导体热量被更多的传递至罐体表面(罐体最高温度变化曲线的斜率实际是逐渐增大的,只是受坐标轴刻度影响,图中观察并不明显)。

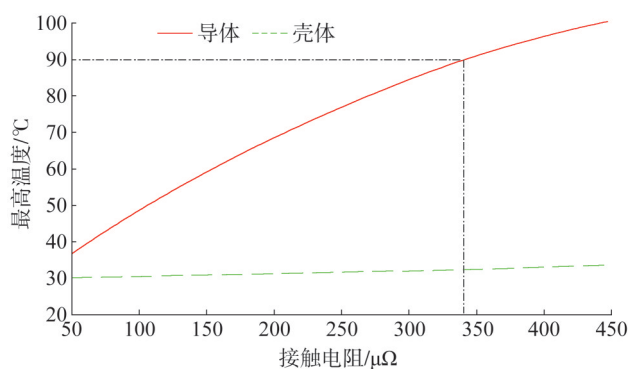


图7 温度随接触电阻变化曲线(3 150 A)

Fig.7 Temperature variation curve with contact resistance under 3150A operating current

根据电力企业标准 DL/T 664—2016《带电设备红外诊断应用规范》,隔离开关插接处热点温度大于 90 °C 即可诊断为严重发热缺陷,而从图7中可以看出,隔离开关动静触头插接处温度达到 90 °C 时,罐体表面最高温度为 32.7 °C,温差为 2.5 K。从而可以认为,当隔离开关运行电流为 3 150 A 时,“罐体表面温差大于 2.5 K”可以判断内部插接处存在严重发热缺陷。

3.2 不同运行电流时的温度分布

为进一步研究不同运行电流时,导体和罐体的温度分布规律,设置混合气体隔离开关运行电流为 1 000 A、2 000 A 和 3 150 A,导体表面最高温度和罐体表面最高温度随接触电阻的变化曲线如图8和图9所示。可以看出,当接触电阻不变时,随着负荷电流的减小,导体和罐体表面最高温度也有不同程度的减小;接触电阻越大时,负荷电流对温度的影响越显著。

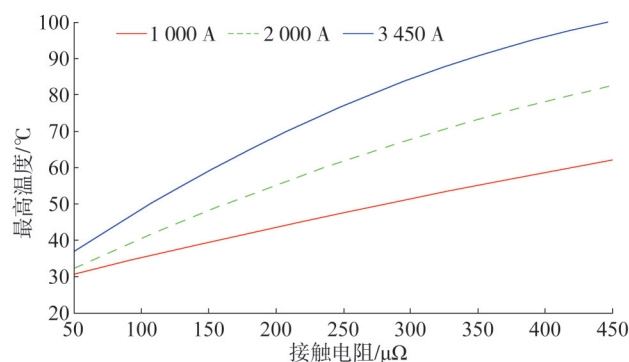


图8 导体最高温度随接触电阻变化曲线

Fig.8 Max temperature of conductor variation curve with contact resistance

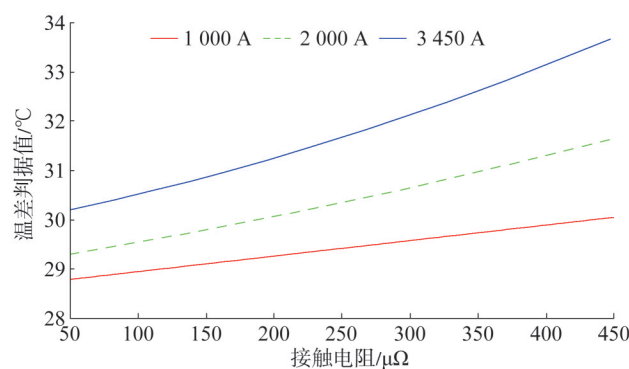


图9 罐体最高温度随接触电阻变化曲线

Fig.9 Max temperature of shell variation curve with contact resistance

从图8可以看出,当接触电阻增大至 450 μΩ, 2 000 A 和 1 000 A 运行电流下的导体最高温度尚未达到严重发热缺陷的判据值 90 °C。因此在 2 000 A 和 1 000 A 运行电流下继续增大接触电阻进行温度计算,记录不同运行电流时,导体最高温度达到 90 °C 时罐体最高温度及温差,如表3所示。

表3 不同运行电流时罐体温度及温差

Table3 Shell temperature and temperature difference under different operating currents

运行 电流/A	正常接触时 罐体最高温度/°C	插接处温度达到 90 °C 时	
		罐体最高温度/°C	温差/K
3 150	30.2	32.7	2.5
2 000	29.4	32.5	3.1
1 000	28.9	32.4	3.5

可以看出,当隔离开关动静触头正常接触时,随着运行电流变小,罐体最高温度也随之变小,这是因为运行电流减小导致了罐体环流的减小,罐体环流发热量下降,此时导体温度较低(均不超过40℃),罐体环流发热是影响罐体表面温度的主要因素。

而当动静触头插接处温度达到90℃时,不同运行电流时罐体表面最高温度的差异很小,这是由于此时导体对罐体的热量传递成为决定罐体表面温度的主要因素。

综合以上两点原因,隔离开关不同运行电流时,利用罐体表面温差诊断内部严重发热缺陷的判据值也有所不同。由表3可知,这一判据值随运行电流的减小而增大,继续开展不同运行电流时(1 000~3 150 A)隔离开关动静触头接触不良时的温度计算,可以得出罐体表面温差判据值随运行电流的变化情况如图10所示。

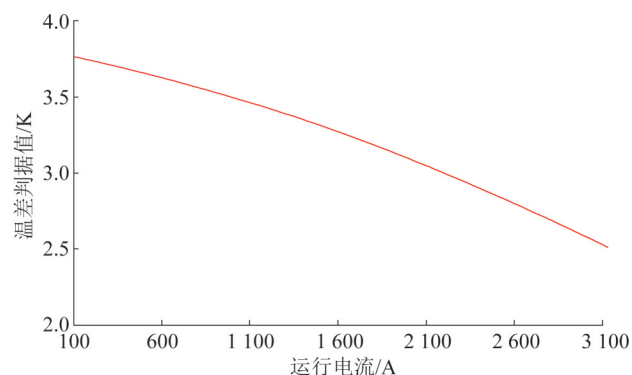


图10 温差判据值随运行电流变化曲线

Fig.10 Curve of temperature difference criterion value changing with operating current

在现场应用时,可以通过开展SF₆/N₂混合气体GIS隔离开关红外测温,测量罐体表面温差并查阅当前运行电流大小,利用图10中判据值与运行电流的对应关系,判断该型号在运的混合气体隔离开关是否存在接触不良引起的严重发热缺陷。结构尺寸相似的其他型号SF₆/N₂混合气体GIS隔离开关,同样可以参考本文的研究结果。

4 结束语

根据220 kV典型型号的SF₆/N₂混合气体隔离开

关的实际结构尺寸,利用有限元仿真软件搭建了三维等比例的电磁场-温度场-流体场耦合仿真模型,并在动静触头插接处设置厚度为1 mm的电阻膜来模拟隔离开关动静触头接触不良的状态。对不同运行电流、不同接触电阻时导体和罐体的温度分布情况的计算分析,结果显示:当接触电阻增大时,导体最高温度始终位于动静触头插接处,且随接触电阻的增长速度较快;罐体表面最高温度始终位于动静触头插接处正上方,且变化趋势较慢。

进一步对不同运行电流下,动、静触头插接处温度达到90℃时的罐体表面温差开展分析计算,用于研究利用罐体表面温差进行插接处发热缺陷诊断的判据,结果表明,隔离开关运行电流为额定电流时,罐体表面温差大于2.5 K时可以判断内部插接处存在严重发热缺陷,随着运行电流的减小,温差判据值逐渐增大。

利用所提的温差判据值与运行电流对应关系,可以通过测量罐体表面温差,对SF₆/N₂混合气体隔离开关在当前运行电流下是否存在接触不良引起的严重发热缺陷进行快速且准确的诊断。

参考文献

- [1] 何宁辉,朱洪波,周秀,等.GIS内部缺陷检测及诊断分析技术研究[J].电测与仪表,2019,56(24):86-91.
HE Ninghu, ZHU Hongbo, ZHOU Xiu, et al. Research on GIS internal defect detection and diagnosis analysis technology [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(24): 86-91.
- [2] 岳美,杨秀龙,许景华,等.基于超声波检测技术的GIS内部自由颗粒缺陷分析[J].山东电力技术,2021,48(2):44-47.
YUE Mei, YANG Xiulong, XU Jinghua, et al. Analysis of free particle defect in GIS based on ultrasonic detection technology [J]. Shandong Electric Power, 2021, 48(2): 44-47.
- [3] 吴学正,李树荣.基于数字孪生的GIS智能变电站健康评估及故障诊断模型[J].河北电力技术,2021,40(3):15-18.
WU Xuezheng, LI Shurong. Health assessment and fault diagnosis model of GIS intelligent substation based on digital twin [J]. Hebei Electric Power, 2021, 40(3): 15-18.
- [4] 武奇,袁志兵.252 kV SF₆/N₂混合气体GIS用三位置隔离开关的设计研究[J].电工技术,2023(11):131-134.
WU Qi, YUAN Zhibing. Design and research of three-position disconnector in 252 kV SF₆/N₂ gas mixture GIS [J]. Electric Engineering, 2023(11): 131-134.
- [5] 和彦森,黄印,颜湘莲,等.SF₆混合气体和环保替代气体设备标准化研究[J].中国电力,2024,57(3):95-102.

- HE Yanmiao, HUANG Yin, YAN Xianglian, et al. Standardization research on SF₆ mixed gas and eco-Friendly alternative gas equipment[J]. China Electric Power, 2024, 57(3): 95-102.
- [6] 肖登明. 环保型绝缘气体发展前景[J]. 高电压技术, 2016, 42(4): 1035-1046.
- XIAO Dengming. Development prospect of gas insulation based on environmental protection[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(4): 1035-1046.
- [7] 赵启. 环保高压开关技术和设备研究现状及展望[J]. 高压电器, 2022, 58(10): 16-24.
- ZHAO Qi. Research status and prospect of environmental protection high voltage switchgear technology and equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(10): 16-24.
- [8] 李旭东, 周伟, 屠幼萍, 等. 0.1~0.25 MPa气压下二元混合气体 SF₆/N₂ 和 SF₆/CO₂ 的击穿特性[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 260-264.
- LI Xudong, ZHOU Wei, TU Youping, et al. Breakdown characteristics of binary mixed gas SF₆/N₂ and SF₆/CO₂ at 0.1~0.25 MPa pressure[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 260-264.
- [9] 肖登明, 阎敦敦. 气体绝缘输电线路(GIL)的应用及发展[J]. 高电压技术, 2017, 43(3): 699-707.
- XIAO Dengming, YAN Jiudun. Application and development of gas insulated transmission line (GIL)[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(3): 699-707.
- [10] 周倩, 柯锟, 张晓星, 等. 基于SF₆混合气体绝缘性能的设备补气策略研究[J]. 电力工程技术, 2021, 40(4): 175-181.
- ZHOU Qian, KE Kun, ZHANG Xiaoxing, et al. Air supply strategy of equipment based on SF₆ mixed gas insulation performance[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(4): 175-181.
- [11] 毛光辉, 高理迎, 张民, 等. SF₆/N₂混合气体雷电冲击放电特性及协同效应研究[J]. 高电压技术, 2022, 48(2): 674-680.
- MAO Guanghui, GAO Liying, ZHANG min, et al. Analysis on discharge characteristics and synergistic effect of SF₆/N₂ mixed gas under lightning impulse[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(2): 674-680.
- [12] 高克利, 颜湘莲, 刘焱, 等. 环保气体绝缘管道技术研究进展[J]. 电工技术学报, 2020, 35(1): 3-20.
- GAO Keli, YAN Xianglian, LIU Yan, et al. Progress of technology for environment-friendly gas insulated transmission line[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(1): 3-20.
- [13] 张丕沛, 李杰, 汪鹏. 隔离开关合闸不到位引起GIS放电故障的原因分析[J]. 山东电力技术, 2021, 48(11): 54-58.
- ZHANG Pipei, LI Jie, WANG Peng. Cause analysis of GIS discharge fault caused by disconnector closing not in Place[J]. Shandong Electric Power, 2021, 48(11): 54-58.
- [14] 杨为, 朱太云, 赵恒阳, 等. GIS隔离开关气室电场模拟与绝缘故障分析[J]. 高压电器, 2020, 56(8): 205-210.
- YANG Wei, ZHU Taiyun, ZHAO Hengyang, et al. Electric field simulation and insulation failure analysis of GIS disconnector gas chamber[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(8): 205-210.
- [15] 周秀, 吴旭涛, 田天, 等. GIS隔离开关温度分布特性的试验研究[J]. 电工电能新技术, 2023, 42(6): 71-78.
- ZHOU Xiu, WU Xutao, TIAN Tian, et al. Experimental research on temperature distribution characteristics of GIS disconnector[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2023, 42(6): 71-78.
- [16] 赵海多, 赵海盼, 李金懋, 等. 220kV变电站HGIS隔离开关合闸不到位原因分析及处理[J]. 内蒙古电力技术, 2018, 36(5): 89-93.
- ZHAO Haiduo, ZHAO Haipan, LI Jinmao, et al. Cause analysis of 220kV HGIS substation isolating switch poor closing and its treatment[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2018, 36(5): 89-93.
- [17] 张丕沛, 李杰, 汪鹏, 等. 组合电器导体接头过热的原因分析及检测方法研究[J]. 山东电力技术, 2020, 47(11): 41-44.
- ZHANG Pipei, LI Jie, WANG Peng, et al. Analysis and detection method of conductor joints overheating in combined electrical apparatus[J]. Shandong Electric Power, 2020, 47(11): 41-44.
- [18] 王浩, 许海伟, 杜勇, 等. 基于数字孪生模型的GIS筒体关键部件温变行为研究[J]. 高电压技术, 2021, 47(5): 1584-1594.
- WANG Hao, XU Haiwei, DU Yong, et al. Research on temperature change behavior of key components of GIS barrel based on digital twin model[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1584-1594.
- [19] 齐卫东, 杨韧, 程鹏, 等. SF₆/N₂混合气体温度与压力特性的计算及相关试验[J]. 高压电器, 2018, 54(1): 213-218.
- QI Weidong, YANG Ren, CHENG Peng, et al. Calculation and experiment on temperature and pressure characteristics of SF₆/N₂ cas mixtures[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(1): 213-218.
- [20] 王珂珂, 李丽, 王久阳, 等. 基于混合绝缘气体的三相GIS母线温升多物理场耦合机制研究[J]. 高压电器, 2021, 57(4): 69-75.
- WANG Keke, LI Li, WANG Jiuyang, et al. Study on multi-physical field coupling mechanism of three-phase GIS bus temperature rise based on mixed Insulating gas[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(4): 69-75.
- [21] 周甜, 李子品, 沈泉宇, 等. GIS隔离开关触头温升多场耦合数值计算与分析[J]. 中国电力, 2018, 51(2): 13-20.
- ZHOU Tian, LI Zipin, SHEN Quanyu, et al. Numerical calculation and analysis of multi-field coupling of temperature rise of GIS isolation switch contacts[J]. China Electric Power, 2018, 51(2): 13-20.
- [22] 次英. 流体力学与传热学基础[M]. 北京: 科学出版社, 2024.
- [23] 戴伟伟, 高凯, 马利, 等. 基于多物理场耦合的GIS温升异常状态评估研究[J]. 机电工程, 2018, 35(6): 623-626.

(下转第77页)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2024.12.009

电导率对直流 GIL 绝缘子电荷积聚过程影响研究

李 杰*, 王 丹, 汪 鹏, 孙景文, 辜 超

(国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250003)

摘要:为研究盆式绝缘子在电热耦合场作用下瞬态表面电荷分布,建立水平布置的直流气体绝缘输电线路(direct current gas insulated transmission line, DC-GIL)三维几何模型,采用有限元方法研究电导率对 DC-GIL 绝缘子电荷积聚特性的影响。结果表明:随着体积电导率的增大,由于绝缘子的体传导机制的促进作用,凸表面电荷密度逐渐由负极性电荷转变为正极性电荷。而随着表面电导率的增加,由于主导电荷积聚的传导机制由表面传导向体传导过渡,凸表面电荷密度逐渐由正极性电荷转变为负极性电荷。在气体绝缘输电线路(gas insulated transmission line, GIL)运行时,电流流过中心导体,在 GIL 和绝缘子内部产生焦耳热,并建立空间分布的温度梯度。由于绝缘子的电导率随温度的变化而变化,在直流电压作用下,绝缘子的电场分布受到影响,进而影响电荷分布。因此,在评估 DC-GIL 绝缘子的绝缘性能时,应重点考虑体积和表面电导率的影响,对长期运行的绝缘子评估时还应考虑温度梯度的影响。

关键词:气体绝缘输电线路;绝缘子;电热耦合场;表面电荷

中图分类号:TM75

文献标志码:A

文章编号:1007-9904(2024)12-0069-09

Effect of Electric Conductivity on the Charge Accumulation Characteristics of DC-GIL Insulator

LI Jie*, WANG Dan, WANG Peng, SUN Jingwen, GU Chao

(State Grid Shandong Electric Power Company Research Institute, Jinan 250003, China)

Abstract: In order to study the transient surface charge distribution characteristics of basin-type insulators under the action of electrothermal coupling field, a three-dimensional geometric model of a horizontal direct current gas insulated transmission line (DC-GIL) was established. The effect of electrical conductivity on charge accumulation characteristics of DC-GIL insulators was investigated with finite element method. The results indicate that, with the increase of the volume conductivity, the charge density of the convex surface gradually changes from negative polarity charge to positive polarity charge, which is dominated by electric conduction mechanism through insulator volume. With the increase of surface conductivity, the charge density of convex surface gradually changes from positive charge to negative charge, and the dominating way of surface charge accumulation would take a transition from electric conduction through insulator surface to electric conduction through insulator volume in the process. During the operation of a gas-insulated transmission line (GIL), current flows through the central conductor, generating joule heat inside the GIL and insulator and establishing a spatially distributed temperature gradient. Since the conductivity of the insulator varies with temperature, it affects the electric field distribution of the insulator, and then the charge distribution, under DC voltage. Therefore, when evaluating the insulation performance of DC-GIL insulators, the influence of volume and surface conductivity should be considered, and the influence of temperature gradient should also be taken into account for long-term operation of insulators.

Keywords: gas insulated transmission lines; insulator; thermal-electric coupled fields; surface charge

0 引言

气体绝缘输电线路(gas insulated transmission

line, GIL)由母线、绝缘子、绝缘气体和外壳等组成^[1-4],绝缘子固定在母线内部,作为支撑和绝缘介质。与交流电压相比,直流电压下绝缘子表面电荷积聚更明显,这可能会导致直流气体绝缘输电线路(direct current gas insulated transmission line, DC-GIL)中的电场发生严重畸变。因此,近年来,人们开

基金项目:国网山东省电力公司科技项目(2023A-131)。
Science and Technology Project of State Grid Shandong Electric Power Company(2023A-131)。

始通过实验和仿真两种方法研究 DC-GIL 绝缘子表面电荷积聚特性。与实验相比,采用仿真方法进行研究更加灵活。仿真中使用的绝缘子模型与 DC-GIL 运行时使用的绝缘子相同,在仿真中不需要考虑绝缘子的安装和设计问题,电压幅值可根据实际运行情况设定。在 GIL 运行时,大电流流过中心导体,在 GIL 和绝缘子内部产生焦耳热,并建立空间分布的温度梯度^[5]。由于绝缘子的电导率随温度的变化而变化^[6],因此在直流电压作用下,绝缘子的电场分布受到影响,进而影响表面电荷分布^[7]。此外,离子迁移率和其他与离子迁移相关的参数也受到温度的影响。

研究者研究温度梯度对 DC-GIL 绝缘子表面电荷积聚的影响^[8-9]。张周胜等使用仿真的方法研究在直流电压作用下 GIL 内无温度梯度变化时,温度梯度对绝缘子表面电荷积聚的影响^[10],研究发现当绝缘子体电导率随温度变化时,绝缘子表面电荷密度增大,但在其研究中没有考虑绝缘气体参数随温度的变化。马国明等通过仿真和实验对直流电压作用下电-热-力耦合时绝缘子表面电荷积聚特性进行研究^[11-12],发现绝缘子表面电荷密度和绝缘子内部空间电荷密度在考虑温度梯度时迅速增加。

国内外对电热耦合场作用下绝缘子表面电导率和体积电导率对瞬态表面电荷积聚影响的研究较少。基于此,建立水平布置的 DC-GIL 盆式绝缘子的三维(three dimensional, 3D)仿真几何模型。分析在电热耦合场作用下,体积和表面电导率对瞬态表面电荷积聚的影响。

1 仿真模型

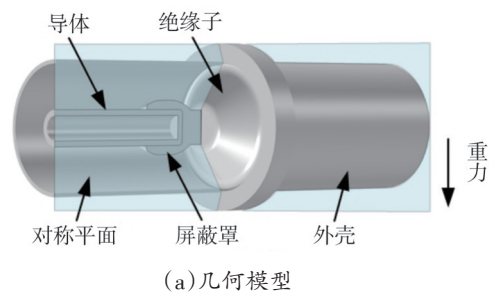
1.1 几何结构

采用水平布置的 200 kV 带盆式绝缘子的 DC-GIL 模型,所采用的 GIL 模型参数如表 1 所示,几何结构如图 1 所示。

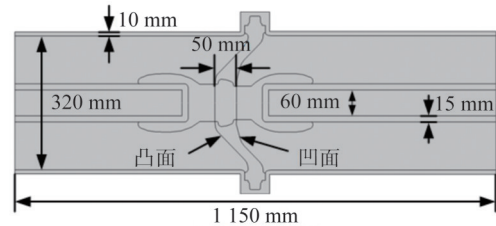
表 1 仿真模型参数

Table 1 Parameters of the simulation model

部件	内径/mm	厚度/mm	材料
导体	60	15	铝
外壳	320	10	铝合金



(a)几何模型



(b)横截面视图

图 1 GIL 和绝缘子的几何模型

Fig.1 Geometric model of the GIL and the insulator

1.2 传热机理

当电流流过导体时,导体产生的焦耳热按式(1)计算。

$$P = I^2 R = \frac{I^2 L}{S_{\text{cond}} \sigma_{\text{Al}}} \quad (1)$$

式中: P 为导体发热功率,W; I 为负载电流,A; R 为直流电阻, Ω ; L 为导体长度,m; S_{cond} 为导体截面积, m^2 ; σ_{Al} 为随温度变化的导体电导率,S/m,如式(2)所示。

$$\sigma_{\text{Al}}(t) = \frac{\sigma_{20}}{1 + 0.004(T_1 - 293)} \quad (2)$$

式中: σ_{20} 为 20℃时的电导率,取 $3.02 \times 10^{-8} \text{ S/m}$ ^[13]; T_1 为导体的温度,K。本研究忽略了涡流的影响。

导体产生的热量通过传导、辐射和对流向周围散热。其中热传导定义为

$$\begin{cases} \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla(\mathbf{q} + \mathbf{q}_r) = Q \\ \mathbf{q} = -\kappa \nabla T \end{cases} \quad (3)$$

式中: ρ 为密度, kg/m^3 ; C_p 为比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; $\mathbf{q}$ 为传导热通量向量, W/m^2 ,传导热通量由高温向低温传递; $\mathbf{q}_r$ 为辐射热通量向量, W/m^2 ,辐射热通量由高温传向低温; κ 为导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; T 为绝对温度,K; t 为时间; Q 为附加热源, W/m^3 。通过实验测得的绝缘子导热系数和比热容如表 2 所示。

辐射作用于导体与外壳之间、导体与绝缘子之间、绝缘子与外壳之间、外壳与周围大气之间。辐射定义为

$$\begin{cases} e_b(T) = n_r^2 \sigma_{SB} T_2^4 \\ q_r = \varepsilon_{se} [G - e_b(T)] \end{cases} \quad (4)$$

式中: n_r 为折射率; σ_{SB} 为 Stefan-Boltzmann 常数, $W/(m^2 \cdot K^4)$; T_2 为表面温度, K ; q_r 为辐射热通量, W/m^2 ; ε_{se} 为表面发射率, 导体外表面、绝缘子表面、外壳内外表面的表面发射率分别为 0.2、0.93、0.93 和 0.92; G 为入射辐射热通量, W/m^2 ; $e_b(T)$ 为所有波长的辐射功率, W/m^2 。

表2 绝缘子导热系数和比热容测量结果

Table 2 Measurement results for the thermal conductivity and specific heat capacity of the insulator

温度/ $^{\circ}C$	导热系数/($W/(m \cdot K)$)	比热容/($J/(kg \cdot K)$)
25	0.945 8	879.8
50	0.966 7	949.4
75	0.933 9	1 017.8
100	0.916 9	1 075

对水平布置的 DC-GIL 仿真模型进行管道外对流计算时, 忽略风速对对流的影响。管道内对流被视为一对同心圆柱体, 中心圆柱体作为热源。对流受连续性方程、质量守恒方程和动量守恒方程的控制。萨瑟兰定律定义了 SF_6 随温度变化的导热系数和动态黏度。此外, 进行仿真前需要通过格拉晓夫数和瑞利数估计管道内流体状态, 以确定仿真采用湍流模型或层流模型。通过估算, 这两个无量纲数均处于 $10^9 \sim 10^{10}$, 认为流体处于湍流状态, 采用湍流模型^[14]。常用的湍流模型有 $k-\varepsilon$ 湍流模型和剪切应力传输模型, 与 $k-\varepsilon$ 模型相比, 剪切应力传输流模型在近壁面区域具有明显优势^[15], 因此在该对流中采用剪切应力传输流模型。

根据式(1)计算焦耳热后, 热流通过 3 种途径传递: 式(3)中定义的热传导; 式(4)中定义的辐射; 上文引入的对流。计算 GIL 模型中的温度梯度。式(1)中导体的电导率随温度的变化而变化, 计算出的温度反过来影响式(1)的产热, 因此, 应采用耦合方法求解这些方程, 最后得到 GIL 和绝缘子内稳定的温度梯度。

1.3 表面电荷积聚机理

在本文中, 填充 SF_6 气体的 GIL 内部电离主要是

由宇宙辐射引起的。因此, 电离产生的负离子主要是 SF_6^- 离子, 正离子主要是 SF_6^+ 离子。通过气体的电流密度 J_G 定义为

$$\begin{cases} J_G^+ = q \cdot E \cdot n^+ b^+ - q \cdot D^+ \nabla n^+ \\ J_G^- = q \cdot E \cdot n^- b^- + q \cdot D^- \nabla n^- \\ J_G = J_G^+ + J_G^- \end{cases} \quad (5)$$

式中: q 为气体中单个离子所带电荷, C ; J_G^+ 为正离子输运产生的电流密度向量, A/m^2 , 正方向与正离子移动方向相同; J_G^- 为负离子输运产生的电流密度向量, A/m^2 , 正方向与负离子移动方向相同; E 为电场强度矢量, V/m , 正方向与正电荷在该点所受电场力方向相同; n^+ 为每 m^3 的正离子个数; b^+ 为正离子迁移率, $m^2/(V \cdot s)$; D^+ 为正离子扩散系数, m^2/s ; n^- 为每 m^3 的负离子个数; b^- 为负离子迁移率, $m^2/(V \cdot s)$; D^- 为负离子扩散系数, m^2/s ; q 为基本电荷, C 。

根据 R. Morrow 的研究可知^[16], SF_6 气体中的正负离子表现出不同的迁移率, 迁移率与温度的关系定义为

$$\begin{cases} b^+(p, T) = b_0^+ \frac{p_0}{p} \frac{T}{T_0} \\ b^-(p, T) = b_0^- \frac{p_0}{p} \frac{T}{T_0} \end{cases} \quad (6)$$

式中: b_0^+ 和 b_0^- 分别为标准条件下正、负离子的迁移率; p_0 和 T_0 为标准条件下的气压和温度, p_0 为 101 kPa, T_0 为 273 K; p 为实际气压, 取 0.5 MPa。因此, 在 0.5 MPa 时, 正负离子迁移率均可根据式(6)计算。

离子扩散系数定义为

$$\begin{cases} D^+ = \frac{k \cdot T}{q} b^+ \\ D^- = \frac{k \cdot T}{q} b^- \end{cases} \quad (7)$$

式中: k 为玻尔兹曼常数, J/K 。

根据电流连续性方程, 电流密度散度定义为

$$\begin{cases} \nabla \cdot J_G^+ = -\frac{\partial n^+}{\partial t} \cdot q - n^+ \cdot k_r n^- \cdot q + \frac{\partial n_{ip}}{\partial t} \cdot q \\ \nabla \cdot J_G^- = \frac{\partial n^-}{\partial t} \cdot q + n^- \cdot k_r n^+ \cdot q - \frac{\partial n_{ip}}{\partial t} \cdot q \end{cases} \quad (8)$$

式中: k_r 为复合速率, m^3/s ; $\partial n_{ip}/\partial t$ 为 SF_6 中的离子对产生速率, $1/(m^3 \cdot s)$ 。在 0.5 MPa 时, 复合系数为 $2.4 \times 10^{-13} m^3/s$, 离子生成速率为 $30/(cm^3 \cdot s)$ 。

离子输运方程定义为

$$\begin{cases} \frac{\partial n^+}{\partial t} = \frac{\partial n_{IP}}{\partial t} - n^+ k_r n^- - b^+ \nabla(n^+ E) + D^+ \nabla^2 n^+ \\ \frac{\partial n^-}{\partial t} = \frac{\partial n_{IP}}{\partial t} - n^- k_r n^+ + b^- \nabla(n^- E) + D^- \nabla^2 n^- \end{cases} \quad (9)$$

通过绝缘子的电流密度为

$$J_1 = \sigma_1 E \quad (10)$$

式中: J_1 为通过绝缘子的电流密度向量, A/m², 正方向由绝缘子高压电极侧指向绝缘子接地电极侧; σ_1 为绝缘子的体积电导率, S/m。

不同场强和温度下的体积电导率取自 L. Zavattoni 的测量结果^[7]。在本研究中, 没有考虑电场强度对电导率的影响。绝缘子的体积电导率在 20 ℃、40 ℃、60 ℃和 80 ℃时的值分别为 2.6×10^{-17} S/m、 1.2×10^{-16} S/m、 4×10^{-16} S/m 和 2.5×10^{-15} S/m。通过对这些数据进行拟合, 得到不同温度下的体积电导率并应用到仿真计算中。

瞬态表面电荷积聚定义为

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial t} = J_{in} - J_{Gn} - \nabla(\sigma_\tau E_\tau) \quad (11)$$

式中: ρ_s 为表面电荷密度, C/m²; J_{in} 为通过绝缘子的电流密度法向分量, A/m²; J_{Gn} 为通过气体的电流密度法向分量, A/m²。 σ_τ 为沿气体/绝缘子表面的表面电导率, S; E_τ 为沿绝缘子表面电场强度切向分量, V/m。

不同温度和电场强度下的表面电导率定义为

$$\sigma_\tau(E_\tau, T) = 1.67 \times 10^{-27} \times e^{0.06T + 1.03E_\tau} \quad (12)$$

式中: e 为自然常数。

考虑绝缘子电导率随温度变化时, 根据式(13)计算绝缘子内部空间电荷积聚。

$$\frac{\partial \rho_1}{\partial t} = \nabla \sigma_1 \cdot \nabla \varphi - \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} \rho_1 \quad (13)$$

式中: ρ_1 为空间电荷密度, C/m³; ε_1 为绝缘子介电常数, F/m。

仿真中导体电压设置为+200 kV 直流电压, 外壳接地。在电流流出的边界上, 正离子浓度梯度和负离子浓度梯度为零, 在电流流入的边界上, 负离子浓度梯度和正离子浓度梯度为零。

2 仿真方法优化

由于 GIL 管道内的温度梯度具有双侧对称性, 推测电荷分布遵循类似的双侧对称性规律。因此,

仿真模型可以简化为原来几何模型的一半, 如图 1 所示, 这样可以减少一半的计算内存。

研究电热耦合场下的电荷积聚需要对温度场、电场和离子流场进行耦合。首先, 因为通过绝缘介质的泄漏电流低于负载电流, 绝缘子和 SF₆ 气体因泄漏电流产生的焦耳热低于导体因负载电流产生的热量, 所以可以忽略电场对温度梯度的影响。其次, 在前几个小时, 绝缘子表面会积聚少量电荷。绝缘子温度梯度达到稳定状态大约需要 5~10 h^[17-18], 而电荷达到饱和/稳定状态大约需要数百至数千小时^[19]。研究结果表明, 在温度为 20 ℃时, 绝缘子表面电荷密度峰值低于 3 μC/mm², 而稳态时峰值电荷密度超过 30 μC/mm²。在处理温度梯度作用下的瞬态电荷积聚时, 如果忽略前几个小时的电荷积聚, 则可以将温度梯度看成是稳定的。

因此, 研究稳定温度梯度作用下的瞬态表面电荷积聚特性, 可以避免仿真中复杂的耦合场, 减少了大量的计算时间和内存。

由于式(9)是对流控制的, 处理它需要占用较大的内存。此外, 因为气体域的振荡发生在边界处, 在仿真计算时需要细化网格, 从而极大增加计算内存和时间。根据之前的评估, 由于细化网格细化需要占用大量内存, 增加的扩散项无法处理 3D 模型的仿真。而采用弱形式偏微分方程, 可以减少计算内存和时间。如果去除离子输运方程中的扩散项, 有扩散项和没有扩散项的两个计算结果之间没有差别^[20]。如果去除扩散项, 计算内存和时间可以降低 70% 以上。因此, 下文研究去除式(9)中的扩散项。

3 温度梯度下表面电荷积聚特性

3.1 绝缘子温度分布特性

研究 GIL 和绝缘子内部的温度分布, 结果如图 2 所示。可以看出, 在气体和绝缘子的上部出现较高的温度, 其中气体中的最高温度约为 45 ℃, 绝缘子的最高温度约为 65 ℃。此外, 绝缘子凸面的温度高于凹面的温度。

GIL 管道内气体在两个不同方向的循环流动:

1) 导体对周围气体加热导致导体表面附近气体向上流动, 沿对称面到达外壳顶部。然后, 气体沿着外壳的内表面向下到达外壳底部, 并沿对称面向上运动至导体下表面, 完成循环。这样, 就实现了气体对绝缘子的加热。

2) 气体在屏蔽罩处被加热,运动到外壳顶部,并从绝缘子流出,形成一个循环。同时,部分气体流向绝缘子,沿绝缘子/外壳界面向下流动。由于凹面附近流向绝缘子的气体比凸面少,因此凸面的温度高于凹面。

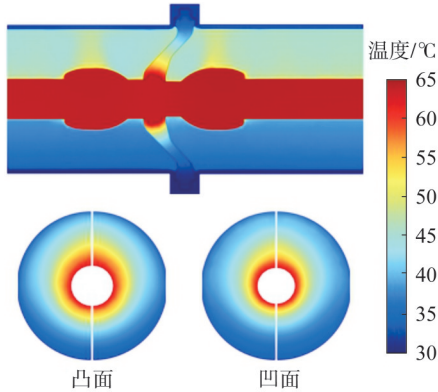
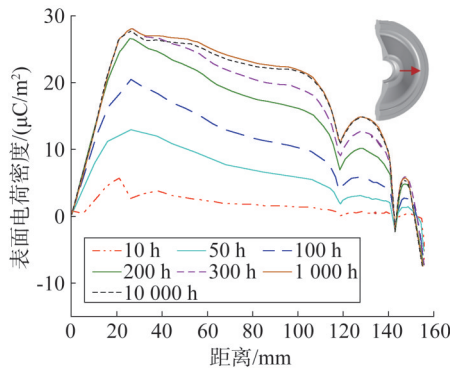


图2 GIL和绝缘子内部温度梯度分布结果

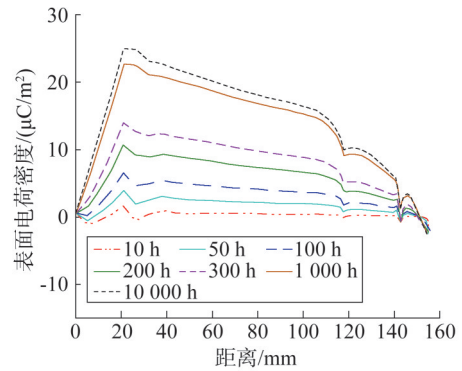
Fig.2 Thermal gradient distribution in the GIL and insulator

3.2 表面电荷积聚过程

研究温度梯度对瞬态表面电荷分布的影响。本节中,体积电导率和表面电导率取自 L.Zavattoni 测量结果,在 1.3 节中给出。将体积电导率和表面电导率分别标记为 σ_v 和 σ_s ,得到不受温度梯度影响的瞬态电荷分布,并将其作为参考。其中,无温度梯度是指在仿真中采用均匀的温度分布。在无温度梯度的情况下,仿真中绝缘子和 SF_6 气体的参数取 20 °C 时的参数值。以凸面上的电荷分布为例,从 200 kV 直流电压加到导体上开始计时,在 10 h、50 h、100 h、200 h、300 h、1 000 h、10 000 h 沿绝缘子表面径向的电荷分布如图 3 所示。



(a) 温度梯度作用下表面电荷分布



(b) 无温度梯度作用下表面电荷分布

图3 凸面电荷分布随时间变化结果

Fig.3 Variation of surface charge distribution along convex surface with time

图 3 中,横坐标距离表示绝缘子表面某一点到导体/绝缘子/气体三交点的长度。因此,距离 0 表示三交点的位置。距离越大,意味着该点离导体越远,离接地外壳越近。以 10 000 h 结果为例,在温度梯度作用下,表面电荷密度约为 $28 \mu\text{C}/\text{m}^2$,在无温度梯度作用下,表面电荷密度约为 $25 \mu\text{C}/\text{m}^2$ 。可以发现,在这两种情况下,正电荷都积聚在凸表面上。

由图 3 所示,在温度梯度作用下,表面电荷积聚过程加快。如图 3(a) 所示,在温度梯度作用下,大约 300 h 后,表面电荷密度达到稳定状态的 90%。这是因为体传导主导电荷积聚过程,温度升高促进体传导,进而促进了式(11)的发展过程。

在温度梯度作用下,绝缘子凸表面的瞬态表面电荷分布如图 4 所示。结果表明,表面电荷不呈环形分布。以 100 h 的结果为例,上部出现较高的表面电荷密度,约为 $22 \mu\text{C}/\text{m}^2$,这是因为上部温度升高促

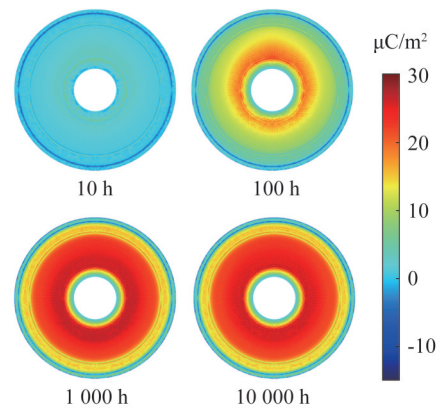


图4 凸面瞬态电荷密度分布

Fig.4 Transient surface charge distribution of convex surface

进了体传导。如图2所示,无论是凸面还是凹面,上部都出现了较高的温度。这是因为在表面电荷积聚过程中体传导占主导地位。温度越高,体积电导率越大,促进了上部的体传导,使得上部出现较高的电荷密度。这种表面电荷密度的差异进一步说明了在处理电热耦合场下的表面电荷积聚特性时,应用3D几何模型的必要性。

4 体积电导率对表面电荷积聚过程的影响

为研究体积电导率对瞬态表面电荷积聚过程的影响,以体积电导率为 σ_1 时作为参考,如图3(a)所示。研究了体积电导率为 $0.01\sigma_1$ 、 $0.1\sigma_1$ 、 σ_1 、 $10\sigma_1$ 和 $100\sigma_1$ 时电热耦合场下表面电荷积聚情况。得到了不同体积电导率条件下沿凸面径向瞬态电荷密度变化规律,如图5所示。可以发现,体积电导率增大会促进表面电荷的积聚。

此外,在不同体积电导率下,在凸面给定位置(距离三交点26 mm)的表面电荷密度随时间变化的结果如图6所示。由图5与图6可以看出,在 σ_1 为0.01时,即使在10 000 h后,表面电荷密度也没有达到稳定状态。当 σ_1 为0.1时,表面电荷密度在数千小

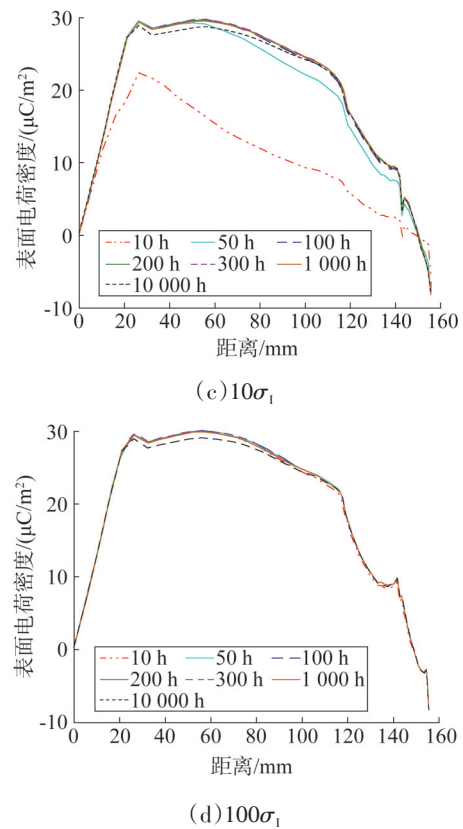
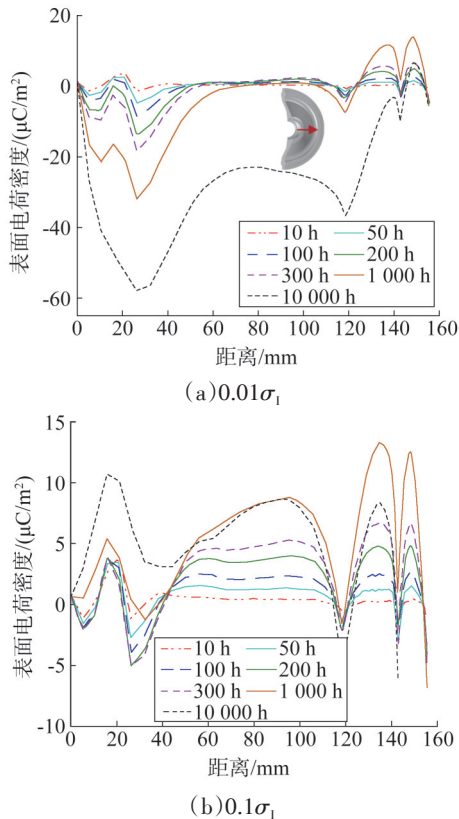


图5 不同体积电导率下凸面电荷密度随时间变化结果
Fig.5 Transient electric field distribution along convex surface with different volume conductivities

图6 不同体积电导率条件下电荷密度随时间变化结果
Fig.6 Variation of charge density with increasing time under different volume conductivities

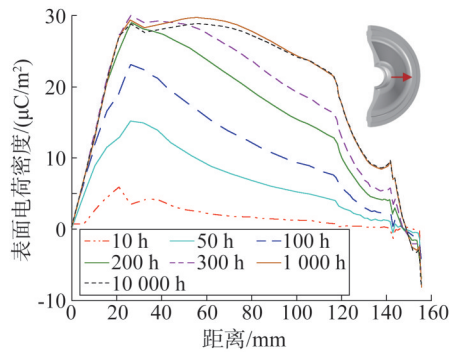
时后达到稳定状态。因此,图5(b)、图5(c)、图5(d)中10 000 h的结果可以看作是稳定的表面电荷分布。

如图5所示,随着体积电导率的增加,表面电荷密度达到稳定状态所需时间减少到数百小时甚至更

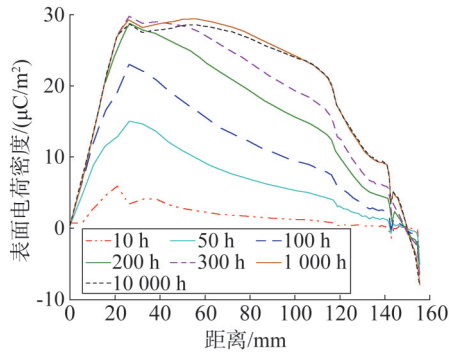
少。这是由于表面电荷积聚过程由气体传导、体传导和表面传导控制,而体传导主导表面电荷积聚。根据欧姆定律可知,体积电导率增大会促进体传导过程,进而促进表面电荷积聚。

5 表面电导率对表面电荷积聚过程的影响

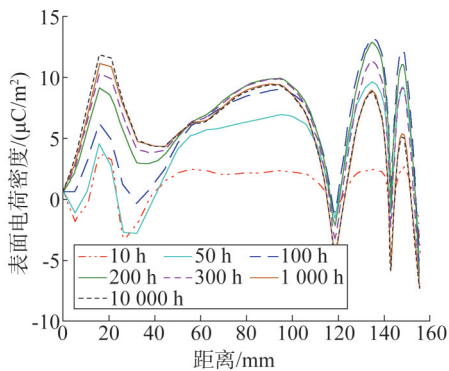
研究表面电导率为 $0.01\sigma_r$ 、 $0.1\sigma_r$ 、 σ_r 、 $10\sigma_r$ 和 $100\sigma_r$ 时电热耦合场下表面电荷积聚情况。得到不同表面电导率条件下沿凸面径向瞬态表面电荷密度变化规律,如图 7 所示。表面电导率为 σ_r 时的结果见图 3(a)。



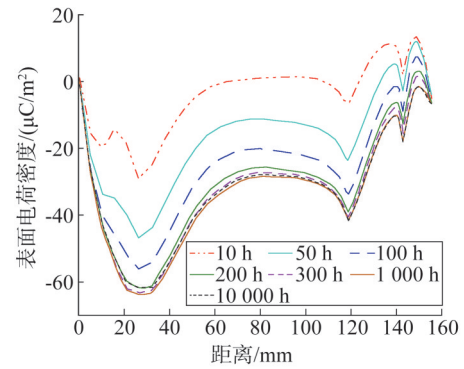
(a) $0.01\sigma_r$



(b) $0.1\sigma_r$



(c) $10\sigma_r$



(d) $100\sigma_r$

图 7 不同表面电导率下凸面电荷密度随时间变化结果

Fig.7 Variation of surface charge distribution along convex surface with time under different surface conductivities

与体积电导率对表面电荷积聚过程的影响不同,当表面电导率小于 $10\sigma_r$ 时,随着表面电导率的增加,没有明显加快表面电荷积聚。与体积电导率相反,当表面电导率很小时,表面电导率对表面电荷积聚的影响很小。在 $100\sigma_r$ 时,绝缘子表面会出现严重的电荷积聚现象。在约 1 000 h 后,不同表面电导率情况下的表面电荷密度都略有变化。因此,10 000 h 的结果可以看作是稳定的电荷分布。

为进一步研究表面电导率对电荷积聚的影响,图 8 给出在不同表面电导率下,10 000 h 后凸面表面电荷密度变化规律。随着表面电导率的增大,正电荷密度减小,然后出现负电荷密度。在表面电导率为 $100\sigma_r$ 时的负电荷密度值远大于表面电导率为 $0.01\sigma_r$ 时的正电荷密度值。

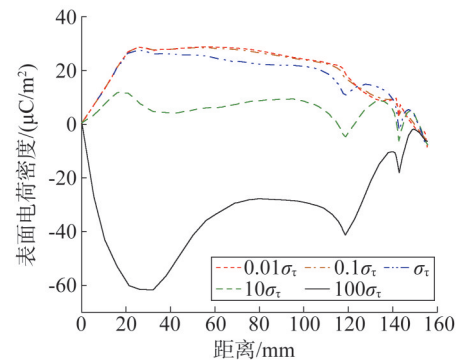


图 8 10 000 h 不同表面电导率条件下凸面电荷密度

Fig.8 Surface charge distribution along convex surface at 10000 hours with different surface conductivities

在凸面给定位置上(距离三交点 26 mm)的表面电荷密度随时间变化结果如图 9 所示。可以发现,表面电导率的变化对瞬态表面电荷积聚达到稳定状态所需时间影响很小。在不同的表面电导率条件下,给定位置处的表面电荷需要 200~300 h 才能达到稳定状态。这与图 6 中不同体积电导率下表面电荷积聚达到稳定状态所需要的时间有很大的不同。

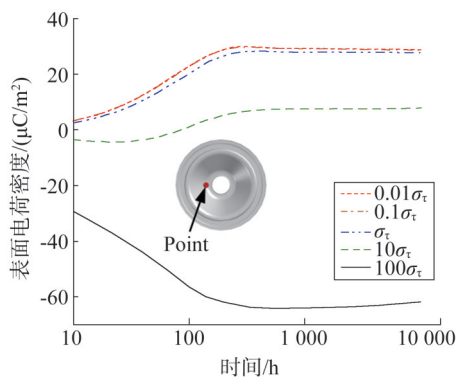


图9 不同表面电导率下电荷密度随时间变化结果

Fig.9 Variation of charge density with time under different surface conductivities

6 结论

采用有限元分析方法研究体积和表面电导率对水平布置的 DC-GIL 内部盆式绝缘子瞬态表面电荷积聚特性的影响。结论如下:

1) 由于绝缘子优异的导热性能,绝缘子的温度从中心导体到外壳呈现圆环状降低趋势。同时,由于自然对流的作用,气体和绝缘子上半部出现较高的温度,并且其凸面温度高于凹面温度。这种温差会影响瞬态表面电荷的积聚。

2) 随着体积电导率的增加,由于体传导的促进作用,加快了表面电荷积聚。由于主导电荷积聚的传导机制由表面传导向体传导过渡,表面电荷密度逐渐由负极性电荷转变为正极性电荷。随着表面电导率的增加,表面电荷积聚过程没有明显加快,表面电荷密度逐渐由正极性电荷转变为负极性电荷。

3) 在评估长期运行的 DC-GIL 中绝缘子的绝缘性能时,应考虑其在电热耦合场作用下的瞬态表面电荷积聚特性。在设计绝缘子时,应考虑体积和表面电导率对瞬态表面电荷积聚特性的影响。

参考文献

- [1] 林令淇. 直流气体绝缘输电线路盆式绝缘子温度分布特性研究[J]. 山东电力技术, 2022, 49(1): 24-29.
LIN Lingqi. Investigation of the temperature distribution of DC-GIL basin-type spacer[J]. Shandong Electric Power, 2022, 49(1): 24-29.
- [2] 齐波, 张贵新, 李成榕, 等. 气体绝缘金属封闭输电线路的研究现状及应用前景[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1466-1473.
QI Bo, ZHANG Guixin, LI Chengrong, et al. Research status and prospect of gas-insulated metal enclosed transmission line [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1466-1473.
- [3] 杨琪. GIL 与 GIS 母线的结构特点与应用[J]. 高压电器, 2011, 47(8): 72-74.
YANG Qi. Characteristics and applications of GIL and GIS bus [J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(8): 72-74.
- [4] 肖登明, 阎究敦. 气体绝缘输电线路(GIL)的应用及发展[J]. 高电压技术, 2017, 43(3): 699-707.
XIAO Dengming, YAN Jiudun. Application and development of gas insulated transmission line (GIL) [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(3): 699-707.
- [5] QIAO Y J, LIANG R, GAO P, et al. Heat transfer analysis of different conditions for SF₆/N₂ gas-insulated transmission lines [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(2): 831-840.
- [6] OKABE S, UETA G, NOJIMA K. Resistance characteristics and electrification characteristics of GIS epoxy insulators under DC voltage [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(3): 1260-1267.
- [7] ZAVATTONI L. Conduction phenomena through gas and insulating solids in HVDC Gas Insulated Substations, and consequences on electric field distribution [D]. Université de Grenoble, 2014.
- [8] DU B X, LIANG H C, LI J, et al. Electrical field distribution along SG₆/N₂ filled DC-GIS/GIL epoxy spacer [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(4): 1202-1210.
- [9] LIANG H C, DU B X, LI J. Electric field regulation and parameter optimization of surface nonlinear conductivity spacer for 500 kV DC -GIL [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(4): 1330-1338.
- [10] 晏武, 张周胜, 邓保家, 等. 温度和正极性电压对直流 GIL 盆式绝缘子表面电荷积聚的影响[J]. 高电压技术, 2019, 45(12): 3889-3897.
YAN Wu, ZHANG Zhousheng, DENG Baojia, et al. Influence of temperature and positive voltage on surface charge accumulation for the disc insulator of GIL under DC voltage [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(12): 3889-3897.
- [11] MA G M, ZHOU H Y, LIU S P, et al. Measurement and simulation of charge accumulation on a disc spacer with electro-thermal stress in SF₆ gas [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(4): 1221-1229.
- [12] 周宏扬, 马国明, 刘姝嫔, 等. 基于电-热多物理场耦合模型的直

- 流 GIL 绝缘子表面电荷积聚及其对沿面电场影响的研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(4): 1251-1260.
- ZHOU Hongyang, MA Guoming, LIU Shupin, et al. Study on surface charges accumulation on insulator and its effects on the surface electrical field in DC-GIL with electro-thermal coupling model[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(4): 1251-1260.
- [13] 武恭. 铝及铝合金材料手册[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [14] KUEHN T H, GOLDSTEIN R J. Correlating equations for natural convection heat transfer between horizontal circular cylinders[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1976, 19(10): 1127-1134.
- [15] REBZANI N, CLAVEL E, MARTY P, et al. Numerical multiphysics modeling of temperature rises in gas insulated busbars [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(5): 2579-2586.
- [16] MORROW R. A survey of the electron and ion transport properties of SF_6 [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 1986, 14(3): 234-239.
- [17] MINAGUCHI D, GINNO M, ITAKA K, et al. Heat transfer characteristics of gas-insulated transmission lines [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1986, 1(1): 1-9.
- [18] MA G M, ZHOU H Y, LI Y B, et al. High-resolution temperature distribution measurement of GIL spacer based on OFDR and ultraweak FBGs [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(6): 3866-3873.
- [19] WINTER A, KINDERSBERGER J. Transient field distribution in gas-solid insulation systems under DC voltages [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(1): 116-128.
- [20] LI X L, ZHANG G K, JIA J R, et al. Improved method in calculating the surface charge distribution of DC-GIL insulators with 3D geometry models [J]. IET Science, Measurement & Technology, 2022, 16(7): 400-411.
- 收稿日期: 2023-03-01
修回日期: 2024-02-06
作者简介:
李 杰(1986), 通信作者(dkyljie@126.com), 男, 博士, 高级工程师, 从事开关类设备状态检测及状态评价工作;
王 丹(1993), 女, 博士, 中级工程师, 从事开关类设备状态检测及状态评价工作;
汪 鹏(1993), 男, 硕士, 中级工程师, 从事开关类设备状态检测及状态评价工作;
孙景文(1990), 女, 硕士, 中级工程师, 从事开关类设备状态检测及状态评价工作;
辜 超(1971), 男, 正高级工程师, 从事变电设备状态检测及状态评价工作。
- (责任编辑 姜婷婷)

(上接第 68 页)

- DAI Weiwei, GAO Kai, MA Li, et al. Research on GIS temperature rise abnormal state evaluation based on multi-physics coupling[J]. Mechanical & Electrical Engineering, 2018, 35(6): 623-626.
- [24] 庞先海, 景皓, 季严松, 等. SF_6 - N_2 混合气体物性参数计算与分析[J]. 河北电力技术, 2019, 38(2): 29-31.
- PANG Xianhai, JING Hao, JI Yansong, et al. Analysis and calculation on material properties of SF_6 - N_2 gas mixtures [J]. Hebei Electric Power, 2019, 38(2): 29-31.
- [25] 吴晓文, 舒乃秋, 李洪涛, 等. 气体绝缘输电线路温升数值计算及相关因素分析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 65-72.
- WU Xiaowen, SHU Naiqiu, LI Hongtao, et al. Temperature rise numerical calculation and correlative factors analysis of gas-insulated transmission lines [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 65-72.
- 收稿日期: 2023-10-25
修回日期: 2024-02-29
作者简介:
张丕沛(1996), 通信作者(sddky_zpp@163.com), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为高压设备带电检测与故障分析;
孙国峰(1989), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为高压设备绝缘试验、带电检测与故障分析;
李 杰(1986), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为高压设备带电检测与故障分析;
汪 鹏(1993), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为高压设备带电检测与故障分析;
王江伟(1994), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为高压设备带电检测与故障分析。
- (责任编辑 姜婷婷)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2024.12.010

基于数学形态学与希尔伯特-黄变换的线路故障测距方法研究

张永东¹, 陶伟叶^{2*}, 常欣丽¹, 王云鹏³, 丛玉颀¹

(1. 国网山东省电力公司威海供电公司, 山东 威海 264000; 2. 淮阴工学院, 江苏 淮安 223003;

3. 山东容弗新信息科技有限公司, 山东 济南 250000)

摘要: 输电线路故障定位是快速检查故障位置、节约能源的必要措施。针对行波测距方法中影响测距精度的问题, 如噪声干扰、波头到达时间标定偏差以及波速计算误差, 文中提出了一种基于数学形态学(mathematical morphology, MM)与希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang transform, HHT)结合的双端行波故障测距算法。首先对故障发生后的高频暂态量经Clark变换后得到线模和零模分量, 通过线模分量提取故障行波, 再对夹杂噪声干扰的行波信号进行数学形态学滤波处理; 然后通过经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)和希尔伯特变换得到瞬时频率谱图, 继而找到突变点位置, 确定波头到达时间, 结合与波速无关的双端行波测距计算故障发生位置; 最后对比采用结合算法和单一算法下的测距结果。仿真结果表明, 结合算法的测距精度比单一算法更高, 且误差精度为0.086‰, 验证了所提线路故障测距算法具有较高的可靠性和精确度。

关键词: 行波测距; 数学形态学; 希尔伯特-黄变换; 故障测距; 噪声干扰

中图分类号: TM77

文献标志码: A

文章编号: 1007-9904(2024)12-0078-06

Research on Line Fault Ranging Method Based on the Mathematical Morphology and Hilbert-Huang Transform

ZHANG Yongdong¹, TAO Weiye^{2*}, CHANG Xinli¹, WANG Yunpeng³, CONG Yudi¹

(1. State Grid Weihai Power Supply Company, Weihai 264000, China;

2. Huaiyin Institute of Technology, Huai'an 223003, China;

3. Shandong Rongfuxin Information Technology Company, Jinan 250000, China)

Abstract: Transmission line fault localization is a necessary measure to quickly check the fault location and save energy. To address the problems affecting the ranging accuracy of traveling wave ranging methods, such as noise interference, deviation in the calibration of the arrival time of the wave head, and error in the calculation of the wave speed, a double-ended traveling wave fault ranging algorithm based on the combination of mathematical morphology (MM) and Hilbert-Huang transform (HHT) is proposed in this paper. Firstly, the high-frequency transient quantities that occur after the fault are decoupled using the Clarke transformation to obtain the line mode and zero mode components. The fault traveling wave is extracted from the line mode components, and the traveling wave signals with noise interference are filtered using mathematical morphology. Then, the instantaneous frequency spectrum is obtained through the empirical mode decomposition (EMD) and the Hilbert transform, and then the position of the mutation point is found to determine the arrival time of the wave head, and the position of fault is calculated by combining with the double-ended travelling-wave ranging, which has no relation with the wave speed. Finally, the results of the combined algorithm and the single algorithm are compared. The simulation results show that the ranging accuracy of the combined algorithms is higher than that of the single algorithm, and the error percentage is 0.086‰, which verifies that the proposed line fault ranging algorithm has high reliability and accuracy.

Keywords: traveling wave ranging; mathematical morphology; Hilbert-Huang transform; fault ranging; noise interference

基金项目: 国网威海供电公司科技项目(520613230005)。

Science and Technology Project of State Grid Weihai Power Supply Company(520613230005)。

0 引言

为尽量减少停电导致的经济损失,输电线路必须尽快恢复供电以满足负载需求^[1]。准确的故障定位有利于线路维修人员快速到达故障位置进行检查和维修,从而最大限度地缩短停电时间^[2-3]。

传统的定位方法主要有阻抗法和行波法^[4-5]。基于电气量来源不同,阻抗法又分为单端阻抗法和双端阻抗法^[5-7]。单端阻抗法在故障点过渡电阻、负荷电流干扰下测距误差偏大;双端阻抗法若采用同步采样则成本将会增大,若不采用同步采样又面临复杂的计算过程^[8]。而行波法则不受过渡电阻、故障类型等的影响,也是国内输电线路普遍采用的测距方法^[9-10]。现代行波法从原理上,可分为单端行波法、双端行波法和三端行波法。其中单端行波法是指利用线路在发生故障时行波第一次到达监测终端的时间和行波遇到故障点反射的时间差进行故障定位的;双端行波法是指利用线路故障时故障点产生的行波向两边传播的时间差结合 GPS 定时,从而实现线路故障精确定位;三端行波法属于一种特殊的改进双端法,是利用检测故障点初始行波到达故障线路本端、对端以及相邻线路对端的绝对时刻进行测距^[11]。

行波测距的关键是波头的识别以及波头到达时间的标定,同时波速和噪声也会对测距精度造成影响。波头检测的方法主要有求导法、相关法、数学形态学(mathematical morphology, MM)、小波变换、希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang transform, HHT)以及一些改进方法。文献[12]提出了一种基于经验小波变换的单端行波测距算法,首先利用经验小波变换(empirical wavelet transform, EWT)对零模电流暂态分量进行分解,通过对低频分量分析进行故障选线;然后利用小波的奇异性检测原理对电流行波波头识别,其算法测距结果误差较大。文献[13]利用 HHT 算法对行波波头进行分析检测,解决了小波变换的不自适应问题。但二者同时都忽略了噪声和波速对测距精度的影响。文献[14-15]考虑了噪声的影响,分别把小波原理和 HHT 变换、神经网络算法相结合,进行波头分析与检测。小波变换虽然是多分辨率分析,但不具有自适应性,其难点是选择合适的小波基函数和分解尺度,且需要不断加入新的训练模

型。与小波变换相比,由于 MM 中唯一的数学计算是加法和减法,因此,其计算量较小,并且基于这种方法的保护非常快速和准确^[16]。

根据以上分析,本文提出了一种基于形态学滤波和希尔伯特-黄变换结合的双端行波测距算法。首先考虑噪声的影响,利用形态学优良的滤波性能抑制噪声干扰和行波的畸变;然后对滤波后的行波信号进行经验模态分解,对分解后的分量通过希尔伯特变换准确标定波头达到时间;最后考虑波速的影响,采用与波速无关的双端测距原理,计算出故障发生位置。

1 基于MM的行波消噪方法

MM 已广泛用于图像和信号处理,并且在电力系统中的保护方面应用也已被证实^[16]。MM 算法具有优良的滤波性能,不仅可以抑制噪声,还可以抑制行波的畸变。其主要包含腐蚀,膨胀,开、闭运算,开-闭运算的级联组合以及结构与元素等内容。

设输入信号 $f(n)$, 结构元素 $g(n)$ 是分别定义在定义域为 $H = \{0, 1, 2, \dots, N-1\}$ 和定义域为 $G = \{0, 1, 2, \dots, M-1\}$ 的一维离散函数; N 和 M 为样本个数, $N \geq M$ 。

腐蚀定义为

$$(f \odot g)(n) = \min \{f(n+m) - g(m)\} \quad (1)$$

膨胀定义为

$$(f \oplus g)(n) = \max \{f(n-m) - g(m)\} \quad (2)$$

式中: $\odot$ 表示腐蚀运算; $\oplus$ 表示膨胀运算; n 和 m 的取值分别属于定义域 H 和 G 内。

开、闭运算建立在腐蚀和膨胀基础上。先腐蚀后膨胀是开运算,先膨胀后腐蚀是闭运算。

开运算定义为

$$(f \circ g)(n) = [(f \odot g) \oplus g](n) \quad (3)$$

闭运算定义为

$$(f \cdot g)(n) = [(f \oplus g) \odot g](n) \quad (4)$$

式中: $\circ$ 表示开运算; $\cdot$ 表示闭运算。

开-闭运算组合为

$$F_{oc}(f(n)) = (f \circ g \cdot g)(n) \quad (5)$$

闭-开运算组合为

$$F_{co}(f(n)) = (f \cdot g \circ g)(n) \quad (6)$$

形态学滤波效果不仅与运算变换有关,而且与

选择的结构元素有关。在电力系统中,对于一般的行波信号,选取直线结构元素较好^[17]。

当线路发生故障后,在故障点处会产生向两端传输的行波。但是由于重合闸等的作用,行波中会夹杂干扰信号影响波头的识别,所以有必要对加噪的行波信号进行滤波处理。鉴于开、闭运算可分别滤除行波信号中的峰值(正脉冲)噪声和低谷(负脉冲)噪声,单独使用无法起到较好的滤波效果,所以采用开、闭运算的级联组合来达到滤波目的。

2 行波的提取方法

通过对故障后三相电压电流进行分析即可得到正向行波与反向行波。首先确定故障发生后的三相电压和电流暂态量 ΔU 和 ΔI 。

$$\Delta U = U_m - U_n \quad (7)$$

式中: U_m 、 U_n 分别为故障后一段时间内电压和故障前相应一段时间内电压。

$$\Delta I = I_m - I_n \quad (8)$$

式中: I_m 、 I_n 分别为故障后一段时间内电流和故障前相应一段时间内电流。

由于三相电压、电流之间存在耦合作用。需要对得到的电压和电流暂态量进行解耦。Clark 变换可以说实现这一目的。

$$Q = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$U_x = Q \times \Delta U \quad (10)$$

$$I_x = Q \times \Delta I \quad (11)$$

式中: Q 为 Clark 变换矩阵; U_x 为变换后的三相电压模量值矩阵; I_x 为变换后三相电流模量值矩阵。

此时经变换后的三相电压电流之间就消除了耦合作用。最后计算正向行波 u_f 与反向行波 u_r 。

$$u_f = 0.5(U_{x1} + I_{x1} \times Z) \quad (12)$$

$$u_r = 0.5(U_{x1} - I_{x1} \times Z) \quad (13)$$

$$Z = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \quad (14)$$

式中: Z 为线路的波阻抗; U_{x1} 、 I_{x1} 分别为 U_x 、 I_x 的线模分量; L_1 、 C_1 分别为线路的正序电感和电容。

3 基于HHT的行波识别方法

HHT 变换主要由经验模态分解和希尔伯特变换

两部分组成^[18]。第一部分把复杂信号分解成多个在不同时间段内具有单一频率的固有模态函数(intrinsic mode function, IMF), 第二部分对分解后的 IMF 分量进行希尔伯特变换, 得到该信号对应的时频特性曲线, 然后分析得出时间、频率、幅值之间的关系。

3.1 经验模态分解

经验模态分解的作用是把信号分解成多个 IMF 分量和剩余残量, 为后续希尔伯特变换做铺垫^[19]。其基本分解步骤如下。

首先确定原始行波信号 $X(t)$ 的极大值与极小值, 利用三次样条插值函数进行拟合, 得到上下包络线 $X_{\max}(t)$ 、 $X_{\min}(t)$, 然后求取平均值 $S_1(t)$ 。

$$S_1(t) = (X_{\max}(t) + X_{\min}(t)) \quad (15)$$

$$W_1(t) = X(t) - S_1(t) \quad (16)$$

式中: t 表示时间; $W_1(t)$ 为原始输入信号与求得的平均值的差。

如果 $W_1(t)$ 满足 IMF 分量的两个条件, 则 $W_1(t)$ 为第一个 IMF 分量; 若不满足 IMF 的两个条件, 则重复以上步骤, 直至求出满足 IMF 两个条件的 IMF 分量。于是得到了第一个 IMF 分量 $C_{\text{IMF1}}(t)$, 剩下的是剩余分量 $r_1(t)$ 。

$$r_1(t) = X(t) - C_{\text{IMF1}}(t) \quad (17)$$

再对 $r_1(t)$ 从头开始重复式(15)一式(17)步骤, 直至剩余分量无法再分离, 最后得到 k 个 IMF 分量和一个剩余分量 $r_m(t)$ 。据此, 行波信号 $X(t)$ 可表示为

$$X(t) = \sum_{i=1}^k C_{\text{IMFi}}(t) + r_m(t) \quad (18)$$

式中: $C_{\text{IMFi}}(t)$ 表示第 i 个 IMF 分量。

3.2 希尔伯特变换

对得到的 IMF 分量进行希尔伯特变换, 变换表达式为

$$h_i(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{C_{\text{IMFi}}(\delta)}{t - \delta} d\delta \quad (19)$$

式中: $h_i(t)$ 为第 i 个 IMF 分量经希尔伯特变换后的值; δ 为希尔伯特变换中与第 i 个 IMF 分量进行卷积的信号 $(1/\pi t)$ 在卷积变换时的时域表征。最终得到解析信号为

$$Z_i(t) = C_{\text{IMFi}}(t) + jh_i(t) = A_i(t) e^{j\theta_i(t)} \quad (20)$$

式中: $Z_i(t)$ 为第 i 个 IMF 分量解析信号的复数表达式; $A_i(t)$ 为第 i 个 IMF 分量解析信号的瞬时频率幅值;

$\theta_i(t)$ 为第*i*个IMF分量解析信号的瞬时频率相位。

由于得到的最后一个剩余分量 $r_m(t)$ 数值很小,所以可以忽略不计。最终经希尔伯特变换后得到的原始行波信号 $X(t)$ 的希尔伯特谱为

$$H(\omega, t) = \text{Re} \sum_{i=1}^k A_i(t) e^{j\theta_i(t)} \quad (21)$$

式中: ω 为频率; Re 表示对解析信号 $Z_i(t)$ 取实部。

根据以上分析,原始行波信号分解为多个IMF分量和一个剩余分量,由于首个固有模态分量IMF1代表了原始信号的高频部分,所以IMF1的瞬时频率谱是HHT分析中的有效成分。由于突变信号包含了丰富的高频量,而首个固有模态分量表示了最高频分量,因此,用IMF1的瞬时频率谱来确定信号的突变点^[19]。通过对IMF1进行希尔伯特变换得到希尔伯特谱,行波的波头会在时频曲线中表现为高频突变点,因此找到突变点的位置,即可确定波头到达时间。

4 与波速无关的双端行波测距

传统双端行波测距是通过测量行波到达故障点两端检测装置的时间差,然后结合波速以及两个检测点之间的距离实现定位^[20]。测距计算公式为

$$X = \frac{1}{2} \times \frac{t_1 - t_2}{L + V} \quad (22)$$

式中: X 为监测点到故障位置的距离; t_1 、 t_2 分别为波头到达故障点两侧的时间; L 为两个检测装置之间的距离; V 为行波波速。

然而,环境、线路参数、空气等都会对波速产生影响,这就给行波测距带来了困难^[21]。由式(22)可知,为消除波速带来的影响,即消除变量 V ,采用与波速无关的双端行波测距,其原理如图1所示。

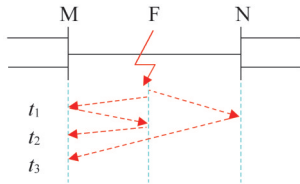


图1 与波速无关的双端测距原理

Fig.1 Wave-speed independent double-ended ranging principle

设 t_0 为故障发生时刻, t_1 为行波从故障点到达M端的时间; t_2 为经故障点反射后第二次到达M端的时间; t_3 为行波从故障点到达N端并反射到M端

的时间。由此可得

$$\begin{cases} V(t_1 - t_0) = X \\ V(t_2 - t_0) = 3X \\ V(t_3 - t_0) = 2L - X \end{cases} \quad (23)$$

经数学变换后可得

$$X = \frac{(t_2 - t_1)L}{t_3 - 2t_1 + t_2} \quad (24)$$

此时式(24)中不含波速 V ,故通过该式计算的故障距离 X 不受波速的影响。

5 仿真验证

基于以上的理论分析,所提基于MM与HHT算法的故障测距方案流程如图2所示。当故障发生后,首先对三相电压电流暂态量经解耦后提取行波信号,然后对夹杂噪声的行波信号进行滤波处理,经滤波后的行波再经过HHT变换两个流程找到突变点位置,从而确定波头到达时间。

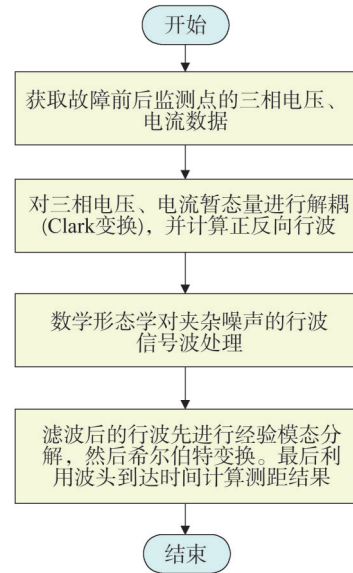


图2 MM与HHT结合的双端行波测距算法流程图

Fig.2 Flowchart of double-ended traveling wave ranging algorithm combining MM and HHT

在MATLAB/Simulink中搭建110 kV仿真输电线路模型如图3所示,图中G为三相电源, Z_1 、 Z_2 为监测点前后线路阻抗, R_{load} 为三相负载。线路采样频率200 kHz,仿真时长0.045 s,设在0.02 s时 $X=50$ km处发生接地故障,为使图中故障电压电流更明显,选择两

相接地故障。线路总长 80 km,线路参数如表 1 所示。

表 1 仿真线路参数

Table 1 Simulation line parameters

参数	正序	零序
电阻/(Ω/km)	0.012 73	0.386 4
电感/(H/km)	$0.933\ 7\times 10^{-3}$	$1\ 264\times 10^{-3}$
电容/(F/km)	12.74×10^{-9}	7.751×10^{-9}

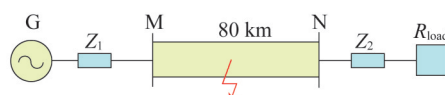


图 3 110 kV 输电线路仿真模型图

Fig.3 Simulation model diagram of 110 kV transmission line

以故障发生后 0.02 s 为计时零点,经解耦后计算提取到的电流行波,在第 50 个、第 100 个、第 150 个和第 200 个采样点处叠加脉冲干扰。利用 MM 滤波算法对加噪后的行波进行处理,处理前后的行波波形如图 4 所示。从图中可以看出,正负脉冲干扰已经被滤除,且滤波后的波形保持了原始行波信号的基本形状。

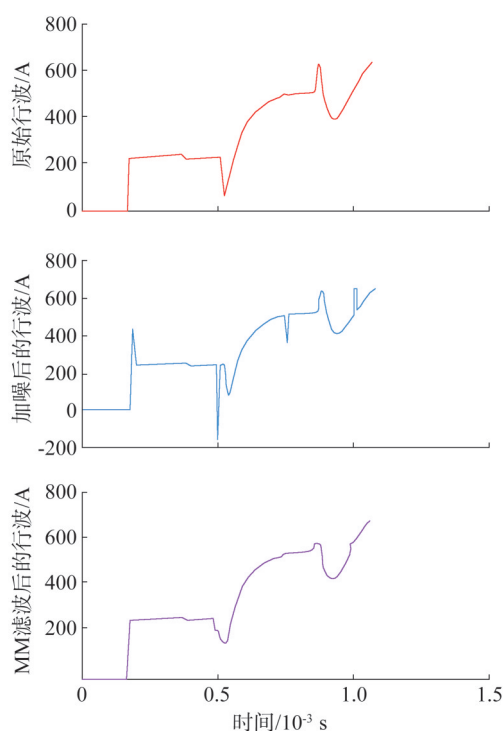


图 4 故障行波滤波前后波形图

Fig.4 Waveform diagram before and after fault traveling-wave filtering

随后对行波信号进行 HHT 变换,该行波信号经验模态分解后的频率特性如图 5 所示,图中各个 IMF 分量都表示不同时刻的频率特性。由于第一个 IMF 分量最能表现故障行波的高频暂态信息,故选取第一个 IMF 分量进行分析。对最高频分量的 IMF1 经希尔伯特变换后的希尔伯特谱如图 6 所示,行波的波头在图中呈现高频突变点,由突变点的位置即可确定波头到达时间。

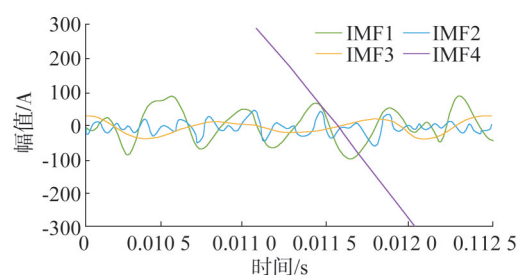


图 5 IMF 分量图

Fig.5 IMF component charts

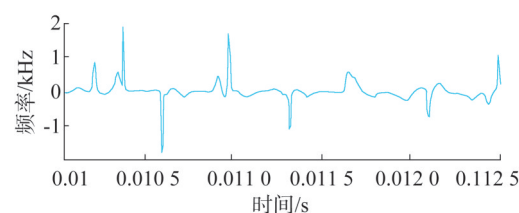


图 6 希尔伯特谱图

Fig.6 Hilbert spectrum

从图 6 中找到突变点,根据第 4 节的内容确定波头到达时间点。结合仿真线路参数,分别计算采用结合算法以及单一算法的测距误差,结果如表 2 所示。

表 2 噪声干扰下不同算法的测距结果

Table 2 Ranging results with different algorithms under noise interference

算法类型	误差/m
结合算法且有干扰	4.3
HHT 且有干扰	6.0
MM 且有干扰	8.2

从表 2 中可知,当输电线路存在干扰时,MM 和

HHT 结合的算法测距误差为 4.3 m;仅单独采用 HHT 算法或 MM 滤波算法的测距误差分别为 6m 和 8.2 m。对比可知,当存在干扰时,采用单一测距算法的误差均大于结合测距算法,且采用 MM 与 HHT 结合测距算法的误差精度为 0.086‰。

6 结论

供电线路长时间断电会给国民经济、供电系统等造成较大的影响,实现准确、快速的故障定位具有重要的意义。相比于阻抗法测距,行波测距方法虽然不受过渡电阻、负荷电流等的影响,但是噪声干扰、波头到达时间标定偏差以及波速计算误差会给行波测距带来困难,降低了定位的准确性。因此,文中提出了数学形态学与希尔伯特-黄变换相结合且不受波速影响的双端行波测距算法,仿真结果表明,所提结合测距算法比单一测距算法精确度更高,验证了此方法的可行性。

参考文献

- [1] 于丹文,张岩,段福凯,等.双高背景下的配电网损耗关键因素降损潜力量化方法研究[J].山东电力技术,2023,50(2):7-13.
YU Danwen, ZHANG Yan, DUAN Fukai, et al. Quantification method of key factors of power loss in distribution network with high penetration of renewables and power electronics[J].Shandong Electric Power,2023,50(2):7-13.
- [2] 廖名洋,张文,袁海,等.基于多脉冲注入法的高压直流输电接地极线路故障测距[J].电网与清洁能源,2022,38(9):98-104.
LIAO Mingyang, ZHANG Wen, YUAN Hai, et al. A fault location method for HVDC grounding pole line using multi-pulse injection method[J].Power System and Clean Energy,2022,38(9):98-104.
- [3] 刘世超,孙其振,张继勇,等.基于在线安全分析的直流换相失败案例仿真分析[J].山东电力技术,2023,50(7):37-43.
LIU Shichao, SUN Qizhen, ZHANG Jiyong, et al. Simulation analysis of DC commutation failure cases based on online security analysis[J].Shandong Electric Power,2023,50(7):37-43.
- [4] 齐郑,黄朝晖,陈艳波.基于零序分量的阻抗法配电网故障定位技术[J].电力系统保护与控制,2023,51(6):54-62.
QI Zheng, HUANG Zhaohui, CHEN Yanbo. Impedance fault location technology for a distribution network based on a zero-sequence component [J]. Power System Protection and Control, 2023,51(6):54-62.
- [5] 邓雯玲,卢继平,石家炜,等.基于双端非同步数据的混合线路故障测距方法[J].电网技术,2021,45(4):1574-1580.
DENG Wenling, LU Jiping, SHI Jiawei, et al. A fault location method for hybrid lines based on two-terminal asynchronous data [J].Power System Technology,2021,45(4):1574-1580.
- [6] 李跃,郑涛,文安.基于单端量的超高压交流输电线路单相接地故障测距方法研究[J].电力系统保护与控制,2020,48(6):27-33.
LI Yue, ZHENG Tao, WEN An. A new location method for UHV AC transmission lines with high resistance faults based on single terminal volume[J].Power System Protection and Control,2020,48(6):27-33.
- [7] 孙广,王阳,薛枫,等.特高压直流输电线路改进双端行波故障定位方法研究[J].电力系统保护与控制,2020,48(14):113-120.
SUN Guang, WANG Yang, XUE Feng, et al. Research on an improved double-terminal traveling wave fault location method for UHVDC project[J].Power System Protection and Control,2020,48(14):113-120.
- [8] 邢志杰,田行军,刘宇晰,等.电缆-架空线混合线路行波故障测距算法研究[J].电网技术,2020,44(9):3540-3546.
XING Zhijie, TIAN Xingjun, LIU Yuxi, et al. Research of traveling wave fault location algorithm for the overhead line-cable hybrid line[J].Power System Technology,2020,44(9):3540-3546.
- [9] 王植.配电网电缆故障行波测距技术研究[D].济南:济南大学,2023.
- [10] 李成信,刘国威,玉聪,等.基于行波的高压输电线路故障定位方法[J].电力科学与技术学报,2023,38(2):179-185.
LI Chengxin, LIU Guowei, YU Cong, et al. A fault location method for high-voltage transmission lines based on traveling wave [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023,38(2):179-185.
- [11] 王乐.基于行波原理的混合线路故障定位研究[D].郑州:华北水利水电大学,2023.
- [12] 陶彩霞,杜雪,高峰阳,等.基于经验小波变换的混合输电线路单相接地故障测距[J].电力系统保护与控制,2021,49(10):105-112.
TAO Caixia, DU Xue, GAO Fengyang, et al. Single-phase to ground fault location of hybrid transmission lines based on empirical wavelet transform [J]. Power System Protection and Control,2021,49(10):105-112.
- [13] 廖晓辉,赵肖健,梁恒娜.一种基于 Hilbert-Huang 变换的电力电缆故障测距方法[J].电力系统保护与控制,2017,45(3):20-25.
LIAO Xiaohui, ZHAO Xiaojian, LIANG Hengna. A power cable fault location method based on Hilbert-Huang transform[J].Power System Protection and Control,2017,45(3):20-25.
- [14] 高淑萍,徐振曦,宋国兵,等.基于小波阈值去噪和 CEEMD 的混合三端直流输电线路故障测距[J].电力系统保护与控制,2022,50(3):29-40.
GAO Shuping, XU Zhenxi, SONG Guobing, et al. Fault location of hybrid three-terminal HVDC transmission lines based on wavelet threshold denoising and CEEMD [J].Power System Protection and Control,2022,50(3):29-40.

(下转第 91 页)

DOI: 10.20097/j.cnki.issn1007-9904.2024.12.011

基于分形理论的闪络放电痕迹分析方法研究

师 伟^{1*}, 孙景文¹, 任敬国², 乔 木², 戈 宁²

(1. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250003; 2. 国网山东省电力公司, 山东 济南 250001)

摘要: 绝缘子连续闪络会导致绝缘子表面出现碳化痕迹, 导致绝缘劣化。对绝缘子表面碳迹的研究有助于解绝缘子长期运行时的闪络特性。文中通过对绝缘子进行直流闪络实验, 获取连续放电后的碳化痕迹图像。基于分形理论, 采用改进的差分盒计数法(improved differential box-counting method, IDBCM)对这些图像进行分析, 对于边缘被切割尺寸框覆盖的矩形图像, 在计数过程中提出加权项, 所提出的方法可以估计绝缘子表面的放电传播特性和劣化特性。由于考虑了碳化痕迹图像的颜色深度, IDBCM在图像预处理和评估绝缘子劣化性能方面表现出了比传统盒计数方法更大的优势。该图像分析方法在处理碳化痕迹时具有通用性, 可为闪络电压提供附加信息, 包括闪络时间、电压大小、工况等。为今后研究放电机理及相应的绝缘子劣化问题提供了一种方法。

关键词: 分形维数; 闪络; 差分盒计数法; 环氧树脂

中图分类号: TM75

文献标志码: A

文章编号: 1007-9904(2024)12-0084-08

Investigation of Approach to Analyze the Tracking Property After Flashover Based on Fractal Theory

SHI Wei^{1*}, SUN Jingwen¹, REN Jingguo², QIAO Mu², GE Ning²

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

2. State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250001, China)

Abstract: Successive flashover would result in carbonized tracking on the insulator surface and cause deterioration to the insulation. Thus, investigating the tracking can be beneficial in understanding flashover characteristics during long-term operations. In this paper, the DC flashover was operated on the insulator, and the image of the track was captured after successive discharges. An improved differential box-counting method (IDBCM) was applied to analyze these images based on fractal theory. Weighted items were suggested during the counting procedure for rectangle images with margins covered by cut-size boxes. It is claimed that the suggested method could estimate the discharge propagation property and deterioration characteristics on the insulator surface. Moreover, IDBCM showed advantages in image pre-processing and deterioration properties revealed compared to the traditional box-counting method attributing to the consideration of color depth. This image analysis method shows universality in dealing with tracking images. It can provide additional information for flashover voltage, including flashover time, voltage size, operating conditions, etc. This paper suggested a potential approach for the investigation of the discharge mechanism and corresponding deterioration in future research.

Keywords: fractal dimension; flashover; differential box-counting method; epoxy resin

0 引言

聚合物电介质由于绝缘性能好而广泛用于气体绝缘设备中。然而, 在气体和固体交界面, 如SF₆和

环氧树脂(epoxies, EP)复合材料交界面, 容易发生闪络, 可能导致设备损坏。目前, 绝缘子沿面闪络已成为影响气体绝缘开关(gas insulated switchgear, GIS)和气体绝缘输电线路(gas insulated transmission lines, GIL)中气体绝缘和固体绝缘发展的重要问题, 受到广泛关注^[1-3]。在长期运行过程中, SF₆/EP界面可能发生连续闪络, 使绝缘层逐渐劣化, 从而导致表面绝缘强度下降^[4-5]。因此, 研究绝缘子连续闪络下

基金项目: 国家电网公司总部科技项目“基于光纤传像的GIS内部多谱段光学成像关键技术研究”(5500-202216134A-1-1-ZN)。
Science and Technology Project of State Grid Corporation of China
“Research on key techniques of Multispectral Optical Imaging in GIS Based on Optical Fiber Transmission”(5500-202216134A-1-1-ZN).

的放电性能及其损伤对于环氧树脂复合材料在气体绝缘设备体系中的应用具有重要意义。

近几十年来,许多学者对闪络特性进行研究,并提出了防止放电发生的设备改进方法^[6-8]。放电过程中环氧树脂的劣化会导致碳化化合物的产生,即在环氧树脂表面会出现明显碳化痕迹^[9],因此可以使用放电现象分析法研究GIS中绝缘子的放电痕迹,并对图像进行分形分析处理,得到放电分析结果^[10-11]。在过去的几年中,分形分析已被应用于研究介电界面或透明电介质的内部放电。A.Beroual等人基于放电图像的分形分析,讨论了油和纸板对蠕变放电的影响^[12-13]。B.X.Du等研究不同树化时间和脉冲持续时间下电树分形维数(fractal dimension, FD)的变化^[14]。

除此之外,在绝缘子上同一路径上的连续闪络会增加碳化痕迹颜色的深度。绝缘子劣化会使电导率增加,导致沿这条特定路径的闪络风险增加。所以,研究碳化痕迹及其颜色特性对于理解连续闪络下放电的传播和放电造成的劣化具有重要意义。现有的分形分析方法大多采用盒计数方法(box-counting method, BCM)和差分盒计数法(differential box-counting method, DBCM)。BCM是最早被用来计算盒维数的算法,由Russel等人于1980年提出,已发展出多种变形算法。BCM首先计算覆盖图像所需最少的尺度不超过 δ 的“盒子”的个数,记为 N_δ ;接着做出 $\log N_\delta - \log \delta$ 图像,利用最小二乘法得到回归直线的斜率 k ;则该图像的盒维数即为 $-k$ 。BCM将彩色图像转换为二值图像进行碳化分析,会去除每个痕迹的颜色深度属性,因此需要在每个路径的分布特性和深度方面应用改进的方法。DBCM作为一种改进的盒计数法方法,与只能应用于二值图像的传统盒计数法相比,能够更好地评估出灰度图像处理后的表面的粗糙度^[15-16],将每个像素的深度作为盒子高度,DBCM可用于评估灰度图像中颜色深度的分布^[17]。

研究连续闪络后的碳化痕迹,并提出改进的差分盒计数法(improved differential box-counting method, IDBCM)来量化EP表面的碳化痕迹,研究碳化痕迹和相应的分形维数。从算法的普适性和分形维数结果的信息出发,讨论所述方法与BCM相比的优势。

1 试验方法

1.1 EP样品特征

将环氧树脂复合材料组成的盆式绝缘子作为样品,试样高度为190 mm,底部半径为251 mm,高压电极和接地电极制备在盆式绝缘子的中央和边界。以氧化铝微粒为填料,质量分数为30%,CT-5531双酚a型环氧树脂作为基体。环氧树脂样品的平均表面粗糙度为0.12 μm ,以纯度为99.99%的 SF_6 气体提供绝缘环境。

由于尖端的电场畸变,导电微粒将黏附在样品表面并在某一方向上诱导放电,闪络将在随机方向上传播,而微粒不会分散碳化痕迹。不同位置的粒子可以提供不同的电场分布,这有助于研究电场分布对闪络特性的影响。直径0.5 mm、长25 mm的铜颗粒分别放置在距离高压电极19 mm、71 mm、123 mm和175 mm处。如图1所示,图中不同位置对应的微粒分别标记为位置a~d。

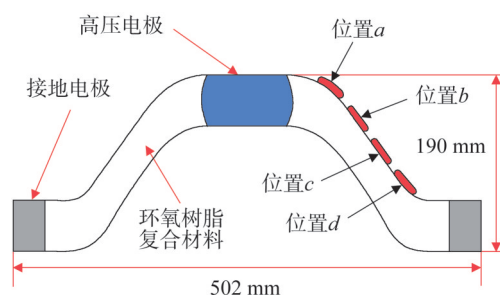


图1 环氧树脂样品

Fig.1 Epoxy resin sample

1.2 表面闪络试验

直流电压由高压直流电源通过充有 SF_6 气体的套管施加,样品用无水乙醇清洗并干燥,放入密封室,将装置抽真空至30 Pa,充入 SF_6 气体至0.06 MPa。在施加电压之前,整个装置静置30 min使气体均匀分布,直流正电压以1 kV/s的速度增加,直到绝缘子发生闪络,通过分压器记录闪络电压。在相同的粒子位置条件下,每组测试需要20次连续闪络,然后在从封闭气室中取出样品后,用高清摄像机拍摄环氧树脂表面的炭痕轨迹。试验电路如图2所示,表面有碳化痕迹的样品典型图像如图3所示。

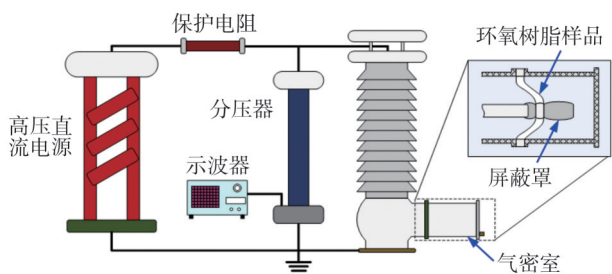


图2 试验电路
Fig.2 Test circuit

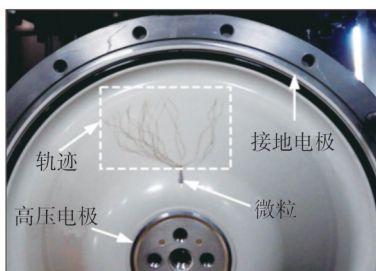


图3 典型碳化痕迹图像
Fig.3 Typical carbonization trace image

2 IDBCM

IDBCM 同样也将信号(图像)分为若干个尺寸为 δ 的“盒子”,而根据每个区域中灰度最大值与最小值的差得到该区域的盒子数量,最后将所有区域上盒子数量相加得到 N_s 。该方法利用图像在某个区域的灰度变化程度来反映该区域中图像的粗糙程度。如图3所示,碳化的深度随痕迹而变化。因此,基于分形理论的图像分析需要考虑深度分布,对碳化痕迹进行评估。分形理论的最基本特点是用分数维度的视角和数学方法描述研究客观事物,更贴近复杂系统的真实属性与状态。用以定量表征分形的参数称为分形维数,是研究分形的主要指标。

根据 DBCM,彩色图像被转换为灰度图像,并且在分形维数计算过程中为图像中的每个像素分配与

灰度级相对应的值^[18]。

试验中的环氧树脂样品为盆型,碳化痕迹分布在三维表面上。以往关于放电现象的分形维数研究大多应用于方形图像^[19-20]。这些图像的大小通常为 $M \times M$ 像素,其中 $M=2^n$, n 是一个大于1的整数。在 BCM 和 DBCM 的计算过程中,如果覆盖方框的边长设为 $2r$,其中 r 是一个大于1的整数,那么所有的像素都可以通过改变盒子的长度来覆盖。所选矩形区域为覆盖特定图像痕迹的最小区域,该区域根据在全部条件下覆盖所有图像中最大区域的痕迹进行选择。

IDBCM 计算过程为:

1)首先将采集到的图像在半径方向上进行扁平化处理,并根据样本结构进行放大以减少透视效果;将平面图像转换为灰度图像,切割成 $M \times N$ 像素,如图4所示。

2)根据 DBCM,应用尺寸为 $s \times s \times s'$ 的方盒覆盖整个灰度图像,其中 s' 为盒子高度。覆盖程序从左上到右下逐块进行,如图5(a)所示。盒子内每个像素的高度对应灰度,盒子覆盖总高度,即 s' 满足 $G/s' = L/s$,其中 G 为灰度的总数, L 为图像的等效长度。

本文处理图像为 $M \times N$ 像素,不是正方形,因此对应的正方形形状图像的等效长度定义为 $L = (MN)^{0.5}$ 。盒子的高度为

$$s' = \frac{G \times s}{L} \quad (1)$$

将方框中最大高度与最小高度之差计为 $N_i(i, j)$,如图5(b)所示,其中 i 和 j 表示覆盖过程中方框的位置;将方框中每个像素的高度记为 $h_{k,q}(i, j)$,其中 k 和 q 表示像素在方框中对应的位置。总计数 $N_i(s)$ 对应于全尺寸方框 s 覆盖的图像,其值为每个方框中的盒子计数之和。 $N_i(i, j)$ 和 $N_i(s)$ 的表达式为:

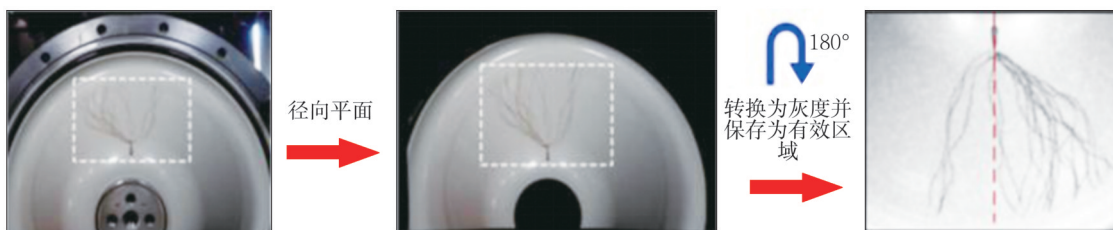
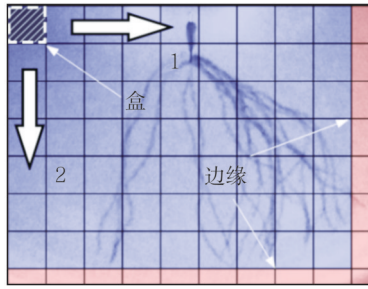


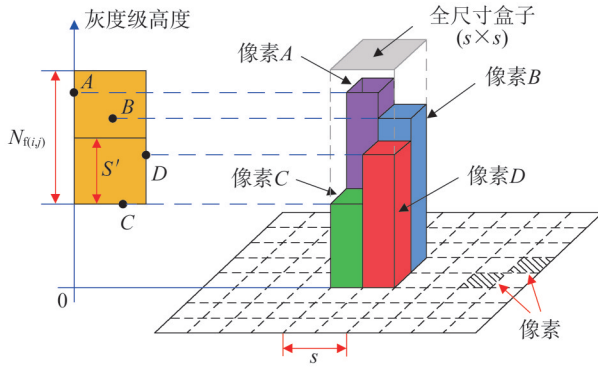
图4 图像处理流程
Fig.4 Image processing flow

$$N_f(i, j) = \text{int} \{ [\max(h_{0,0}(i, j), \dots, h_{k,q}(i, j), \dots, h_{s-1,s-1}(i, j)) - \min(h_{0,0}(i, j), \dots, h_{k,q}(i, j), \dots, h_{s-1,s-1}(i, j))] / s' \} + 1 \quad (2)$$

$$N_f(s) = \sum_{i=1}^{\text{int}(\frac{M}{s})} \sum_{j=1}^{\text{int}(\frac{N}{s})} N_f(i, j) \quad (3)$$



(a) 覆盖过程



(b) 方框覆盖某块高度计数方法

图5 DBCM覆盖方法

Fig.5 DBCM overlay method

3) 如果高度 M 或宽度 N 不能被 s 整除, 那么边缘将保留。计算微分值如式(4)所示, 其中 $S(i, j)$ 表示切尺寸盒面积, $N_c(i, j)$ 表示覆盖指数为 (i, j) 的切尺寸盒子的计数; 式(5)定义了整个边距的总计数, $N_c(s)$ 表示某一盒子长度的右边距、下边距和右下角的计数之和。总差计数 $N_t(s)$ 是全尺寸和切割尺寸覆盖程序的计数之和, 如式(6)所示。

$$N_c(i, j) = \left\{ \text{int} \left\{ [\max(h(i, j)) - \min(h(i, j))] / s' \right\} + 1 \right\} \times \frac{S(i, j)}{s \times s'} \quad (4)$$

$$N_c(s) = \sum_{i=1, j=\text{int}(\frac{N}{s})+1}^{i=\frac{M}{s}} N_c(i, j) + \sum_{i=\text{int}(\frac{M}{s})+1, j=1}^{j=\frac{N}{s}} N_c(i, j) + \quad (5)$$

$$N_c(\text{int}(\frac{M}{s}) + 1, \text{int}(\frac{N}{s}) + 1)$$

$$N_t(s) = N_f(s) + N_c(s) \quad (6)$$

方盒的边长限制为 $\sqrt[3]{L} \leq s \leq L/2$, 用不同的 s 重复步骤2)和步骤3), 直到长度达到限制。 $(G/s', N_t(s))$ 表示比值和对应的微分值, 绘制在双对数轴上, 然后进行线性拟合, 拟合直线的斜率为分形维数。

3 结果与讨论

3.1 放电痕迹特征

由于环氧树脂中的碳元素导致表面碳化, 表面留下了明显的棕色轨迹, 微粒与中心电极距离为 19 mm、71 mm、123 mm 和 175 mm 的碳化痕迹图像如图6所示。碳化痕迹会导致放电在该区域传播的可能性增加。表面碳化痕迹分为两部分, 即覆盖高压电极至颗粒尖端区域的高压部分和覆盖底部圆圈处颗粒尖端至地面区域的接地部分。

图6(b)和图6(c)的中间区域有明显的深棕色痕迹, 表明大多数闪络通过此路径传播, 该路径放电的可能性很高。为了定量评估碳化痕迹, 应用分形分析, 并计算图6中每个图像的分形维数。



(a) 距离 19 mm

(b) 距离 71 mm



(c) 距离 123 mm

(d) 距离 175 mm

图6 不同位置金属微粒条件下碳化痕迹图像

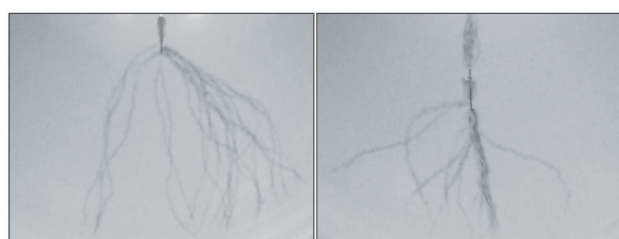
Fig.6 Image of carbonization trace under the condition of metal particles at different positions

3.2 基于IDBCM的分形维数结果

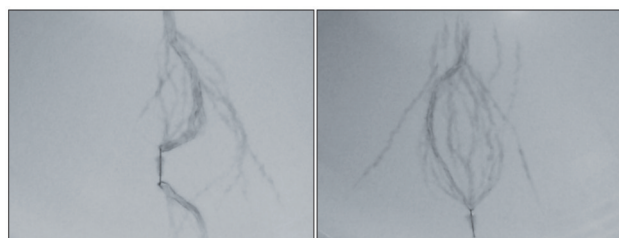
图6的原始图像切割转换后的灰度图像如图7所示。根据IDBCM, 图7中4个碳化痕迹对应的拟合

结果如图8所示。可以看出,提出的计算方法在改变覆盖盒长度时具有相当大的线性趋势,因此IDBCM可以用于评估碳化痕迹的自相似性。计算拟合直线的斜率,对应的分形维数如图9所示。分形理论已被广泛应用于分析固体表面的粗糙度和波动,分形维数越高,表明表面波动越大,闪络越严重,表面越不光滑(如存在突起等);而分形维数值越低,表明表面越光滑。当引入分形维数来评估灰度图像中的灰度分布时,高值表示该图像中的异常灰度值,包括白色背景中的异常暗像素或深色背景中的浅色像素。

随着粒子从中心电极移动到接地电极,分形维数先增大后减小。图7(b)、图7(c)的中间区域有一条“主路径”,即其不能被其他简单路径所包含。深颜色和低灰度值的主路径作为背景异常灰度值,会导致灰度值分布的明显波动,最终导致分形维数值较高。



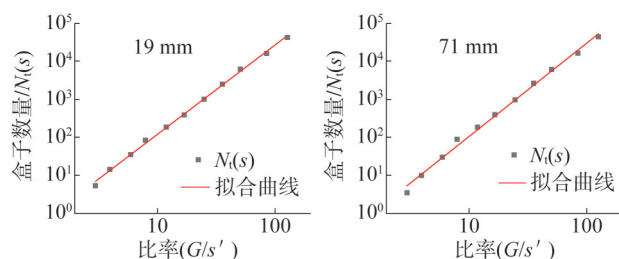
(a)距离 19 mm (b)距离 71 mm



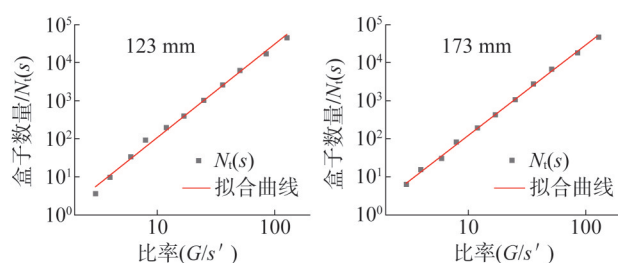
(c)距离 123 mm (d)距离 175 mm

图7 不同位置金属微粒碳化痕迹灰度

Fig.7 Gray level of carbonization trace of metal particles at different positions



(a)距离 19 mm (b)距离 71 mm



(c)距离 123 mm (d)距离 175 mm

图8 拟合结果

Fig.8 Fitting result

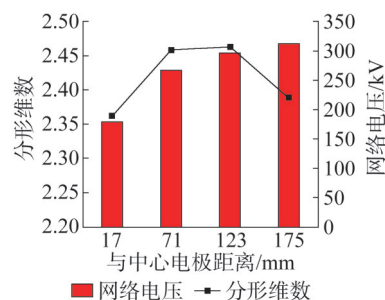


图9 分形维数与闪络电压关系结果

Fig.9 Results of relationship between fractal dimension and flashover voltage

因此,与图7(b)、图7(c)相比,图7(a)、图7(d)中的分形维数值较低,因为这两幅图像中存在明显的“主路径”。

严重的放电会产生颜色较深的“主路径”,表明连续闪络过程中放电沿该方向传播的可能性较大。考虑到颗粒在表面位置的变化,中间区域的颗粒会导致闪络沿颗粒方向传播的频率和可能性较高。由于沿同一路径连续放电会导致环氧树脂表面严重退化,在气体绝缘系统中,中间区域的颗粒会对样品或绝缘子造成更严重的损坏。

与图6相对应的闪络电压如图9所示。很明显,随着颗粒在径向上从中心向外移动,闪络电压增加,离中心电极最近的17 mm处颗粒的闪络电压最低。这意味着高压电极附近表面上的颗粒在运行期间极有可能引起闪络。根据电场分布的计算,粒子尖端的电场强度极高,这将在高压下导致尖端附近的SF₆气体严重电离,带电粒子将在尖端附近产生并扩散到周围环境。与绝缘气体相比,由带电粒子组成的路径表现出优异的导电性。一旦路径桥接了金属颗粒和电极,金属颗粒就可以被视为电极的延长,此

时,可以将金属颗粒视为电极的突出部分。这将导致闪络电压明显降低。当金属颗粒远离电极时,例如沿着表面的中间区域,很难获得由带电颗粒组成的高导电路径。由于路径太长,带电粒子无法在扩散作用下桥接电极和金属粒子。因此,当金属颗粒放置在中心电极附近时,闪络电压较低。

对比分形维数和闪络电压的结果,可以看出,随着粒子位置的变化,存在不协调的趋势。除电压外,可参考碳化痕迹估计闪络特性,并提供不同于电压的信息,因此,放电痕迹分析对确保绝缘子的长期安全运行具有重要意义。而利用IDBCM分析放电痕迹,其辨别力较好。

若绝缘子采用新的设计结构或新材料,须对其进行与闪络特性相关试验。拆卸上文所提装置后,用高清摄像机收集碳化痕迹图像,分析碳化痕迹和放电特性。而对于正在运行GIS中的绝缘体,光纤图像束可以插入GIS围管,使GIS内部图像转移到外部,借助于GIS外的成像装置采集绝缘子图像。这样,可以在不拆卸GIS的情况下获得碳化痕迹图像。

目测检查可以发现样品表面是否有痕迹以及是否发生过闪络,但无法辨识表面退化程度。IDBCM定量评估表面退化程度,能够为绝缘子的结构设计和材料选择提供参考。

3.3 BCM与IDBCM比较

为深入理解基于IDBCM的分形分析方法,对二维模式下基于传统BCM的分形分析结果进行讨论。将原始碳化痕迹图像转化为二值图,首先将彩色图像转换为灰度图像,然后,将最优灰度值设置为阈值,将灰度值高于阈值的像素设置为白色,将灰度值低于阈值的像素设置为黑色,最后得到与图7对应的二值图像如图10所示。由于已经尝试达到最优阈值,图10所示的图像是相对最理想的结果,但其无法从背景中完美地提取碳化痕迹,不能提供具有合理精度的信息,因此图10中的图像不能用于计算基于BCM的分形维数。无法提取碳化痕迹的原因为图6所示彩色模式下沿图像的渐变背景混淆了碳化痕迹和背景参考阈值。

为完全从背景中提取碳化痕迹,利用可补偿算法,处理后的碳化痕迹图像二值图如图11所示。按照文献[14]所述内容,利用BCM计算不同位置金属微粒碳化痕迹分形维数,结果如图12所示。

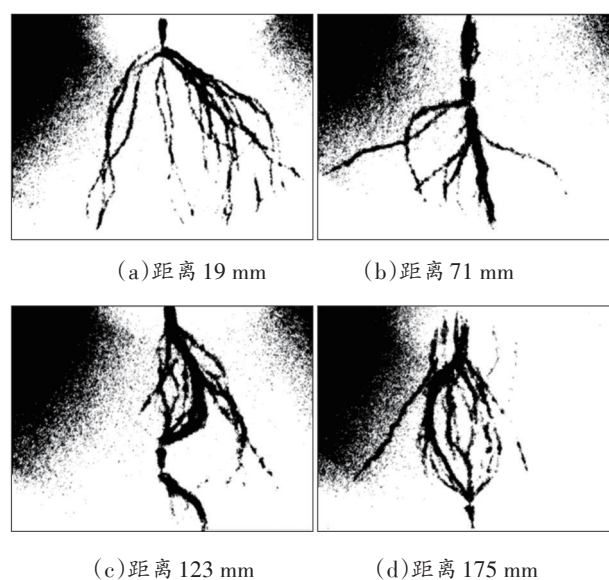


图10 基于原始碳化痕迹图像转化的二值图结果
Fig.10 Binary graph results based on original carbonization trace image transformation

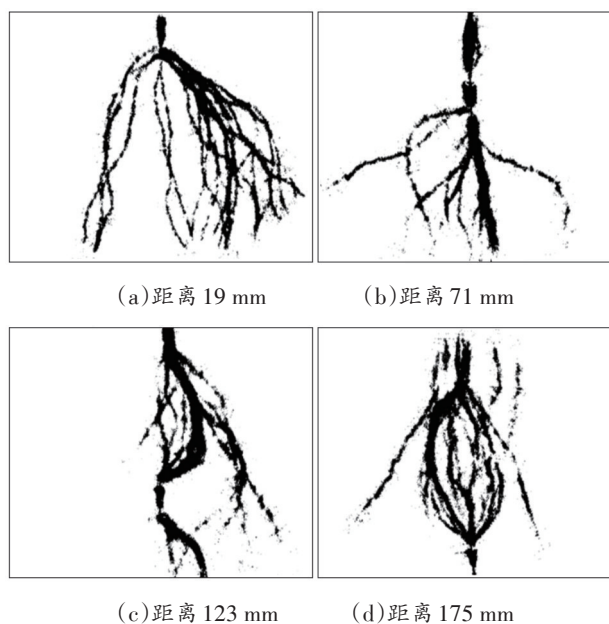


图11 补偿算法处理后的碳化痕迹图像二值图
Fig.11 Binary graph of carbonization trace image processed by compensation algorithm

由图12可知,随着粒子位置的变化,碳化痕迹的分形维数也会发生相应的变化,基于BCM的分形维数提供了模糊的规则性,但其并不适合处理这种情况下的碳化痕迹。从灰度级或颜色模式到二进制模式的转换过程中忽略深度,因此在评估中将忽略

每个像素的颜色波动,BCM与IDBCM相比,忽略了“主路径”,尤其是与中心电极距离为71 mm和123 mm处的粒子。在复杂条件下进行试验时,要保证捕获的图像具有均匀的背景较为困难,使得BCM难以从背景中提取碳化痕迹,最终导致算法精度下降。相较于BCM,所提IDBCM具有更好的精度和适应性。

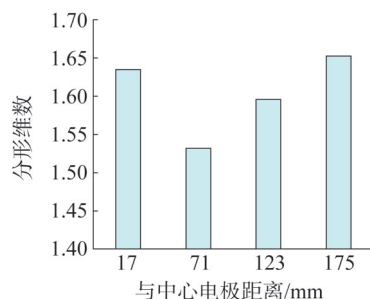


图12 BCM计算不同位置金属微粒碳化痕迹分形维数结果

Fig.12 BCM calculates the fractal dimension of carbonization traces of metal particles at different locations

4 结论

聚合物介电材料在气体绝缘系统中存在表面闪络问题,限制其在高压电器中的应用。研究了SF₆/EP界面连续闪络的碳化痕迹,并应用IDBCM法评估了碳化痕迹。结论总结如下:

1)在SF₆/EP界面处进行直流闪络,由于连续放电,环氧树脂表面仍存在明显的棕色碳化痕迹。碳化痕迹显示,中间区域的粒子有明显的主路径,这表明连续闪络对环氧树脂造成了严重损坏。

2)对于任意高度和宽度的矩形图像,在计数过程中采用加权因子覆盖潜在边缘。基于IDBCM的分形维数算法中,中间区域的粒子分形维数值较高,这是由于主路径区域颜色深度的波动所致。

3)与BCM相比,IDBCM考虑了颜色碳化深度,在评价连续放电的传播路径和相应的表面退化方面具有优势。同时,IDBCM在满足要求的图像质量方面具有通用性,可以提供闪络电压的附加信息。所提出的图像分析方法为今后的研究提供了一种基于分形理论的闪络放电痕迹分析的潜在方法。

参考文献

[1] 李杰,汪鹏,孙景文,等.基于Gabor变换的GIS设备典型放电缺

陷识别[J].山东电力技术,2022,49(2):54-60.

LI Jie, WANG Peng, SUN Jingwen, et al. Recognition of typical discharge defects in gas insulated switchgear equipment based on Gabor transform[J]. Shandong Electric Power, 2022, 49(2): 54-60.

[2] 王江伟,张丕沛,李杰,等.特高压变电站1000 kV GIS局部放电问题分析[J].山东电力技术,2022,49(7):52-57.

WANG Jiangwei, ZHANG Pipei, LI Jie, et al. Analysis of partial discharge in 1000 kV GIS of UHV substation [J]. Shandong Electric Power, 2022, 49(7): 52-57.

[3] 郑莹莹,吕俊涛,周大洲,等.GIS设备金属颗粒放电的带电检测方法[J].山东电力技术,2018,45(11):15-18.

ZHENG Yingying, LYU Juntao, ZHOU Dazhou, et al. Live detection method for metal particle discharge in GIS equipment[J]. Shandong Electric Power, 2018, 45(11): 15-18.

[4] FREDERIX E M A, KOMEN E M J. Simulation of noble metal particle growth and removal in the molten salt fast reactor [J]. Nuclear Engineering and Design, 2023, 415: 112690.

[5] MORIMOTO T, ESAKI T, TERAOKA Y, et al. Crystal growth of tetra-n-butylammonium bromide hydrate nucleated from metallic particles[J]. Journal of Crystal Growth, 2023, 623: 127399.

[6] TETIK H, MARKGRAF E, KATO K, et al. Highly conductive laser-induced graphene through the deposition of liquid metal particles for flexible electronics [J]. Flexible and Printed Electronics, 2023, 8(3): 035001.

[7] NAZEER M, HUSSAIN A, HAMEED M K. Impact of nano metallic particles and magnetic force on multi-phase flow of third-grade fluid in divergent channel: analytical study [J]. International Journal of Modelling and Simulation, 2023, 43(4): 426-437.

[8] KIM Y H, AN J H, LI X M, et al. Solvent-driven transformation of micro-sized metal particles into a nanoporous structure and its application to ultrafast-charging batteries [J]. Advanced Functional Materials, 2023, 33(36): 2301552.

[9] LUO B W, ZHU Z C, LIANG X B, et al. Effect of metal site influenced by metal particle size on the catalytic hydrogenolysis of cornstarch lignin [J]. Journal of the Energy Institute, 2023, 109: 101255.

[10] 刘航斌,林厚飞,褚静,等.基于CWGAN-div和Mi-CNN的GIS局部放电图谱识别[J].浙江电力,2023,42(8):75-83.

LIU Hangbin, LIN Houfei, CHU Jing, et al. Recognition of partial discharge patterns of GIS based on CWGAN-div and Mi-CNN [J]. Zhejiang Electric Power, 2023, 42(8): 75-83.

[11] QUE L K, AN Z L, MA Y, et al. High resistance of surface fluorinated epoxy insulators to surface discharge in SF₆ gas [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(1): 245-252.

[12] CHAOU A K, MEKHALDI A, TEGUAR M. Elaboration of novel image processing algorithm for arcing discharges recognition on HV polluted insulator model [J]. IEEE Transactions on Dielectrics

- and Electrical Insulation, 2015, 22(2): 990-999.
- [13] KOPPISETTY K, SERKAN M, KIRKICI H. Image analysis: a tool for optical-emission characterization of partial-vacuum breakdown [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2009, 37(1): 153-158.
- [14] AMARASINGHE D, SONNADARA U, BERG M, et al. Fractal dimension of long electrical discharges [J]. Journal of Electrostatics, 2015, 73: 33-37.
- [15] BEROUAL A, DANG V H. Fractal analysis of lightning impulse surface discharges propagating over pressboard immersed in mineral and vegetable oils [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(4): 1402-1408.
- [16] DU B X, XUE J S, ZHANG M M. Effect of pulse duration on electrical tree and breakdown process of epoxy resin in LN2 [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(1): 359-366.
- [17] LIU Y, CHEN L Y, WANG H M, et al. An improved differential box-counting method to estimate fractal dimensions of gray-level images [J]. Journal of Visual Communication and Image Representation, 2014, 25(5): 1102-1111.
- [18] QI B, LI C R, HAO Z, et al. Surface discharge initiated by immobilized metallic particles attached to gas insulated substation insulators: process and features [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(3): 792-800.
- [19] LONG M, PENG F. A box-counting method with adaptable box height for measuring the fractal feature of images [J]. Radioengineering, 2013, 22(1): 208-213.
- [20] ZHOU H W, XIE H. Direct estimation of the fractal dimensions of a fracture surface of rock [J]. Surface Review and Letters, 2003, 10(5): 751-762.
- 收稿日期: 2023-03-01
修回日期: 2024-02-23
作者简介:
师 伟(1987), 通信作者(weishi1987@126.com), 男, 博士, 高级工程师, 从事开关类设备状态检测及状态评价工作;
孙景文(1990), 女, 硕士, 工程师, 从事开关类设备状态检测及状态评价工作;
任敬国(1986), 男, 博士, 高级工程师, 从事开关类设备状态检测及状态评价工作;
乔 木(1989), 男, 硕士, 高级工程师, 从事开关类设备状态检测及状态评价工作;
戈 宁(1987), 男, 硕士, 高级工程师, 从事开关类设备状态检测及状态评价工作。
- (责任编辑 郑天茹)

(上接第 83 页)

- [15] 徐先峰, 马志雄, 姚景杰, 等. 基于小波变换和 GA-BP 神经网络的电力电缆故障定位[J/OL]. 电气工程学报: 1-9[2023-12-10]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1289.tm.20231024.1305.002.html>.
- XU Xianfeng, MA Zhixiong, YAO Jingjie, et al. Cable fault location based on wavelet transform and GA-BP neural network[J/OL]. Journal of Electrical Engineering: 1-9[2023-12-10]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1289.tm.20231024.1305.002.html>.
- [16] NAMDARI F, SALEHI M. High-speed protection scheme based on initial current traveling wave for transmission lines employing mathematical morphology [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(1): 246-253.
- [17] LUO X J, ZHANG L L, SHAN H T, et al. Traveling wave velocity independent fault location scheme with adaptive mathematical filters for distribution network [J]. Electric Power Systems Research, 2022, 209: 108040.
- [18] OLIVEIRA A P, MOREIRA F A, PICANÇO A F. Accuracy analysis using the EMD and VMD for two-terminal transmission line fault location based on traveling wave theory [J]. Electric Power Systems Research, 2023, 224: 109667.
- [19] OLIVEIRA A P, MOREIRA F A, PICANÇO A F. Application of Hilbert-Huang and stockwell transforms to fault location in transmission lines using traveling wave theory[C]//2022 IEEE 7th International Energy Conference (ENERGYCON). IEEE, 2022: 1-6.
- [20] WANG H Z, QI Z K, CHEN B S, et al. Eliminating the dependence of GPS or communication latency estimation in traveling wave based double-terminal fault location [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(6): 3792-3803.
- [21] LOPES F V, REIS R L A, SILVA K M, et al. Past, present, and future trends of traveling wave-based fault location solutions[C]//2021 Workshop on Communication Networks and Power Systems (WCNPS). IEEE, 2021: 1-6.
- 收稿日期: 2023-12-11
修回日期: 2024-06-13
作者简介:
张永东(1987), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为继电保护、故障分析;
陶伟叶(1999), 通信作者(2012150268@qq.com), 男, 硕士在读, 主要研究方向为电网故障分析;
常欣丽(1987), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为继电保护、故障分析;
王云鹏(1987), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电网故障分析;
丛玉颀(1986), 女, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为继电保护、故障分析。
- (责任编辑 车永强)

《山东电力技术》2024年总目次

(期.页)

·输电线路抗风设计、性能评估及风振控制·

海岛大跨越输电塔线体系风振响应及动力失稳分析	于佳宝,卓越,张佳毅,郑 翀,曹枚根(1.1)
± 1100 kV 特高压输电塔线体系风振响应分析	杨子烨,朱超杰,施伟国,邓洪洲(1.11)
海岛输电塔线体系风振响应及易损性分析	曾璧环,池曦镔,张佳毅,杨德栋,曹枚根(1.24)
基于ABAQUS的输电线找形与分裂导线模拟研究	田 利,刘凯铭,张思遥,荣坤杰,邵国栋,张思祥(9.1)
螺栓松动对输电塔振动特性及抗风性能的影响研究	胡亚洲,曹枚根,屠 锋,郑 翀(9.9)
柔性腹杆输电塔风振特性及抗倒塌分析	钱俊峰,曹枚根,于佳宝(9.19)
MnS形态与分布对输电塔塔材力学性能的影响	张华恺,管明健,冀新波,陈 阳,李晓宇(9.30)

·配电网·

计及主动需求响应的配电网有功无功鲁棒优化调度	李 阳,张启亮,李开灿,孔维娜,刘学祺(1.35)
新型电力系统下配电网网络结构研究	龚俊祥,徐有琳,张 菁,许春华(1.45)
计及线化潮流约束的主动配电网运行优化	丁月明,张学清,崔荣喜,李明冰,许家余(3.36)
基于多源报警信息贝叶斯网络与关联离散系数的配电网故障台区定位方法	李思远,国 力,许志元,李晓磊,朱彦玮(3.45)
基于集群划分的配电网双层电压协调优化策略	杨 颂,王成龙,孙树敏,程 艳,于 芃(3.55)
基于强化学习算法的微电网优化策略	李子凯,杨 波,周忠堂,张 健,徐明珠(6.27)
基于智能光储软开关的柔性有源配电网潮流优化	宋 亮,邢志同,毛晨旭,于馨玮(6.36)
多配电台区柔性直流互联系统换流站定容技术研究	刘 洋,李立生,崔 健,于海东,屈 鲁(6.43)
基于多端柔性直流配电网主动型负荷建模分析	赵祖熠,蔡清亮,迟小翔(6.52)
以 $N-1$ 满足率为约束的配电网最大供电能力评估	邵 雪,栗子豪,陈昭宇,朱 齐,王 沁(9.65)
计及新能源波动的分布式储能分层控制策略	王尚斌,苑丽伟,方 莹,李洪海,刘彦华(9.74)

·人工智能·

基于时钟循环神经网络的光伏故障诊断	林永君,张世成,杨 凯,李 静(1.52)
基于核主成分分析和食肉植物算法优化随机森林的风电功率短期预测	陈晓华,吴杰康,龙泳丞,王志平,蔡锦健(1.59)
适于低功率状态的多特征融合负荷分解方法	李子凯,岳宝强,杨 波,周忠堂,王春宝(1.68)
基于EABC算法优化RFR模型的电力行业碳排放量预测	赵中华,张绪辉,王 太,刘 科,张利孟(1.77)
基于鸸鹋优化算法优化广义回归神经网络的电动汽车充电负荷短期预测	陈晓华,吴杰康,张勋祥,龙泳丞,王志平(7.1)
基于3DCNN与CLSTM混合模型的短期光伏功率预测	于丹文,李 山,刘航航,李广磊(7.10)

基于 EMD-DBO-BiLSTM 的风电外送线路载流量预测方法 刘明林(7.19)

·新能源并网优化运行与控制·

基于 CatBoost 的新型电力系统两阶段轻量化暂稳智能评估方法

..... 兰宇田,姚 伟,张文栋,刘世超,仇玉强(2.1)

面向分布式资源聚合管控的虚拟电厂建模与优化控制综述

..... 何斯强,张俊岭,顾宗奇,施啸寒,江 涵(2.11)

抽水蓄能电站的多元化经济价值评价方法研究 汪 莹,韩晓男(2.25)

基于模态分析的宽频带振荡区域定位研究 周生奇,管学辉,钟世民,孙鹏菊,李 强(2.37)

·数字新基建·

用于 Buck 变换器监测的嵌入式概率数字孪生控制器 贝太周,陈 博,袁 月,刘 博(2.46)

新型电力系统终端通信网优化方案研究 王浩成,宋厚营,于 佳(2.56)

基于时空流量预测的时延敏感无源光网络动态带宽调度技术

..... 张 浩,王一蒙,桑玮婧,顾仁涛,朱文武(9.37)

基于改进 YOLOv5s 的现场审计设备智能识别方法研究 隋爱芳,丁鹏程(9.46)

一种面向可信 WLAN 和 5G 异构网络的垂直切换算法 赵 洋,管 菱,赵晓红,任天成,王文婷(9.57)

·设备检测与故障诊断·

基于改进 VMD-MCKD 和深度残差网络的风机齿轮箱故障诊断

..... 蔡昌春,何 捷,承敏钢,张能文,王全凯(2.67)

调相机外冷水系统结垢分析及改进研究 郝亚楠,李贵海,颜 庆,王 俊,郭 语(2.79)

基于充电曲线转换的串联锂离子电池组一致性诊断方法研究

..... 吕炳霖,刘勇超,张佳云,田 晓,李文芳(7.45)

风电螺栓紧固力超声波测量的现状与展望 魏祥赛,刘广兴,张丙法,崔伟坛,蒲英俊(7.52)

·城市电网韧性提升关键技术·

灾后移动应急资源调度和配电网恢复统一决策 陈韵含,许 寅,王 颖,黄 鑫,王赛一(3.1)

城市应急微网群管控关键技术综述 巨云涛,李子怡(3.8)

基于对抗性自动编码器的城市配电网虚假数据注入攻击检测 常 颢,徐俊俊,王晓兵,周 宪(3.18)

台风灾害下电网多维韧性评估研究 谭 静,王 东,张英华,苏 峰,徐雪松(3.27)

面向恢复力提升的高比例分布式光伏接入配电网规划方法 缪雨函,许 寅,王 颖(8.1)

面向韧性提升的虚拟振荡器并网运行控制方法 史亚帆,许 寅,吴翔宇(8.10)

计及电动汽车引导和网络重构的配电网负荷恢复策略 王炜歆,张露元,王小君,王希豪,刘 翌(8.18)

·输变电·

基于点云数据的变电站三维建模方法研究 郑文杰,乔 木,杨 祎,崔其会(3.65)

基于风险理论的合闸过电压抑制方案评估方法研究	孙景文,徐 冉,师 伟,姚金霞,陈立征(3.73)
基于PCA-IHHO-LSSVM的变压器绕组热点温度预测	刘婧珂,肖 添,魏 阳,刘云飞,刘 闯,陈海旭(8.59)
环保型泡沫灭火剂在变压器油表面的铺展特性研究	李国春,齐国栋,孔 帅,朱小龙,王东路(8.67)
高电场下直流绝缘子表面积污特性研究	王亚平,李智辉,阿思亚,刘 岩,曹 彬(8.78)
变压器饱和特性对无功盈余下系统过电压影响的仿真研究	张培夫,葛 景,王新宝,常宝立,俞秋阳(11.85)
特高压GIS开关设备电磁波衰减特性及在线监测传感器布点方案研究	张丕沛,白 卓,于 吉,郭晨瑞(11.93)
SF ₆ /N ₂ 混合气体隔离开关接触不良时的温度分布及诊断判据研究	张丕沛,孙国峰,李 杰,汪 鹏,王江伟(12.61)
电导率对直流GIL绝缘子电荷积聚过程影响研究	李 杰,王 丹,汪 鹏,孙景文,辜 超(12.69)
基于数学形态学与希尔伯特-黄变换的线路故障测距方法研究	张永东,陶伟叶,常欣丽,王云鹏,丛玉顿(12.78)
基于分形理论的闪络放电痕迹分析方法研究	师 伟,孙景文,任敬国,乔 木,戈 宁(12.84)
 ·新型电力系统源网荷储和多能互补关键技术·	
电-气-热综合能源系统协同调度优化研究综述	赵佩尧,李正烁,高 晗,杨 畅(4.1)
电力系统交流潮流线性化方法研究综述	赖海鹏,李志刚,于金雨,郑杰辉(4.12)
数据驱动的电力系统动态安全评估研究综述	姜力杨,盖晨昊,齐 航,孙润稼(4.27)
促进用户负荷特性优化的分时电价机制设计方法	王 坤,李树旭,李俊杰,李知艺(4.36)
综合能源生产单元参与日前电-气耦合市场分布鲁棒自调度方法	李懿鑫,李正烁,刘航航(4.47)
 ·电网运行与控制·	
连续换相失败对大电网功角稳定影响分析	朱元振,马 欢,姜力扬,周 宁,蒋 哲(4.56)
基于猎人猎物优化算法优化BiLSTM的电力负荷短期预测	陈晓华,吴杰康,蔡锦健,唐文浩,龙泳丞,王志平(4.64)
多端口变换器及其解耦策略关键技术综述	乐 宇,夏志鹏,王 悦,吴 馨,刁春燕(4.72)
基于ADPSS的直驱风机半实物仿真研究	张志轩,李乐蒙,周 宁,贾小凡,蒋 哲,赵 康(7.27)
考虑节点惯量的新型电力系统连锁故障仿真模型及关键节点辨识	黄振宁,孙 宁,邵华强,李云婧(7.35)
考虑充电站无功支撑的城市电网动态无功电压优化	董 新,李 广,乔荣飞,刘 申,阚常涛(12.1)
电子式消弧线圈对接地故障谐波选线的影响	乔东伟,宫德锋,秦苏亚,杨 坤,薛永端(12.10)
基于Bhattacharyya系数和Pearson相关系数的交直流混联电网电压波形相似度纵联保护方法	张弘喆,丛 伟,王瑞梅,古千硕,张永杰(12.19)
基于WOA-AM-GRU的短期电力负荷预测方法的研究	韩明冲,韩 杰,姜 超,苏本勇,韩 冰(12.27)

•能源互联网•

- 考虑 P2G 及碳捕集的热电联产虚拟电厂低碳优化调度 薛太林,杨海翔,张海霞,房 毅,王 京(5.1)
- 综合能源网络建模与运维技术研究综述 冯 振,阎 俏,迟青青,王明远,焦 飞(5.9)
- 基于合作博弈的多园区互联综合能源系统低碳经济调度 邢家维,程 艳,于 芃,关逸飞,王成龙(5.19)
- 基于扩展系统动力学模型的电力碳排放量预测方法 李光肖,杨依路,刘宗杰,何召慧,孙文胜(11.61)
- 计及阶梯式碳交易机制及负荷响应的综合能源系统优化调度模型
..... 唐 晓,袁 飞,代 勇,刘文明,张 寒(11.74)

•新能源•

- 基于改进 PSO-LSTM 算法的风电机组状态监测方法研究 王印松,刘佳微,贾思宇,翁 疆(5.30)
- 基于多重数据筛选的短期风电功率区间优化预测 田莉莎,严 雄(5.38)
- 水平荷载作用下刚性桩桩土相互作用弱化规律和分布模式研究
..... 孙永鑫,曲占斐,何春晖,王 龙,王志鹏(5.47)
- 计及风电机组短时过载能力的风电场多机协同频率控制策略
..... 曲建璋,丁浩天,王毓琦,王绪光,陈建磊(10.1)
- 基于北方苍鹰优化算法优化长短期记忆神经网络的光伏发电功率短期预测 陈晓华,吴杰康(10.10)
- 基于数据驱动的风电机组能效状态检测与预警研究 于 芃,程 艳,邢家维,杨 颂,王玥娇(10.18)
- 多时空尺度风电集群爬坡的模型预测控制分层策略 王 京,徐诒玥,房 毅,杨海翔,王晨旭(11.39)
- 基于阻抗分析法的双馈风电机组经串补线路并网系统的次同步振荡特性研究
..... 袁慧涛,袁文涛,王文敬,胡国华,曾宪振(11.48)

•发电技术•

- 圆形截面凝汽器布管设计及换热性能分析 秦启君,周 旭,陈令章(5.56)
- 基于可解释关系模型的 SCR 入口气温预测 路 宽,杨兴森,张绪辉,孙雯雪,王海仰,杨子江(5.63)
- 基于改进混合黏菌天鹰算法的水电机组调节系统参数辨识
..... 钟子威,祝令凯,郑 威,付文龙,张仕海(5.73)
- 基于 EBSILON 的母管制热电联产系统多目标负荷优化研究
..... 胡一鸣,陈 斌,李 明,钟 江,李 蔚,肖 颖(7.61)
- 全燃烟煤的 W 火焰锅炉改造数值模拟研究 赖金平,李朝兵,何陆灿,张文振(7.68)
- 背压机组与抽凝机组经济性计算方法改进研究 张 虎,劳金旭(7.75)
- 基于时序深度融合网络的汽轮发电机组振动故障诊断 何小锋(10.67)
- 火-风-光多能互补系统中燃煤机组“三联改”适用性研究 ··· 祝令凯,郑 威,钟子威,王琮瑜,宋继伟(10.74)
- 超超临界机组城市中水综合实践应用及零排放试验研究 ··· 李贵海,孙有坤,高 坚,孔 帅,刘国强(10.84)

•源网荷储协调互动•

- 考虑电动汽车集群响应的分布式资源协同调度策略研究 江 建,张树森,徐峰亮(6.1)
- 多区域机组协同配合的优化排序安全稳定控制策略 陶 军,雷 轲,慕 腾,刘石川(6.12)

用于火储联合调频的多元混合储能系统应用及经济性分析 邹 杰,周占平,邵国栋(6.20)
计及资源差异特性的分布式光伏与储能聚合运营优化方法

..... 关逸飞,王玥娇,刘奕元,孙树敏,杨 颂(12.34)

考虑调峰辅助服务的虚拟电厂日前运行优化研究 耿 健,金玉龙,杨宇峰,曹 敬,武锡锦(12.44)

基于时间序列数据挖掘的常规机组爬坡性能估计

..... 刘恩仁,高 嵩,白 卓,杨子江,李乐蒙,李 军(12.53)

•技术研讨•

抛物线边界随机幅值的局部放电图谱虚拟仿真培训系统 张艳杰,隋宜臻,刘洪顺(6.60)

特高压输电线路全过程机械化施工方案及费用分析 王 成,李 钟,龚 涛,陈俊帆,李 磊(6.68)

基于改进组合权重的电网救援优先级确定方法 韩志骏,隋 灿,刘朝章,许永刚,韩 洪(6.77)

•电力市场运营•

考虑电价不确定性的发电企业电能量-辅助服务市场报价策略

..... 刘航航,周 蕾,司君诚,王元元,王玲玲(8.27)

碳达峰碳中和背景下中国西部用电需求预测研究 恩格贝,张 岩(8.36)

考虑新能源不确定性的电网运营商多时间尺度鲁棒交易 马文祚,夏周武(8.49)

基于双分支特征集成LSTM的非侵入式负荷分解研究 韩小地,郭家兴,钱 康,刘文瑞(10.31)

基于对数平均迪氏指数分解的居民生活用电增长特征分析

..... 牟 颖,薛万磊,汲国强,刘 青,张栋梁(10.44)

电能量-调频联合市场中储能电站的参与策略分析 王元元,刘航航,司君诚,宋世航,蔡言斌(10.55)

•高安全储能电池管理技术•

储能用磷酸铁锂电池充电方法评估 柴 进,董志国,唐茂林,王 溯,时 玮(11.1)

磷酸铁锂电池内短路检测方法研究综述 董志国,韩长江,孙浩然,唐茂林,王 溯(11.15)

改善锂负极循环稳定性的研究进展 张 燕,张华龙,张瑞强,余恺昕,潘新慧,钱 骥(11.27)



2025
你好
Happy New Year

喜迎元旦

《山东电力技术》期刊祝您元旦快乐！

致作者读者、审稿专家、编委专家及所有帮助支持我们的朋友：

一元复始，万象更新，
在这辞旧迎新的美好时刻，
感谢编委专家的鼎力支持，
感谢审稿专家的倾力指导，
感谢作者读者朋友的深厚信任。
新的一年，恭祝大家元旦快乐，万事胜意！

