

《四川电力技术》
编辑委员会

主任委员 刘 勇
副主任委员 王 平
刘俊勇
委 员 (按姓氏笔画笔形为序)
丁理杰 邓亚军 甘德刚
田立峰 李镇义 朱国俊
朱 康 刘天琪 苏少春
杨子辛 肖 红 吴广宁
余 熙 邹见效 陈 纓
胡 灿 袁邦亮 徐 波
董秀成 韩晓言 曾嘉志
秘 书 李世平
程文婷

目 次

· 高压技术 ·

- 基于地理信息的配电网感应雷闪络风险评估
..... 雷 潇,陈梦军,刘小江,廖文龙,刘 强(1)
输电线路杆塔接地状态评估及风险分级研究 邱 烜,彭红刚,王牧浪,徐 研(5)
高海拔特重冰峻岭地区输电线路结构创新措施综述
..... 辜良雨,蒋 锐,甘运良,翟洪利,陈俊帆,王仲富,王 波(9)
云南大理光伏 ± 30 kV 柔性直流输电工程过电压与绝缘配合研究
..... 陈 卓,蒋艾町,梁亚博,夏 雪(14)
一起 110 kV 同塔双回路因风舞导致跳闸的案例分析 马小军,邵永浩(20)
土壤异质性对模拟直流场环境下 X70 钢的腐蚀行为影响
..... 田倩倩,王志高,丁 德,兰新生,吴 健,耿 植,白晓春(24)

· 电力系统 ·

- 基于熵权理论的 FAHP 模型在城市配电网建设评价中的研究与应用
..... 于国康,余 金,高贵亮,余中平,鲜 龙,李永清(29)
小电流接地选线跳闸技术分析探讨与试点建设 周 兰,尚 超(35)
单星形接线电容器组击穿故障下桥差电流保护公式推导
..... 胡德雯,李自成,林 嶙,柴薪垚(38)
融合算法在蓄电池 SOC 估算中的研究综述
..... 王晓辉,郑 超,张思义,戴 明,肖 伟,陈 醒(43)

· 工业互联网 ·

- 单/双协同模式下配电网故障排查的最优巡线规划
..... 苏学能,张 华,龙 呈,高艺文,李世龙(47)
输电线路山火雷达实时监测技术及应用研究 李 江,曹永兴,朱 军,罗东辉(53)
基于 HPLC 在智能电网数据采集中的应用探讨 柯海波(58)

· 电力经济 ·

- 考虑宏观政策的能源需求组合预测模型
..... 黄 欣,吴杰康,李红玲,李逸欣,郑敏嘉,李 猛,吴伟杰,张伊宁(62)
考虑可再生能源配额分配的电力零售市场设计
..... 崔东君,和敬涵,程晓春,程 宏,王 宇,李冬梅(70)
基于运行最优模拟的综合能源系统经济评价方法 马 超,肖 汉,李嘉逸(77)
计及经济因素的混合模型电量预测研究
..... 徐久益,李自明,姚剑峰,杨晓雷,屠一艳,李 杰(83)
基于主从区块链技术的区域能源交易架构 杨 亭,雷 霆(89)

封面图片由李举涛提供

四川电力技术

双月刊 1978 年创刊

中国标准连续出版物号:

ISSN 1003 - 6954

CN 51 - 1315/TM

2021 年第 44 卷第 1 期(总 271 期)

主管单位:四川省电力公司

主办单位:四川省电机工程学会

四川电力科学研究院

发行范围:公开

主 编:陈 纓

副 主 编:程文婷

编辑出版:《四川电力技术》编辑部

发 行:四川电力科学研究院

地 址:成都市锦晖西二街 16 号

邮政编码:610041

电话:(028)69995169,69995168,69995165

E-mail:cdscdljs@163.com

印 刷:四川科锐得实业集团有限公司

文化传播分公司

封面设计:成都宏泰广告有限公司

国内定价:每册 6.00 元

[期刊基本参数]CN 51 - 1315/TM * 1978 *

b * A4 * 94 * zh * P * ¥6.00 * 3000 * 18 *

2021 - 2

CONTENTS

• High Voltage Technology •

Risk Assessment on Induced Lightning Flashover of Distribution Network Based on Geography Information	Lei Xiao, Chen Mengjun, Liu Xiaojiang, Liao Wenlong, Liu Qiang(1)
Research on Grounding State Estimation and Risk Classification of Transmission Line Towers	Qiu Xuan, Peng Honggang, Wang Mulang, Xu Yan(5)
Study on Structure Innovation Measures for Transmission Line in Steep Mountains with High Altitude and Heavy Icing	Gu Liangyu, Jiang Rui, Gan Yunliang, Zhai Hongli, Chen Junfan, Wang Shenfu, Wang Bo(9)
Research on Overvoltage and Insulation Coordination for Converter Station of ± 30 kV Flexible DC Transmission Project in Dali of Yunnan	Chen Zhuo, Jiang Aiting, Liang Yabo, Xia Xue(14)
Analysis on A Tripping Accident of 110 kV Double – circuit Lines on the Same Tower due to Wind Dancing	Ma Xiaojun, Shao Yonghao(20)
Influence of Soil Heterogeneity on Corrosion Behavior of X70 Steel in Simulated Direct Current Electric Field	Tian Qianqian, Wang Zhigao, Ding De, Lan Xinsheng, Wu Jian, Geng Zhi, Bai Xiaochun(24)

• Power System •

Research and Application of FAHP Model Based on Entropy Weight Theory in Evaluation of Urban Distribution Network Construction	Yu Guokang, Yu Jin, Gao Guiliang, Yu Zhongping, Xiang Long, Li Yongqing(29)
Analysis and Pilot Construction of Grounding Line Selection Tripping Technology in Small – current Grounding System	Zhou Lan, Shang Chao(35)
Derivation of Bridge Differential Current Protection Formula under Breakdown Fault of Capacitor Bank with Single Star Connection	Hu Dewen, Li Zicheng, Lin Ceng, Cai Xinyao(38)
Summary of Fusing Algorithm Research in Estimation for State of Charge of Battery	Wang Xiaohui, Zheng Chao, Zhang Siyi, Dai Ming, Xiao Wei, Chen Xing(43)

• Industrial Internet •

Theoretical Optimal Models for Fault Line Inspection in Distribution Network via Single/Dual Cooperative Modes	Su Xueneng, Zhang Hua, Long Cheng, Gao Yiwen, Li Shilong(47)
Research on Real – time Radar Monitoring Technology and Its Application to Forest Fire Around Transmission Line	Li Jiang, Cao Yongxing, Zhu Jun, Luo Donghui(53)
Application of HPLC to Data Acquisition in Smart Power Grid	Ke Haibo(58)

• Power Economics •

Combination Forecasting Model for Energy Demand Considering Micro Policy	Huang Xin, Wu Jiekang, Li Hongling, Li Yixin, Zheng Minjia, Li Meng, Wu Weijie, Zhang Yining(62)
Design of Electricity Retail Market Considering Quota Allocation of Renewable Energy	Cui Dongjun, He Jinghan, Cheng Xiaochun, Cheng Hong, Wang Yu, Li Dongmei(70)
Economic Evaluation Method of Integrated Energy System Based on Operational Optimal Simulation	Ma Chao, Xiao Han, Li Jiayi(77)
Research on Electricity Consumption Prediction under Mixed Model Considering Economic Factors	Xu Jiuyi, Li Ziming, Yao Jianfeng, Yang Xiaolei, Tu Yiyang, Li Jie(83)
Regional Energy Transaction Architecture Based on Master – slave Blockchain Technology	Yang Ting, Lei Ting(89)

SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY

2021 Vol. 44 No. 1

(Ser. No. 271)

Bimonthly, Started in 1978

Address: No. 16, 2ND Jinhui West Street, Chengdu, Sichuan,
China

Postcode: 610041

Sponsor:

Sichuan Society of Electrical Engineering

Sichuan Electric Power Research Institute

Editor in chief: Chen Ying

Editor & Publisher:

Editorial Department of SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY

基于地理信息的配电网感应雷闪络风险评估

雷 潇¹,陈梦军²,刘小江¹,廖文龙¹,刘 强¹

- (1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;
2. 国网四川省电力公司自贡供电公司, 四川 自贡 613000)

摘 要:感应雷过电压是 10 kV 配电网跳闸和停运的主要原因。为评估其风险,首先,建立了感应雷过电压的电磁暂态仿真模型,分析了雷击距离、雷电流幅值、土壤电阻率对过电压幅值的影响,据此提出了一种感应雷过电压幅值简化计算方法;然后,根据输配电线路杆塔坐标、土壤电阻率和雷电流幅值概率密度,建立配电网杆塔闪络概率计算模型;最后,结合地闪密度构建感应雷闪络风险评估模型。

关键词:地理信息;配电网;感应雷过电压;风险评估

中图分类号:TM863 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2021)01-0001-04

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210101

Risk Assessment on Induced Lightning Flashover of Distribution Network Based on Geography Information

Lei Xiao¹, Chen Mengjun², Liu Xiaojiang¹, Liao Wenlong¹, Liu Qiang¹

- (1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;
2. State Grid Zigong Electric Power Supply Company, Zigong 613000, Sichuan, China)

Abstract:Induced lightning overvoltage is the main reason for the tripping and shutdownn of 10 kV distribution network. In order to assess the risk,the electromagnetic transient simulation model of induced lightning overvoltage is established firstly. The influences of lightning distance, lightning current amplitude and soil resistivity on the overvoltage amplitude are analyzed, and a simplified calculation method for induced lightning overvoltage amplitude is proposed. And then, according to the tower coordinates, soil resistivity and probability density of lightning current amplitude of transmission and distribution lines, the calculation model for lightning flashover probability of distribution network tower is established. Finally, the risk assessment model of induced lightning flashover is constructed combined with the lightning density.

Key words:geography information; distribution network; induced lightning overvoltage; risk assessment

0 引 言

四川是中国雷电活动最为频繁的地区之一,输配电线路极易发生雷击跳闸。据部分地市公司的 10 kV 配电网故障统计数据,雷击跳闸占比超过 50%,且存在大量雷击设备损坏故障。根据 10 kV 配电架空线路的典型绝缘配置^[1],雷电冲击 50% 闪络电压一般小于 200 kV。目前国网四川省电力公司采购的柱式绝缘子雷电冲击 50% 闪络电压一般

为 105 kV 和 125 kV。在此绝缘强度下直击雷和感应雷均易造成绝缘闪络。由于 10 kV 配电线路易受周边引雷设施,尤其是输电线路杆塔的屏蔽,更易发生感应雷跳闸。已有的研究数据表明,感应雷引起的雷害故障占绝大部分^[2]。

目前国内外学者对感应雷过电压进行了系统性的研究,发现雷击距离、雷电流幅值、土壤电阻率是主要影响因素^[3-6]。文献[5]建立了电磁暂态仿真方法,文献[7]提出了简化模型。在此基础上,电力公司可进行差异化的 10 kV 配电网防雷评估和治理。然而,配电网运维能力并不能匹配庞大的资产数量,依靠科研部门和供电所以“一线一案”的方式

基金项目: 国网总部项目 5500-202037100A-0-0-00(川藏高海拔地区电网雷电基础参数综合分析与工程化应用研究)

开展防雷改造,存在工作量大、效率低下的问题。

而另一方面,电力公司经过近年来在大数据基础建设上的投入,已建立了各类基础数据库和管控系统。调研发现,通过整合各类数据信息,可实现配电网感应雷过电压的自动计算,进而完成感应雷闪络风险评估。

鉴于此,下面根据感应雷过电压计算方法和影响因素,利用输配电线路基础信息、雷电定位系统信息和运维经验,提出基于地理信息的配电网感应雷闪络风险评估模型。

1 感应雷过电压

1.1 电磁暂态仿真模型

根据文献[5-6]的方法,利用 ATP-EMTP 软件中的用户自定义 MODELS 搭建了一套计算配电线路感应雷过电压的仿真模型,如图 1 所示。可调参数包括雷击距离、雷电流幅值、土壤电阻率等,便于分析各因素对感应过电压的影响。雷电流采用标准波形,即波前时间 $2.6 \mu\text{s}$,半波时间 $50 \mu\text{s}$ 。

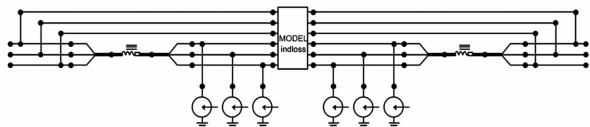


图 1 感应过电压计算模块

1.2 影响因素

影响感应雷过电压幅值的主要因素有雷电流幅值、雷击距离和土壤电阻率。图 2 展示了雷电流幅值与感应雷过电压的关系。可见,在不同土壤电阻率和雷击距离下,两者呈线性关系。雷击距离与感应雷过电压幅值的关系如图 3 所示。雷击距离越大,过电压幅值越小。由 DL/T 620—1997《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》^[8],过电压幅值与雷击距离呈反比关系,与仿真结果较为一致。图 4 展示了雷电流幅值 30 kA、雷击距离 65 m 时,感应雷过电压幅值与土壤电阻率的关系。

1.3 简化计算模型

虽然通过仿真建模可计算电网局部区域的感应雷过电压波形,但实际运行中感应雷大小和位置均具有随机性,在评估过程中难以实现大规模的随机性计算。对此,根据大量仿真数据,基于各主要影响因素的影响规律,提出了考虑土壤电阻率的感应雷

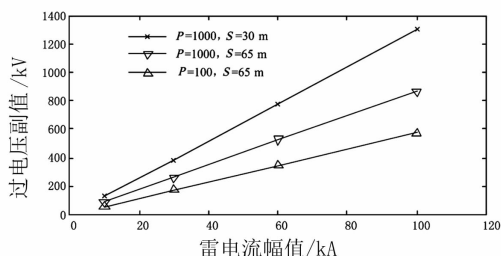


图 2 过电压幅值与雷电流幅值的关系

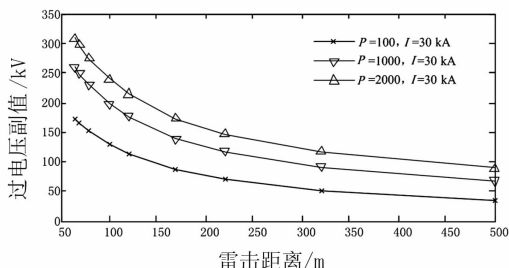


图 3 过电压幅值与雷击距离的关系

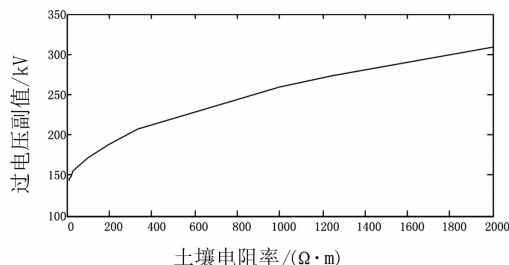


图 4 过电压幅值与土壤电阻率的关系

过电压幅值简化计算方法,如式(1)所示。

$$V = \begin{cases} I_m(A + B \cdot \frac{1}{S}) & S > 65 \text{ m} \\ I_m(P_1 \cdot \frac{1}{S^2} + P_2 \cdot \frac{1}{S} + P_3) & S < 65 \text{ m} \end{cases} \quad (1)$$

$$A = 1.425 \ln(\rho + 819.8) - 9$$

$$B = 95.25 \ln(\rho + 169.3) - 200.75$$

$$P_1 = 1.39 \times 10^{-4} \rho^2 - 0.587 \rho - 966$$

$$P_2 = -3.16 \times 10^{-5} \rho^2 + 0.14 \rho - 193$$

$$P_3 = -4.04 \times 10^{-7} \rho^2 + 2.11 \times 10^{-3} \rho + 2.94$$

式中: S 为雷击点与线路的垂直距离, m; I_m 为雷电流幅值, kV; ρ 为土壤电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$ 。

2 地理信息数据

地理信息数据指输配电线路所处地理位置及相关信息,主要包括输配电杆塔 GPS 坐标、区域地闪密度、区域土壤电阻率等。目前,国网四川省电力公司运检管控系统集合了全省输电线路杆塔 GPS 坐

标、雷电定位系统落雷数据;PMS2.0 系统收集了全省 10 kV 配电网杆塔坐标,具备了 10 kV 配电网感应雷过电压闪络风险评估的数据基础。

输电线路杆塔可视为城郊和农村地区主要的引雷设施,其附近的 10 kV 配电网杆塔不易遭受直击雷,但易受感应雷过电压的威胁。通过分析输配电线路杆塔坐标,可自动识别输电线路杆塔附近的配电网杆塔,进而计算一旦输电线路杆塔遭受雷击时配电网的闪络概率。

地闪数据源自雷电定位系统,在数据量足够大的情况下,可获取单基杆塔所处局部区域的地闪密度,否则取线路所在县或地市的地闪密度。区域地闪密度表征雷电活动的频繁程度,可反映配电网杆塔附近区域落雷概率,是感应雷闪络风险的重要考虑因素。

区域土壤电阻率受微地形及气候影响,在无实测数据的情况下,无法准确估计单基杆塔所处位置的准确值。目前可通过区域土质进行大致估计。

3 风险评估指标

3.1 综合风险指标

10 kV 配电网绝缘的感应雷过电压闪络风险由雷击风险和过电压闪络风险共同构成。雷击风险体现配电网杆塔附近发生雷击的概率,取决于区域雷电活动频繁程度。过电压闪络风险是指配电网杆塔附近一旦遭受雷击,发生绝缘闪络的风险。一般而言,可将两者相乘以构造类似于跳闸率的综合风险指标。但地闪密度的绝对值通常很小,且各地市之间差别较大,会导致综合风险指标对地闪密度的差异过于灵敏,而运维单位更关心一旦发生雷击绝缘闪络的概率。因此,将雷击风险和过电压闪络风险以加权求和的方式构建综合风险指标,如式(2)所示。

$$F = \sigma \cdot F_1 + F_2$$

(2)

式中: F_1 为雷击风险; F_2 为过电压闪络风险; σ 为雷击风险加权值,取 0.3。

3.2 雷击风险

雷击风险为反映雷电活动频繁程度的相对值,可通过对地闪密度进行归一化处理来量化。《雷区分级标准与雷区分布图绘制规则》(Q/GDW

10672—2017)将地闪放电频度从弱到强分为 8 个层级,如表 1 所示。^[9]

表 1 地闪层级

层级	地 闪 密 度
A	$N_{sg} < 0.78 \text{ 次}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$
B1	$0.78 \text{ 次}/(\text{km}^2 \cdot \text{a}) \leq N_{sg} < 2.0 \text{ 次}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$
B2	$2.0 \text{ 次}/(\text{km}^2 \cdot \text{a}) \leq N_{sg} < 2.78 \text{ 次}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$
C1	$2.78 \text{ 次}/(\text{km}^2 \cdot \text{a}) \leq N_{sg} < 5.0 \text{ 次}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$
C2	$5.0 \text{ 次}/(\text{km}^2 \cdot \text{a}) \leq N_{sg} < 7.98 \text{ 次}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$
D1	$7.98 \text{ 次}/(\text{km}^2 \cdot \text{a}) \leq N_{sg} < 11.0 \text{ 次}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$
D2	$11.0 \text{ 次}/(\text{km}^2 \cdot \text{a}) \leq N_{sg} < 15.5 \text{ 次}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$
E	$N_{sg} \geq 15.5 \text{ 次}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$

根据该地闪密度层级,所构建的雷击风险指标计算方法如式(3)。

$$V = \begin{cases} 1 & N_{sg} > 15.5 \\ N_{sg}/15.5 & N_{sg} < 15.5 \end{cases}$$

(3)

式中, N_{sg} 为地闪密度值。

3.3 附近有引雷设施情况下的闪络概率

对于配电网杆塔附近有输电线路杆塔的情况,可认为一旦该局部区域发生雷击均击中输电线路杆塔。过电压闪络概率通过雷电流幅值累计概率密度、输配电杆塔距离和土壤电阻率进行计算,计算模型如图 5 所示。

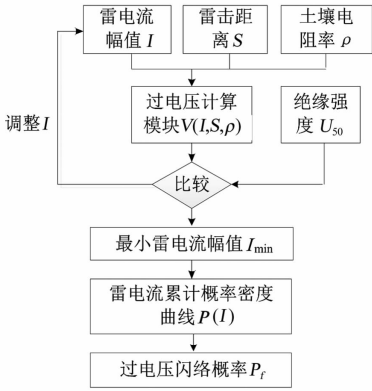


图 5 过电压闪络概率计算模型

其中,雷电流累计概率密度曲线为离散化数据,由雷电流幅值等差序列和其对应的累计概率序列构成。所采用的雷电流雷击概率密度曲线由雷电定位系统统计数据生成,其中某区域数据如图 6 所示。

在给定雷击距离和土壤电阻率的情况下,根据式(1)由小到大计算雷电流序列中各数值下的过电压幅值,与杆塔绝缘的雷电闪络 50% 电压 U_{50} 比较,

获取能使杆塔闪络的雷电流幅值最小值 $I_{\min}$ 。累计概率密度在 $I_{\min}$ 时的概率即是过电压闪络概率。

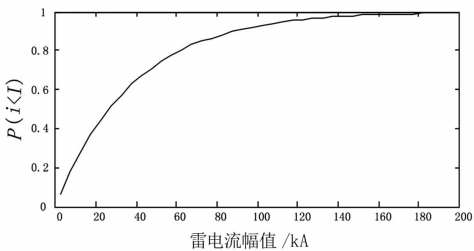


图 6 某区域雷电流幅值雷击概率密度曲线

3.4 附近无引雷设施情况下的闪络概率

对于配电网杆塔附近无输电线路杆塔的情况，认为落雷位置与线路垂直距离呈均匀分布。根究 DL/T 620—1997《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》，线路 65 m 以外的落雷为感应雷，而 200 m 以外的落雷几乎不会造成绝缘闪络。因此，雷击距离在 65 ~ 200 m 范围内呈均匀分布。

在其他参数确定的情况下，前面给出的闪络概率模型实际可看作雷击距离 S 的函数 $P(S)$ 。因此，通过计算 65 ~ 200 m 情况下的闪络概率并进行平均化处理，即可获取雷击距离均匀分布情况下的闪络概率。

4 风险等级划分

将配电网感应雷闪络风险划分为高、较高、中和低四等，如表 2 所示，研究各种情况下的综合风险指标，分析风险等级划分的合理性。其中，10 kV 配电网绝缘的雷电闪络 50% 电压以常用的柱式绝缘子型号为准，取 105 kV。

附近有输电线路杆塔的情况下，综合风险和雷击距离的关系如图 7 所示。地闪层级在 C1 区及以上，即地闪密度 $d > 2.78$ 次/($\text{km}^2 \cdot \text{a}$) 的区域，附近 100 m 以内有输电线路杆塔的配电网杆塔，其风险等级均为较高及以上。除甘孜、阿坝地区，四川大部地区的地闪层级在 C1 及以上，因此将四川大部分地区中靠近输电线路杆塔的配电网杆塔的综合风险均划分为较高风险和高风险。

附近无输电线路杆塔的情况下，配电网杆塔综合风险和地闪密度的关系如图 8 所示。对于土壤电阻率较低且地闪层级在 C1、C2 的区域，如成都平原，风险等级一般为中或低。对于土壤电阻率较低且

地闪层级在 D1 及以上的区域，如宜宾地区，风险等级一般为较高。对于土壤电阻率较高且地闪层级在 D1 及以上的区域，如攀枝花和凉山，风险等级为高。

表 2 风险等级划分

风险等级	综合风险指标 f
高	$f > 0.7$
较高	$0.7 > f > 0.54$
中	$0.54 > f > 0.45$
低	$0.45 > f$

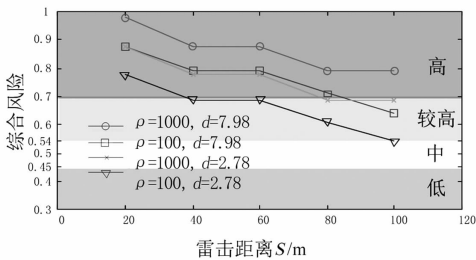


图 7 综合风险与雷击距离的关系

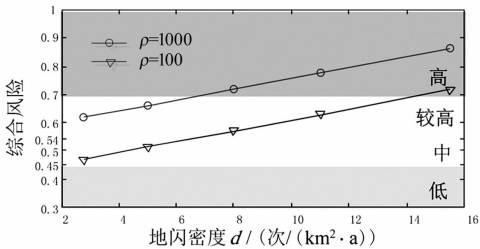


图 8 综合风险与地闪密度的关系

5 结 语

上面提出了一种基于地理信息的配电网感应雷闪络风险评估方法，主要内容如下：

1)采用雷击风险和过电压闪络概率，构造了综合风险指标，并以此划分了 4 个风险等级。雷击风险为反映雷电活动频繁程度的相对值，通过对地闪密度进行归一化后获取。过电压闪络概率为区域发生雷击后绝缘闪络的概率。

2)根据电磁暂态仿真模型获取各种参数下的感应雷过电压幅值，以此拟合简化计算公式。结合雷电流幅值概率密度、雷击位置概率分布和绝缘强度，针对附近是否有输电线路杆塔，提出了闪络概率计算模型。

3)根据所提出的风险评估方法，四川大部分区
(下转第 76 页)

输电线路杆塔接地状态评估及风险分级研究

邱 烜,彭红刚,王牧浪,徐 研

(广州供电局有限公司,广东 广州 510000)

摘要:提出了一种杆塔接地装置状态评估和风险分级的方法。该方法依据输电线路杆塔的接地参数——接地电阻测量值与接地电阻设计值,引入了中间参数——杆塔接地电阻与设计要求值的偏差率 σ 和接地电阻测量值变化率 γ ,借助于四分位数法的统计学方法,评估杆塔接地装置状态,将输电线路全线杆塔依据风险程度递进划分为ABCDE共5个级别。在输电线路杆塔接地参数累积大量数据的前提下,基于最大期望算法,预测杆塔接地参数随时间的分布规律,实现在杆塔接地参数测量之前,通过预测的参数来修正杆塔接地装置的风险分级。

关键词:接地参数;状态评估;风险分级;四分位数法;最大期望算法

中图分类号:TM932 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2021)01-0005-04

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210102

Research on Grounding State Estimation and Risk Classification of Transmission Line Towers

Qiu Xuan, Peng Honggang, Wang Mulang, Xu Yan

(Guangzhou Electric Power Supply Co., Ltd., Guangzhou 510000, Guangdong, China)

Abstract: A method for state estimation and risk classification of tower grounding devices is presented. Based on the grounding parameters of poles and towers in transmission line, that is, the measured value of grounding resistance and the design value of grounding resistance, the intermediate parameter is introduced, that is, σ (the deviation rate of grounding resistance of tower from the design requirement) and γ (the rate of change of the measured value of grounding resistance). The statistical method with the aid of quartile method evaluates the status of tower grounding device, and divides the entire towers of transmission line into five levels of ABCDE according to the degree of risk. Under the premise of a large amount of data accumulated on tower grounding parameters of transmission line, and based on the expectation-maximization (EM) algorithm, the distribution rule of tower grounding parameters with time is predicted, and the risk classification of tower grounding device is corrected by the predicted parameters before the measurement of tower grounding parameters.

Key words: grounding parameters; state estimation; risk classification; quartile method; maximum expectation algorithm

0 引言

输电线路杆塔接地性能的评估与校核,是架空输电线路在设计阶段就必须重点考虑的问题。在线路出现故障时,良好的杆塔接地性能,能快速地将故障电流通过杆塔接地装置泄放到大地上,有效降低输电线路的故障跳闸(闪络)率,并提高线路的反击耐雷水平。输电线路杆塔的接地电阻是表征其接地系

统性能的重要指标^[1-2]。因此,在输电线路的运维工作中,测量并确保杆塔的接地电阻在合理的区间内十分重要。然而,在常规的输电线路防雷改造中,一般只能根据往年的雷击跳闸数据确定杆塔的接地改造方案;但根据雷击数据做出的接地运维策略,其措施针对性不强,技术经济性不高,无法明确投入与预期效果的定量关系。另外,考虑到技术经济性,在输电线路杆塔接地运维工作中,也不可能一次性对所有阻值超标(大于设计值)的接地装置施行改造^[3]。下面结合杆塔接地参数“大数据云平台”收

集到的接地参数,提出了一种杆塔接地装置的运行状态评估和风险等级预警的方法和系统。旨在通过数据分析得到杆塔接地的差异化运检方案,更科学地支撑运维管理决策。

所提出的输电线路杆塔接地装置的状态评估和风险分级方法结合历史数据,选取某一特定线路的所有杆塔作为研究对象,基于统计分析方法对全线的接地电阻分布情况、测量值与设计值的偏差、同一杆塔接地参数的变化等特征量进行综合计算,进而得到全线逐基杆塔的接地装置状态和风险等级分级情况。同时,基于最大期望算法计算得到杆塔接地电阻随时间分布的预测情况,并通过预测参数修正杆塔接地装置的风险分级。所提方法能更具针对性地提出线路杆塔接地运维改造策略,为实现更高效、更专业的杆塔接地运维提供了理论支撑。

1 状态特征量及风险等级分类

1.1 杆塔接地状态参数

输电线路杆塔接地状态参数主要包括:接地电阻设计值 $R_{\text{设计}}$ 、历次运行测量值 $R_{\text{测量}}$ (文中用于分析的接地电阻测量值均为考虑季节系数的相对值)和杆塔附近的土壤电阻率等。依据 GB 50545—2010《110 kV ~ 750 kV 架空输电线路设计规范》和 GB/T 50065—2011《交流电气装置的接地设计规范》规定,架空输电线路杆塔接地电阻需满足表 1^[5-6] 的要求。

表 1 不同土壤电阻率条件下的杆塔接地电阻要求值

土壤电阻率 /(Ω·m)	≤100	>100 ~ ≤500	>500 ~ ≤1000	>1000 ~ ≤2000	>2000
接地电阻/Ω	10	15	20	25	30

1.2 统计特征参数

杆塔接地电阻的测量/设计偏差率 σ 反映了运行中接地装置与设计状态的偏差情况,可通过式 (1) 计算。

$$\sigma = (R_{\text{测量}} - R_{\text{设计}}) / R_{\text{设计}} \tag{1}$$

式中: $R_{\text{测量}}$ 为最近一次的测量数据; $R_{\text{设计}}$ 为线路杆塔设计的要求限制值。一般来说,线路设计中,杆塔的接地电阻设计值即是按表 1 中的要求进行设计和规范。如果运行管理中难以获得线路杆塔的接地电阻设计值,可按照表 1 中的对应设计要求值进行偏差率计算。

另外,为了保证杆塔接地工程的经济性,在某些土壤电阻率较大的地区,标准中对接地电阻的最大限制值不再做严格要求。此时,可通过该基杆塔自身的接地电阻测量值变化率 γ 来反映杆塔接地装置的状态变化情况,可通过式 (2) 计算。

$$\gamma = (R_{\text{本次测量}} - R_{\text{前次测量}}) / R_{\text{前次测量}} \tag{2}$$

所提出的接地装置状态评估和风险分级方法主要依照上述两个接地状态特征量:接地电阻测量值与设计值偏差率 σ 和接地电阻测量值变化率 γ 。其中: σ 为主要影响因素; γ 为次要影响因素。

1.3 接地装置的风险等级分类

将某条线路中的每一基杆塔,按 A、B、C、D、E 分为 5 个不同的接地故障风险等级。每个风险等级对应的接地装置运行状态和推荐的差异化运检方案如表 2 所示^[7-8]。

表 2 不同故障风险等级对应的运行状态及运检方案

风险分级	运行状态	差异化运检方案
A	接地状态好	每 5 年测量一次
B	接地状态较好	每 3 年测量一次
C	接地状态正常, 但存在故障隐患	每 1 年测量一次
D	接地状态较差,可能存在 腐蚀、连接或其他故障	每 6 个月测量一次
E	接地状态差,存在腐蚀、 连接或其他故障	马上复测, 并进行接地改造

由于该风险分析方法是针对某一特定线路中的全部杆塔,因此,得到的杆塔接地故障风险等级只是相对于全线中其他杆塔的“相对风险等级”。而这种“相对风险等级”的划分,能更具针对性地制定该线路的杆塔接地运维改造策略,实现更高效、更科学的杆塔接地运维。

2 接地数据的统计分析方法

2.1 四分位数法

在进行全线样本数据的分析时,利用四分位数^[9-11]统计学方法来描述全线路接地参数的分布,可以进一步评估每一基杆塔接地故障风险程度。同时,四分位数具有较强的数据容错性,部分测量异常值不会对所提评估方法的判据产生大的影响,因而,采用四分位数法对工程数据的测算结果比较客观。基于四分位数法对接地特征参数数据进行分析,可为杆塔接地装置的故障风险分级提供理论依据。

2.2 最大期望算法

最大期望(expectation-maximization, EM)算法是一类通过迭代进行极大似然估计(maximum likelihood estimation, MLE)的优化算法。极大似然估计的根本目的是根据抽样得到的样本(即数据),反推出最有可能的分布参数(即模型);最大期望算法是在依赖于无法观测的隐藏变量的概率模型中,寻找参数极大似然估计或者最大后验估计的算法。它的求解思路是:根据经验为每个类别(即隐藏变量)赋予一个初始分布,这相当于是假定了分布参数;然后根据分布的参数可以求取每个数据元组的隐藏变量的期望(相当于实施了归类操作);再根据归类结果计算分布参数(向量)的最大似然值,利用这个最大似然值再反过来重新计算每个元组的隐藏变量的期望。这样循环往复,最终,如果隐藏变量的期望与参数的最大似然值趋于稳定了,最大期望算法就执行完毕^[12-13]。

基于最大期望算法,依据大量的杆塔接地参数数据,可以预测某一杆塔的接地电阻值 R_{EM} ,根据预测杆塔接地参数随时间的分布规律,实现在杆塔接地参数测量之前,通过预测的参数来修正杆塔接地装置的风险分级。

3 接地装置的风险分级方法

3.1 故障风险分级方法

所提接地装置风险分级方法基于上述四分位数的统计学方法,以整条输电线路为考察对象。主要依照两个参数(接地电阻测量值与设计值偏差率 σ 和接地电阻测量值变化率 γ),其中 σ 为主要影响因素, γ 为次要影响因素。分级计算中杆塔接地装置状态评估及风险分级流程如下:

- 1)如果 σ 小于 0,则判定风险等级为 A(无风险)。
- 2)如果 σ 大于 0 且小于样本 1 的 25% 分位值,则判定风险等级为 B。
- 3)如果 σ 大于样本 1 的 25% 分位值且小于样本 1 的 50% 分位值,则判定风险等级为 C。
- 4)如果 σ 大于样本 1 的 50% 分位值且小于样本 1 的 75% 分位值,则判定风险等级为 D。
- 5)如果 σ 大于样本 1 的 75% 分位值,则判定风险等级为 E。

6)如果 γ 小于 0,则风险因子保持不变,不影响上述判定。

7)如果 γ 大于 0 且小于样本 2 的 25% 分位值,则风险因子 +1;如果 γ 大于样本 2 的 25% 分位值且小于样本 2 的 50% 分位值,则风险因子 +2;如果 γ 大于样本 2 的 50% 分位值且小于样本 2 的 75% 分位值,则风险因子 +3;如果 γ 大于样本 2 的 75% 分位值,则风险因子 +4。

8)如果杆塔的风险等级为 B、C、D,且风险因子累积 +5,则对应杆塔的风险等级调升一级;如果杆塔的风险等级为 A、E,则不受风险因子影响。

杆塔接地装置状态评估和风险分级流程如图 1 所示。

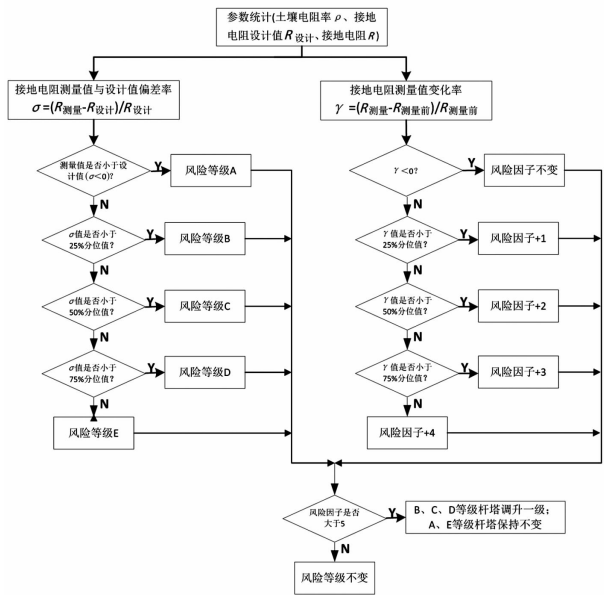


图 1 杆塔接地装置状态评估和风险分级流程

3.2 考虑参数预测算法的风险修正

当输电线路杆塔接地参数累积到一定的数量时,可以借助于最大期望算法,预测同一基杆塔接地参数随时间的分布规律。杆塔接地装置状态评估和风险分级预测流程依照图 1,基于最大期望算法,预测杆塔的接地电阻值 R_{EM} ,用接地电阻预测值 R_{EM} 取代测量值 $R_{测量}$,实现在杆塔接地参数测量之前,通过预测的参数来修正杆塔接地装置的风险分级。根据每基杆塔的风险分级结果,可以指导运维人员针对风险等级高的杆塔优先排班测量。

4 状态评估范例

对某 110 kV 输电线路(共 60 基杆塔)的杆塔接

地参数历史测量数据进行了统计分析,并按所提出的风险分级方法进行了计算分析。全线测量接地电阻大小的分布如图 2 所示。



图 2 110 kV 输电线路沿线接地电阻分布热力图

根据所述的风险分析方法,得到全线 60 基杆塔中:34 基杆塔接地风险等级为 A(无风险);6 基杆塔风险等级为 B;7 基杆塔风险等级为 C;6 基杆塔风险等级为 D;7 基杆塔风险等级为 E。在考虑到技术经济性的前提下,优先改造 7 基风险等级为 E 的杆塔。

随后,对这 7 基风险等级为 E 的杆塔进行接地电阻改造,均降至设计接地电阻值以内。最后,对全线杆塔的接地状态风险进行二次评估,改造评估结果如表 3 所示。可以发现, σ_2 较 σ_1 整体上有所下降,即测量值与设计值的偏离程度有所缩小,进而在有限的接地电阻改造投入下,提高了整条线路的反击耐雷水平。

表 3 110 kV 输电线路接地状态评估改造结果

杆塔号	杆塔设计 接地电阻 / Ω	杆塔测量 接地电阻 (最近一次) / Ω	偏差率 σ_1	风险 等级	杆塔测量 接地电阻 (第二次测量) / Ω	风险 等级
6	15	20.17	34.47	E	14.32	A
19	10	13.24	32.40	E	9.86	A
24	10	15.44	54.40	E	8.75	A
33	20	28.95	44.75	E	19.29	A
43	15	20.54	36.93	E	15.12	B
51	10	14.38	43.80	E	10.19	B
56	10	13.92	39.20	E	9.32	A

5 结 语

为实现输电线路杆塔接地的差异化运检,上面提出了杆塔接地的差异化运维方案,并结合四分位

数法和最大期望算法提出了一种杆塔接地装置状态评估和风险分级的方法。最后,将该方法应用于某 110 kV 输电线路,得到了全线杆塔的接地风险等级分类。主要结论如下:

1)输电线路杆塔接地装置的运维检修方案应结合杆塔接地装置的状态评估水平和风险分级情况进行差异化制定,从而提高线路接地运维的工作效率和经济性。

2)可结合四分位数法和最大期望算法,对输电线路杆塔接地参数的历史测量数据进行统计分析,并基于关键特征参量的比较提出一种基于历史测量数据的风险分级方法,将全线杆塔依据风险程度递进划分为 ABCDE 共 5 个级别。

3)应用该方法对某 110 kV 输电线路杆塔(共 60 基)接地参数历史测量数据的分析,成功得到了全线 13 基中等风险以上的杆塔信息和对应的差异化运维方案。

参考文献

[1] 何金良,曾嵘. 电力系统接地技术[M]. 北京:科学出版社,2007.

[2] 接地装置特性参数测量导则:DL/T 475—2017[S]. 北京:中国电力出版社,2017.

[3] 扈海泽,敬亮兵,袁雪琼,等. 杆塔接地改造新方法[J]. 电瓷避雷器,2016(4):148—151.

[4] 林敏. 基于大数据的最大期望算法研究[J]. 数字技术与应用,2015(4):124—125.

[5] 110 kV~750 kV 架空输电线路设计规范:GB 50545—2010[S]. 北京:中国电力出版社,2010.

[6] 交流电气装置的接地设计规范:GB/T 50065—2011[S]. 北京:中国电力出版社,2011.

[7] 杨虹,刘国强,张来福,等. 电力系统接地网缺陷诊断方法及发展趋势[J]. 电工电能新技术,2016,35(10):35—42.

[8] 李黎,李建平,刘青松,等. 接地装置腐蚀速度的预评估[J]. 建筑电气,2014,32(2):46—49.

[9] 毛燕. 四分位法和迭代法对数据分散的能力验证检测数据统计分析结果的比较[J]. 冶金分析,2016,36(5):76—81.

[10] 杨锡运,刘玉奇,李建林,等. 基于四分位法的含储能光伏电站可靠性置信区间计算方法[J]. 电工技术学报,2017,32(15):136—139.

高海拔特重冰峻岭地区输电线路结构创新措施综述

辜良雨¹, 蒋 锐¹, 甘运良², 翟洪利², 陈俊帆¹, 王伸富¹, 王 波¹

(1. 中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610021;

2. 中国南方电网有限责任公司超高压输电公司, 广东 广州 510663)

摘 要:针对高海拔、特重冰、峻岭地区输电线路导线荷载大、地形陡峭、铁塔根开大、铁塔级差有限、基础工程量大、常规施工方法效率低等特殊问题,结合工程设计经验,从全过程经济性、可靠性、可行性以及环保性综合考虑,提出了送电结构专业的创新措施,包括 3 种钢架延长腿、三类新型铁塔、两种新型基础方案。

关键词:高海拔;特重冰;峻岭;输电线路;铁塔;基础

中图分类号:TM752 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2021)01-0009-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6945.20210103

Study on Structure Innovation Measures for Transmission Line in Steep Mountains with High Altitude and Heavy Icing

Gu Liangyu¹, Jiang Rui¹, Gan Yunliang², Zhai Hongli², Chen Junfan¹, Wang Shenfu¹, Wang Bo¹

(1. CPECC Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610021, Sichuan, China;

2. EHV Power Transmission Company of China Southern Power Grid Co., Ltd.,

Guangzhou 510663, Guangdong, China)

Abstract: Aimed at steep mountains with high altitude and heavy icing, the transmission line has some special problems, such as heavy load of earth wire, steep terrain, large size of tower, lack of tower legs, large amount of foundation project quantity and low efficiency of conventional construction methods. Combined with the rich experiences in engineering design, and from the comprehensive consideration of economy, reliability, feasibility and environmental protection in the full cycle, the structure innovation measures of transmission line are put forward, including three kinds of steel to extend the leg, three kinds of new tower type and two kinds of new foundation type.

Key words: high altitude; heavy icing; steep mountains; transmission line; tower; foundation

0 引 言

就输电线路而言,海拔 1500 m 以上为高海拔,导线覆冰厚度在 30 mm 以上为特重冰,相对高差 500 m 以上的山地为峻岭。相比常规地区,高海拔、特重冰、峻岭地区(以下简称“高特峻地区”)输电线路通常存在导线荷载大、地形陡峭、铁塔根开大、铁塔级差有限、基础工程量大、常规施工方法效率低等特殊问题。而高特峻地区输电线路一旦出现安全问题,抢修和运维成本太高,因此在该地区的设计应该充分从全寿命角度考虑,适当提高线路本体的可靠度,保证该地区输电线路的安全。

针对这些特殊问题,结合西南电力设计院在该

类地区丰富的工程经验,从全过程经济性、可靠性、可行性以及环保性综合考虑,对送电结构专业提出了一些创新工程措施。

1 铁塔设计创新措施

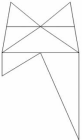
1.1 钢架延长腿

为了尽量避免开方和基础外露过大,保证输电线路在高特峻地区的安全,设计了钢架延长腿相关的设计技术,主要采用的技术方案分为 3 种:整体钢架、独立钢柱和独立小塔,各种钢架型式如表 1 所示。

结合以往工程经验,高特峻地区钢架延长腿选择的初步原则如下:

1) 当塔位地形坡度在 35° 以内时,各型铁塔均

表 1 3 种主要钢架型式

组合方式	示意图	方案说明	优 点	缺 点
平腿 + 整体支架		上部铁塔采用平腿,下部支架是整体结构,水平力可自由传递。	铁塔整体变形小。施工方便,铁塔加工和组立与常规铁塔基本相同。	没有发挥上部铁塔长短腿的优势,钢架耗钢量较高。
高低腿 + 独立格构柱		上部铁塔采用全方位高低腿,下部格构柱可自由组合,塔腿水平力依靠格构柱传递到基础。	充分利用上部铁塔长短腿的特点,级差可提高 2 ~ 6 m。	钢柱顶部变形大,连接位置节点处理比较复杂。
高低腿 + 独立小塔		上部铁塔和下部小塔采用全方位高低腿,下部小塔可自由组合,水平力依靠小塔传递到基础。有竖直型式和倾斜型式两种。	充分利用铁塔长短腿的特点,级差可提高 8 ~ 11 m。	小塔顶部变形大,连接位置节点处理比较复杂,小塔基础的混凝土量较高。

可使用整体钢架;

2)当塔位坡度不大于 40°时,可采用独立格构柱,同时格构柱高度不宜高于 6 m;

3)当塔位坡度超过 40°时,宜采用独立小塔,小塔高度一般为 8.0 ~ 11.0 m。

几种钢架的工程实例如图 1 所示。

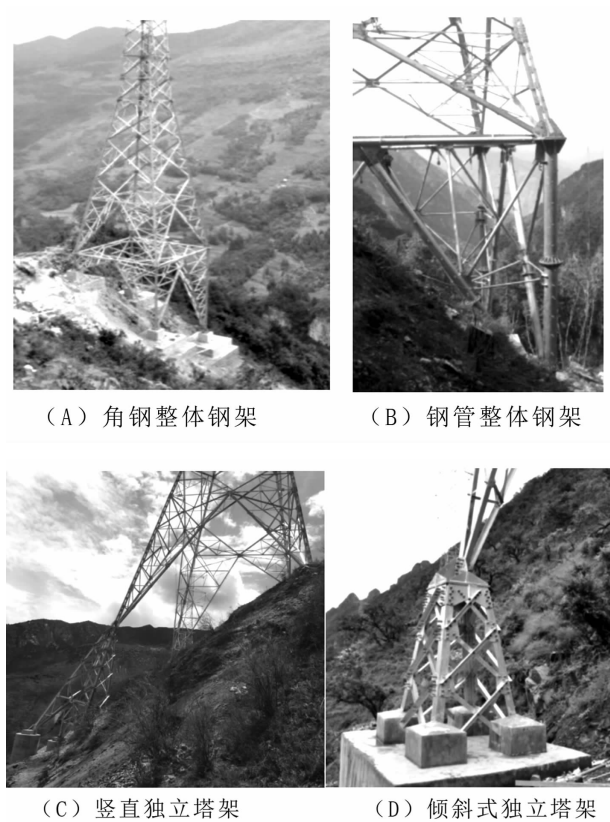


图 1 几种钢架的工程实例

1.2 新型铁塔型式

针对高特峻地区铁塔受力大、根开尺寸大、铁塔级差有限等问题,设计了单(双)极直柱塔、单极酒杯塔以及三(两)脚塔。

1.2.1 直柱门型塔

为了解决铁塔级差不够的问题,设计了单(双)极直柱门型塔,如图 2 所示。

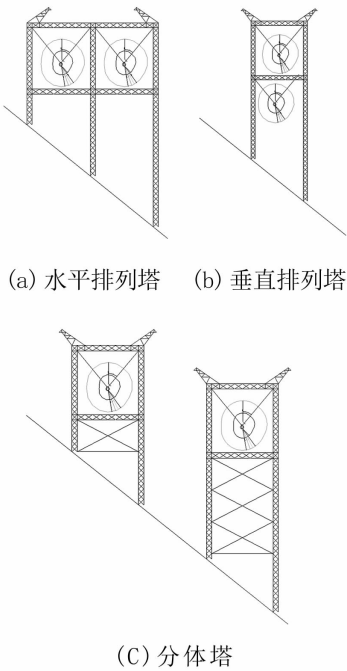


图 2 直柱门型塔

在高特峻地区的狭窄山梁或山脊塔位,采用这

种直柱门型塔优点明显,直柱长度可根据地形进行设计,主动适应地形坡度需要。直柱钢构架的横向和纵向宽度可根据塔型实际使用情况下的横向与纵向荷载比例确定,确保提供足够的横向和纵向刚度,保证杆塔受力安全。

直柱基础本体工程量和基面开方量较常规塔更少,对于环境破坏小,施工也简单;但是征地面积较常规塔型大,且铁塔受力较常规塔复杂。后续需要结合电气性能方面要求做进一步的分析,并进行模拟计算和真型塔试验后方能采用。

图 3 为双极直柱门型塔的效果图。



图 3 双极直柱门型塔效果

1.2.2 单极酒杯塔

相比上述直柱塔,从单极运行、减小根开、适宜陡坡地形角度出发,设计了单极酒杯塔,如图 4 所示。

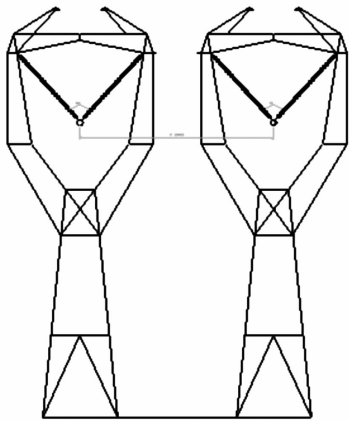


图 4 单极运行的酒杯塔

该种塔型将直流线路的同塔双极架设拆分为两个单极运行,以此来避免过大的扭距和扭转变形问题。

其优点为:1)可根据地形随意选择塔位,极间距的大小不影响铁塔受力;2)不受覆冰断线和不均匀冰情况下的扭转变形影响,仅承受横向弯矩和纵向弯

矩;3)每个塔的外荷载仅有同塔双极运行的一半,单重轻且构件规格较小,有利于施工运输和组装。

其缺点为:1)基础开挖数量多,基础混凝土和土石方工程较干字型塔略大,不利于环保;2)当两个单极塔距离较近时,部分基础可能会交叉带土,不能充分发挥基础的抗拔承载力;3)运行检修上不方便,需要两次登塔。

综上所述,单极运行的酒杯塔虽然有塔位选择灵活、塔重轻等特点,但是占地多的缺点比较明显;经济性和环保性较差,而安全性没有得到明显提高,建议极其特殊地区全方面考虑后再行采用。

1.2.3 三(两)腿塔

结合以往经验设计了三腿塔和两腿塔(见图 5)。在二自线(1996 年设计)中曾成功使用该类型的铁塔,可以解决部分陡坡铁塔级差不够的问题。

1.3 铁塔创新措施经济性分析

以某特高压工程 30 mm 冰区 ZC30303 - 78 m 为例,塔位地形陡峭约 45°,级差不能满足要求。从环境保护、水土保持角度尽量做到塔位“零开方”,考虑一个塔腿采用特殊处理方案,对多种方案进行综合技术经济对比,如表 2 所示。

从上述分析可以看出,在高特峻地区陡峭塔位,采用三腿塔经济性最好,采用独立格构柱和独立小塔经济性略优于基础加高,采用整体钢架造价最高,但是整体钢架变形最小,安全性最好。

从施工难度看,独立格构柱、独立小塔以及基础加高方式的施工难度最高,三腿塔最简单。从环保角度看,独立格构柱和独立小塔基础数量更多,对环境破坏更大,而钢架基础荷载最大,基础型号最大,三腿塔破坏最小。

因此,结合经济性、安全性、施工难度以及环保性,推荐优先选用三腿塔。若仍然不能满足级差要求,再结合施工条件选择各类钢架方案。

2 基础设计创新措施

2.1 子母基础^[2]

个别塔位基础露出地面太高,水平承载力难以满足时,可采用子母基础型式,如图 6 所示。该基础采用一种带连梁的框架结构基础体系,与铁塔相连的基础称为“母基础”,与“母基础”相连的叫“子基础”。该基础型式可以减小母基础的尺寸,整体可

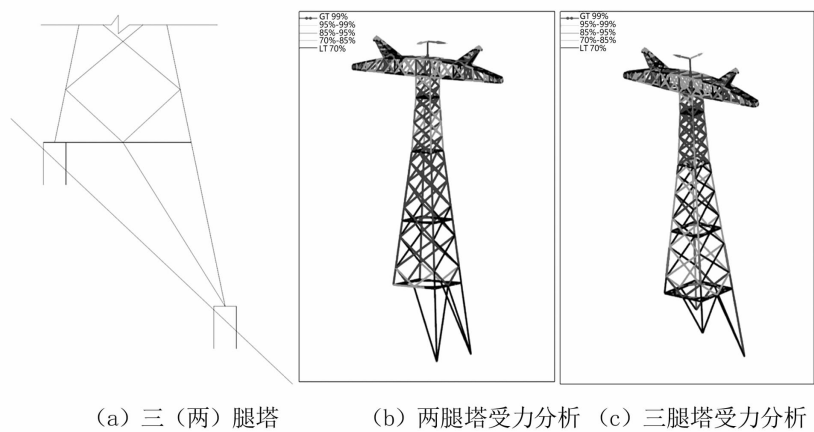


图 5 三(两)腿塔受力分析

表 2 高特峻地区特殊塔位多方案综合技术经济对比

项 目	三腿塔	常规塔 + 整体钢架	常规塔 + 独立格构柱	常规塔 + 斜独立小塔	常规塔 + 基础加高
各方案高度/m	—	钢架高:18	格构柱高:9	小塔高:11	加高:9
钢材/t	161.5	179.3	180.7	175.7	155.7
基础混凝土/m ³	164.8	231.3	181.2	204.5	268.0
基础钢筋/t	14.8	19.6	17.7	18.6	23.0
铁塔造价/万元	161.5	179.3	180.7	175.7	155.7
基础混凝土造价/万元	57.7	81.0	63.4	71.6	93.8
基础钢材造价/万元	10.4	13.7	12.4	13.0	16.1
主要工程量造价合计/万元	229.5	274.0	256.5	260.3	265.7
比值系数	0.86	1.03	0.97	0.98	1.00

注:①上述处理方式均按上边坡不开方原则进行测算。

②塔材按 1 万元/t,基础混凝土按 0.35 万元/m³,钢筋按 0.7 万元/t。

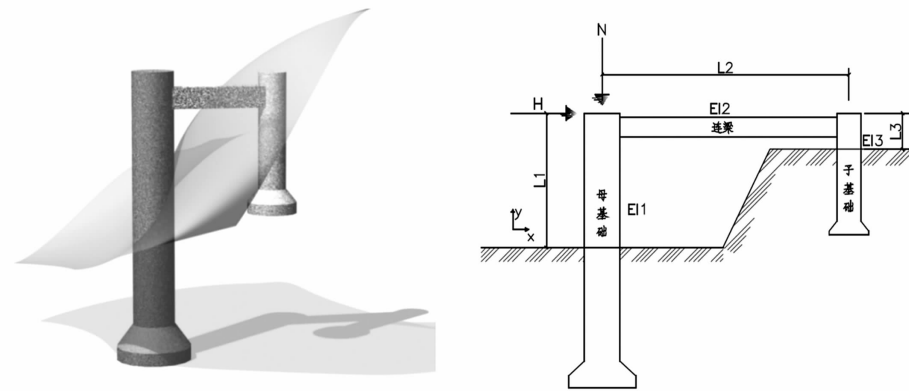


图 6 子母基础三维图和布置图

以减少基础混凝土方量。

但该基础型式施工工艺复杂,对于环境破坏较大,仅推荐在个别特殊地区作为露出地表面太高的基础加强采用。

2.2 新型钢管桩基础

目前输电线路常用的山区基础型式多为钢筋混凝土结构,采用人工开挖,但在峻岭地区的陡坡上施

工难度非常大,且高海拔、重冰区基础混凝土方量大,施工现场开挖的弃土多且向外运输困难,而弃土处理不当引起塔位安全风险较大^[3]。

针对上述问题,创新设计了一种新型钢管桩基础,不仅可以减少本体基础工程量的运输及现场浇筑量,还对就地处理弃土提出了新方式,对于不同的荷载情况考虑了两种方案,如图 7 所示。

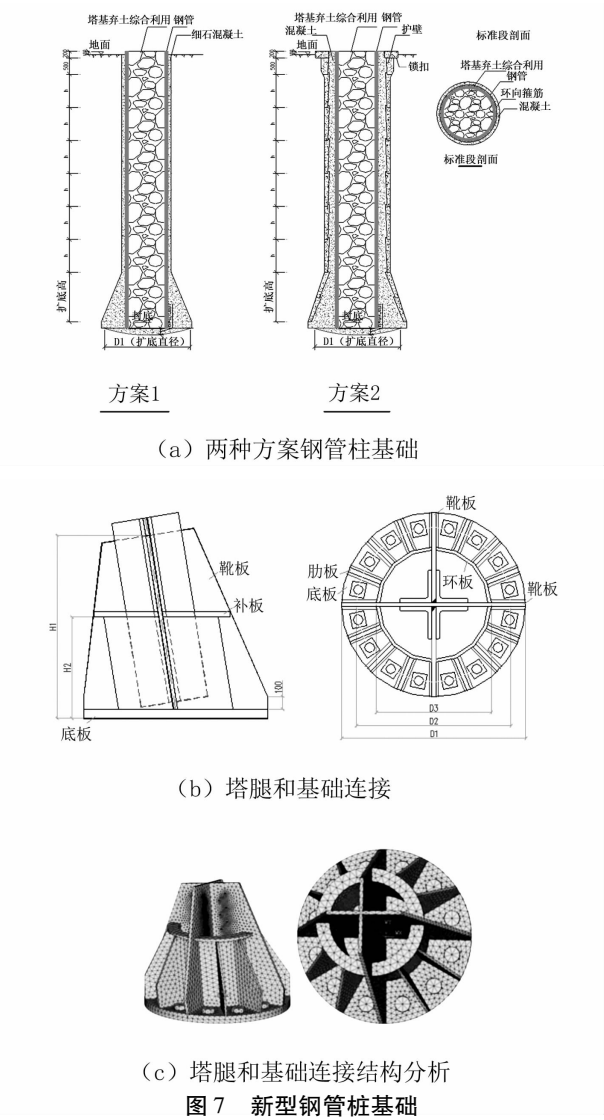


图 7 新型钢管桩基础

2.2.2.1 方案说明

方案 1 采用钢管桩和孔壁间灌注细石 C30 混凝土,预留空隙约 60~100 mm。基础最顶上标准节孔壁需修筑护壁和锁口,其余段可利用钢管柱作为坑壁支护结构。方案 2 采用钢管桩和孔壁间灌注常规混凝土,预留 200~300 mm。基础全部修筑护壁和锁口,以保证基础开挖时坑内的工人安全。

钢管采用内法兰连接,分段重控制在 1.5 t 以内(分段长约 2.0 m),方便采用中型索道运输。

2.2.2.2 主要优点

1) 中空的钢管桩可以回填大部分弃土,大大降低了以往施工弃土顺坡丢弃后引起的塔位风险问题,最大程度地降低对环境的破坏;

2) 基础混凝土工程量的减少,可以减小现场浇筑混凝土以及材料堆放的场地,减少水泥、沙、石头和施工用水的运输量,也可以较少对塔位环境的破坏;

3) 可利用钢管柱接地,减少接地沟的开挖,减

少对环境的破坏。

2.2.3 理论计算原理

1) 计算应同时考虑承载力极限状态和正常使用极限状态,承载力计算应考虑抗压、抗拔以及水平承载力计算。

2) 抗拔计算可按照《架空输电线路基础设计技术规程》^[4]中“复合式沉井基础”中要求执行,上拔承载力考虑基础自重、回填弃土自重及基础与土体见的摩阻力来抵抗,其中抗拔折减系数需结合真型试验实测值分析归纳。

3) 抗压计算可按照《架空输电线路基础设计技术规程》中“复合式沉井基础”中要求执行,下压承载力应考虑孔壁的侧摩阻力、基础地基反力以及土体的弹性抗力。

4) 水平承载力计算可参考《建筑桩基技术规范》^[5]和《架空输电线路基础设计技术规程》,但需进一步分析,对取值参数进行优化。

5) 应按《钢结构设计标准》^[6]对钢管桩进行局部屈曲计算。

6) 应验算钢管桩在设计地面处的水平变位。

7) 基础的本体强度按《混凝土结构设计规范》^[7]和《型钢混凝土组合结构技术规程》^[8]执行。

2.2.4 典型塔位综合对比分析

以某特高压工程 40 mm 冰区 ZC30403-78 m 为例,塔位地形陡峭约 35°~45°,采用索道运输,下面采用常规挖孔基础和新型钢管桩基础进行了综合对比分析,详见表 3。

表 3 常规挖孔基础和新型钢管桩基础综合对比

方 案	常规基础	钢管桩基础方案 1	钢管桩基础方案 2
钢管壁厚/m	—	0.02	0.02
钢管外壁直径/m	—	2	1.6
基础直径/m	1.8	2.2	2.2
基础全长/m	12	14	14
单塔基础方量/m ³	134	37	100
单塔护壁方量/m ³	34	2	25
单塔基础挖方量/m ³	168	250	238
钢筋运输量/t	12	0	3
钢管运输量/t	0	14	11
材料总运输量/t	414	107	315
弃土处理方案	外运	回填+外运	回填+外运
余土量/m ³	168	39	125

从表 3 可以看出,新型钢管桩可极大地降低塔

(下转第 69 页)

云南大理光伏 ± 30 kV 柔性直流输电工程 过电压与绝缘配合研究

陈 卓, 蒋艾町, 梁亚博, 夏 雪

(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610021)

摘 要:为合理确定 ± 30 kV 低压柔性直流输电工程设备的绝缘水平和配置避雷器, 基于云南大理光伏升压 ± 30 kV 柔性直流工程, 利用 PSCAD/EMTDC 对工程换流站的暂态过电压进行了计算, 并根据计算结果进行绝缘配合研究。研究结果对工程换流站设备的选型和制造具有指导意义, 也为低压柔直输电工程的建设提供了参考依据。

关键词: 低压柔性直流输电; ± 30 kV; 换流站; 过电压计算; 绝缘配合

中图分类号: TM761 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2021)01-0014-06

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20210104

Research on Overvoltage and Insulation Coordination for Converter Station of ± 30 kV Flexible DC Transmission Project in Dali of Yunnan

Chen Zhuo, Jiang Aiting, Liang Yabo, Xia Xue

(CPECC Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610021, Sichuan, China)

Abstract: In order to decide the insulation level of the equipment in converter station of ± 30 kV flexible low voltage DC transmission project reasonably and configure the lightning arresters, based on ± 30 kV flexible DC project of Dali photovoltaic boost in Yunnan, the transient overvoltage of converter station is calculated with PSCAD/EMTDC. According to the calculation results, the insulation coordination is studied. The research results have a significance on guiding the type selection and manufacturing of converter station equipment, and also provide a reference for the construction of flexible low voltage direct transmission project.

Key words: flexible low voltage DC transmission; ± 30 kV; converter station; overvoltage calculation; insulation coordination

0 引 言

近年来,随着清洁能源的不断开发与利用,基于风电、光伏等可再生能源的并网技术受到了广泛的研究与实践^[1-3]。柔性直流输电技术,基于电压源型变流器,应用先进的电力电子器件与 PWM 脉宽调制技术,克服了传统直流输电方法存在换相失败风险、谐波水平较高和需要无功补偿等诸多缺点,为风电、光伏等新能源并网提供了更加灵活、可靠的输电方式^[4-7]。

早期的柔性直流输电技术多采用两电平和三电平的拓扑结构,但这种结构开关损耗较高、均压困难,且由于电平数较少,输出电压谐波含量高^[8-9],因此,学者们提出了模块化多电平换流器(modular

multilevel converter, MMC)。与传统的两电平和三电平拓扑换流器相比,MMC 易于扩展,输出电压谐波小、直流输电系统效率高,且能够降低系统的输电损耗^[10-12]。

国内最早建成投运的 MMC 柔性直流输电工程是上海南汇风电柔性直流输电工程,该工程实现了风电场的接入并网。此外,国内目前还建设有广东南澳、浙江舟山和福建厦门柔性直流工程,都是基于 MMC 的柔性直流输电工程^[8-9]。

对于柔性直流输电工程,系统的过电压计算与绝缘配合研究是不可缺少的一项内容,其不仅为避雷器的配置提供了参考依据,也为合理选择换流站电气设备的绝缘水平提供了指导,有助于实现工程设计经济合理的目标,维护系统的安全稳定运行^[13-15]。

目前国内对于直流输电工程的过电压与绝缘配合研究主要集中在特高压直流换流站。然而,与传统直流输电不同,柔性直流输电技术由于受电力电子器件影响,输送容量较低,选取绝缘裕度时需考虑容量的降低,以实现系统的经济型和与合理性^[13]。文献[14-15]分别研究了 ± 200 kV 和 ± 320 kV 的高压大容量柔性直流工程换流站的绝缘配合;但对于低压柔性直流输电工程,由于输电等级更低,输送容量更小,过电压水平会发生变化,其避雷器的配置和绝缘水平设计也会有所改变。因此,为了工程的经济性与合理性,有必要对 ± 30 kV 低压柔性直流输电工程的过电压水平和绝缘配合进行研究。

云南大理光伏升压 ± 30 kV 柔性直流工程采用基于 MMC 的柔性直流输电技术,通过直流电缆将光伏发电接入电网,是国内第一个光伏接入的低压柔性直流输电工程。下面基于云南大理光伏升压 ± 30 kV 柔性直流工程,利用 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件搭建了系统的仿真模型,并对系统过电压进行了计算,同时根据过电压计算结果对系统进行了避雷器配置和绝缘配合研究。研究结果对低压柔直换流站设备的选型和制造具有指导意义,为可再生能源接入的低压柔直输电工程换流站过电压计算与绝缘配合研究提供了参考依据。

1 工程概况及系统运行参数

1.1 工程概况

云南大理光伏升压 ± 30 kV 柔性直流工程是国家重点研发计划项目“大型光伏电站直流升压汇集接入关键技术及设备研制”的配套工程。工程基于柔性直流输电技术,计划由大理市干塘子光伏电站经过直流汇集升压和 DC/DC 变换将直流电压提升至 ± 30 kV,通过 600 m 长的直流电缆线路输送至 MMC 换流站,再经过换流站接入 35 kV 交流系统,系统接入方案如图 1 所示。该工程既示范了低压柔性直流电网输电技术的应用,同时解决了大理州地区可再生能源送出与消纳问题。

1.2 系统运行参数

该工程基于 MMC 的柔性直流输电技术,输送容量为 5 MW,直流输送电压等级为 ± 30 kV,交流侧电压等级为 35 kV。工程换流站采用单极对称接线形式,联络变压器采用 11 型双绕组无励磁调压变

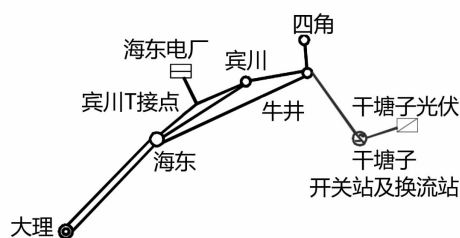


图1 系统接入方案

压器,容量为 1×6300 kVA,变压器抽头选择为 $38.5 \pm 2 \times 2.5\% / 35$ kV,阻抗电压为 8%。桥臂电抗器电感值为 156 mH。

直流输电线路选用电力电缆直埋方式,由于工程直流线路距离较短,因此直接利用 MMC 换流站对侧光伏电站接地,为直流系统提供直流零电位参考点。

2 工程过电压计算

柔性直流输电系统换流站由于整流和逆变的需要,存在着大量的非线性元件,这些元件在发生短路故障时容易引起过电压的问题,危害换流站甚至整个直流系统的安全稳定运行^[14]。因此,研究系统暂态过电压的特性,为输电系统合理配置避雷器、确定设备的绝缘水平提供参考依据,不仅可以节约设备制造成本,实现工程的经济设计,也有助于工程系统的安全稳定运行^[16-17]。

在 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件中搭建了如图 2 所示拓扑结构的大理光伏升压 ± 30 kV 柔性直流输电系统仿真模型,其中工程直流侧光伏组件出力为 5 MW,系统直流电压为 ± 30 kV,4 个 DC/DC 直流变换器的容量分别为 1.5 MW、1.5 MW、1 MW、1 MW,其中 1.5 MW 回路直流升压装置由 3 个 500 kW 的 DC/DC 升压模块串联,每个模块输出电压为 $DC \pm 10$ kV;1 MW 回路直流升压装置由 1 个 1 MW DC/DC 升压模块构成,4 个 DC/DC 直流变换器采用输出并联的接线方式汇集并网。MPPT 控制采用电导增量法,以实现光能的最大利用。工程换流站换流阀桥臂采用 36 个全桥子模块和 36 个半桥子模块串联的混合结构,桥臂电感为 0.156 H,子模块电容为 1260 μ F。交流侧通过换流变压器与 35 kV 交流系统相连。换流阀模块采用定直流电压控制,控制极间直流电压为 60 kV。交路系统则采用两点等值法进行等值处理。

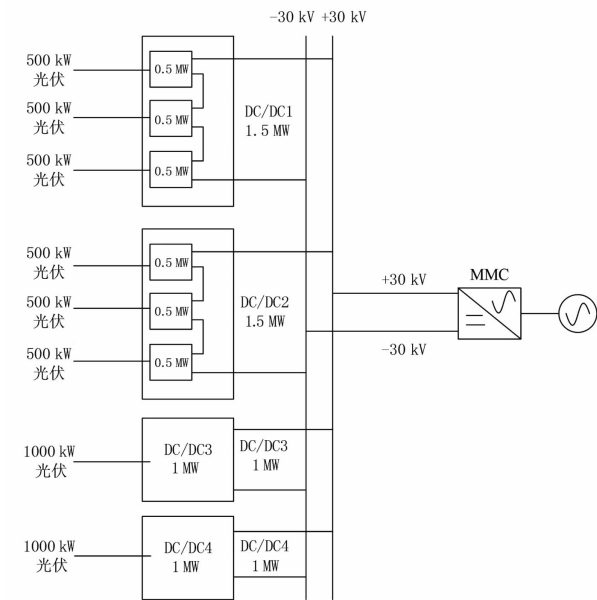


图 2 大理光伏升压 ± 30 kV 柔性直流系统拓扑结构

下面将通过仿真,全面计算分析工程系统发生故障时交流侧与直流侧的暂态过电压,包括交流侧的雷击过电压、交流输电线路发生不对称接地故障时的工频过电压和短路故障时的操作过电压,与直流侧的直流电缆外绝缘故障时的过电压以及交流断路器动作换流阀两侧过电压。由于云南大理光伏升压 ± 30 kV 柔性直流工程直流侧线路采用的是电缆直埋敷设方式,故直流场电气设备不考虑雷电过电压的问题。

2.1 交流侧暂态过电压

2.1.1 雷电过电压

对于低电压等级的换流站或者变电站,由于建设水平不高、绝缘水平不理想等缺点,因雷击导致的跳闸、绝缘子闪络等故障停电成为降低工程安全可靠运行的主要因素之一^[18-19]。同时,低电压等级系统的工频过电压与操作过电压水平往往较低,因此换流站交流侧的雷电过电压水平是工程设计关注的重点,也是系统避雷器配置与绝缘配合的主要参考依据。

根据文献[20-21]中介绍的雷电流、杆塔、绝缘子以及换流站设备的数学等效模型搭建方法,在 PSCAD 中搭建换流站的雷电过电压仿真模型,包括交流场进线段 1~2 km 输电线路模型和主要电气设备的电磁暂态仿真模型,如图 3 所示,以研究系统在雷电绕击和反击工况下的过电压水平。其中,雷电流幅值根据换流站所处地区雷电流幅值分布概率确定,其数学模型采用双指数函数模型^[20];杆塔杆头

绝缘子闪络的判定采用规程法,即绝缘子串两端出现的过电压超过绝缘的 50% 放电电压即判为闪络^[22],该工程选用的绝缘子的 50% 放电电压约 350 kV,因此将闪络电压设为 350 kV。

图 4 为系统分别在雷电绕击和反击工况下故障相绝缘子两端的电压水平。由图可知,当发生雷电流绕击情况时,绝缘子两端电压达到 378 kV,绝缘子出现闪络;当发生雷电流反击情况时,绝缘子两端电压达到 444 kV,绝缘子出现闪络。

因此,可以看出,如果不装设避雷器,绝缘子会出现闪络情况,交流场各设备的过电压值远大于设备的绝缘水平,对设备绝缘和系统运行造成十分严重的影响。

2.1.2 不对称接地故障时的工频过电压

以水平年夏季最大运行方式为研究方式,利用搭建的仿真模型(如图 2 所示),分别在系统交流侧输电线路首端、中端和末端设置单相接地故障和两相接地故障,以计算两种故障发生时健全相产生的过电压值。仿真过程中故障发生时刻为 3 s,持续时间 100 ms。

计算结果分别如表 1 和表 2 所示。可以看出,当线路首端发生单相接地短路时,线路首端过电压幅值最大,达到 40.21 kV;当线路中端发生两相接地故障时,线路首端过电压幅值最大,达到 38.50 kV。

表 1 交流线路单相接地故障后工频过电压最大值

故障位置	过电压最大值/kV		
	首端	中端	末端
首端	40.21	36.42	31.74
中端	37.54	36.12	31.32
末端	37.36	34.59	32.61

表 2 交流线路两相接地故障后工频过电压最大值

故障位置	过电压最大值/kV		
	首端	中端	末端
首端	37.18	33.80	31.64
中端	38.50	37.36	32.00
末端	35.02	33.67	32.60

2.1.3 短路故障时的操作过电压

同样的,利用如图 2 所示的仿真模型,在系统稳定运行后($t=3$ s)对交流线路首段、中端、末端分别施加单相接地故障和两相接地故障,故障持

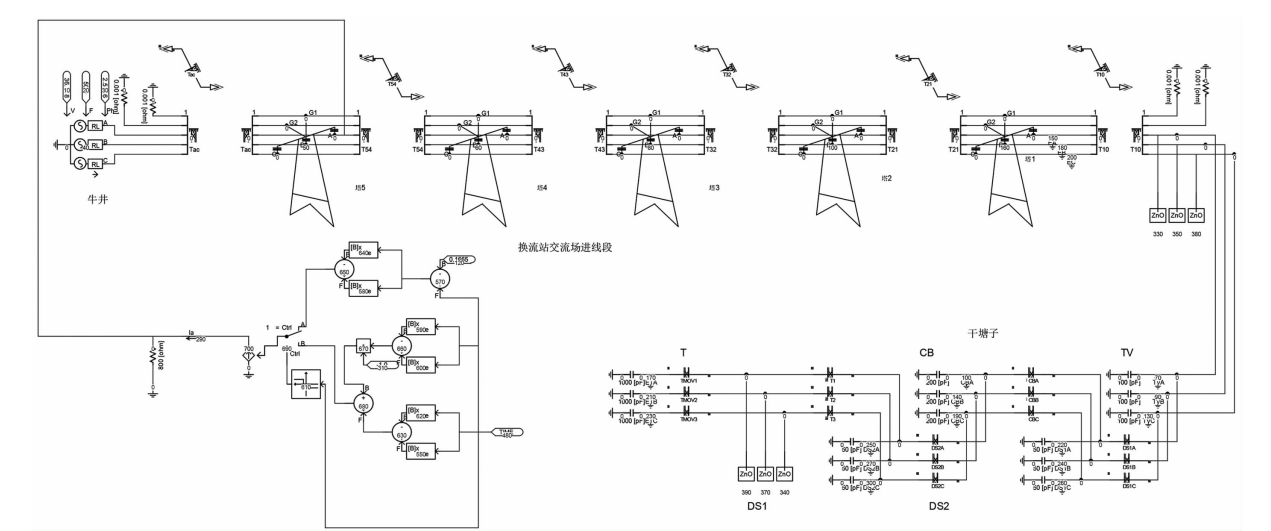


图 3 换流站的雷电过电压仿真模型

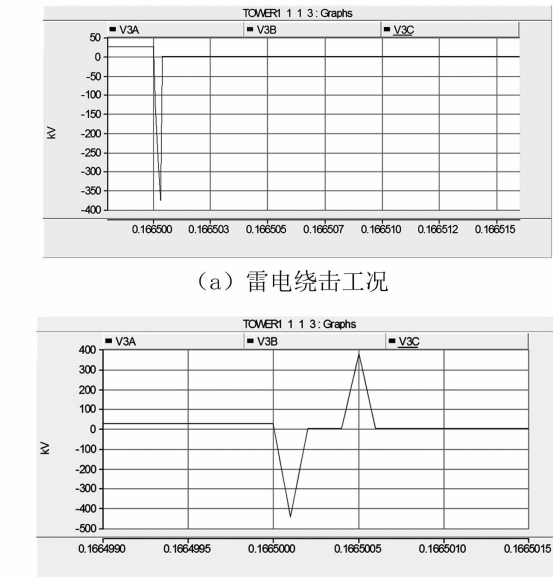


图 4 雷电绕击和反击工况下故障相绝缘子两端电压水平

续 0.5 s,计算断路器动作 100 ms 内,健全相首端、中端、末端产生的过电压最大值,仿真结果分别如表 3 和表 4 所示。

表 3 交流线路单相接地故障操作过电压最大值

故障位置	过电压最大值/kV		
	首端	中端	末端
首端	35.43	33.29	30.60
中端	38.28	35.92	31.82
末端	33.20	31.37	30.18

可以看出,当线路中端发生单相接地短路故障断路器动作后,线路首端过电压幅值最大,达到 38.28 kV;当线路首端发生两相接地短路故障断路器

动作后,线路末端过电压幅值最大,达到 34.03 kV。

表 4 交流线路两相接地故障操作过电压最大值

故障位置	过电压最大值/kV		
	首端	中端	末端
首端	34.03	32.20	30.94
中端	31.44	29.45	28.31
末端	32.10	28.42	28.21

2.2 直流侧暂态过电压

2.2.1 直流电缆外绝缘故障过电压

对电缆外绝缘出现破损时发生单极接地故障或极间短路故障引起的直流侧过电压进行仿真计算,仿真结果如表 5 所示。

表 5 直流侧外绝缘故障后直流侧过电压最大值

首端过电压 最大值/kV	中端过电压 最大值/kV	末端过电压 最大值/kV
62.39	64.28	65.02

2.2.2 交流断路器动作换流阀两侧过电压

在系统交流侧线路首端分别设置单相接地故障和两相接地故障,仿真计算断路器动作时换流站换流阀两侧的暂态过电压值。仿真结果如表 6 所示。

表 6 交流断路器动作换流阀两侧过电压最大值

故障类型	断路器动作	换流阀两侧电压幅值/kV
单相接地故障	分闸	127.31
两相接地故障	分闸	126.01

可以看出,当系统发生单相接地故障时,断路器分闸,换流阀两侧过电压最大可达 127.31 kV;当系统发生两接地故障时,断路器分闸,换流阀两侧过电压最大可达 126.01 kV。

3 避雷器配置与系统绝缘配合

由第 2 节计算结果可以看出,对于交流侧,当系统受到雷击时,设备承受的过电压很大;对于直流侧,交流断路器动作时换流阀两侧的过电压幅值均超过 100 kV,其中单相接地故障时分闸最高过电压值达到 127.31 kV,超过直流设备正常运行电压水平,因此必须进行避雷器配置来保护电气设备。

3.1 避雷器配置方案

该工程采用金属氧化物避雷器 (metal - oxide surge arresters, MOA),其配置原则与常规柔性直流输电系统的避雷器配置原则相同^[14],由于工程电压等级较低,过电压水平不高,不是所有关键位置的过电压都会对系统造成威胁,因此可以对避雷器作适当的增减。

大理光伏升压 ±30 kV 柔性直流输电系统换流站避雷器配置方案如图 5 所示。

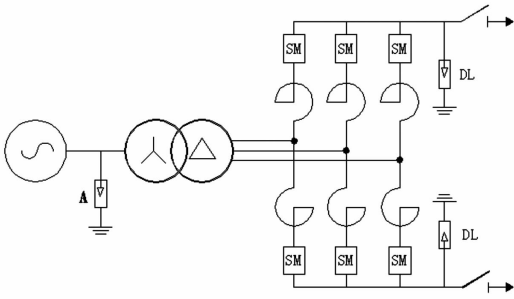


图 5 大理光伏升压 ±30 kV 柔性直流输电系统换流站避雷器配置方案

1) 针对交流侧,主要是雷电过电压很大,工频及操作过电压水平较低,因此,结合过电压计算结果及系统主接线方案,采用在联络变压器出口和线路出线处同时装设交流避雷器 A。

2) 针对直流侧,由于与断路器动作时换流阀两端过电压水平相比,直流侧外绝缘故障后直流侧的过电压值较低,因此直流侧主要针对当故障断路器动作时换流阀两端过电压水平进行避雷器配置。同时直流配电电缆接多个分布式负荷或电源,存在多个直流极线出口,需在每一个出口处布置避雷器以保护出线端的设备,因此在换流阀和直流隔离开关之间装设直流避雷器 DL。

交流避雷器 A 和直流避雷器 DL 的相关参数如表 7 所示。

表 7 交流避雷器 A 和直流避雷器 DL 参数选择

单位:kV(有效值)

参 数	A	DL
系统标称电压	35	30
额定电压	51	48
持续运行电压	40.8	30.2
操作冲击残压	114	136
雷电冲击残压	134	145

配置避雷器后对系统交流侧雷电过电压和直流侧操作过电压水平重新进行计算。按照如图 5 所示避雷器配置方案在仿真模型中加入交流避雷器 A 和直流避雷器 DL,仿真结果分别如表 8 和表 9 所示。

表 8 配置避雷器后交流侧雷电绕击和反击过电压

单位:kV

设备	绕击	反击
电压互感器	55.22	62.07
1 号隔离开关	62.45	74.05
断路器	64.36	73.55
2 号隔离开关	59.03	65.10
联络变压器	93.46	78.24

表 9 配置避雷器后交流断路器动作换流阀两侧过电压最大值

故障类型	断路器动作	换流阀两侧电压幅值/kV
单相接地故障	分闸	83.57
两相接地故障	分闸	84.66

可以看出,配置避雷器后,交流侧的雷击过电压明显下降,当交流线路发生单相接地故障和两相接地故障时,断路器动作后,换流阀两侧过电压最大值分别为 83.57 kV 和 84.66 kV,均小于配置避雷器前的过电压值,直流避雷器 DL 最大吸收能量为 0.598 kJ,证明了避雷器配置的有效性。

3.2 电气设备绝缘配合

根据第 3.1 节避雷器的配置结果和配置避雷器后计算得到的各设备的雷电过电压和工频过电压值,本节参照国家标准 GB/T 50064—2014《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》^[22]对交流侧和直流侧电气设备的绝缘水平进行选取。

值得注意的是,云南大理光伏升压 ±30 kV 柔性直流工程位于云南省大理州,站址海拔约为 1730 m,为保证高海拔下设备的安全运行,其外绝缘水平需要进行海拔修正。根据 GB/T 50064—2014 给出的外绝缘放电电压气象条件校正方法进行修正,计算

得到该工程 35 kV 电压等级的海拔修正系数 k_a 估算结果(相-地)如表 10 所示。

表 10 35 kV 电压等级海拔修正系数 k_a 估算结果

工频过电压	操作过电压	雷电过电压
1.236 5	1.210 5	1.236 5

根据表 10 计算出的海拔修正系数 k_a ,可得到该工程 35 kV 电气设备的绝缘水平和直流侧电气设备的绝缘水平,分别如表 11 和表 12 所示。

表 11 35 kV 电气设备绝缘水平及保护水平

配合系数表

设备名称	设备耐受电压值				雷电冲击 保护水平 配合系数
	雷电冲击耐压 /kV(峰值)		1 min 工频耐压 /kV(有效值)		
	内绝缘	外绝缘	内绝缘	外绝缘	
主变压器	200	248	95	117	1.45
其他电器	200	248	95	117	
断路器断口间	200		95		
隔离开关 断口间		266		146	

表 12 直流侧电气设备外绝缘水平

设备名称	雷电冲击耐压水平/kV		短时工频耐压水平/kV	
	计算值	取值	计算值	取值
功率单元	193	195	68	70
隔离开关	193	195	68	70

4 结 语

基于云南大理光伏升压 ±30 kV 柔性直流工程对低压柔性直流换流站的过电压与绝缘配合进行了详细的研究。利用 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件搭建了工程系统的仿真模型,仿真计算了未配置避雷器时系统交流侧的雷击过电压、交流输电线路发生不对称接地故障时的工频过电压和短路故障时操作过电压与直流侧的直流电缆外绝缘故障时的过电压以及交流断路器动作换流阀两侧过电压。计算结果表明:交流侧的雷电过电压水平较高,受到雷击时,过电压最高可达 444 kV,出现绝缘子闪络情况,其他工况下过电压水平较低;直流侧则是操作过电压水平较高,当出现故障断路器动作时,换流站换流阀两侧过电压水平较高,达到了 127.31 kV。

根据过电压计算结果,对系统交流侧雷电过电

压和直流侧操作过电压进行了避雷器配置,在联络变压器出口和线路出线处同时装设了交流避雷器 A,在换流阀和直流隔离开关之间装设了直流避雷器 DL,并且确定了避雷器的具体参数。然后对工程电气设备进行了绝缘配合,并且基于工程实际情况进行了海拔修正,给出了工程设备最终的绝缘水平。研究结果对换流站设备的选型和制造具有指导意义,为过电压计算与绝缘配合研究提供了有用的参考数据。

参考文献

[1] Chamarthi Phanikumar, Vivek Agarwal, Mohamed Shawky El Moursi. New Self-balancing 7-level Inverter with Coupled Inductors for 1- ϕ Grid-connected Renewable Energy Systems with Voltage Boosting Capability[J]. IET Power Electronics, 2020, 13(5):899-908.

[2] Nagendra Singh, Sanjay K. Jain. Investigation of Three-level NPC-qZS Inverter-based Grid-connected Renewable Energy System[J]. IET Power Electronics, 2020, 13(5):1071-1085.

[3] 文云峰,杨伟峰,汪荣华,等. 构建 100% 可再生能源电力系统述评与展望[J]. 中国电机工程学报,2020,40(6):1843-1856.

[4] 刘耀,吴佳玮,肖晋宇,等. 有源型柔性直流输电技术在全球能源互联网背景下的应用研究[J]. 全球能源互联网,2020,3(2):107-116.

[5] 徐政,陈海荣. 电压源换流器型直流输电技术综述[J]. 高电压技术,2007,33(1):1-10.

[6] Xuemei Zheng, Yangman Li, Zhuang Liu, et al. Steady-state Control Strategy of VSC-HVDC Transmission System Based on Full-order Terminal Sliding Mode Control Method[J]. The Journal of Engineering, 2019(16):987-990.

[7] 许小宁. 柔性直流输电技术的现状与运用前景[J]. 现代工业经济和信息化,2020,10(1):77-78.

[8] 王璐. 基于 MMC 的换流站内部故障及交流不对称故障保护策略研究[D]. 沈阳:沈阳工业大学,2019.

[9] 顾亚旗. 含风电场的多端柔性直流输电系统控制策略研究[D]. 北京:北京交通大学,2019.

[10] 严铭,蔡晖,谢珍建,等. 适用于多端柔性直流输电系统的分布式直流电压控制策略[J]. 电力自动化设备,2020,40(3):134-140.

[11] 叶林. 柔性直流输电系统拓扑结构[J]. 中国高新技术,2019(14):12-14.

一起 110 kV 同塔双回线因风舞导致跳闸的案例分析

马小军,邵永浩

(国网宁夏电力有限公司检修公司,宁夏 银川 750011)

摘 要:针对一起 110 kV 同塔双回线因风舞导致永久性故障的线路跳闸事故,从故障现象、录波信息、保护行为等方面进行了分析和总结,并提出指导建议和应对措施,以提高运维、检修人员对于较复杂电网事故的处理效率。

关键词:同塔;双回线;风舞;跳闸

中图分类号:TM773 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2021)01-0020-04

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210105

Analysis on A Tripping Accident of 110 kV Duble – circuit Lines on the Same Tower due to Wind Dancing

Ma Xiaojun, Shao Yonghao

(State Grid Ningxia Maintenance Company, Yinchuan 750011, Ningxia, Chian)

Abstract:A tripping accident of 110 kV double – circuit lines with permanent fault caused by wind dancing is analyzed and summarized from the aspects of fault phenomena, recording information and protection behavior, and the corresponding measures are put forward, which will improve the efficiency of accident handling for operation and maintenance personnel.

Key words:same tower; double – circuit line; wind dancing; tripping

0 引 言

近年来,随着电网建设的快速推进,电网结构也越来越复杂,不同电压等级输电线路的跨越现象日趋严重。当出现大风、冰雪等恶劣天气时,线路会因风或覆冰舞动,此时跨越线路之间的垂直距离可能不够,易导致不同电压等级之间的跨越线路相互放电,造成多条线路之间的短路故障,最终跳闸,影响电网的安全稳定运行^[1]。下面以一起 110 kV 同塔双回线因风舞导致跳闸的事故为例,进行分析,并提出一定的建议和应对措施。

1 故障前运行方式

330 kV A 站:110 kV a 线 122 断路器运行于 110 kV II B 母,110 kV b 线 121 断路器运行于 110 kV I B 母,110 kV 母线并列运行。

110 kV B 站:110 kV a 线 111 断路器运行于

110 kV I 母,110 kV b 线 121 断路器运行于 110 kV II 母,母联断路器 100 热备用,110 kV 母线分列运行。

110 kV C 站:110 kV a 线带全站负荷,35 kV d 线、e 线运行于 35 kV II 母,35 kV 母线并列运行,35 kV 消弧线圈运行于 1 号主变压器。

系统运行方式如图 1 所示。

2 跳闸事故原始信息

2.1 A 站跳闸事故原始信息

某日 06:57:26:214,A 站 110 kV b 线 16 ms 差动保护动作,1082 ms 重合闸动作,重合于故障,1178 ms 差动保护动作,1200 ms 距离加速动作,跳开 b 线 121 断路器,故障测距 28.55 km。

在 06:57:26:225,110 kV a 线 9 ms 差动保护动作,1074 ms 重合闸动作,重合于故障,1166 ms 差动保护再次动作,1189 ms 距离加速保护动作,跳开 a 线 122 断路器,故障测距 21.12 km。

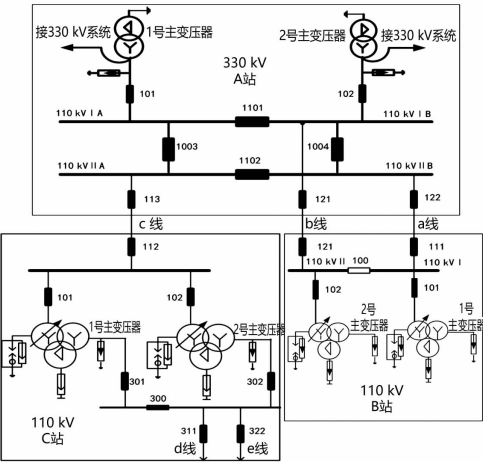


图 1 故障前系统运行方式

2.2 B 站跳闸事故原始信息

同日 06:57:26:221,110 kV b 线 5 ms 差动保护动作,1005 ms 重合闸动作并重合成功,故障测距 7.45 km。

在 06:57:26:231,110 kV a 线 7 ms 差动保护动作,35 ms 距离 I 段保护动作,1047 ms 重合闸动作并重合成功,故障测距 13.82 km。

2.3 现场调查及分析

保护人员接到命令后赶往现场进行事故处理,到达现场后对保护动作信息进行调取分析^[2-3]。

1)查看 330 kV A 站 110 kV b 线保护装置故障录波(如图 2),发现故障时 A、C 相电压有不同程度降低,A 相接地,故障电流如表 1 所示。

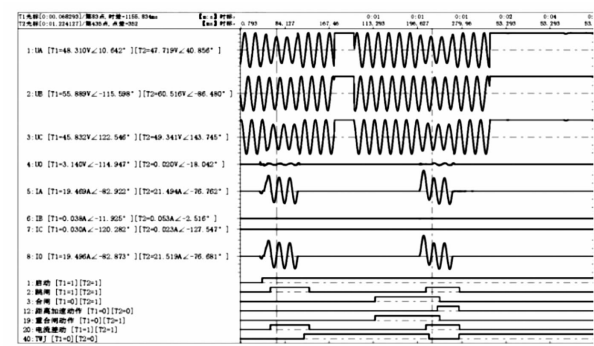


图 2 330 kV A 站 b 线保护装置故障录波

表 1 330 kV A 站 b 线故障电流

故障电流	I_a/A	I_b/A	I_c/A	$3I_0/A$
二次	19.469	0.038	0.030	4.800
一次	3115.04	6.08	4.80	3119.36

注:b 线 TA 变比为 800/5。

2)查看 110 kV B 站 110 kV b 线保护装置故障录波(如图 3),发现故障时 A、C 相电压有不同程度

降低,由于 B 站侧为负荷侧,且 110 kV 2 号主变压器中性点未接地,故无电流流过。

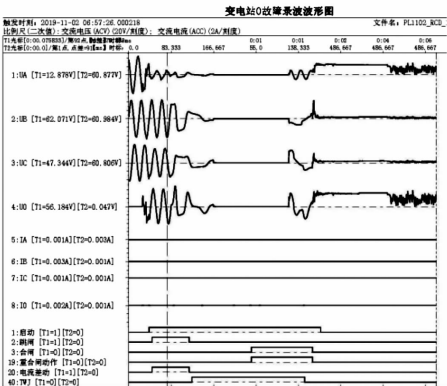


图 3 110 kV B 变电站 b 线保护装置故障录波

3)查看 110 kV B 站 110 kV a 线保护装置故障录波(如图 4),发现故障时 A、C 相电压有不同程度降低,因 110 kV 1 号主变压器中性点直接接地,因此出现穿越性电流^[4]。

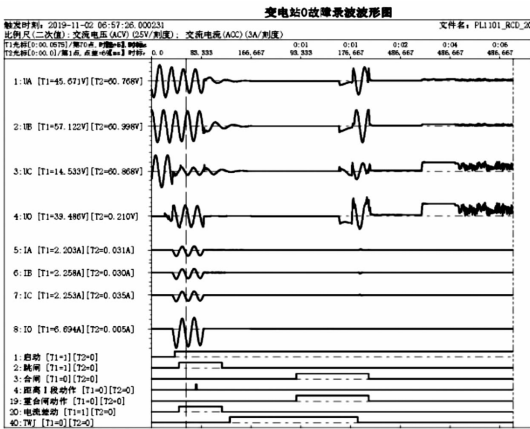


图 4 110 kV B 站 a 线保护装置故障录波

4)查看 330 kV A 站 110 kV a 线保护装置故障录波(如图 5),发现故障时 A、C 相电压有不同程度降低,C 相接地,故障电流如表 2 所示。

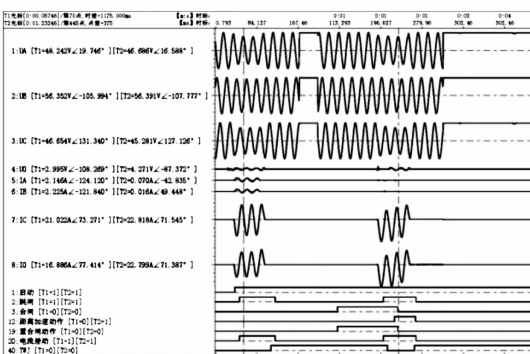


图 5 330 kV A 站 a 线保护装置故障录波

5)通过查看 330 kV A 站故障器录波报告(如图 6)可知,a 线与 b 线 A、C 相电流等大反相,且故障

表 2 330 kV A 站 a 线故障电流

故障电流	I_a/A	I_b/A	I_c/A	$3I_0/A$
二次	2.146	2.225	21.022	16.886
一次	343.36	356.00	3 110.36	2 701.76

注:a 线 TA 变比为 800/5。

发生与切除时间相同,因此判断 a 线 122、b 线 121 发生跨线 C、A 相间短路接地故障。

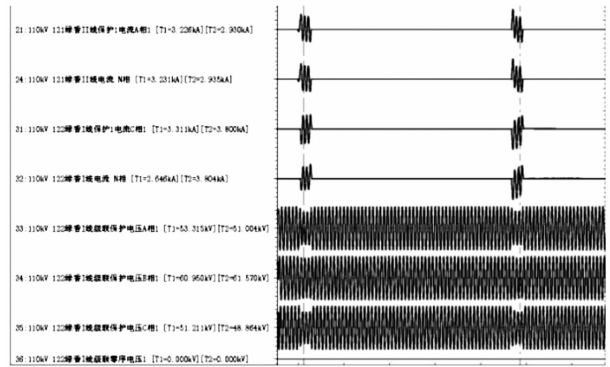


图 6 330 kV A 站 110 kV 故障录波

6)通过查看 C 站保护动作信息,发现该日 06:57:26 时 110 kV C 站 d 线 322 保护过流 I 段动作,调取 d 线故障录波(如图 7),故障电流如表 3 所示。

7)由图 7 和表 3 发现,故障时 B、C 相电压均降低,但只有 C 相有故障电流,为 C 相接地故障。通过进一步对 d 线检查发现,35 kV d 线 C 相避雷器击穿。

由于 35 kV 系统属于不接地系统,单相接地时保护不能跳闸,故还有其他接地点造成 d 线保护装置动作。

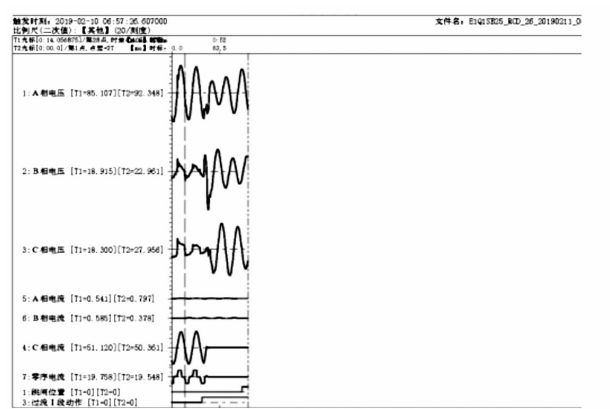


图 7 110 kV C 站 d 线保护装置录波

8)调取 C 站 1 号主变压器中后备保护装置故障录波,如图 8 所示,发现故障时为 BC 相间短路故障,故另一接地点存在于 B 相,故障电流如表 4 所示。

表 3 110 kV C 站 d 线故障电流

故障电流	I_a/A	I_b/A	I_c/A
二次	0.540	0.585	51.120
一次	21.6	23.4	2 044.8

注:d 线 TA 变比为 200/5。

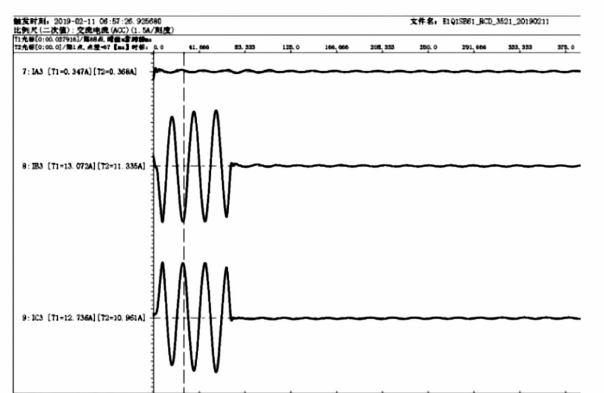


图 8 C 站 1 号主变压器中后备保护装置录波

表 4 110 kV C 站 1 号主变压器中后备故障电流

故障电流	I_a/A	I_b/A	I_c/A
二次	0.347	13.072	12.736
一次	27.76	1 045.76	1 018.88

注:C 站 1 号主变压器中后备 TA 变比为 400/5。

9)调取 C 站 2 号主变压器中后备保护装置故障录波,如图 9 所示,发现故障时为 BC 相间短路故障,进一步证实另一接地点存在于 B 相,故障电流如表 5 所示。

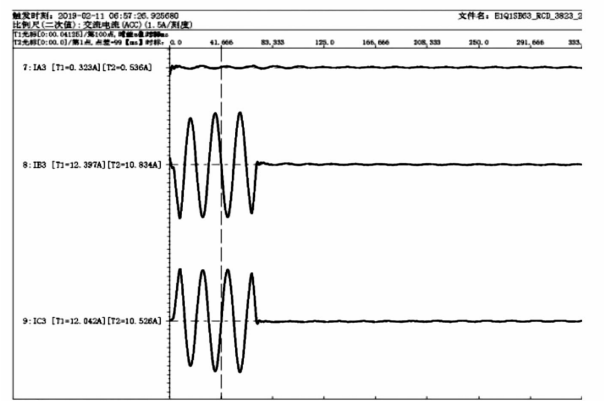


图 9 C 站 2 号主变压器中后备保护装置录波

表 5 110 kV C 站 2 号主变压器中后备故障电流

故障电流	I_a/A	I_b/A	I_c/A
二次	0.323	12.397	12.042
一次	25.84	991.76	963.36

注:C 站 2 号主变压器中后备 TA 变比为 400/5。

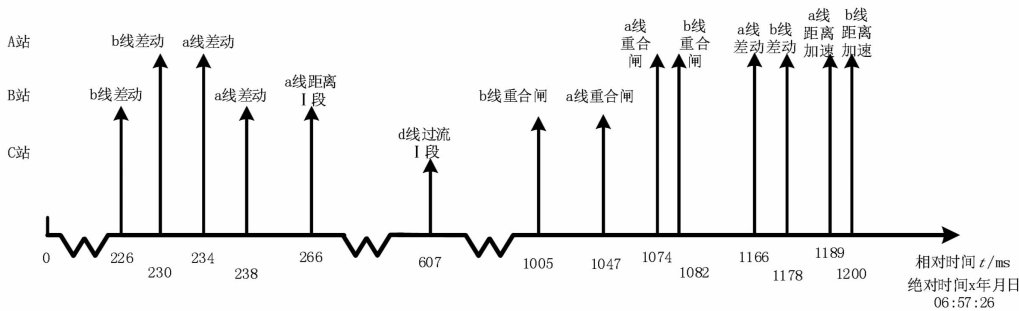


图 10 事故经过时间轴

由 C 站 1 号主变压器、2 号主变压器中后备保护装置故障录波可知,故障时 B 相故障电流一次值约为 2 037.52 A,C 相故障电流一次值约为 1 982.24 A,故障电流如表 6 所示,达到 d 线保护过流 I 段保护定值一次值(1300 A,0.05 s),未达到 e 线保护过流 I 段保护定值一次值(2300 A,0.05 s),所以 C 站 d 线保护动作、e 线保护不动作行为正确。

整个事故经过先后时间顺序的坐标图如图 10 所示。



图 11 a、b、e 线放电示意图

3 故障过程与保护动作行为分析

对本次多条线路故障及保护动作过程分析如下:

1)根据气象预警与现场工作人员的描述得知,短路时该地区存在 10 级西北风,据此环境条件和故障滤波的动作顺序以及现场事故检查结果,可以推测、分析出整个事故的经过:大风造成 e 线大幅度摆动,首先摆向 110 kV b 线 96 号杆塔,由于杆塔弧垂较高,未造成短路,当 e 线摆至 95 号杆塔方向时,造成 110 kV b 线、e 线相互放电,并且 e 线距离 b 线较近,对在故障初期前 10 ms,110 kV b 线 A 相与 35 kV e 线 B 相短路,造成 b 线 A 相接地后,故障发展为 110 kV a 线 C 相与 e 线 B 相短路,最终造成 b 线 A 相、a 线 C 相经 e 线 B 相跨线接地短路,现场 a 线、b 线、e 线线路布置如图 11 所示。

2)故障持续 3 个周波,此时,b 线、a 线两侧保护装置光差保护动作,切除故障,因对两条线而言均为单相故障,断路器经重合闸延时重合(重合闸整定为单相重合闸方式)。B 站侧 111、121 断路器重合闸延时较 A 站侧 122、121 断路器短,故 B 站侧断路器重合后无故障电流,重合成功;而 A 站侧 122、121 断路器合闸时 b 线 C 相、a 线 A 相与 e 线 B 相依然短路,故重合闸失败,跳开 b 线、a 线断路器,切除故障。

3)e 线 B 相与 a 线 C 相、b 线 A 相短路,加之 d 线 C 相线路避雷器被击穿,造成两相短路,故 d 线保护动作,切除故障。

4 整改及建议

1)加强线路运维管理,核实 35 kV e 线与 110 kV a 线、b 线线路交跨距离。另外在线路设计阶段也应充分考虑或适当增大线路的交跨距离。

2)加强保护人员技术培训,提高对电网故障分析处理能力,尤其对于涉及多条线路、多个变电站的复杂故障,应优先从分析故障录波图入手。

3)设备跳闸后应对相应的避雷器进行特殊巡视、测温或试验,及早排除较隐蔽的故障点。

4)加强电网复杂故障的事故预想与事故演习,增强工作人员在复杂事故发生时的应变能力。

5 结 语

上面通过对一起 110 kV 同塔双回线因风舞导致永久性故障的线路跳闸事故,从故障现象、录波信息、保护行为等方面进行分析,并对运维管理、技术

土壤异质性对模拟直流场环境下 X70 钢的腐蚀行为影响

田倩倩¹, 王志高¹, 丁 德², 兰新生¹, 吴 健², 耿 植¹, 白晓春²

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;

2. 国网陕西省电力公司电力科学研究院, 陕西 西安 710054)

摘 要:通过模拟直接地极不平衡电场,研究了 X70 钢在四川宜宾 ± 800 kV 复龙特高压直流换流站接地极附近土壤中的腐蚀行为。结果表明,土壤性质对埋地金属的腐蚀性影响较大。其中,土壤 pH 值对 X70 钢在直流接地极附近土壤中的腐蚀速率有显著影响,腐蚀速率与土壤酸碱性的关系为酸性 > 中性 > 碱性;同时,土壤总含盐量越大,金属腐蚀速率越大。该研究为评估直接地极附近埋地金属设施的腐蚀影响和新建特高压直流工程接地极的设计规划选址提供一定的依据。

关键词:直接地极;土壤性质;X70 钢;腐蚀特性

中图分类号:TM862 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2021)01-0024-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210106

Influence of Soil Heterogeneity on Corrosion Behavior of X70 Steel in Simulated Direct Current Electric Field

Tian Qianqian¹, Wang Zhigao¹, Ding De², Lan Xinsheng¹, Wu Jian², Geng Zhi¹, Bai Xiaochun²

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

2. State Grid Shaanxi Electric Power Research Institute, Xi'an 710100, Shaanxi, China)

Abstract: The corrosion behavior of X70 steel is studied through the simulation of DC electric field, which is buried around the ultra high voltage direct current (UHVDC) grounding electrode of Fulong ± 800 kV converter station in Yibin of Sichuan province. The results indicates that the soil property has a significant impact on the corrosion behavior of X70 steel. The corrosion rate of X70 steel is accelerated in the acid soil, and in different soil environments, the corrosion rate of X70 steel is ranked in the order, that is, acid soil > neutral soil > alkaline soil. Besides, higher content of the salt in the soil will increase the corrosion rate of X70 steel. This study will provide important references for assessing the corrosion influence of the underground metallic facilities near UHVDC grounding electrodes, and especially be helpful for the site selection of the grounding electrode for new UHVDC transmission projects.

Key words: direct current grounding electrode; soil property; X70 steel; corrosion behavior

0 前 言

随着中国经济的高速发展,电力需求迅速增长,建设以特高压电网为骨干网架的坚强智能电网正成为国家电力建设的战略目标。远距离、大容量的特高压直流输电工程日益增多。目前已有向家坝—上海、锦屏—苏南、宜宾—金华、哈密—郑州等多

条 ± 800 kV 特高压直流输电工程投运,还有多条特高压直流输电工程在建^[1-2]。直流输电工程在运行中,单极—大地运行和双极不平衡运行方式都会有一定量的电流通过接地极流入大地,在很大范围内形成一个恒定的直流电流场。由于存在土壤电阻,这个电场会有不同程度的压降,当电场所处的土壤中埋设有连接不同等电位线的油气管道、输电线路杆塔接地体或变电站接地网等地下金属设施时,低

电位点处的金属构件将会发生电化学腐蚀^[3-5]。

据报道,受三峡—上海 ±500 kV 高压直流输电工程单极运行影响,西气东输管道芙蓉至上海段阴极保护设备出现异常,管道电位正向或负向大幅偏移,正向偏移幅度最高达 830 mV(VS. CSE),负向偏移幅度最高达 1410 mV(VS. CSE)^[6]。溪洛渡—从化 ±500 kV 直流输电工程在单极运行时,广东翁源接地极附近的西气东输管道受其干扰,在管道上产生较高的干扰电位,可能会导致管体腐蚀^[7]。加拿大魁北克—新英格兰 ±450 kV 直流输电系统发生故障,1200 A 电流流入大地,附近管道上产生了 300 ~ 700 mV 的电位偏移^[8]。

电位差是发生电化学腐蚀的必备条件,当金属结构处于稳定电场中,具有一定电位差,作为腐蚀原电池导线回路的土壤则成为腐蚀体系的主要影响因素。现有的一些研究建立了接地极在土壤中的电场分布模型,但将土壤视为均一性^[9]。实际中由于地形、土壤成分、结构的复杂性,土壤性质对埋于其中的金属腐蚀作用有显著的不同,如含 Cl⁻ 时易发生局部腐蚀;有较多碳酸盐时,结构表面易形成坚硬腐蚀产物层,阻挡腐蚀进一步扩展等。由此可以看出,土壤的性质大体决定了金属在其中的腐蚀行为,但是目前对于直流接地极存在时的有关土壤性质的腐蚀行为研究还较少。

根据对四川宜宾 ±800 kV 复龙换流站接地极附近输气管道腐蚀的调研情况发现,在距接地极相同距离的条件下,不同土壤环境下管道腐蚀穿孔的数量分布不均,这可能跟该管段所处的土壤性质有直接关系。因此,针对具体的直流接地极,研究了典型管线钢 X70 在不同土壤中的电化学腐蚀特性,对其腐蚀规律和腐蚀机理进行了分析,为评估直流接地极附近埋地金属设施的腐蚀影响和新建特高压直流工程接地极的设计规划选址提供一定的依据。

1 实验方法

1.1 实验材料

电极材料选用 X70 高强管线钢,其化学成分见

表 1 X70 管线钢化学成分

元素名称	Fe	C	Si	Mn	P	S	其他元素(Nb,V,Ti,Mo)
质量分数/%	≥98	≤0.05	≤0.30	1.0~1.6	≤0.01	≤0.01	余量

表 1。

1.2 土壤理化性质分析

1.2.1 土壤样品采集

土壤样品采集于四川宜宾 ±800 kV 复龙换流站接地极附近,该接地极水平敷设,采用同心双圆环的方式,外环和内环半径分别为 315 m 和 240 m,截面为 0.6 m×0.6 m,内环埋设深度 3.5 m,外环埋设深度 4.0 m,均采用焦炭填充。土壤样品分别取自距复龙接地极等距离(距接地极极心约 800 m)的不同位置。其中,S1 号土样取自水田,S2 号土样取自泥滩,S3 号土样取自道路旁,S4 号土样取自水渠边,S5 号土样取自村舍。各取样点与接地极的相对位置见示意图 1。取样深度均为距地表深度 80 cm。采集的土壤样品进行自然风干,风干后的土壤样品密封备用。

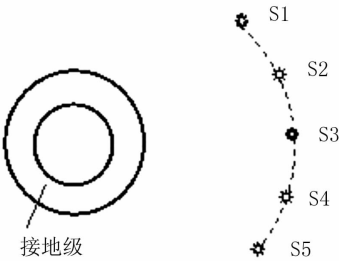


图 1 土样取样点

1.2.2 土壤 pH 值测试

称取通过 20 筛孔(1 mm)的风干土样 20 g,放在 50 mL 高型烧杯中。加入 20 mL 去离子水,在磁力搅拌器上搅动 1 min,使土壤充分散开。放置 30 min 使其平衡,此时应避免空气中有氨或挥发性酸。将 pH 电极插到下部悬液中,并轻轻摇动,随后将甘汞电极插入上部清液中进行 pH 测定,数分钟内即可测得稳定读数。

1.2.3 土壤离子成分测试

土壤中各离子成分测试时取水土比为 1:1 的土壤抽滤液各 100 mL,阴、阳离子分别采用 ICS-2100 型离子色谱仪 Ion Chromatography (Thermo Fisher Scientific Inc.) 和 iCAP 7000 等离子发射光谱仪 ICP-OES (Thermo Fisher Scientific Inc.) 进行成分及其含量的测试。

1.3 电化学测试

电化学实验采用 CS350 型电化学工作站 Electrochemical Workstation (Wuhan Corrtest Instruments Corp. , Ltd.) 进行三电极体系测量。在三电极体系两端设置一个 5 mV 的电势差,正负极间隔 500 mm,用以模拟直接地极的腐蚀电场。工作电极为 10 mm × 10 mm 的 X70 高强度管线钢,辅助电极为铂电极,参比电极为饱和甘汞电极(SCE)。极化曲线 zifu 扫描速率为 1 mV/s,扫描范围设置为相对于自腐蚀电位 ± 300 mV(相对开路电位)。电化学阻抗谱测量频率范围为 0.05 Hz ~ 100 kHz。所有实验均在土壤: 水 = 1: 1 的混合液中进行。

2 实验结果

2.1 土壤理化性质

表 2 所示为本次实验所用土壤的理化性质分析结果。从表 2 中可以看出,5 种土壤样品的理化性质有明显的差异。S5 号土壤为偏酸性土壤,S1 号和

S4 号土壤为中性土壤,S2 号和 S3 号土壤为偏碱性土壤。对于中性土壤,总含盐量及 Cl⁻ 含量由大到小依次为 S1 > S4。对于碱性土壤,总含盐量及 Cl⁻ 含量由大到小依次为 S2 > S3。

2.2 极化曲线

图 2 为 X70 钢在不同土壤中的极化曲线。X70 钢在不同土壤中的极化曲线形状大体相似,在自腐蚀电位以下处于活化状态,且活化区域较宽。当电位高于自腐蚀电位时,随着阳极极化电位升高,阳极电流密度加快,阳极溶解反应发生,随后增速降低,开始发生钝化反应,X70 钢表面的阳极溶解反应受到阻碍,腐蚀速率降低。采用塔菲尔曲线对极化曲线进行拟合,相应的拟合结果见表 3。

从表 3 中可以看出,土壤 pH 值对 X70 钢的腐蚀速率影响显著。偏酸性土壤中 X70 钢的腐蚀速率最快,中性土壤中 X70 钢的腐蚀速率相对于偏碱性土壤中 X70 钢的腐蚀速率快。由表 3 中的极化电流密度和腐蚀速率可见,土壤的腐蚀性由大到小依次为 S5 > S1 > S4 > S2 > S3。X70 钢在土壤的水

表 2 不同土壤样品理化性质

检测项目	S1	S2	S3	S4	S5
pH	7.07	8.00	7.61	7.04	6.31
Al ³⁺ /(mg · L ⁻¹)	6.30	569.00	—	2.50	—
Cu ²⁺ /(mg · L ⁻¹)	6.90	—	—	1.70	—
Fe ²⁺ /(mg · L ⁻¹)	622.30	89.50	117.00	325.60	352.60
Ca ²⁺ /(mg · L ⁻¹)	11.39	41.01	26.20	9.59	3.98
Mg ²⁺ /(mg · L ⁻¹)	1.81	6.83	4.37	2.36	1.08
K ⁺ /(mg · L ⁻¹)	0.45	0.38	0.15	0.16	0.12
Na ⁺ /(mg · L ⁻¹)	3.41	1.47	0.89	0.45	0.10
Cl ⁻ /(mg · L ⁻¹)	9.85	4.09	3.02	2.37	2.12
SO ₄ ²⁻ /(mg · L ⁻¹)	12.00	76.86	71.06	22.35	2.28
总含盐量/(mg · L ⁻¹)	674.41	789.14	222.69	367.08	362.28

注:“—”代表未检出。

表 3 X70 钢在不同土壤中的极化曲线拟合参数

土壤编号	E_0/V	$i_{corr}/(mA \cdot cm^{-2})$	β_a/V^{-1}	β_c/V^{-1}	β_a/β_c	速率/(mm · a ⁻¹)
S1	-0.780	5.197×10^{-6}	8.484	4.636	1.83	0.239
S2	-0.778	2.553×10^{-6}	12.575	4.401	2.86	0.117
S3	-0.826	2.061×10^{-6}	10.261	6.523	1.57	0.095
S4	-0.775	4.287×10^{-6}	9.786	3.856	2.58	0.197
S5	-0.782	7.221×10^{-6}	7.149	4.598	1.55	0.331

注: E_0 为自腐蚀电位; i_{corr} 为自腐蚀电流密度; β_a 为阳极斜率; β_c 为阴极斜率。

溶液中的腐蚀过程,包括铁的阳极溶解和溶解氧的阴极还原这组共轭反应。由阳极塔菲尔斜率/阴极塔菲尔斜率之比 β_a/β_c 可以看出,X70 钢在几种土壤中的腐蚀过程都表现出较为强烈的阳极控制为主的混合控制的腐蚀体系。

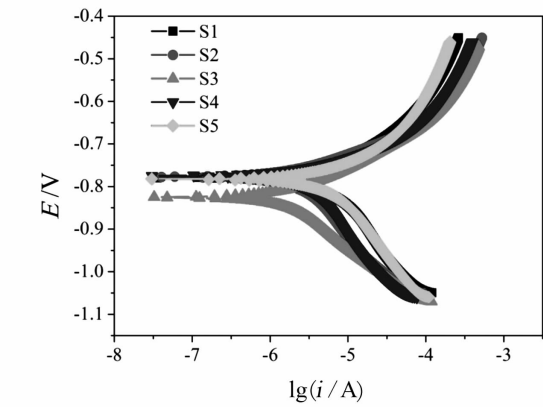


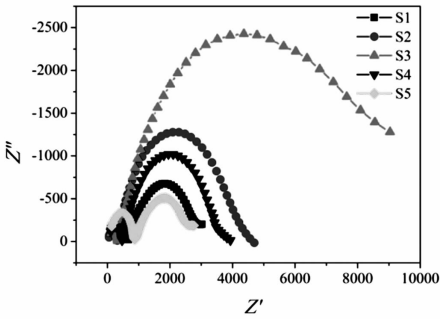
图 2 X70 钢在不同土壤样品中的极化曲线图谱

2.3 交流阻抗

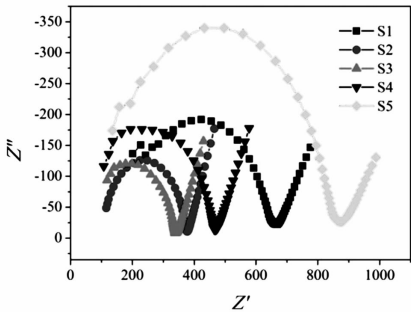
对 X70 钢在不同土壤样品中的交流阻抗谱进行了研究,图 3 的 X70 钢阻抗图谱表现为具有 2 个时间常数的双容抗弧,即高频部分的容抗弧 (R_1) 和低频部分的感抗弧 (R_t),其腐蚀受电荷传递过程控制。其中高频的容抗弧反映的是溶液穿透表面层和腐蚀产物在基体表面形成双电层的容抗和阻抗,低频的容抗弧反映的是表面层和腐蚀产物膜对基体的保护作用,其等效电路图如图 4 所示。其中, R_0 为土壤水溶液电阻; R_1 为电极表面腐蚀产物与吸附的土粒的结合层的电阻; R_t 为电荷转移电阻; C_t 为结合层电容; C_p 为双电层电容。

从图 3(a)中可以看出,S5、S1、S4、S2 及 S3 土壤中的 X70 钢结构的高频部分的容抗弧 (R_1) 逐渐减小。从图 3(b)中可以看出,低频部分的感抗弧 (R_t) 逐渐增大。根据 Corrtest 软件模拟的不同土壤交流阻抗拟合参数如表 4 所示。对于 R_t 而言,在偏酸性土壤中,高湿度条件下,钢表面的腐蚀产物结合层不稳定,不能对电极反应形成阻碍, H^+ 离子的还原反应易于进行,故 S5 号土壤的 R_t 最小,故而其腐蚀速率最大。而对于偏碱性的 S3 号土壤来说,随着腐蚀反应的进行,钢表面的腐蚀产物结合层越来越致密,且土壤中较低的离子浓度,严重阻碍氧的传输过程,造成 R_t 最大,相应的其腐蚀速率最小。

可见,利用 R_t 的倒数可以作为钢/土壤体系腐蚀性评价的指标。其结果与极化曲线拟合结果相



(a) X70 钢在不同土壤中的阻抗图谱



(b) X70 钢高频部分的容抗弧

图 3 X70 钢在不同土壤中的 Nyquist 图

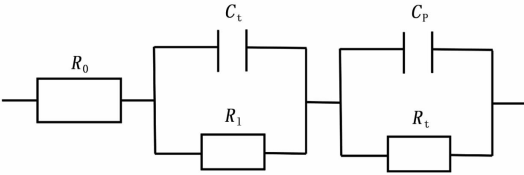


图 4 X70 钢在不同土壤中的阻抗测试等效电路

一致。即偏酸性的 S5 号土壤,在高含水量条件下, H^+ 离子的还原反应易于进行,腐蚀性最强。而偏碱性的 S3 号土壤表面的液膜及较低的离子浓度,严重阻碍氧的传输过程,腐蚀性最低。

2.4 分析与讨论

由上述结果分析可见,在接地极不平衡电流场环境中,土壤性质对埋地金属的腐蚀影响较大,特别是土壤中 pH 值的改变对土壤中 X70 钢的腐蚀速率影响显著。这是因为在酸性土壤中,以析氢腐蚀为主,而在中性及偏碱性体系中,以吸氧腐蚀为主。析氢腐蚀速率较吸氧腐蚀速率大,因此在酸性土壤中 X70 钢的腐蚀速率较高^[10]。此外,在土壤的饱和溶液中,酸性土壤中的 H^+ 离子的还原反应易于进行,故酸性土壤中的腐蚀速率最快。而在中性土壤和偏碱性土壤中,钢结构表面的水膜以及腐蚀产物层阻碍了氧的传输过程,因此腐蚀速率较低。

土壤含盐量增加了土壤的电导率,减少了电阻极化,增加了腐蚀速率。对于中性土壤,S1 号土壤

表 4 X70 钢在不同土壤中的交流阻抗拟合参数

土壤编号	R_0	R_1	C_1	C_p	R_t
S1	201.00	443.00	0.000 241 45	0.642 03	2 392.00
S2	48.63	265.50	0.000 148 40	0.758 53	3 994.00
S3	81.68	255.60	0.000 202 92	0.708 58	8 711.00
S4	72.76	391.20	0.000 159 51	0.725 90	3 225.00
S5	110.90	736.60	0.000 285 96	0.601 93	1 957.00

的腐蚀速率大于 S4 号土壤,这可能是因为 S1 号土壤中可溶性盐离子的浓度为 674.41 mg/L,比 S4 号土壤中的 367.08 mg/L 高约一倍,土壤电导率较高,易于氧的传输过程的进行。所以 S1 号土壤的腐蚀速率较快。同样道理,偏碱性土壤,S2 号土壤的总含盐量以及 Cl⁻ 含量大于 S3 号土壤,故 S2 号土壤的腐蚀速率较高。

土壤中的 Cl⁻ 等侵蚀性离子团的存在,不仅能够增强土壤电导率,而且能够破坏 X70 钢表面的钝化膜,使得 X70 钢表面所产生的腐蚀产物层失去了保护性,使试样腐蚀的阳极化过程加快,并透过基体表面腐蚀层和基体生成可溶性产物,促进试样腐蚀。^[11]

3 结 语

1)在直流接地极不平衡电流场中,土壤性质对埋地金属的腐蚀性影响较大,金属在与接地极等距离的不同位置处的土壤中腐蚀特性差别较大。

2)土壤 pH 值的改变对土壤中 X70 钢的腐蚀速率影响显著。腐蚀速率与 pH 值的关系为酸性 > 中性 > 碱性。因为在酸性土壤中,以析氢腐蚀为主;而在中性及偏碱性体系中,以吸氧腐蚀为主。析氢腐蚀速率较吸氧腐蚀速率大,因此在酸性土壤中 X70 钢的腐蚀速率较高。

3)土壤总含盐量越大,其土壤的导电性则越大,从而为 X70 钢的腐蚀提供了良好的离子通道,促使金属腐蚀速率相应增大。

4)随土壤侵蚀性阴离子 Cl⁻ 含量增大,使得 X70 钢表面所产生的腐蚀产物层失去了保护性,因此腐蚀速率增大。

参考文献

[1] 刘振亚. 特高压交直流电网[M]. 北京: 中国电力出

版社, 2013.

[2] 刘振亚. 全球能源互联网 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.

[3] 魏德军. 直流接地极对地下金属设施的电腐蚀影响 [J]. 电网技术,2008,32(2): 75-77.

[4] 迟兴和,张玉军. 直流接地极与大地中金属管道的防护距离 [J]. 电网技术,2008,32(2): 71-74.

[5] 胡毅. 直流接地极电流对输电线路接地构件的腐蚀影响研究[J]. 中国电力, 2000,33(1): 58-61.

[6] 程明, 张平. 鱼龙岭接地极入地电流对西气东输二线埋地钢质管道的影响分析 [J]. 天然气与石油,2010, 28(5): 22-26.

[7] 孟晓波, 廖永力, 李锐海, 等. 金属管道受入地电流影响的抑制措施研究 [J]. 南方电网技术,2015,9(2): 62-67.

[8] Peter Nicholson. High Voltage Direct Current Interference with Underground/Underwater Pipelines [C]. NACE International Corrosion 2010 Conference and Expo, 2010: 10102.

[9] 朱轲,吴驰,扬威. 直流接地极对附近输电线路杆塔的腐蚀影响及防护措施的研究 [J]. 高压电器,2011, 47(10): 41-47.

[10] 曹英,刘磊,曹默,等. 接地网材料在四种典型土壤中的电化学腐蚀研究 [J]. 东北电力大学学报,2014, 34(1): 35-38.

[11] 闫爱军,刘瑞,宋卫荣,等. 土壤环境因素对碳钢接地材料腐蚀性影响 [J]. 腐蚀和防护,2012,33(S2): 159-165.

作者简介:

田倩倩(1989),女,工程师,硕士研究生,从事电力用油试验与研究、金属腐蚀与防护工作。

(收稿日期:2020-10-22)

基于熵权理论的 FAHP 模型在城市配电网建设评价中的研究与应用

于国康¹, 余 金¹, 高贵亮¹, 余中平¹, 鲜 龙², 李永清³

(1. 国网新疆电力有限公司经济技术研究院, 新疆 乌鲁木齐 830002;
2. 兰州理工大学, 甘肃 兰州 730050; 3. 国网甘肃省电力公司白银供电公司, 甘肃 白银 730900)

摘 要:随着电力负荷和线路不断增加,城市配电网面临诸多生产压力和设备问题,电网企业经常通过实施城市配电自动化系统来解决上述问题;但由于其建设项目运行指标复杂,所以一般的评价方法难以准确给出评判结果。针对这一问题,提出了基于熵权理论的模糊层次项目综合评价模型。通过在具体电网中应用该评价模型,验证了其可行性和有效性,能够为实际配电网项目建设提供有效的评价方法和决策参考。

关键词:配电自动化;评价;熵权理论;模糊层次评价法

中图分类号:TM7 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2021)01-0029-06

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210107

Research and Application of FAHP Model Based on Entropy Weight Theory in Evaluation of Urban Distribution Network Construction

Yu Guokang¹, Yu Jin¹, Gao Guiliang¹, Yu Zhongping¹, Xiang Long², Li Yongqing³

(1. State Grid Xingjiang Economic Research Institute, Urumqi 830002, Xingjiang, China;
2. Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, Gansu, China;
3. State Grid Baiyin Electric Power Supply Company, Baiyin 730900, Gansu, China)

Abstract:With the continuous increase of loads and lines, urban distribution networks are facing many production pressures and equipment problems. Power grid companies often implement urban distribution automation systems to solve these problems. However, due to the complex operation indicators of their construction projects, it is difficult to give the judgment result accurately by general evaluation methods. Aiming at this problem, a fuzzy hierarchical project comprehensive evaluation model based on entropy weight theory is proposed. Through the application of the evaluation model in specific power grids, its feasibility and effectiveness have been verified, and it can provide effective evaluation methods and decision-making references for actual distribution network project construction.

Key words:distribution automation; evaluation; entropy weight theory; fuzzy hierarchy evaluation

0 引 言

中国的城镇化在不断推进,因此城市配电网的供电负荷大小和供电线路长度也在不断增加。同时,由于城市配电网所处的环境开始不断地恶化,越来越多的配电网设备逐渐出现损坏和故障。为了解决上述问题,电网企业普遍采用建设配电自动化系统的方式来提升城市配电网供电可靠性与运维管理水平等运行指标。但是,目前配电网自动化系统项

目建设还没有成熟的评价理论和方法,相关的量化分析评价研究也较少。现采用的城市配电网建设项目后评价方法普遍存在指标单一的问题,且其最终结论也依赖于一些定量指标。但与城市配电自动化系统运行相关的各类指标表现出数量多、层次多、类型化的特点。因此,需要通过对上述指标进行全面的评价,才能将配电自动化系统建设项目的实际成效定量地反映出来,从而给电力企业和投资方提供决策依据^[1]。

综合评价方法种类较多,其中模糊层次分析法

(fuzzy analytic hierarchy process, FAHP)^[2-5] 是工程人员最常采用的一种,它能够有效地处理模糊和不确定性问题,通过对建设项目指标进行打分来定量描述其运行成效,可以消除工程人员非客观判断影响^[1,6]。FAHP 在应用当中能够较好地体现工程人员对不确定性的一种模糊评判^[7],但它却无法量化表示专家的主观经验和评价结论。

针对 FAHP 的不足,基于熵权理论基本原理,提出了一种熵权法与模糊层次法相结合的综合评价模型^[6]。该模型需要计算评价指标的权重,同时对专家的评价结论进行量化,并以此来体现工程人员的主观判断,从而从定性和定量两方面确定结论与结论之间的区别^[8]。

1 模糊层次分析法和熵权法的基本原理

1.1 模糊层次分析法

设对被评价指标有影响的因素集合为 $U = (u_1, u_2, \dots, u_m)$, 其中每一种因素 u_i 共有 n 种情形, 其集合为 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 。集合 U 的子集实质上为模糊权重向量 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\}$, 体现了所评价指标不同的重要性; 集合 $U \times V$ 则是一个 $m \times n$ 阶矩阵, 定义为模糊关系评价矩阵 R 。通过对 U 和 $U \times V$ 进行模糊计算, 可以得出模糊子集 $B = \{b_1, b_2, \dots, b_n\} \in V$ 。由此可以知道, 模糊综合评价方法其实质就是, 首先构建能够代表各个指标权重大小的向量 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_m\} \in F(U)$, 然后找到一个能够实现集合 U 到集合 V 模糊变换的 $f(u_i)$, 即找到一个能够对集合 U 的每个元素 $u_i (i = 1, 2, \dots, m)$ 做出独立判断的向量, $f(u_i) = (r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{in}) \in F(V)$, 再通过集合 U 和集合 V 构造模糊关系矩阵 $R = [r_{ij}]_{m \times n} \in F(U \times V)$, 其中, 指标因素 u_i 具有评价 v_j 的程度, v_j 是集合 V 的元素, 表示对被评价指标有影响的第 j 种状态。至此, 便可以求出模糊子集 $B = \{b_1, b_2, \dots, b_n\} \in F(V)$, 它即为最终的综合评价结果, 其中 b_j 表示其对 B 的隶属度。

1.2 熵权法^[6]

熵权法主要是通过计算所评价对象不同指标体系的熵值 H , 从而得到相应的权重大小 w_i , 熵值 H 的具体表达式为

$$H = -\frac{1}{\lg k} \sum_{i=1}^k w_i \lg w_i \tag{1}$$

在具体工程项目中, 评价对象的指标特性有所不同, 它们所包含的二级指标也需要考虑权重分布, 这就要求工程人员在实际使用时需要对多级指标的权重进行考察。通过对每个最低等级指标的分析和权重的确定, 采用由低到高的方式, 依次计算各级评价指标对应的权重分布, 最终得到整个指标体系的总体权重分布情况。通过上述分析可知, 熵值范围为 $0 \leq H \leq 1$ ^[8]。

1) 若 H 接近于 1

若指标体系中 $k (k \neq 0)$ 个评价指标且权重相等, 即 $w_i = 1/k_i$, 此时熵值 H 恒为 1, 即:

$$H = -\frac{1}{\lg k} \times \left(k \times \frac{1}{k}\right) \times (-\lg k) = 1 (k \neq 0) \tag{2}$$

由熵权理论的基本原理可知, 当 $H = 1$ 时, 指标体系中的各个指标权重分布相同, 且与指标体系中的度量值相等; 若 $H \approx 1$, 指标体系中各个指标的指数近似相等, 这在评价实际工程时很少发生。由于每个指标的选取存在联系, 所以当 $H \approx 1$ 时, 说明各指标不是相互独立的, 这也说明评价指标体系的建立不够准确。

2) 若 H 接近于 0

当指标体系中只有某一指标的权重为 1, 其余都为 0, 此时熵值 H 为

$$H = -\frac{1}{\lg k} \log_k 1 = 0 (k \neq 0) \tag{3}$$

当 $H \approx 0$ 时, 说明指标体系的极少数指标的权重分布很大, 这就会使得在评价其他不太重要的指标时出现较大误差, 由于这种情况在评价过程中并不常见, 所以这也说明此时建立的评价指标体系也不够准确。

3) 若 H 介于 0~1 之间

当 H 在 0~1 之间时, 说明指标体系的权重分布情况是与实际比较相符。此时, 所建立的指标体系具有了明显的层级优势, 这也体现了指标体系的结构层次性, 从而可以使用熵权方法来对评价指标进行量化^[9]。

2 改进 FAHP 评价模型

2.1 选取评价标准

为了提高评价的准确性、有效性和客观性, 需要

根据实际配电自动化工程的实施特点,选择科学合理的评价标准,这就要求首先要考虑各个方面对工程运行有影响的因素,其次便是工程人员的运行经验。设专家选择的指标数为 m ,专家总数为 M ,则由前面对模糊层次模型的分析可知隶属度 d 为

$$d = \frac{m}{M} \tag{4}$$

在选择和确定评价标准时,需要通过 10 位专家根据不同评价等级来确定相应的评价得分,同时考虑到中国配电自动化工程建设评价体系的研究现状,还需要借鉴其他行业相关做法来建立标准,具体如表 1 所示。

表 1 所建立的评价标准及其说明

等级	标准	说明
优	0.8~1.0	好,可以
良	0.6~0.8	良好,可以
中	0.3~0.6	一般,不确定
差	0~0.3	差,不可以

2.2 构建评估矩阵

已知模糊关系评价矩阵 $R = U \times V$,根据建立的评价标准和计算得到的 d ,可以求出评价矩阵 R 为

$$R = \begin{pmatrix} r_{11} & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & \cdots & r_{mn} \end{pmatrix} \tag{5}$$

2.3 计算矩阵 R 中每一个指标权重^[6]

在 $m \times n$ 个评价指标中,第 i 个评价指标的熵值为

$$H_i = - \frac{1}{\lg m} \sum_{j=1}^m r_{ij} \lg r_{ij} \tag{6}$$

式中, $i = 1, 2, \cdots, m; j = 1, 2, \cdots, n$ 。从而,对于第 i 个指标来说,它的熵权即为 w_i ,可定义为

$$w_i = \frac{1 - H_i}{\sum_{i=1}^m (1 - H_i)} \tag{7}$$

2.4 确定某个层级指标权重

由前述可知,当指标体系中只有某一指标的权重为 1,其余都为 0 时,熵权值最小。基于这一原理,先给各个指标层级确定权重,然后进行进一步的处理,可以得到每层指标加权和平均之后的标准化值 I_i ^[1]:

$$I_i = \frac{\sum_{i=1}^m (1 - H_i)}{m} \tag{8}$$

根据式(8)可知, I_i 越大,指标体系中某指标层级的权重分布就越大。将 I_i 进行处理可以得到:

$$v_i = \frac{I_i}{\sum_i I_i} \tag{9}$$

2.5 构建模糊综合评价子集

利用评价矩阵 R 和分层权重矩阵 A 可以得到模糊评价结果矩阵为

$$B = A \times R \tag{10}$$

利用模糊评价结果,考虑隶属度影响,对指标的影响因素大小进行分析并给出结果。

2.6 计算模糊综合评判矩阵

得到某一层级的模糊评价结果矩阵 B 后,可以运用相同的步骤逐级进行计算,最终得到模糊综合评判矩阵 $B^* = AR$ 。此时,可以将计算得到的评价结果与相关数据进行比较,并在给定表中按“优、良、中、劣、差”对结果进行评分,并以此来判定所评价项目的可行性是否达到预先设定的标准和要求^[8]。

3 应用分析

将所提出的改进 FAHP 评价模型应用于 BY 市配电自动化项目评价,分析其项目建设运行的经济、技术和社会综合效益^[2,5]。

3.1 权重确定

依据 BY 市配电自动化建设项目确定相关评价指标体系,然后建立综合因素评价集合 $U = (U_1, U_2, U_3)$,并根据实际情况将考虑的 3 类因素构建成二维综合因素评价集合:

经济效益集合为 $U_1 = (B_{11}, B_{12}, B_{13}, B_{14}, B_{15})$,其中: B_{11} 为单位电量产值; B_{12} 为单位资产供电负荷; B_{13} 为投入产出比; B_{14} 为单位线路产度造价; B_{15} 为单位变电容量造价。

技术效益集合为 $U_2 = (B_{21}, B_{22}, B_{23}, B_{24}, B_{25})$,其中: B_{21} 为主变压器负载率; B_{22} 为供电安全性; B_{23} 为供电可靠性; B_{24} 为电压质量; B_{25} 为网损率。

社会综合效益集合为 $U_3 = (B_{31}, B_{32}, B_{33}, B_{34}, B_{35})$,其中: B_{31} 为就业率; B_{32} 为环境影响情况; B_{33} 为电表入户率; B_{34} 为供电覆盖率; B_{35} 为科技进步

收入比率。

1)确定一级指标权重

建立评价集合 $U=(U_1,U_2,U_3)$ 的评价矩阵,如表 2 所示。

表 2 一级指标评价矩阵

U	U_1	U_2	U_3	ω	一致性检验
U_1	1.0	2.0	3.0	0.539 7	$\lambda_{\max}=3.000\ 9$
U_2	0.5	1.0	2.0	0.296 8	$C_I=0.004\ 6$
U_3	1.0	0.5	1.0	0.163 3	$C_R=0.007\ 9$

表 2 中: w 表示矩阵 U 最大特征值的特征向量; $\lambda_{\max}$ 表示矩阵 U 最大特征值; C_I 表示一致性指标; C_R 表示判断矩阵是否满足一致性指标。此外 R_I 表示平均随机一致性指标,它们的关系如下:

$$C_I=\frac{\lambda_{\max}-n}{n-1}$$

(11)

$$C_R=\frac{C_I}{R_I}$$

(12)

当 $C_R<0.10$,则判断满足一致性,否则重新判断,直至满意。

2)计算 U_1 、 U_2 和 U_3 的权重

根据经济效益集合 U_1 所包含的内容可以得到相应的判断矩阵,然后计算出对应的权重分布,结果如表 3 所示。

表 3 经济效益评价矩阵

U_1	B_{11}	B_{12}	B_{13}	B_{14}	B_{15}	ω	一致性检验
B_{11}	2	2	2	3	2	0.326 4	$\lambda_{\max}=5.294\ 4$
B_{12}	1/2	1	1	3	5	0.258 9	$C_I=0.073\ 6$
B_{13}	1/2	1	1	2	5	0.238 7	$C_R=0.065\ 7$
B_{14}	1/3	1/3	1/2	1	1	0.097 0	
B_{15}	1/2	1/5	1/5	1	1	0.079 2	

根据技术效益集合 U_2 所包含的内容可以得到相应的判断矩阵,然后计算出对应的权重分布,结果如表 4 所示。

表 4 技术效益评价矩阵

U_2	B_{21}	B_{22}	B_{23}	B_{24}	B_{25}	ω	一致性检验
B_{21}	1	1	1/3	2	2	0.186 7	$\lambda_{\max}=5.215\ 9$
B_{22}	1	1	1	3	2	0.251 0	$C_I=0.054\ 0$
B_{23}	3	1	1	2	6	0.360 9	$C_R=0.048\ 0$
B_{24}	1/2	1/3	1/2	1	1	0.107 1	
B_{25}	1/2	1/2	1/6	1	1	0.093 3	

根据社会综合效益集合 U_3 所包含的内容可以得到相应的判断矩阵,然后计算出对应的权重分布,结果如表 5 所示。

表 5 社会综合效益评价矩阵

U_3	B_{31}	B_{32}	B_{33}	B_{34}	B_{35}	ω	一致性检验
B_{31}	1	1	1/3	2	2	0.177 1	$\lambda_{\max}=5.093\ 6$
B_{32}	1	1	1	3	4	0.274 9	$C_I=0.023\ 4$
B_{33}	3	1	1	4	5	0.379 3	$C_R=0.020\ 9$
B_{34}	1/2	1/3	1/4	1	1	0.885 8	
B_{35}	1/2	1/4	3	1	1	0.080 0	

3)层次总排序

根据计算出的 U_1 、 U_2 和 U_3 所对应的权重可以得到第二级评价指标的权重大小以及基于权重因子的指标对评价结果产生影响的效果排序^[10],结果如表 6 所示。

表 6 组合权重分布

第二级指标	第三级指标	组合权重分布(X_i)	排序结果
经济效益 (0.539 7)		0.326 4	1
		0.258 9	3
		0.238 7	4
		0.097 0	9
		0.079 2	10
经济效益 (0.296 9)		0.186 7	8
		0.251 2	6
		0.360 9	5
		0.107 3	12
		0.093 3	14
社会综合 效益 (0.163 4)		0.177 1	13
		0.275 0	11
		0.379 4	7
		0.885 9	2
		0.080 0	15

为了得到各种因素综合权重分析的结果,按照 4 个层级对成效进行划分^[3],结果如表 7 所示。

表 7 成效分析以及等级划分

等级	成效分析	等级划分
I	较好	$0.1\leq\text{权重}\leq1$
II	好	$0.05\leq\text{权重}\leq0.1$
III	一般	$0.02\leq\text{权重}\leq0.05$
IV	较差	$0\leq\text{权重}\leq0.02$

根据得到的权重大小排序可知,单位电量产值这一指标的权重(0.176 28)排在第一位,由此可以知道当 BY 市配电网建设完成后,电网企业的售电量得到了明显著提升。另一方面,分析居民供电覆盖率(0.144 838)、单位资产供电负荷率(0.139 748)和用户用电可靠率指标(0.107 322)的排序可以知道,项目的实施提高了售电量,实现了 100% 居民用电,同时也提高了用户用电可靠率,而且整体提高了配电网总资产效率,使其增加到相应电力负荷水平,因此处于第一梯队。单位线路长度造价指数(0.052 441)、单位主变压器负荷率指数(0.055 442)、供电安全可靠率指数(0.074 554)提升效果次之,说明进行配电网自动化的改造可以实现单位线路成本的有效降低,相应的单位可变容量成本也能够有效下降,效益整体呈现良好趋势,属于第二梯队。除与科技相关的指标外的剩余指标排序比较靠后,属于第三梯队,这说明 BY 市城市配电网建设对于这些指标所带来的效益增值和改善不明显,还需进一步关注测算。科技进步效益流入率(0.013 180)权重最小排在最后,属于第四梯队的指标,这说明 BY 市配电网自动化的建设对科技进步效益流入率的影响较小,取得的效益增值和改善相对较差,还需在科技力度的精准投入上继续加强、加深,使得科技成果更好作用于配电网自动化建设,从而提升科技因素的利用效益。

3.2 综合评价

通过对 BY 市城市配电网自动化建设项目的评价,对 U_1 、 U_2 和 U_3 进行单因素评价。结果如表 8、表 9、表 10 所示。

表 8 U_1 评价结果

U_1	很好	好	一般	差	较差
B_{11}	0.10	0.40	0.20	0.20	0.10
B_{12}	0.00	0.30	0.40	0.30	0.00
B_{13}	0.10	0.20	0.40	0.20	0.10
B_{14}	0.00	0.30	0.40	0.20	0.10
B_{15}	0.00	0.30	0.40	0.30	0.00

表 9 U_2 评价结果

U_2	很好	好	一般	差	较差
B_{21}	0.10	0.30	0.20	0.20	0.20
B_{22}	0.00	0.30	0.40	0.20	0.10
B_{23}	0.00	0.30	0.40	0.20	0.10
B_{24}	0.00	0.30	0.40	0.10	0.20
B_{25}	0.00	0.30	0.30	0.30	0.10

表 10 U_3 评价结果

U_3	很好	好	一般	差	较差
B_{31}	0.10	0.30	0.30	0.30	0.00
B_{32}	0.00	0.30	0.50	0.20	0.00
B_{33}	0.00	0.20	0.40	0.30	0.10
B_{34}	0.10	0.20	0.40	0.20	0.10
B_{35}	0.00	0.20	0.30	0.30	0.20

基于所得到的评价值,构建模糊矩阵,利用 $B = \omega \times R$ 可以求出各个因素的一级和二级评价结果^[1]。

1)一级评价结果

$$B_1 = \omega_1 \times R_1 = \begin{bmatrix} 0.326\ 5 \\ 0.258\ 8 \\ 0.238\ 6 \\ 0.097\ 0 \\ 0.079\ 1 \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} 0.1 & 0.4 & 0.2 & 0.2 & 0.1 \\ 0 & 0.3 & 0.4 & 0.3 & 0 \\ 0.1 & 0.2 & 0.4 & 0.2 & 0.1 \\ 0 & 0.3 & 0.4 & 0.2 & 0.1 \\ 0 & 0.3 & 0.4 & 0.3 & 0 \end{bmatrix}$$

$$= (0.056\ 51, 0.308\ 8, 0.334\ 7, 0.233\ 8, 0.066\ 21)$$

(13)

$$B_2 = \omega_2 \times R_2 = \begin{bmatrix} 0.186\ 6 \\ 0.251\ 1 \\ 0.360\ 8 \\ 0.107\ 2 \\ 0.093\ 3 \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} 0.1 & 0.3 & 0.2 & 0.2 & 0.2 \\ 0 & 0.3 & 0.4 & 0.2 & 0.1 \\ 0 & 0.3 & 0.4 & 0.2 & 0.1 \\ 0 & 0.3 & 0.4 & 0.1 & 0.2 \\ 0 & 0.3 & 0.3 & 0.3 & 0.1 \end{bmatrix}$$

$$= (0.018\ 66, 0.287\ 4, 0.353, 0.198\ 4, 0.129\ 3)$$

(14)

$$B_3 = \omega_3 \times R_3 = \begin{bmatrix} 0.177\ 2 \\ 0.274\ 9 \\ 0.379\ 3 \\ 0.885\ 8 \\ 0.08 \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} 0.1 & 0.3 & 0.3 & 0.3 & 0 \\ 0 & 0.3 & 0.5 & 0.2 & 0 \\ 0 & 0.2 & 0.4 & 0.3 & 0.1 \\ 0.1 & 0.2 & 0.4 & 0.2 & 0.1 \\ 0 & 0.2 & 0.3 & 0.3 & 0.2 \end{bmatrix}$$

$$= (0.106\ 3, 0.404\ 7, 0.720\ 7, 0.401\ 3, 0.142\ 5)$$

(15)

2)二级评价结果

基于各个因素的一级评价结果,可以构建各个因素的二级评价模糊评价矩阵^[1],并根据评价标准中的权重分布,得到最终不同因素的综合评价结果。

3)系统综合评价

基于得到的一级和二级评价结果,可以得到 BY 市城市配电网自动化项目评价体系模糊综合评价矩阵为

$$E = \omega \times R = \begin{bmatrix} 0.539\ 6 \\ 0.296\ 9 \\ 0.163\ 5 \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} 0.056\ 51 & 0.308\ 8 & 0.334\ 7 & 0.233\ 8 & 0.066\ 21 \\ 0.018\ 66 & 0.287\ 4 & 0.353\ 0 & 0.198\ 4 & 0.129\ 30 \\ 0.106\ 30 & 0.404\ 7 & 0.720\ 7 & 0.401\ 3 & 0.142\ 50 \end{bmatrix}$$
$$= (0.053\ 4, 0.318\ 3, 0.403\ 2, 0.250\ 7, 0.097\ 4) \quad (16)$$

通过上述分析,在采用基于熵权理论的模糊层次评价模型后,针对 BY 市城市配电网自动化的建设项目,在所有参与评价的人员中,综合评价为“较好”的占 5.43%;综合评价为“好”的占 31.83%,综合评价为“一般”的占 40.32%^[6]。同时,在本次综合评价的结果中,认为建设“尚且不够完善”的评价人员人数占比大约为 25.07%,认为建设“很不完善”的评价人员人数占比大约为 9.17%。在上述理论中,依据已描述的最大隶属度原则,最终将 BY 市城市配电网建设项目的综合评价结果确定为 (0.318 4~0.403 3),基本介于一般与较好间。由此可以得出结论:BY 市城市配电自动化项目建设能够获得一定的综合效益,实现其配电网可靠性和运行水平的明显提升^[11],进而可以助力城市快速发展。

4 结 语

基于项目技术、经济和社会效益 3 个方面的指标,构建城市配电自动化项目建设评价指标体系,综合熵权法和模糊综合评价法提出了改进的模糊层次分析法,并应用于 BY 市配电自动化建设项目综合评价。应用结果表明,所使用的改进模糊层次分析评价模型能够客观、准确地确定城市配电网建设运行的有效性,可以为电网公司和相关投资方在城市

(上接第 23 页)

培训、事故预想等方面提出了几点建议,以提高运维、保护人员的事故处理效率。

参考文献

[1] 国家电网公司. 国家电网公司十八项电网重大反事故措施(修订版)[Z]. 北京:国家电网公司,2018.

[2] 李润鑫,魏博. 风电场零序保护不正常动作典型案例分

析[J]. 内蒙古电力技术,2017,35(2):93-96.

参考文献

[1] 李永清. 改进的 FAHP 在白银配电自动化项目综合评价中的应用研究[D]. 兰州:兰州理工大学, 2019.

[2] 黄宇. 模糊层次分析法在配电网建设项目后评价的应用[D]. 南昌:南昌大学, 2016.

[3] 张磐,凌万水,郑悦,等. 基于模糊层次分析法的配电自动化运行评估方法研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(22): 72-77.

[4] 张斯梁. 基于模糊层次分析法的产业新城内智能电网工程后评价[D]. 北京:华北电力大学, 2016.

[5] 林俊,王钊,苏迪. 改进的模糊层次分析法在配电网规划中的应用[J]. 高电压技术,2008, 34(6): 1161-1167.

[6] 王红. 养老地产 PPP 项目融资模式及风险评价研究[D]. 吉林:吉林建筑大学, 2019.

[7] 刘立轩. 基于多层次模糊评价法的内蒙古电网工程项目后评价研究[D]. 包头:内蒙古科技大学, 2012.

[8] 王涛. 基于熵权模糊的通辽配电自动化主站项目前评估[D]. 北京:华北电力大学, 2017.

[9] 吕晓玥,简迎辉. 基于熵权模糊综合评价法的水资源送水工程项目综合后评价研究[J]. 项目管理技术, 2014, 12(12): 114-118.

[10] 韩富春,任婷婷,陈晶晶. 基于层次分析法的输变电工程项目后评价研究[J]. 电气技术,2009(2): 42-45.

[11] 王勇胜,孔祥美,陈露锋. 基于改进层次模糊综合评价法的电网建设项目风险评估体系[J]. 科技和产业, 2018, 18(3): 79-83.

作者简介:

于国康(1990),男,硕士研究生,工程师,主要研究方向为电网规划。

(收稿日期:2020-08-26)

[3] 吴斌. 电力变压器非电量保护故障案例分析[J]. 自动化应用,2018(1):108-109.

[4] 薛峰. 怎样分析电力系统故障录波图[M]. 北京:中国电力出版社,2014:12-25.

作者简介:

马小军(1992),男,学士,主要研究方向为电力系统稳定性分析与继电保护等。

(收稿日期:2020-08-05)

小电流接地选线跳闸技术分析探讨与试点建设

周 兰,尚 超

(国网重庆市电力公司市南供电分公司,重庆 601336)

摘 要:针对当前小电流接地配电网系统中电缆线路不断增多,传统中性点接地方式及人工拉路方法难以满足现代城市电网安全要求的形势,梳理了灵活并小电阻选线跳闸、灵活并中电阻选线跳闸、主动干预灭弧、分布式选线跳闸、集中式选线跳闸共 5 种接地选线后作用于跳闸方案的动作逻辑及主要优缺点。并通过某电力公司试点建设的动作数据及运行经验,推荐已投运设备选择集中式单相接地选线跳闸方案,新建与改造设备选择分布式单相接地选线跳闸方案。

关键词:小电流系统;接地选线跳闸;分布式接地选线;集中式接地选线

中图分类号:TM774 **文献标志码:**A **文章编号:**1003 - 6954(2021)01 - 0035 - 03

DOI:10.16527/j.issn.1003 - 6954.20210108

Analysis and Pilot Construction of Grounding Line Selection Tripping Technology in Small - current Grounding System

Zhou Lan, Shang Chao

(State Grid Shinan Electric Power Supply Branch of Chongqing Electric Power Company, Chongqing 601336, China)

Abstract:Due to the increase of cable lines in small - current grounding distribution systems currently, traditional neutral point grounding modes and manual pulling method now is difficult to meet the security requirements of modern urban power grid. The action logic, main advantages and disadvantages of five kinds of grounding line selection tripping schemes are sorted out, that is, parallel small resistance line selection, parallel medium resistance line selection, active intervention of arc extinction, distributed line selection and centralized line selection. Through the actual data and operation experiences of a electric power company, the centralized single - phase grounding line selection tripping scheme is recommended if the electrical equipment is already in operation, and the distributed single - phase grounding line selection tripping scheme can be selected if the equipment has not been put into operation.

Key words:small - current grounding system; grounding line selection tripping; distributed grounding line selection; centralized grounding line selection

0 引 言

配电网主要作用是向用户分配电能,其网络庞大,结构复杂,分布面广,易产生各类故障,其中线路单相接地故障占比 80% 以上。国内外普遍存在配电网接地故障的难题。目前中国中低压配电网较为广泛地采用小电流接地系统,因单相接地后三相线电压基本保持不变,国内传统运行规程规定小电流接地系统发生单相接地允许接地运行 1 ~ 2 h^[1-3]。

近些年来,随着国内电网的不断发展,城市中心变电站电缆出线越来越密集,电缆沟道数量亦急剧增加,电缆线路接地后若弧光长时间存在,会加重对故障点的破坏,严重时造成相间故障,甚至引发火灾造成电缆群伤事件或大面积停电。欧洲国家中,除奥地利、德国允许小电流接地系统继续带电运行外,其他国家都是在检测到发生接地故障且经过一段时间不能自行熄弧后直接跳开故障线路。亚洲的日本也采用直接跳开故障线路的做法^[4]。国内的广东电网等单位已开始优化中性点接地方式实现接地快速跳

闸的功能^[5-6]。

近两年某电力公司已多次发生电缆沟火灾事故,造成了一定的经济损失及社会影响。究其原因,均因未能快速切除始发的 10 kV 电缆单相接地故障有关。因此,急需开展小电流接地系统单相接地故障时快速切除故障的研究与试点。

1 小电流接地选线跳闸技术

小电流接地系统单相接地故障选线跳闸技术(以下简称小电流接地选线跳闸),是以变电站、开闭所内线路保护装置或公用设备为基础,利用故障产生的信息或其他设备附加的信息确定故障线路,经延时判断非瞬时故障后,直接作用于跳闸的方法。

应用小电流接地选线跳闸技术需对变电站内现有一次或二次设备进行改造,主要通过改造一次设备实现选线跳闸的有灵活并小电阻选线跳闸、灵活并中电阻选线跳闸、主动干预灭弧 3 种方案;主要通过改造二次设备实现选线跳闸的有分布式选线跳闸、集中式选线跳闸两种方案。

1.1 一次设备改造

1.1.1 灵活并小电阻选线

该方案中,当系统发生单相接地时,若接地故障持续 1~10 s,则消弧线圈自动并小电阻接地,接地回路零序电流升高,利用馈线零序保护动作跳闸。无论馈线回路跳闸与否,小电阻持续投入 0.1~10 s 自动退出,系统恢复为消弧线圈接地方式。若接地消除,则装置自动复归;若接地故障仍存在,则靠人工断开故障线路。

该方案施工难度与成本不高,即使馈线回路跳闸不成功,但选线装置仍能正确发出信号,因此理论上选线正确率高。但实际运行电网中接地情况复杂,馈线零序保护定值整定困难,灵活并小电阻选线法对于复杂故障可能难以准确判断。因接地时并小电阻对一次系统有较大影响,该方法会造成故障回路零序电流升高,使电弧可能更大。另外,控制器发生故障,在并接小电阻无法自动退出时,容易被烧坏,对零序 CT 容量要求也较高。

1.1.2 灵活并中电阻选线

该方案中,当系统发生单相接地时,若接地故障持续 1~10 s,则消弧线圈自动并中电阻接地。中电阻投入持续 0.1~10 s 后自动返回。消弧线圈中性

点处零序电流与各线路零序电流进行相位比较判断出接地线路,接地装置再进行告警、跳闸。

灵活并中电阻选线方案对零序 CT 要求不高,施工难度与成本相对较低。但该方法因一个判断逻辑的最多选线条数未受限制,若选线错误则存在多条线路误跳的风险。接地时并中电阻对一次系统有较大影响,会造成故障回路零序电流升高,电弧可能更大。此外,灵活并中电阻选线方案对一次电缆屏蔽层接地方式要求高,且每套装置所接回路数少。

1.1.3 主动干预灭弧

通过主动干预灭弧,当系统发生单相接地时,若接地故障持续 40 s,故障相的接地开关柜自动合闸,母线直接接地,30 s 后自动复位。若自动复位后线路单相接地故障未消除,将再次合闸,之后需人工远方断开故障线路,再进行接地装置复位。

主动干预灭弧法最大的优点是单相接地线路故障点可实现快速灭弧。但也存在诸多缺点,如选线正确后不作用于跳闸,需靠人工断开故障线路;主动干预灭弧装置动作时,会造成母线直接接地,对系统影响较大;当控制器发生故障时,存在接地开关柜烧坏的风险。

1.2 二次设备改造

1.2.1 分布式选线跳闸

分布式小电流接地选线方案是将接地选线功能分布集成于 10~35 kV 的线路保护装置中。当本线路的接地概率最高时,则经延时率先跳闸。若跳闸后“选跳错误重合闸延时”内故障消失则判定选线跳闸成功,否则判定为选线跳闸错误。若选线跳闸错误,并且重合闸功能未投入,则继续跳其他可能接地的线路;若选线跳闸错误,并且重合闸功能投入,则经延时重合线路,线路重合后 0.2 s 继续跳其他可能接地的线路,最多跳 3 条线路,若选线跳闸成功,则保护复归。

分布式选线跳闸法选线跳闸成功率较高,一个判断逻辑最多可选择 3 条概率最大的线路,即使错误选线也不会造成多条线路跳闸。若选线失败则自动重合,且与线路本身重合闸是两个完全独立的逻辑,不相互影响。此外,该方法将功能集成于线路保护 CPU 中,不需增加额外设备,在新建与改造站中特别适用。因仅对二次设备进行改造,不会对一次系统造成影响;且设备运行较为稳定,故障率低。

但是,分布式选线跳闸法对诸如 3 s 内两条线

路同时发生同相接地的复合故障不能正确选线。针对已投运站,站内必须是同一厂家且版本较新的装置才能实现升级,因此适用范围较小,且对现场已有的保护装置要求高,施工时需对每套保护装置更换 CPU 或升级,重新配置装置二次线,费用较高,施工难度大,停电时间长。另外,该方法对零序 CT 的极性、一次电缆屏蔽层接地方式的要求较高。

1.2.2 集中式选线跳闸

集中式选线跳闸方案将功能集成于集中式接地跳闸装置中,最多可以选出 3 条线路,并且按照接地概率进行排序,率先跳接地概率最高的线路。若跳闸后 2 s 内故障消失则判定选线跳闸成功,否则判定为选线跳闸错误。若选线跳闸错误,并且重合闸功能未投入,则继续跳其他可能接地的线路;若选线跳闸错误,并且重合闸功能投入,则经延时重合线路,线路重合后 0.2 s 继续跳其他可能接地的线路。

类同于分布式跳闸方案,集中式选线跳闸具有选线跳闸成功率高、选线失败会自动重合、不会造成多条线路跳闸、不会对一次系统造成影响、设备运行稳定等诸多优点。且主网、配电网设备均适用,施工难度与成本相对较低。

同样,集中式选线跳闸方案,对零序 CT 的极性、一次电缆屏蔽层接地方式要求高。且对已投入重合闸的馈线,集中式选线跳闸不能闭锁线路保护重合闸,无论选线是否正确,都会重合一次,靠选线装置后加速跳闸功能切除故障线路。

2 试点建设

自 2018 年以来,某电力公司分别试点建设了灵活并小电阻选线跳闸、灵活并中电阻选线跳闸、主动干预灭弧、分布式选线跳闸、集中式选线跳闸 5 种单相接地快速跳闸方案。截止 2020 年 5 月,该 5 种试点装置已分别在 A、B、C、D、E 等 5 座 110 kV 变电站投入运行,动作情况如表 1 所示。

表 1 接地选线跳闸试点建设情况

方案	灵活并小电阻	灵活并中电阻	主动干预灭弧	分布式	集中式
试点变电站	A	B	C	D	E
动作次数	0	1	0	18	7
正确率/%	—	0	—	100	100

从改造一次设备的 3 种方案来看,灵活并小电阻方案所试点的 A 站以及主动干预灭弧方案所试点的 C 站,投运至今线路设备未发生单相接地故障,未取得运行跳闸数据,需进一步试运行。灵活并中电阻方式 B 站动作一次但选线失败,厂家虽已整改,但建议工程完工后先仅投告警功能,待选线成功率提高后再启用跳闸功能。

从改造二次设备的两种方案来看,已投运的 110 kV D、E 站选线装置共动作 25 次,全部选线正确并快速跳闸切除故障,正确率达 100%。综合投资、施工、运行效果等方面考虑,对已投运的主网、配电网设备,集中式接地选线跳闸方案较为适合。对于新建或改造的主网、配电网设备,分散式接地选线跳闸方案更为适合。

3 存在的问题及建议措施

3.1 存在的问题

单相接地选线跳闸启用后,对电缆设备起到了较好的保护作用,电缆群伤风险得到有效控制,但同时也出现了一些新的问题。

1)停电范围扩大。由于双电源开闭所自备投功能大量启用,开闭所分列运行时,开闭所某一出线发生单相接地(开闭所无单相接地选线跳闸功能),站端跳闸后开闭所自备投自动合备用电源,将导致另一回电源跳闸失电,扩大停电范围。

2)故障查找困难。为快速切除故障,单相接地延时 2 s 就会跳闸,电缆损坏程度较轻,故障点查找难度增大。采用试送方式时,分割试送很可能造成正常负荷多次跳闸。

3)零序电流存在难题。目前,各试点方案对零序 CT、电缆屏蔽层接地均有较高要求,而在实际施工、运行中,零序 CT 极性、电缆屏蔽层都极易出错,且正常运行时难以发现,导致正常运行时零序 CT 不能满足要求。

3.2 建议措施

针对以上问题,提出以下 3 点解决措施:

1)加强配电网保护逐级配合。开闭所等配电网保护须具备接地选线跳闸功能,逐步实现逐级配合,有选择性地切除接地点。

2)故障处理短时退出接地跳闸出口。过渡期
(下转第 82 页)

单星形接线电容器组击穿故障下桥差电流 保护公式推导

胡德雯¹,李自成²,林 增²,柴薪垚²

(1. 国网四川省电力公司检修公司,四川 成都 610041;
2. 成都理工大学工程技术学院,四川 乐山 614099)

摘 要:在电容器内部元件发生击穿故障时,电容器组的电容会随之发生变化,将导致中性点电压发生偏移和不平衡电流的产生。首先,对电力系统中补偿电容器组的桥差保护计算公式进行推导,同时对电容器组单星形接线形式进行公式整理;然后,通过 Matlab 建立 Simulink 仿真模型,对不同击穿率下的电容器组运行情况进行仿真分析;最后,通过仿真数据对推导公式加以验证。

关键词:电容器组;桥差电流;故障率;外熔断器;故障电容器

中图分类号:TM714.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2021)01-0038-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210109

Derivation of Bridge Differential Current Protection Formula under Breakdown Fault of Capacitor Bank with Single Star Connection

Hu Dewen¹, Li Zicheng², Lin Ceng², Cai Xinyao²

(1. State Grid Sichuan Maintenance Company, Chengdu 610041, Sichuan, China;
2. College of Engineering and Technology, Chengdu University of Technology,
Leshan 614099, Sichuan, China)

Abstract: When the internal components of capacitor break down, the capacitance of capacitor bank will change accordingly, which will lead to the deviation of neutral point voltage and the generation of unbalanced current. Firstly, the calculation formula of bridge differential protection of compensation capacitor bank in power system is deduced, and the single star connection form of capacitor bank is sorted out. And then, the Simulink simulation model is established by Matlab with examples, and the operation of capacitor banks under different breakdown rates is simulated and analyzed. Finally, the derived formula is verified by simulation data.

Key words: capacitor bank; bridge differential current; fault rate; external fuse; fault capacitor

0 引 言

随着电力系统的飞速发展,电容器组在电力系统被广泛运用。在电力系统中,串联电容器能起到抵消线路电抗、缩短电气距离、提高输电能力等作用^[1];并联电抗器能起着补偿系统无功功率、提高系统功率因数、改善供电电压质量等作用。并联电容器的接线方式又可分为单星形接线、双星形接线、三角形接线。

在中国电压等级 6~60 kV 电力系统中,接地方

式一般采用的是中性点不接地或经消弧线圈接地^[2]。中性点不接地系统中,当电容器内部发生故障时,将直接引起电容器电容值改变,导致三相电容组电容值不同,使中性点电位也随着发生偏移,最终导致三相电压不平衡而使得故障扩大。

电容器组在电力系统中,直接关系到电网经济稳定运行,因此电容器组的保护显得至关重要。桥差电流保护作为一种常用的电容器组保护手段,如何整定桥差电流使其精准有效地保护电容器组,成为保护电容器组的主要问题。下面针对电容器组有外熔断器无内熔丝或有外熔断器有内熔丝但内熔丝

未及时熔断的情况,在电容器内部电容元件发生击穿短路故障时,对单星形接线桥差电流保护进行公式推导,并举例通过 Matlab 进行仿真加以验证。

1 公式推导

1.1 电容值计算

以 A 相电容器组内部发生故障为例进行公式推导分析。其中电容器组的内部结构如图 1 所示。电容器组由 4 个电容臂组成,分别用 C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 表示, C_1 、 C_2 并联构成电容器组的上半部分, C_3 、 C_4 并联构成电容器组下半部分,结构如图 1(a)^[3] 所示。

设电容器组有 N 个串联段,每个串联段由 $(M_1 + M_2)$ 台电容器组成,且每个电容器都串接有外熔断器,其结构图如图 1(b)^[4] 所示。单台电容器电容量为 C ,故障击穿率为 β 。

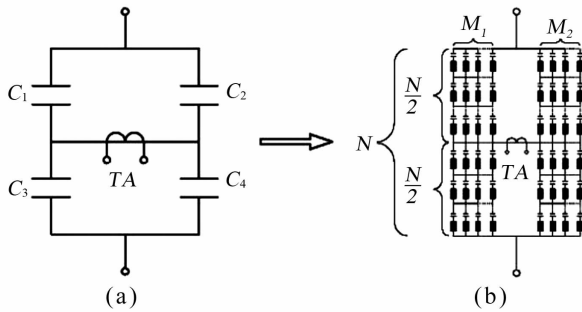


图 1 电容器组内部结构

1) 故障臂的故障电容器的电容值

$$C_x = \frac{1}{1 - \beta} C \quad (1)$$

2) 故障臂的故障并联段电容器电容值

$$C_f = C_x + (M_1 - 1)C = \frac{M_1 - M_1\beta + \beta}{1 - \beta} C \quad (2)$$

3) 电容器组故障臂电容器的电容值

$$C_1 = \frac{C_f \frac{M_1}{\frac{N}{2} - 1}}{C_f + \frac{M_1}{\frac{N}{2} - 1} C} \quad (3)$$

将式(2)代入式(3),简化得到:

$$C_1 = \frac{2 M_1 (M_1 - M_1\beta + \beta) C}{N(M_1 - M_1\beta + \beta) - 2\beta} \quad (4)$$

4) 电容器组非故障臂电容器的电容值

$$C_2 = C_4 = \frac{2M_2}{N} C \quad (5)$$

$$C_3 = \frac{2M_1}{N} C \quad (6)$$

5) 电容器组的上半部分电容器的电容值

$$C_{A\pm} = C_1 + C_2 = \frac{2[(M_1 + M_2)N(M_1 - M_1\beta + \beta) - 2M_2\beta]}{N[N(M_1 - M_1\beta + \beta) - 2\beta]} C \quad (7)$$

6) 电容器组的下半部分电容器的电容值

$$C_{A\mp} = C_3 + C_4 = \frac{2(M_1 + M_2)}{N} \frac{m}{n} C_u \quad (8)$$

7) 故障相电容器组的电容值

$$C_A = \frac{C_{A\pm} C_{A\mp}}{C_{A\pm} + C_{A\mp}} = \frac{(M_1 + M_2)[(M_1 + M_2)N(M_1 - M_1\beta + \beta) - 2M_2\beta]}{(M_1 + M_2)N(M_1 - M_1\beta + \beta) - M_1\beta - 2M_2\beta} \quad (9)$$

8) 非故障相电容器组的电容值

$$C_B = C_C = \frac{(M_1 + M_2)m}{N \cdot n} C_u \quad (10)$$

1.2 中性点偏移电压计算

假设三相电源 U_A 、 U_B 、 U_C 为对称三相电源,则根据节点电压法可得

$$\left(\frac{1}{X_A} + \frac{1}{X_B} + \frac{1}{X_C}\right) \dot{U}_0 = \frac{\dot{U}_A}{X_A} + \frac{\dot{U}_B}{X_B} + \frac{\dot{U}_C}{X_C} \quad (11)$$

$$\left(\frac{1}{X_A} + \frac{1}{X_B} + \frac{1}{X_C}\right) \dot{U}_0 = \frac{\dot{U}_A}{X_A} - \frac{\dot{U}_A}{X_B} \quad (12)$$

由于 $X = \frac{1}{\omega C}$,并将式(9)、式(10)代入式(12),

得到:

$$\dot{U}_0 = \frac{M_1\beta}{3[(M_1 + M_2)N(M_1 - M_1\beta + \beta)] - 2M_1\beta - 6M_2\beta} \dot{U}_A \quad (13)$$

1.3 桥差电流计算

1) 故障相电容器电压 U_{AG}

$$\dot{U}_{AG} = \dot{U}_A - \dot{U}_0 = \frac{3[(M_1 + M_2)N(M_1 - M_1\beta + \beta)] - 3M_1\beta - 6M_2\beta}{3[(M_1 + M_2)N(M_1 - M_1\beta + \beta)] - 2M_1\beta - 6M_2\beta} \dot{U}_A \quad (14)$$

2) 电容器组的额定电流

$$I_N = \frac{\omega(M_1 + M_2)C}{N} U_A \quad (15)$$

3) 电容器组桥差电流

$$i_d = \frac{\dot{U}_{A上}}{X_2} - \frac{\dot{U}_{A下}}{X_4} = \frac{\frac{X_{A上}}{X_A} \dot{U}_{AG}}{X_2} - \frac{\frac{X_{A下}}{X_A} \dot{U}_{AG}}{X_4} \quad (16)$$

由于 $X_2 = X_4$, 化简得:

$$i_d = \frac{X_{A上} - X_{A下}}{X_A} \frac{\dot{U}_{AG}}{X_2} \quad (17)$$

将式(7)至式(9)、式(14)代入式(17), 简化得到:

$$i_d = \frac{6M_1M_2\beta}{(M_1+M_2)\{3[(M_1+M_2)(M_1-M_1\beta+\beta)]-2M_1\beta-6M_2\beta\}} \dot{I}_N \quad (18)$$

1.4 故障电容器电流

1) 故障电容器的电压

$$\begin{aligned} \dot{U}_{Cf} &= \frac{X_{A上}}{X_A} \frac{X_f}{X_1} \dot{U}_{AG} \\ &= \frac{C_A}{C_{A上}} \frac{C_1}{C_f} \dot{U}_{AG} \\ &= \frac{3M_1(M_1+M_2)(1-\beta)}{3[(M_1+M_2)N(M_1-M_1\beta+\beta)]-2M_1\beta-6M_2\beta} \dot{U}_A \end{aligned} \quad (19)$$

2) 单台电容器的额定电流

$$I_{CN} = \omega C \frac{U_A}{N} \quad (20)$$

3) 故障电容器电流

$$\begin{aligned} \dot{I}_{Cf} &= j\omega C_x \dot{U}_{af} \\ &= \frac{3M_1(M_1+M_2)N}{3[(M_1+M_2)N(M_1-M_1\beta+\beta)]-2M_1\beta-6M_2\beta} \dot{I}_{CN} \end{aligned} \quad (21)$$

1.5 比值系数

设外熔断器的额定电流是电容器额定电流的 K 倍, 则有

$$I_{Nf} = K I_{CN} \quad (22)$$

$$I_{Cf} = \frac{3M_1(M_1+M_2)N}{3[(M_1+M_2)N(M_1-M_1\beta+\beta)]-2M_1\beta-6M_2\beta} I_{Nf} \quad (23)$$

1) 故障台电容器过电流倍数

$$K_c = \frac{I_{Cf}}{I_{CN}} = \frac{3M_1(M_1+M_2)N}{3[(M_1+M_2)N(M_1-M_1\beta+\beta)]-2M_1\beta-6M_2\beta} \quad (24)$$

2) 故障电流为熔断电流的倍数

$$K_f = \frac{I_{Cf}}{I_{Nf}} = \frac{3M_1(M_1+M_2)N}{3K[(M_1+M_2)N(M_1-M_1\beta+\beta)]-2M_1\beta-6M_2\beta} \quad (25)$$

1.6 两臂平衡公式

当电容器组的两臂平衡时, 则有 $M_1 = M_2 = M/2$ 。

1) 中性点偏移电压

$$\dot{U}_0 = \frac{\beta}{3N[M(1-\beta)+2\beta]} \dot{U}_A \quad (26)$$

2) 桥差电流

$$i_d = \frac{3\beta}{3N[M(1-\beta)+2\beta]} \dot{I}_N \quad (27)$$

3) 故障电容器电流

$$i_{Cf} = \frac{3MN}{3N[M(1-\beta)+2\beta]} \dot{I}_{CN} \quad (28)$$

4) 故障电容器过电流倍数

$$K_c = \frac{I_{Cf}}{I_{CN}} = \frac{3MN}{3N[M(1-\beta)+2\beta]} \quad (29)$$

5) 故障电流为熔断电流的倍数

$$K_f = \frac{I_{Cf}}{I_{Nf}} = \frac{3MN}{3KN[M(1-\beta)+2\beta]} \quad (30)$$

将以上推导公式整理成如表 1 所示。

表 1 单星形桥差保护计算公式

适用场合	两臂不平衡	两臂平衡
中性点 偏移电压	$\dot{U}_0 = \frac{M_1\beta}{3[(M_1+M_2)N(M_1-M_1\beta+\beta)]-2M_1\beta-6M_2\beta} \dot{U}_A$	$\dot{U}_0 = \frac{\beta}{3N[M(1-\beta)+2\beta]} \dot{U}_A$
桥差电流	$i_d = \frac{6M_1M_2\beta}{(M_1+M_2)\{3[(M_1+M_2)(M_1-M_1\beta+\beta)]-2M_1\beta-6M_2\beta\}} \dot{I}_N$	$i_d = \frac{3\beta}{3N[M(1-\beta)+2\beta]} \dot{I}_N$
过流倍数	$K_c = \frac{3M_1(M_1+M_2)N}{3[(M_1+M_2)N(M_1-M_1\beta+\beta)]-2M_1\beta-6M_2\beta}$	$K_c = \frac{3MN}{3N[M(1-\beta)+2\beta]} \quad -8\beta$
熔断系数 ($K_f > 1$)	$K_f = \frac{3M_1(M_1+M_2)N}{3K[(M_1+M_2)N(M_1-M_1\beta+\beta)]-2M_1\beta-6M_2\beta}$	$K_f = \frac{3MN}{3KN[M(1-\beta)+2\beta]} \quad -8\beta$

注: M 为电容器组并联台数; N 为电容器组串联台数; M_1 为电容器组右臂并联台数; M_2 为电容器组左臂并联台数; β 为电容器击穿率; K 为外熔断器额定电流与电容器额定电流比值。

2 Matlab 建模与仿真

已知: $M_1 = M_2 = M/2 = 2$; $N = 4$; $C = 2 \mu\text{F}$;
 $\dot{u}_A = 10\,000 \sin 314 t (\text{V})$; $\dot{u}_B = 10\,000 \sin (314 t + 120^\circ) (\text{V})$; $\dot{u}_C = 10\,000 \sin (314 t + 240^\circ) (\text{V})$;假设 A 相电容器组的 C_1 臂发生击穿短路故障,分别对外熔断器未熔断时的故障击穿率进行计算,并对 $\beta = 20\%$ 和 $\beta = 80\%$ 进行仿真分析。

2.1 模型建立

单星形接线电容器组装置的 Simulink 的仿真模型^[5-6]如图 2 所示(注:由于电容直接与电源并联无法仿真,因此在电容器组中串联 50Ω 的电阻,在 50 Hz 工频交流下有 $X_C \gg X_R$,即容抗远远大于电阻,为方便计算以下计算中忽略串联电阻)。

2.2 计算结果

- 1)计算分析
- 在不同故障类型情况下,根据上述推导的公式带入数据可得如表 2 的计算结果。
- 2)仿真结果

$\beta = 20\%$ 仿真结果如图 3 所示; $\beta = 80\%$ 仿真结果如图 4 所示。

2.3 仿真结果分析

根据上述的计算数据与模型仿真数据进行比较,结果吻合,因此有效地验证了公式的正确性。同时还能得出以下结论:

当电容器内部发生击穿故障时,故障电容器的电容值增大,引起故障电容器电流增加和电容器组中心电位发生偏移^[7]。随着击穿率升高故障电容器的电容值随之增大,中心点电压偏移越严重,故障电容器流过的电流跟随增大。故障电容器的内部电容元件将承受的电压也随着故障率增加而增加,若故障电容器不能有效地切除,可能引起故障的进一步发展直至故障电容器完全被击穿。在整个电容值的变化过程中,桥差电流随着电容臂的不平衡度而发生变化,产生电容不平衡现象。

3 结 语

电容器组保护可通过桥差电流来整定保护,若

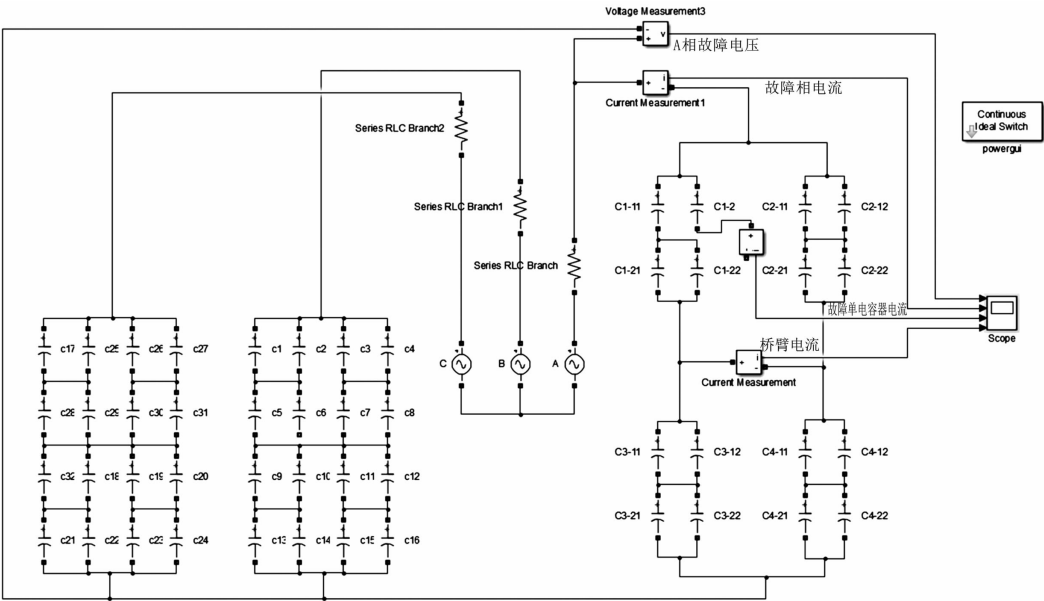


图 2 Simulink 仿真模型

表 2 计算结果

故障类型	中性点偏移电压/V	故障电容器组电压/V	故障电容器电流/A	桥差电流/A
$\beta = 0\%$	0	7 071.1	1.111	0
$\beta = 20\%$	34.0	7 037.1	1.280	0.064
$\beta = 50\%$	110.5	6 960.6	1.669	0.205
$\beta = 80\%$	252.5	6 818.6	2.376	0.434
熔断器熔断	-221.0	7 292.1	0.000	0.417

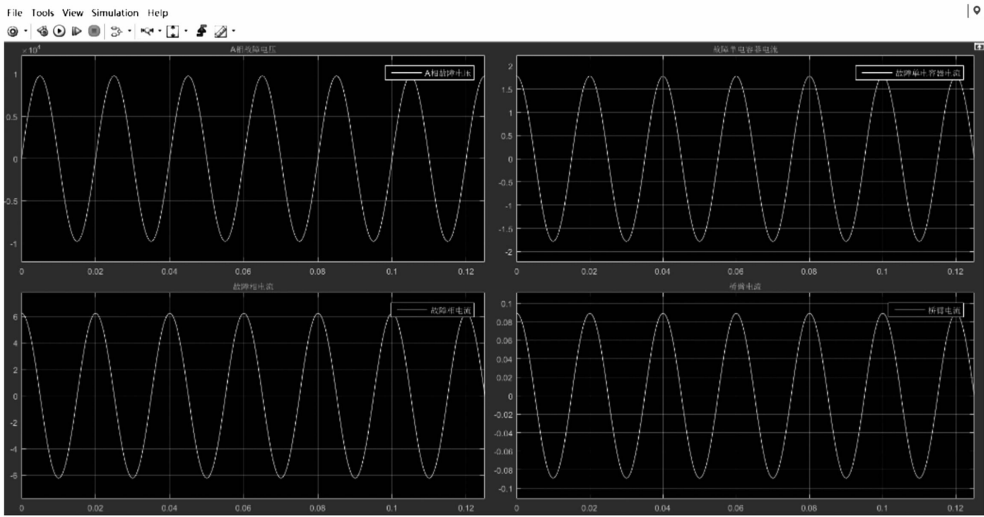


图 3 $\beta = 20\%$ 仿真

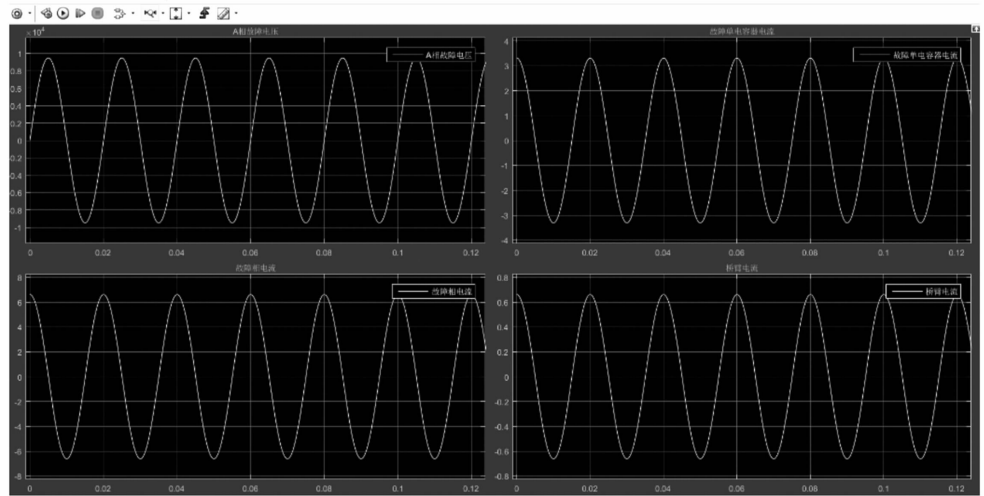


图 4 $\beta = 80\%$ 仿真

桥差电流超过整定的电流值,触发并联电容器组跳闸,避免电容器故障的进一步发展。在做桥差电流整定时,应根据电容器内部结构与桥臂电容台数代用公式,同时结合电容器的额定电流与外熔断器的额定电流进行综合分析后整定,避免整定错误使桥差保护误动作,影响到电力系统安全运行。

参考文献

[1] 陈伟润. 10 kV 配电网的无功补偿技术应用[J]. 科学之友, 2011(10): 15-16.

[2] 戴克铭. 配电系统中性点接地方式的分析[J]. 电网技术, 2000, 24(10): 52-55.

[3] 盛国钊, 严飞, 姜胜宝, 等. 大容量电容器组桥差不平衡电流保护近似计算[J]. 电力电容器与无功补偿, 2009, 30(2): 1-6.

[4] 常菊民, 王薇, 高小根. 单星形桥式差流保护的公式推导与分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2008, 29(6): 12-14.

[5] 李春雷. 并联补偿电容器组的保护配置与故障仿真[D]. 广州: 华南理工大学, 2012.

[6] 黄时细, 罗小安, 蔡文丰. 基于 MATLAB 仿真的无功补偿应用研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2012, 33(2): 17-21.

[7] 杨昌兴, 王敏. 外熔丝保护性能与电容器组接线方式[J]. 浙江电力, 2005, 24(6): 5-8.

作者简介:

胡德雯(1996), 男, 助理工程师, 主要从事特高压换流站运维工作;

李自成(1970), 男, 教授, 主要从事高电压技术、电力工程等方面的研究;

林 增(1998), 男, 助理工程师, 主要从事电力工程、电力电子技术工作;

柴薪焱(1998), 女, 助理工程师, 主要从事电力工程、电力电子技术工作。

(收稿日期: 2020-06-09)

融合算法在蓄电池 SOC 估算中的研究综述

王晓辉¹, 郑 超², 张思义¹, 戴 明¹, 肖 伟¹, 陈 醒¹

(1. 国网江苏省电力有限公司徐州供电公司, 江苏 徐州 221000;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

摘 要: 蓄电池的荷电状态(SOC)是电池管理系统中的重要参数之一,准确估算电池 SOC 对生产运行具有重要意义。首先,阐释了 SOC 的定义;其次,分析了传统单一 SOC 估算法的不足;然后,论述了近几年蓄电池 SOC 融合估算方法如神经网络、卡尔曼滤波法和综合法的研究进展,并分析了各种方法存在的优缺点;最后,给出总结与展望。提出充分利用数据挖掘和深度学习技术,将 BMS 记录的历史数据用于蓄电池 SOC 的估算,有助于提高计算精度和应用范围。

关键词: 蓄电池;荷电状态(SOC);融合算法

中图分类号: TM912 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2021)01-0043-04

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20210110

Summary of Fusing Algorithm Research in Estimation for State of Charge of Battery

Wang Xiaohui¹, Zheng Chao², Zhang Siyi¹, Dai Ming¹, Xiao Wei¹, Chen Xing¹

(1. State Grid Xuzhou Electric Power Supply Company, Xuzhou 221000, Jiangsu, China;

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

Abstract: The state of charge (SOC) of battery is one of the important parameters in battery management system (BMS). Accurate estimation of SOC is of great significance for production and operation. Firstly, the definition of SOC is explained. Secondly, the shortcomings of traditional single SOC estimation method are analyzed, and then, the research progress of SOC fusion estimation methods for battery in recent years, including neural network, Kalman filter and synthesis method, is discussed, and the advantages and disadvantages of each method are analyzed. Finally, the summary and prospect are given. It is proposed to make full use of data mining and deep learning technology and use the historical data recorded by BMS to estimate the SOC of battery, which is helpful to improve the calculation accuracy and application range.

Key words: battery; state of charge (SOC); fusion algorithm

0 引 言

蓄电池是制造业中一种使用广泛的储能设备,具有供电可靠、电压稳定等特点。此外,蓄电池是混合动力汽车和电动车辆的核心组成部分,作为系统的间接或直接电源,保证其安全可靠的运行对系统的安全至关重要^[1-2]。但由于受蓄电池固有特性的影响,实际场景下仍存在一些薄弱环节。突出表现在以下 3 点:现有方式下蓄电池组很难达到预期寿

命;运行维护工作量较大;现阶段实时监测技术落后、手段单一。电池管理系统(battery management system, BMS)俗称电池管家,是电池与用户之间的纽带,具有准确监测、高效评估、精确管理的特点。BMS 采集电池系统的实时运行数据,并对其状态进行评估,主要包括:荷电状态(state of charge, SOC)、功率边界、健康状态和故障状态,其中荷电状态估计是 BMS 研究的核心和难点^[3-5]。近年来,国内外学者先后对 SOC 的估算方法进行了大量的研究^[6-55],也取得一些成果,但是在工程应用方面仍存在问题。SOC 是电池使用过程中最重要的参数之一,会

受到电池内部电化学反应、外部环境条件等因素的影响,具体包括充放电倍率、环境温度、电池内阻及老化等。目前蓄电池 SOC 估算方法主要有开路电压法、安时积分法、神经网络法、卡尔曼滤波法以及综合法,下面对上述方法进行详细分析,并给出总结与展望。

1 电池 SOC 的定义

SOC 指电池的荷电状态,是一个无量纲的数值量,可理解为储存在能量系统中的有用电荷和全部额定电荷容量的比值,即剩余容量/额定容量。

$$S(t) = \frac{E(t)}{E_{nom}} \tag{1}$$

式中: $S(t)$ 为荷电状态值; $E(t)$ 为剩余容量(residual capacity); E_{nom} 为额定容量(tatal capacity)。

2 单一 SOC 估算方法的不足

相关研究指出,蓄电池的电动势 $U(t)$ 与其荷电状态密切相关^[9-13],函数关系如式(2)所示。

$$S(t) = F(U(t)) \tag{2}$$

经典的 SOC 估算方法采用安时积分法^[14-17],也叫电流积分法或库伦计数法,通过对电池充放电过程中的电流进行积分运算,进而估算电池的 SOC 为

$$S(t) \approx S_0 - \frac{\int_0^t \eta(t) I(t) dt}{E_{nom}} \tag{3}$$

式中: S_0 为初始荷电状态; $\eta(t)$ 为放电倍率(放电时, $\eta(t) \approx 1$; 充电时, $\eta(t) \approx 0.98 \sim 0.99$)。

开路电压法操作便捷,但需要电池较长时间处于静置状态,所需的测量条件特殊。

安时积分法的误差来源有:1) 电流采样误差,主要是电流采样的精度和频率;2) 电池容量变化导致的误差,即电池的环境温度、电池的老化程度、电池的充放电倍率以及电池的自放电等都会影响到电池的容量;3) SOC 误差,即初始 SOC 的精确获取以及最终 SOC 计算过程中无法避免的取舍误差。

3 融合 SOC 估算方法

3.1 卡尔曼滤波法

对蓄电池而言,运用卡尔曼滤波进行电池的

SOC 估算,是当下一种比较主流的研究方向。建立合适的电池等效模型是该方法的核心;通过当下时刻的测量值、上一时刻的预测值以及构建模型的误差,计算得到当下时刻的最优值。其突出优势在于,计算过程考虑了误差,并且该过程中误差独立存在。文献[18-26]均通过建立等效电池模型,运用卡尔曼滤波估算蓄电池的 SOC。此外,有学者对传统卡尔曼滤波进行改进,得到了扩展卡尔曼滤波法^[27-29],进一步提高了计算精度。卡尔曼滤波法的准确度与构建的电池模型的准确度高度正相关,计算复杂。

卡尔曼滤波法适用于电流波动比较剧烈的情况,对 SOC 初值的要求不高,但对电池模型的精度要求很高。

3.2 神经网络法

近年来,电池 SOC 估算研究方法中也引入了人工智能算法,主流采用的是 BP(back propagation)神经网络。根本上是对反映电池状态的参数样本的数据处理,其中对样本数据的选取和处理是重点,对电池本身的内部结构无需做深入的研究,就能得出电池运行中的 SOC 值。

将神经网络算法用于电池 SOC 估算,前期准备数据,后期处理相对简单。基于实验电路,文献[30-31]构建样本集,主要包含以下数据:蓄电池的端电压 $U(t)$ 、充放电电流 $I(t)$ 、欧姆内阻 $R(t)$ 、温度 $T(t)$ 和荷电状态 $S(t)$,然后利用 RBF 神经网络模型预测 SOC,准确度较高,但实验电路太过理想,实验不具普适性。

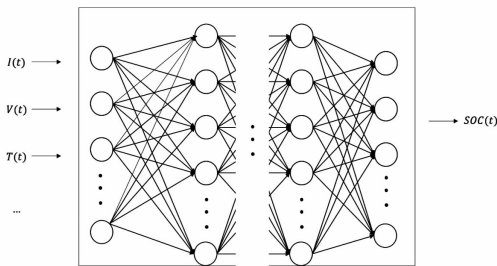


图 1 神经网络估算 SOC

文献[32]文献提出利用 LIBSVM 支持向量机,结合实验样本数据,建立了蓄电池的 SOC 预测模型,实验结果指出该方法优于传统的 BP 神经网络。文献[33]提出了基于稀疏采样数据的电池 SOC 单步预测法。选取了表征电池状态的部分参

数,并以此历史数据构建了SOC训练数据集,采用支持向量机(support vector machine, SVM)进行数据的预训练,其中SVM的最优参数通过贝叶斯算法获取,实验结果表明该方法具有较高的鲁棒性。

文献[34]在传统BP神经网络的基础上加以改进,提出了基于改进遗传算法的BP神经网络的蓄电池SOC估算方法,其仿真实验结果表明,该方法提高了估算精度,具有较好的收敛性。基于Matlab仿真,文献[35]设计的基于LSTM神经网络电池SOC预测模型较传统SOC估计方法的精度高,但提升不是特别明显。文献[36-41]通过选取与电池状态息息相关的参数,如温度、电流、老化程度等,建立神经网络模型,估算电池的SOC值。但是,该算法需要大量的样本数据,其对最终训练结果有重大的影响,特征量的取舍会带来误差^[42]。

神经网络法可在线估计,不需要精确的SOC初值,但需要大量的实验数据训练。

3.3 综合法

单一的方法,各有缺陷,综合使用上述方法,可以提高SOC估算精度^[43-55]。

文献[43]的实验结果表明,扩展卡尔曼滤波结合无迹卡尔曼滤波算法有效地降低了SOC估算中的噪声,提高了估算精度。文献[44]基于蓄电池的戴维南二阶模型,其二阶模型参数通过最小二乘法确定,采用神经网络模型确定开路电压和SOC之间的非线性关系,最后通过主从式自适应无迹卡尔曼滤波估算SOC,实验结果指出相比于扩展卡尔曼滤波(extended Kalman filter, EKF)、无迹卡尔曼滤波(unscented Kalman filter, UKF)算法,该方法估算精度高、收敛速度快。

文献[45]在分裂电池模型的基础上,引入了带遗忘因子的递推最小二乘法,最后利用UKF算法对蓄电池的SOC进行估算,提高了估算精度。文献[46]结合蓄电池的Thevenin一阶RC等效电路模型、RLS和改进的双卡尔曼滤波(improved dual extended Kalman filter, I-DEKF)算法进行SOC估算,减小了传统安时积分法的误差;此外有实验表明结合蓄电池的二阶RC等效电路模型、递归最小二乘法(recursive least square, RLS)和改进的Sage-Husa估计器对SOC估算过程的噪声进行抑制,提高了估算精度^[47]。文献[48]融合门控循环单元神经网络和Huber-M估计鲁棒卡尔曼滤波算法,有效

地降低了锂离子电池SOC估算中存在的测量误差。文献[49]在传统高斯过程模型的基础上,引入了K-means聚类算法与最大期望(expectation maximization, EM)算法对传统模型参数进行更新,实验结果显示该方法的估算精度要优于传统高斯过程回归方法。

文献[50]针对电池的SOC估算提出了一种电池状态分阶段处理的思想,但适用场景比较单一,仅适用于纯电动物流车。

文献[51]创新性地将分数阶微积分用于电池SOC估算,结合卡尔曼滤波法,提高了BMS中SOC估算的准确性。文献[52]设计了离散滑模观测器,结合电池的戴维南等效模型,进行模型的参数识别,实验结果优于扩展卡尔曼滤波法,但忽略了模型本身的误差,不具普适性。

文献[53]设计了电池管理系统和监控平台,提出了将安时计量法和等效电动势法相结合的并联加权反馈算法来估算电池SOC,估算准确度要优于传统并联加权算法。单实验数据与电池实际的状态数据有差距,不适用现场工况。

4 结 语

对于蓄电池而言,由于工况变化复杂,基于传统的单一变量,如 $U(t)$ 、 $I(t)$ 的开路电压法和安时积分法误差较大。神经网络法和卡尔曼滤波法融合多个变量,其估算准确度要优于传统单一估算方法,但是卡尔曼滤波法和神经网络法受限于电池模型和训练数据,而且算法复杂。影响电池容量的因数众多,有电流、电压、环境温度、寿命等,在电池SOC估算算法中应当综合考虑多种因数。BMS中储存了大量的历史运行数据,如何将这些历史数据与数据挖掘和深度学习等技术很好地结合起来,将是电池SOC估算的重要途径。

参考文献

- [1] 李匡成,季亚昆,刘政. 蓄电池模型研究综述[J]. 电源技术, 2017, 41(3): 505-507.
- [2] 王鹏程,朱长青. 铅酸蓄电池监测系统发展综述[J]. 电源技术, 2020, 44(4): 636-639.
- [3] 廖晓军,何莉萍,钟志华,等. 电池管理系统国内外现状及其未来发展趋势[J]. 汽车工程, 2006, 28(10):

- 961-964.
- [4] 杨亚丽,孙磊,李匡成.多用户实时控制快速充电技术研究[J].电测与仪表,2011,48(10):77-79.
- [5] 刘彦忠,张奕黄,王大龙.车用动力锂电池的 SOC 估计[J].电力电子技术,2012,45(12):48-50.
- [6] 季迎旭,杜海江,孙航.蓄电池 SOC 估算方法综述[J].电测与仪表,2014,51(4):18-22.
- [7] 华周发,李静.电动汽车动力电池 SOC 估算方法综述[J].电源技术,2013,37(9):1686-1689.
- [8] 陈燎,戴俊,盘朝奉.动力电池荷电状态研究的可视化分析[J].电池,2020,50(2):187-190.
- [9] 王曦,伍联营,张伟涛,等.铅酸电池开路电压的测量及其与累积放电量的关系[J].储能科学与技术,2018,7(1):75-79.
- [10] 朱春波,武国良,陈清泉.基于 EMF 等效模型电动车镍氢电池 SOC 估计[J].电力电子技术,2008,41(10):48-49.
- [11] 冯真得,何耀,刘新天,等.基于容量修正的阀控式铅酸蓄电池 SOC 估计[J].电源技术,2017,41(1):68-70.
- [12] 朱春波,武国良,陈清泉.基于 EMF 等效模型电动车镍氢电池 SOC 估计[J].电力电子技术,2008,42(10):48-49.
- [13] John Chiasson, Baskar Vairamohan. Estimating the State of Charge of A Battery [J]. Transactions on Control Systems Technology, 2005, 13(3):465-470.
- [14] Dennis Doerffel, Suleiman Abu Sharkh. A Critical Review of Using the Peukert Equation for Determining the Remaining Capacity of Lead-acid and Lithium-ion Batteries[J]. Power Sources, 2006, 155(2):395-400.
- [15] 杨文荣,朱赛飞,陈阳,等.基于改进安时积分法估计锂离子电池组 SOC[J].电源技术,2018,42(2):183-184.
- [16] 于海芳,逯仁贵,朱春波,等.基于安时法的镍氢电池 SOC 估计误差校正[J].电工技术学报,2012,27(6):12-18.
- [17] 罗勇,祁朋伟,黄欢,等.基于容量修正的安时积分 SOC 估算方法研究[J].汽车工程,2020,42(5):681-687.
- [18] 王金铎,俞万能,朱永怀,等.基于 SOC 估算的船用锂电池组健康管理[J].船舶工程,2020,42(4):15-20.
- [19] Daniil Fadeev, 张小周,董海鹰,等.基于模糊卡尔曼滤波器的锂电池荷电状态与健康状态预测(英文)[J]. Journal of Measurement Science and Instrumentation, 2020, 11(1):63-69.
- [20] 安昌祖,张蕊萍,张小周,等.基于模糊无迹卡尔曼滤波算法的锂电池 SOC 估计[J].电源技术,2020,44(3):333-336.
- [21] 丁稳房,付晓光,张轩豪.基于自回归各态历经模型参数辨识的模糊双卡尔曼滤波算法的储能电池荷电状态估算[J].科学技术与工程,2020,20(6):2299-2304.
- [22] 宋绍剑,魏黄娇,宋春宁.基于 AEKF 的锌镍单液流电池 SOC 估计[J].电池,2020,50(1):50-53.
- [23] 夏飞,王志成,郝硕涛,等.基于卡尔曼粒子滤波算法的锂电池 SOC 估计[J].系统仿真学报,2020,32(1):44-53.
- [24] 刘毅,谭国俊,何晓群.优化电池模型的自适应 Sigma 卡尔曼荷电状态估算[J].电工技术学报,2017,32(2):108-118.
- [25] 赵天意,彭喜元,彭宇,等.改进卡尔曼滤波的融合型锂离子电池 SOC 估计方法[J].仪器仪表学报,2016,37(7):1441-1448.
- [26] 毛华夫,万国春,汪镭,等.基于卡尔曼滤波修正算法的电池 SOC 估算[J].电源技术,2014,38(2):298-302.
- [27] 张博远,罗羽,杨玉新,等.基于扩展卡尔曼滤波的 SOC 估算与仿真[J].舰船电子工程,2020,40(1):99-102.
- [28] 高文哲,黄涛.基于扩展卡尔曼滤波模型的电动汽车锂电池 SOC 估算研究[J].通信电源技术,2020,37(1):44-45.
- [29] 刘嘉林,申江卫,吕天阳,等.基于扩展卡尔曼滤波的锂离子电池 SOC 估计[J].农业装备与车辆工程,2019,57(12):97-99.
- [30] 赵轩,康留旺,汪贵平,等.基于 BP 神经网络的 SOC 估计及铅酸蓄电池特性[J].电源技术,2014,38(5):874-877.
- [31] 米林,赵孟娜,秦甲磊,等.基于径向基函数神经网络的电动汽车动力电池 SOC 模型[J].重庆理工大学学报(自然科学),2011,25(10):1-5.
- [32] 陈凯,彭仲哈,吴启瑞,等.基于 LIBSVM 的铅酸蓄电池荷电状态估计[J].电源技术,2020,44(4):578-581.
- [33] 鲍伟,葛建军.基于稀疏采样数据的电动公交车电池 SOC 预测方法研究[J].汽车工程,2020,42(3):367-374.
- [34] 于仲安,卢健,王先敏.基于 GA-BP 神经网络的锂离子电池 SOC 估计[J].电源技术,2020,44(3):337-340.
- [35] 郑永飞,文怀兴,韩昉,等.基于 LSTM 神经网络的动力电池 SOC 估算研究[J].计算机应用与软件,2020,37(3):78-81.

单/双协同模式下配电网故障排查的最优巡线规划

苏学能, 张 华, 龙 呈, 高艺文, 李世龙
(国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

摘 要:针对有效制定科学、高效的配电网故障巡线排查方案,提出了一种单/双协同模式下故障排查巡线规划理论最优模型。结合配电网呈辐射状运行的特点,首先,设计了单模式配电网故障排查的最优巡线模型,并分析其计算复杂度;其次,为契合现场作业特点,在单模式模型的基础上衍生构建了双协同模式下高效协同的配电网巡线排查模型,该模型可同时兼顾总排查任务量最小和队间分配任务量更均衡。随后在论述两种模型差异的基础上,通过结合 Dijkstra 和深度优先搜索算法设计了所提两种模型的求解思路及解决方案。最后,以 IEEE 33 - Bus 和某实际系统为例,验证了所提巡线排查模型的准确性、高效性。

关键词:配电网;巡线巡检;迪杰斯特拉;深度优先搜索
中图分类号:TM726 **文献标志码:**A **文章编号:**1003 - 6954(2021)01 - 0047 - 06
DOI:10. 16527/j. issn. 1003 - 6954. 20210111

Theoretical Optimal Models for Fault Line Inspection in Distribution Network via Single/Dual Cooperative Modes

Su Xueneng, Zhang Hua, Long Cheng, Gao Yiwen, Li Shilong
(State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract:To effectively formulate a scientific and efficient fault line inspection plan, two theoretical optimal models for fault line inspection schemes in distribution network via single/dual cooperative modes are proposed. In combination with the characteristics of radial operation of distribution network, the optimal line inspection model for single - mode fault detection is firstly designed, and then its computation complexity is analyzed. Subsequently, to meet the properties of field operation, a single - mode model based efficient collaborative line inspection model in dual mode is derived. This model can both take the minimum total line inspection length and a more balanced task allocation among teams into account. Finally, solution differences and their processes via Dijkstra and depth - first search algorithm (DFS) between two models are discussed in detail, and taking the system of IEEE 33 - Bus and an actual system for example, the accuracy and efficiency of the proposed line inspection models are verified.

Key words:distribution network; line inspection; Dijkstra; depth - first search algorithm

0 引 言

长期以来,电力规划与建设存在“重发输、轻配用”的问题,使配电网的发展相对滞后。目前,配电网仍面临以下问题:1)供电半径长,线损高;2)网络结构不合理,运行方式不够灵活;3)负荷增长迅猛、电网建设用地紧张^[1]。鉴于此,配电网发生故障的可能性通常难以规避。目前,虽可结合配电自动化进行故障定位,但限于如投资成本以及配电网大部分线路尚未全面进行自动化升级改造等原因,当下更精准的故障排查仍多以人工巡线为主,而无优化

调整的巡线排查往往效率欠佳。因此,在配电网抢修的指挥决策应变上,如何有效制定出最科学、高效的故障排查策略及优化任务的分配,具有重要的理论价值和现实意义^[2-3]。

配电网故障处理主要分为故障定位、故障隔离和恢复供电 3 个阶段^[4],因此当下国内外相关研究也多集中于故障定位与诊断^[5-6]、基于断路器操作的故障恢复与重构^[7-8]以及抢修路径的优化^[9-10]等相关方面。关于故障定位研究,成果较为丰硕,主要集中于以下三方面:1)故障定位的模型构建及求解,如文献[11]结合故障信息矩阵和网络描述矩阵,获取能用于判断和隔离故障区段的故障判断矩阵。文献[12]考

虑了配电网闭环运行的工况,进一步提出能适应环网闭环运行和多电源模式下的多重故障定位算法。2)故障定位优化模型的准确及鲁棒性能提升。文献[13-15]从优化的视角刻画故障定位问题以建立优化模型,并采用如蚁群算法、遗传算法和仿生磁学等算法进行求解。3)非健全信息下的容错故障定位。由于配电设备主要工作在户外,工况较为恶劣,易发生漏报或者错报故障的情况。因此,也有部分研究热衷于解决非健全信息下的容错故障定位,如粗糙集和贝叶斯等算法^[16-17]。

上述故障定位研究多集中于研究如何实现故障区段定位建模合理化,进而保证故障定位的快速、准确,但以上目标良好实现的前提均依托于配电自动化终端的完善配置。但限于如投资成本、线路众多等原因,配电网仍有少部分线路尚未进行自动化升级改造;此外,即使对于已改造的线路,配电自动化终端有效覆盖率依然较低,故当下更精准的故障定位最终仍以人工巡线排查为主。因此,基于各类终端完善化作为前提的现有研究则稍显过于靠前,但随着泛在电力物联网的层级部署、逐步推进,当下相关研究将存在落地发展的可能。因此,限于现有条件,目前更需要一种高效的过渡方案,即针对配电网仍存在未改造的线路或者配电自动化终端覆盖较低的线路,精准故障定位仍需借助人工巡线模式。然而,针对人工巡线的研究,目前多局限于单人或小队进行巡线作业,而相对更为高效、契合现场工况的双协同模式下的故障排查巡线规划方案的设计,鲜有研究。

鉴于上述分析,从理论角度解析巡线最优模型的存在性,以期为建立实用高效的故障排查巡线模型提供导向指引。首先,结合配电网辐射状特点,构建了单模式下故障排查的最优巡线模型,并从理论上证明了其计算复杂度;其次,为设计符合实际作业的高效方案,进一步构建了双协同模式下高效最优排查巡线模型;最后,论述了两个模型的求解差异和具体流程,并以 IEEE 33 - Bus 和某实际系统为例,验证所提巡线排查最优模型的准确性和有效性。

1 单/双协同模式下配电网故障的最优巡线排查模型

为助于故障精准定位、抢修路径优化和供电有

效恢复,快速准确的故障排查则显得尤为重要。因此,从单/双协同模式角度构建巡线排查最优模型,为现场应用提供合理有序的排查导向。

1.1 单模式下故障巡线排查最优模型

中压配电网通常以闭环设计、开环运行,即现场多为单电源带馈线的辐射状网架结构,如图 1 所示。图 1 中,S1 为电源;H1 和 H2 分别为联络开关,正常运行时为分断状态,转供负荷等其他条件时,两个联络开关 H1 和 H2 则处于闭合状态,体现了闭环设计、开环运行的设计理念;编号 1—16 为分段开关;L1—L6 为负荷节点供电。

进一步,抽离 H1/H2 等联络设备后,图 1 可简化为如图 2 的网络结构。

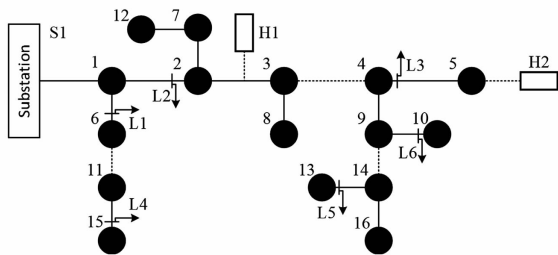


图 1 辐射状配电网

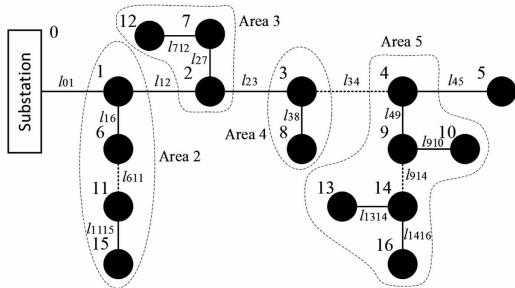


图 2 简化辐射状配电网

图 2 中定义每条线路路径参数为 $L_{i,j}$, 且 i 和 j 分别对应该线路首尾相连的分段开关。若从主干分支角度划分图 2, 其可划分为 Area 2—Area 5 及由剩余部分所组成的区域 Area 1。

考虑到现场站点对彼此之间路径存在部分不可达或距离任意性,且现场多以实际线路为巡查对象,因此不作特殊说明,后续模型构建与数值分析均假定巡线路径为待巡查线路。基于此,单小队巡线模式下,考虑主干分支将仅排查一次,而不同于主干分支的剩余子分支,排查次数将为两次。当然,含有多分叉的各子分支亦可按照类似于此方式的递归排查。此外,子分支辨识可以采用深度优先搜索算法 (depth - first search algorithm, DFS)。在此基础上,

故障排查巡线数学模型的构建将比较直观,如式(1)所示。

$$l_m + 2 \sum_{i \in \Omega_b} l_i \quad (1)$$

式中: l_m 为主干支的路径长度; l_i 为第 i 个子分支的总路径长度; Ω_b 为子分支区域集合,如图 2 中 Area 2—Area 5。

若定义图 2 各分支集合总长度为 l_s ,则式(1)可改写为 $l_m + 2(l_s - l_m)$,亦即 $2l_s - l_m$ 。结合故障巡线排查最佳的设想,则目标函数 F 可被定义为

$$F = \min(2l_s - l_m) \quad (2)$$

式中,可调整参数显然仅为 l_m ,因此 F 最佳显然为 l_m 最大,即主干分支总长度最长。若从数学对偶的角度,最大寻优亦即搜寻最小的目标,故式(2)可进一步改写为

$$F = \max l_m \quad (3)$$

相比式(2),目标函数式(3)更为简洁直观。简化后寻优模型,应用于小规模配电网时甚至可直接给出最佳排查巡线路径,且相比智能算法获取的排查路径,效果亦更加稳定。如对于图 2,若可确定主干分支为集合 $\Omega_m = \{l_{01}, l_{12}, l_{23}, l_{34}, l_{45}\}$,则 $l_m = \sum_{i \in \Omega_m} \Omega_i$ 。此时,显然单小队模式下的故障排查巡线路径最佳结果为 $2l_s - l_m$ 。因此,上述问题将被转变为节点对之间最长路径的确定。

实际上,图论领域有关路径搜索算法,如 Floyd、Bellman-Ford 和 Dijkstra 等^[18],多倾向于研究网络最短路径。为便于结合图论最短路径算法,式(3)对应的目标函数可转变为

$$F = \min(-l_m) \quad (4)$$

式(4)含义则为将网络各分支长度均取负的前提下,数学中最大问题可对偶成最小寻优的问题。在此基础上,式(4)寻优则是无向负权网络中寻找节点对最短路径问题。对于此问题,显然可以采取 Dijkstra 算法进行求解。相应地,此模型计算复杂度将为 $O(N^2)$, N 为节点总数。值得注意,目标函数从式(1)转换为式(4)均是基于网络划分子区域后逐步简化而得,因此最终计算各交叉子分支 l_i 时需要以相同转换思路递归类似求解。

1.2 双协同模式下故障巡线排查最优模型

科学高效的故障排查策略及任务分配的优化,有助于抢修决策的辅助、供电质量的提升和经济效益的增强。因此,如何在单小队模式的基础上,进一

步衍生更符合现场作业特点的双协同故障排查巡线模型,明显更具研究价值。不同于前者,双小队协同模式排查作业的目标,应能同时兼顾总排查路径最短和队间差异最小。总路径最短显然是多作业模式下排查效率提升的综合结果,而后者则是均衡队伍彼此间的分配任务量,即为出于“短板原理”的权衡与考量。

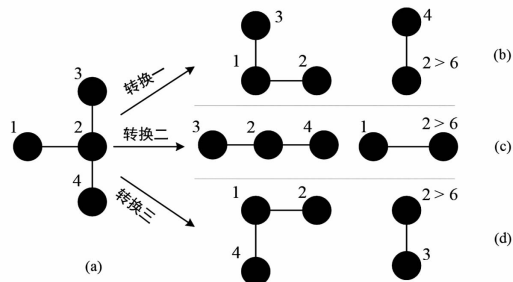


图 3 拓朴切割

为便于排查的连续性,双协同排查任务的分配需保证子任务路径的连通性。为满足此条件,此处将引入图论图切割方式,并通过各节点的节点度 $d_i \geq 2$ 作为划分标准,而不择取 $d_i = 1$ 的节点。原因在于其为末端节点,划分实质等价于未有效切割完整网络。

以图 3 拓朴切割示意图为例, $d_i \geq 2$ 的节点仅有节点 2(即 $d_i = 3$),而其切割方式则对应 3 种。切割后的图 3(b)至图 3(d)中右半部分的节点 2 均依顺序编号方式调整为 6,以便于后续描述。在此基础上,划分后的两连通子图则可采用第 1.1 小节所构建的单小队排查巡线模型,获取各自巡线目标函数,即 $F_1 = \min(-l_{m,i1})$ 和 $F_2 = \min(-l_{m,i2})$,其中 $l_{m,i1}$ 和 $l_{m,i2}$ 分别为两个子任务下子图主干分支路径长度。依据 F_1 和 F_2 ,并结合各子图子分支 l_m 和 l_n ,且 $m \in \Omega_{b1}, n \in \Omega_{b2}$, Ω_{b1} 和 Ω_{b2} 分别为两子图子分支集合,则可进一步采用式(1)获取各子任务的最佳巡线路径长度,分别定义为 F_3 和 F_4 。

通过 F_3 和 F_4 ,可构造出协同模式所需的双目标函数,具体为

$$\begin{cases} \min F_5 = F_3 + F_4 \\ \min F_6 = |F_3 - F_4| \end{cases} \quad (5)$$

式中, F_3 和 F_4 分别为双协同模式下,排查路径总长度最小和队间任务分配量最均衡。

值得注意,双目标函数通常可以多目标寻优相关算法求解,如非支配排序遗传算法 II(non-domi-

nated sorted genetic algorithm II, NSGA - II)^[19]。求解过程有赖于 Pareto 前沿曲线的构建,而其结果则是该曲线所反映双重目标之间的折衷解。折衷原因在于改进任何目标函数的同时难以兼顾不削弱至少一个其他目标函数。考虑目标函数式(5),Pareto 前沿曲线显然是离散的,而有趣的是该曲线表征为类 Pareto 形式,即呈现如图 4 的分布特点。原因具体在于,当 F_5 最优的前提下, F_6 存在多解,而此现象主要源于部分节点存在多种撕裂可能性。结合图 4 可得知,最佳巡线排查方案应为与坐标 (F'_1, F'_2) 对应点,亦即最终搜寻目标。

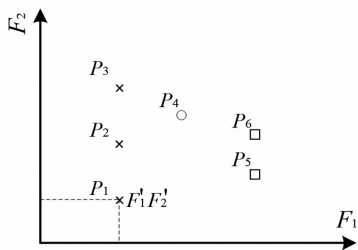


图 4 类 Pareto 前沿

2 适应多模式下故障巡线模型的求解流程

单/双协同模式下故障排查巡线模型之间差异,主要在于现场人员参与和资源调配的不同。考虑双协同模式,既是对传统排查巡线模式的延伸,亦是对复杂工况的高效适应。但正如第 1.2 节所讨论,双协同模式的排查作业最终可转化为单小队排查的两次调用,只是输入子图信息不同。

为兼容两种模式,融合两种故障巡线排查模型求解流程后的步骤如下所示:

1) 输入配电网拓扑相邻信息,形成邻接矩阵 K 、节点参数集合 H 、线路长度集合 L ,并逐一将长度取负和单/双协同模式标识 Flag。

2) 若 $\text{Flag} = 0$,则执行步骤 3;反之,转至步骤 6。

3) 依据 K 和 L ,以 Dijkstra 获取节点对最短路径,并将该链表记作 l_m ,即主干分支。

4) 结合 l_m ,获取 $d_i \geq 2$ 的节点,记作集合 N_1 后遍历其各成员 $m \in N_1$,并进行如下操作:

(1) 孤立节点 m : 即 $\forall p \in l_m$,令 $K_{m,p} = K_{p,m} = 0$;

(2) 分支辨识:根据孤立节点中 K ,计算节点 m 节点度后,以 DFS 辨识 m 所含子分支,记作集合 Ω_b 。

5) 结合 l_m 、 Ω_b 、 $m \in N_1$ 和 L ,利用式(1)计算故障排查路径最佳长度后结束。

6) 据 H 获取 $d_i \geq 2$ 的节点,记作集合 N_2 后遍历其各成员 $n \in N_2$,并进行如下操作:

(1) 以类似于图 3 的组合方式,从节点 n 将原始拓扑拆分为两子图,记作 $G = \{G_1, G_2\}$;

(2) 对 G 成员,分别执行步骤 3 至步骤 5;

(3) 据式(5)分别获取与 n 对应的多种排查方案,记作 $F_n = \{(F_{5,n1}, F_{6,n1}), \dots, (F_{5,nk}, F_{6,nk})\}$,其中 k 表征节点 n 撕裂方案索引。

7) 汇总步骤 6 所得方案为 $F_n, n \in N_2$ 后,据此构建类 Pareto 曲线,从中择取巡线最佳方案后结束程序。

3 算例仿真

为便于阐述所述方案,修改后的 IEEE 33 - Bus 系统将首先作为示例。该系统网络结构及线路参数分别如图 5 和表 1 所示。值得注意,此处修正后的 IEEE 33 - Bus 系统为依据配置在作为与其他馈线段联络的边界节点 S1、18、22 和 25 处的各类配电自动化终端,抽离出的待进一步巡线排查的完整故障区段。依据第 1 章,可对修正的 IEEE 33 - Bus 系统分别构建单/双协同模式的故障巡线排查模型。

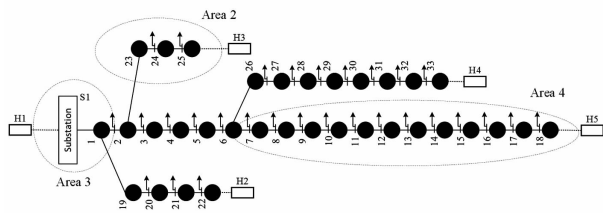


图 5 修正后 IEEE 33 - Bus 简化系统

出于对比基准考量,单小队作业排查模型将被优先分析。在根据第 1 章方法对表 1 中线路长度取负后,结合 Dijkstra 可辨识该系统最短路径,即最大主干链表 l_m 由三部分所构成,分别为 $\{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 、 $\{1, 19, 20, 21, 22\}$ 和 $\{6, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33\}$,即除 Area 2—Area 4 外剩余部分组成。进一步,由 l_m 和 DFS 算法,可识别出该系统子分支集合 Ω_b ,规模共计三部分,分别对应图 5 中 Area 2—Area 4。由 l_m 、 Ω_b 和目标函数式(1),可得知巡线排查最佳路径为沿 l_m 排查一次,每逢交叉点顺子分支,即 Ω_b 成员排

查两次,而最终巡线排查总长度 $l_m + 2 \sum_{i \in \Omega_b} l_i$ 则为 110.68 km。

表 1 IEEE 33 - Bus 系统线路参数

线路	长度/km	线路	长度/km	线路	长度/km
S1 - 1	4.00	11 - 12	0.54	2 - 23	1.00
1 - 2	3.00	12 - 13	0.50	23 - 24	2.50
2 - 3	2.50	13 - 14	0.50	24 - 25	2.00
3 - 4	1.00	14 - 15	1.00	6 - 26	5.00
4 - 5	2.00	15 - 16	0.50	26 - 27	6.00
5 - 6	1.00	16 - 17	0.60	27 - 28	7.00
6 - 7	2.00	17 - 18	0.80	28 - 29	8.00
7 - 8	1.00	1 - 19	1.00	29 - 30	6.50
8 - 9	1.00	19 - 20	2.50	30 - 31	7.50
9 - 10	0.45	20 - 21	3.70	31 - 32	6.00
10 - 11	0.65	21 - 22	3.40	32 - 33	6.50

为兼顾排查路径总长度最小和队间任务分配量最均衡,采用第 1 章所提方法构建关于图 5 相一致的双协同模式排查巡线模型。依据该模型,可以绘制其巡线模型寻优结果的类 Pareto 曲线,如图 6 所示。由图 6 可得知,排查方案 F_n 共有 35 种结果。仅以 F_5 和 F_6 单一目标而论,最佳排查路径总长度及最小长度差异分别为 101.14 km 和 3.86 km,但是两个目标最优并不全都体现于同一方案。换言之,同时兼顾优化两目标至 101.14 km 和 3.86 km 的最佳方案数量仅有一个,且两个子任务巡查路径总长度分别为 48.64 km 和 52.50 km。为验证方案的有效性,此处也将给出 F_5 和 F_6 寻优空间的上下限,分别为 $[101.14, 110.68]$ 和 $[3.86, 108.28]$,显然所提双协同模式故障排查巡线模型最佳。

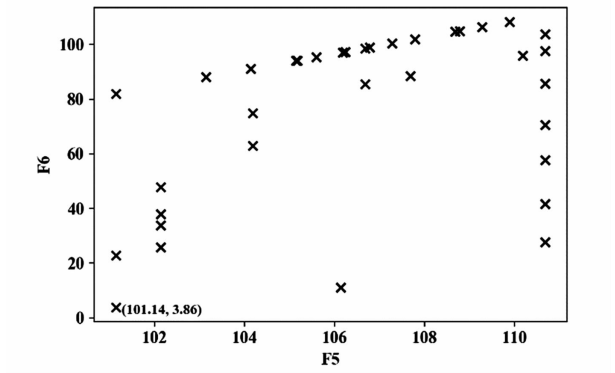


图 6 类 Pareto 前沿

为便于理解,其任务分配方案如图 7 所示。即子任务 2 负责 Area 2,剩余部分即为子任务 1。协同划分两个子任务排查路径集合分别为:

1)子任务 1

主链表 $l_m : \{1, 19, 20, 21, 22\}$ 。

节点 1 - 18 所构成集合,子分支:分支 1 为 $\{1,$

34 $\}$;分支 2 为 $\{2, 23, 24, 25\}$ 。

2)子任务 2

仅有主链表 $l_m : \{6, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33\}$ 。

对比单小队作业模式,任务量将被优化减少了近 8.62%,即 9.54 km,由此说明双协同作业模式除了有助于满足预想的多队并行模式提升排查效率,也可在适宜站点进行任务的切割分配时,有利于削减整体的巡线任务量。

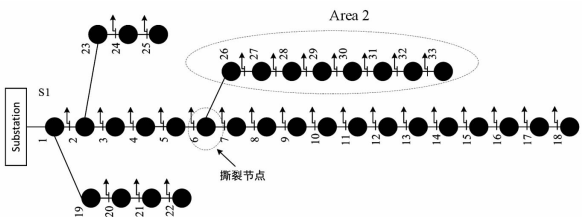


图 7 协同作业分配

进一步,以四川某地区实际系统为例,验证所提单/双协同模式下故障排查巡线理论最优模型的有效性。该系统节点总数为 55 个,包含熔断器、分支线和馈线段多个断路器和设备。应用所提方法可得到如表 2 所示的 3 种方案。

表 2 某实际系统双小队巡线方案 单位:km

方案	A 小队	B 小队	Min F5	Min F6
1	60	28	88	32
2	52	46	98	6
3	60	28	88	32

结合表 2 可知,仅考虑巡线路径总长度最短时,方案 1 和方案 3 为最终优选方案;反之,若仅侧重于小队巡线差异最短时,最佳方案为方案 2,小队巡线差异仅差别 6 km。若需同时兼顾目标 F5 和 F6,则方案 1 和方案 3 将是最终的巡线方案,巡线总长度为 88 km,可提升最终的巡线效率。

4 结 语

上面提出了一种单/双协同模式下故障排查巡线规划理论最优模型,并对算例进行了仿真验证。

1)相比基于智能算法排查作业模式,所提单模式巡线模型更趋于解析解,不存在收敛发散或不一致的问题,且巡线效果更优。

2)在单模式下衍生的双协同故障排查巡线模型,在满足双队协同总排查任务量最小的同时,亦兼顾队间分配任务量的最佳均衡,可助于提升巡线排

查故障的作业效率。

所开展的工作,均是以配电网辐射状运行为基础,即所提单/双协同模式下故障排查巡线规划理论模型均是依赖于配电网自身呈辐射状供电运行方式的特点。而实际输电线路也存在着巡线巡检的排查效率问题,且其采用不同于低压配电网的网状运行方式。此外,输电线路巡线巡检也面临着分布点广、地形复杂和冰灾、水灾等自然灾害等诸多困难,依赖于人工排查的传统方式,存在着成本高、困难大、风险大等问题。而目前电力无人机电力巡线将为此提供一种高效替代方案,因此后续将无人机巡线方案的设计作为研究重点,以期为其高效排查提供导向指引。

参考文献

[1] 王倩,吕林. 快速排序的 Dijkstra 算法在配网抢修路径中的应用[J]. 四川电力技术,2008,31(2):30-31.

[2] 杨丽君,张晶,程慧琳,等. 基于最优效用的配电网多故障抢修任务分配策略[J]. 电工技术学报,2014,29(6):263-270.

[3] 杨丽君,吕雪姣,李丹,等. 基于多代理系统的主动配电网多故障动态修复策略研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(23):6855-6865.

[4] 徐丙垠,李天友,薛永端. 配电网继电保护与自动化[M]. 北京:中国电力出版社,2017.

[5] 翁蓝天,刘开培,刘晓莉,等. 复杂配电网故障定位的链表法[J]. 电工技术学报,2009,24(5):190-196.

[6] 梅念,石东源,李银红,等. 计及信息畸变影响的电网故障诊断分级优化方法[J]. 电工技术学报,2009,24(9):178-185.

[7] 蒋燕君,姜建国,乔树通. 采用本质多目标进化算法的舰船电网故障智能恢复决策[J]. 中国电机工程学报,2011,31(31):118-124.

[8] 黄靖,张晓锋,叶志浩. 基于多智能体的船舶综合电力系统故障恢复方法[J]. 中国电机工程学报,

2011,31(13):71-78.

[9] 张晶伟,张粒子,黄弦超. 基于遗传拓扑混合算法的配电网多故障抢修策略[J]. 电力系统自动化,2008,32(22):32-35.

[10] 卢志刚,孙卜,刘照拯,等. 基于改进离散多目标 BCC 算法的配电网灾后抢修策略[J]. 电力系统自动化,2011,35(11):55-59.

[11] 刘健,倪建立,杜宇. 配电网故障区段判断和隔离的统一矩阵算法[J]. 电力系统自动化,1999,23(1):31-33.

[12] 王飞,孙莹. 配电网故障定位的改进矩阵算法[J]. 电力系统自动化,2003,27(24):45-46.

[13] 郭壮志,陈波,刘灿萍,等. 基于遗传算法的配电网故障定位[J]. 电网技术,2007,31(11):88-92.

[14] 郭壮志,吴杰康. 配电网故障区间定位的仿电磁学算法[J]. 中国电机工程学报,2010,30(13):34-40.

[15] 陈歆技,丁同奎,张钊. 蚁群算法在配电网故障定位中的应用[J]. 电力系统自动化,2006,30(5):74-77.

[16] 束洪春,孙向飞,于继来. 粗糙集理论在电力系统中的应用[J]. 电力系统自动化,2004,28(3):90-95.

[17] 王英英,罗毅,涂光瑜. 基于贝叶斯公式的似然比形式的配电网故障定位方法[J]. 电力系统自动化,2005,29(19):54-57.

[18] 李佩杰,刘乾,白晓清,等. 一种基于有向图的配电网故障定位方法[J]. 现代电力,2016,33(1):60-68.

[19] Chan TM. More Algorithms for All-pairs Shortest Paths in Weighted Graphs[J]. SIAM Journal on Computing, 2010, 39(5): 2075-89.

[20] Singh, U., Singh, N. Optimal Feature Selection via NSGA-II for Power Quality Disturbances Classification [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 14(7): 2994-3002.

作者简介:

苏学能(1991),男,博士研究生,工程师,从事配电自动化研究工作。

(收稿日期:2020-08-05)

(上接第 8 页)

[11] 牛家红,樊昌周,李宏伟,等. 四分法和差分相干结合的北斗弱信号捕获算法 [J]. 电子科技,2015,28(9):11-15.

[12] Ding Shaowei, Chen Huawei. A Localization Approach for Multiple Sound Sources via An Expectation Maximization Algorithm Using Differential Microphone Arrays [J]. Chinese Journal of Acoustics, 2019, 36(4): 454-472.

[13] Mehrdad Shahmohammadi Beni, D. Krstic, D. Nikezic, et al. Studies on Unfolding Energy Spectra of Neutrons Using Maximum-likelihood Expectation-maximization

Method[J]. Nuclear Science and Techniques, 2019, 30(9):134-43.

作者简介:

邱 焯(1986),男,工程师,工学学士,主要从事地区高压输电线路运维管理工作;

彭红刚(1985),男,工程师,工学学士,主要从事地区高压输电线路运维管理工作;

王牧浪(1994),男,助理工程师,工学学士,主要从事地区高压输电线路运维管理工作。

(收稿日期:2020-07-23)

输电线路山火雷达实时监测技术及应用研究

李 江¹, 曹永兴², 朱 军², 罗东辉²

(1. 四川省资阳市公安局, 四川 资阳 641300;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

摘 要:输电线路山火灾害的监测是线路运维中的重难点问题,提出及时、有效的输电线路山火监测技术可以帮助提高运维效率。雷达遥测技术具有监测范围广、精度高、方便维护等优势。为了挖掘雷达在重要输电通道遥测领域的重大潜力,研发了基于 Ka 波段雷达的输电线路山火实时监测装置,并进行工程实测及应用。实测结果表明,研发建造的输电线路山火雷达实时监测装置可以快速、准确地对火灾目标进行监测,满足工程精度需求,具备工程应用可行性。

关键词:雷达; 山火; 监测; 工程应用

中图分类号:TM93 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2021)01-0053-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210112

Research on Real-time Radar Monitoring Technology and Its Application to Forest Fire Around Transmission Line

Li Jiang¹, Cao Yongxing², Zhu Jun², Luo Donghui²

(1. Ziyang Public Security Bureau of Sichuan, Ziyang 641300, Sichuan, China;

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

Abstract: The monitoring of forest fire around transmission line is always one of the difficult problems in line operation and maintenance. The new technology of timely and effective forest fire monitoring is proposed to improve the efficiency of line operation and maintenance. Radar telemetry technology has the advantages of wide monitoring range, high precision and convenient maintenance. In order to analyze the great potential of radar in the telemetry field of important transmission lines, a real-time monitoring device of forest fire for transmission line based on Ka band radar is developed, and the project measurement and application are carried out. The measured results show that the real-time radar monitoring device of forest fire for transmission line can quickly and accurately monitor the fire target, meet the engineering accuracy requirements, and have engineering application feasibility.

Key words: radar; forest fire; monitoring; engineering application

0 引 言

输电线路因其运行的长期性和跨越区域的广泛性,而容易遭到外力破坏,山火就是其中的重要因素之一^[1-3]。输电线路山火灾害的特点主要包括其发生随机性、突然性以及可以快速造成极大的损失。及时监测到山火并进行实时预警,是输电线路预防山火灾害的迫切需求。

针对输电线路山火灾害监测,近年来出现了无人机巡航、卫星遥感、火灾探测器探测以及图像类在

线监测等新型山火监测技术的研究和应用^[4-6],然而受限于技术形式和沿线环境的影响,传统监测方法在山火趋势预判、火灾判定准确度以及小范围、初期火情的预警问题上仍存在一定的问

题。相较而言,基于热能多谱监测雷达的输电线路山火监测技术,无需人工实时监测,减少了人力成本^[7-10];和红外技术相比,探测范围更广,并且降低了误报率,而且探测精度和探测实时性更强,更利于对火灾初起的发现以及火势发展趋势的预判。

因此,根据山火特征情况,结合国家电网 GIS 信息平台查询获取输电走廊周边地形地貌数据,设计

研发基于 Ka 波段小型雷达的输电线路山火监测系统,探究其工程应用技术,并在实际工程中进行试点安装与实测。

1 山火雷达回波识别

雷达对物体的探测主要依托物体反射的雷达回波变化情况。火焰的组成含有极多电子、离子以及中性粒子,与周围常规物体的雷达回波存在显著差异。而且火灾烟尘的物理特性也与周围物质不同,会对雷达回波造成一定影响。因此,基于雷达探测可以实现对山火情况的探测。

基于山火回波以及输电线路周边物体特性,选择毫米波雷达用于山火探测系统研发,为了验证毫米波雷达对山火烟尘监测的有效性,开展了山火雷达回波识别试验。

首先,架设 16G 和 24G 毫米波雷达采集地物杂波;接着,分两次点燃柴火堆并采集数据;最后,灭火后继续采集数据。图 1 所示为点火前试验场地及采集到的背景雷达回波;图 2 所示为点火后采集的雷达回波数据波动情况。

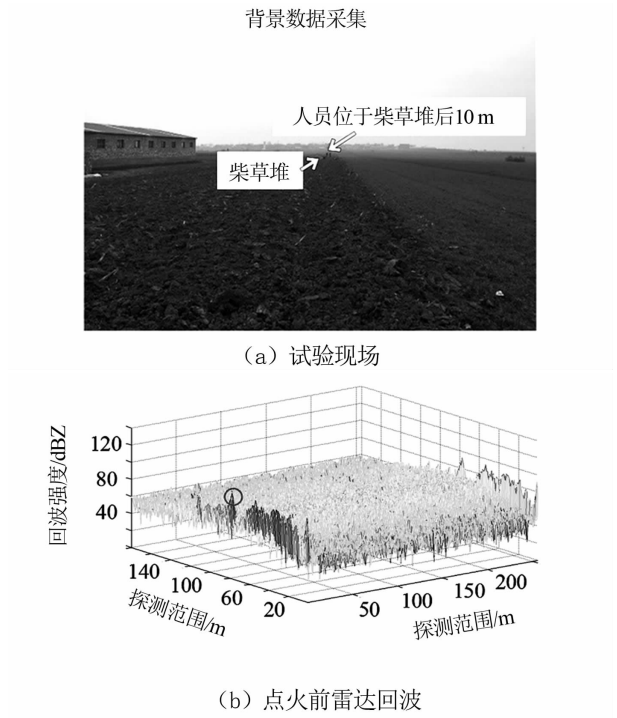
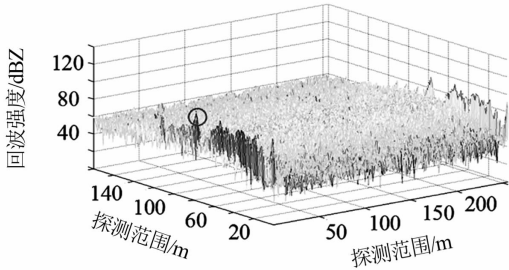


图 1 试验现场照片及点火前雷达回波

分析雷达回波数据发现,雷达回波相对于地物杂波扰动范围有 20% ~ 30% 的增幅。同时,在柴火堆邻近距离单元的雷达回波和地物杂波相比,也有



(a) 火焰烟尘



(b) 点火后雷达回波

图 2 火焰烟尘照片及点火后雷达回波

一定的扰动范围增幅现象,说明火焰燃烧过程中产生的烟尘随风有小范围移动,可以作为山火识别的一个判别依据。

1.1 预测评估的核心思路

针对现有技术对山火趋势预测评估能力不足以及误报率较高等问题,提出一种结合国网 GIS 信息平台、小型雷达与线路传感器的山火发展趋势预测方法。该方法在复杂的环境中,利用由广域到近区的花情数据较准确地进行山火发展趋势预测,保证电网的安全运行,包括以下几个步骤:

- 1) 结合输电线路走廊情况,进行小型雷达及微气象传感器的布置及安装;
- 2) 从国网 GIS 信息平台查询山火周边输电走廊地形地貌数据;
- 3) 设置一个时间间隔 Δt ,以时间间隔为单位实时提取气象数据,传回后缓存入数据库;
- 4) 分析小型雷达扫描数据,利用小型雷达进行实时火情监测;
- 5) 结合山火发展趋势模拟算法进行走廊周边山火趋势预测;
- 6) 将小型雷达广域气象监测数据对山火下阶段的发展趋势进行辅助决策。

所设计的输电线路山火发展趋势预测流程如图 3 所示。

1.2 主要参数指标

基于山火回波尺度较小、回波较弱、回波整

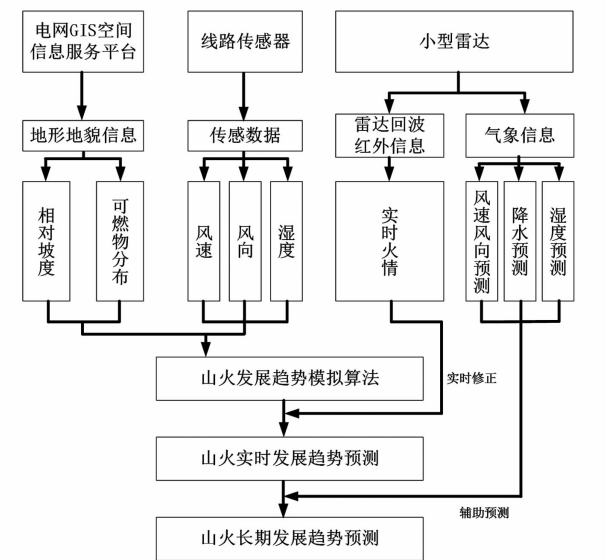


图 3 输电线路山火发展趋势预测流程

体一般不会移动(以扩散形式发展)、接地、垂直高度一般小于 4.5 km 等特性,选定了如表 1 所示的系统参数指标。

表 1 主要参数指标

类别	名称	参数
主要功能	控制方式	固定式遥控
	技术体制	全固态脉冲多普勒
探测范围	工作频率	35 GHz
	探测距离	570 m ~ 15 km
	方位扫描	0 ~ 360°
	仰角扫描	0 ~ 180°
	扫描速度	0 ~ 24°/s
分辨率	距离	30 m(0.2 μs)
		150 m(1 μs)
		300 m(2 μs)
无线系统	方位、俯仰	≤ 0.1°
		直径
		1500 mm
馈线系统	波导驻波比	≥ 52 dB
		馈线损耗
		≤ 0.42°
收发系统	输出射频脉冲功率	≥ 100 W
		脉冲重复频率
		300 ~ 10 000 Hz
双光谱相机系统	瞬时线性动态范围	≥ 80 dB
		探测器分辨率
		336 × 256
	灵敏度	≤ 25 mk
		总像素
		200 万

1.3 监测系统组成

整机固定式雷达由天线装置和终端工控机等组

成。其中天线装置主要由反射体、摄像机、俯仰箱以及支臂和基座等。图 4 为天线装置结构示意图。图 5 为雷达监测系统采用的摄像装置示意图。

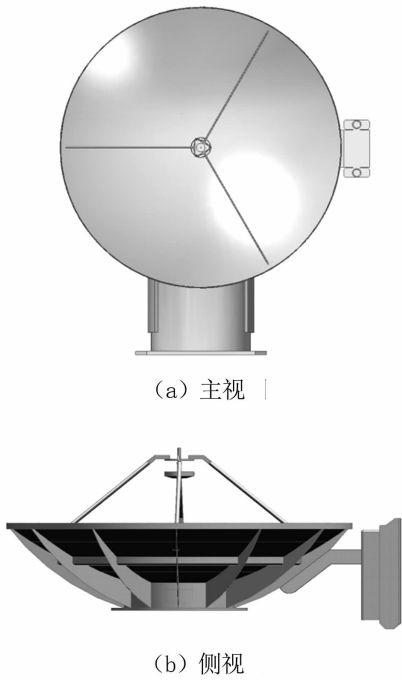


图 4 雷达监测系统采用的天线装置

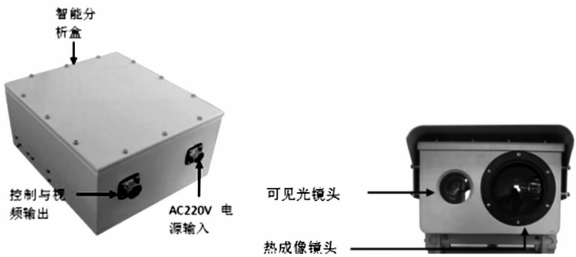


图 5 雷达监测系统采用的摄像装置

2 山火雷达监测系统的工程应用

2.1 工程选址及准备

山火雷达监测系统选址可优先考虑以下 3 个方面:1)重要输电通道热能多谱山火监测预警雷达(Ka 波段)应考虑山火频发区域,雷达所选站点与重点关注线路的直线距离不超过 10 km。2)选址应避开洪水、泥石流、山体滑坡以及地质断裂结构等不利因素较多的地区。3)选择遮蔽角以及净空条件适宜地区,避免遮挡监测视角。在工程安装地址初步确定后,需对该地进行实地测量并绘制环境平面图。

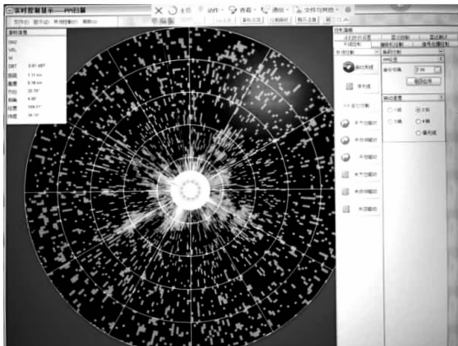
2.2 试点工程试验案例

基于上述研究及结果,设计建造了热能多谱毫

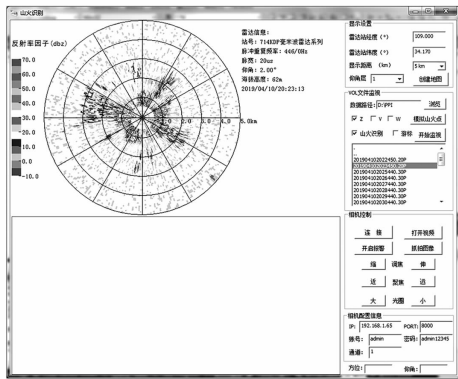
米波雷达装置并进行了试点工程实测试验,图 6 为雷达监测装置。



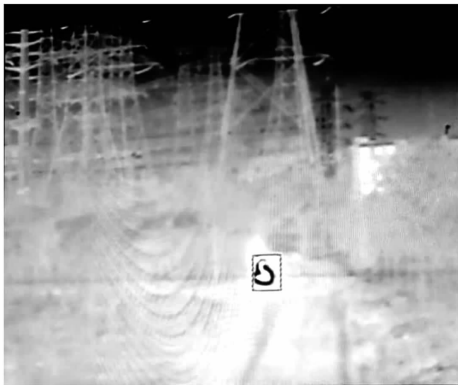
图 6 雷达监测装置现场安装运行



(a) 山火雷达实时显示软件

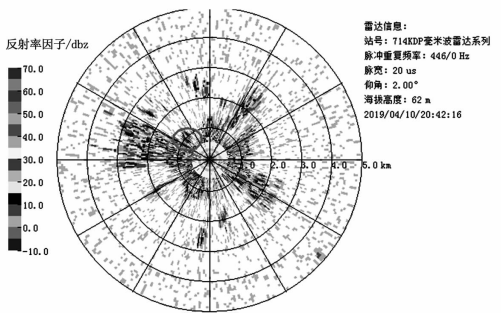


(b) 山火雷达输出结果界面

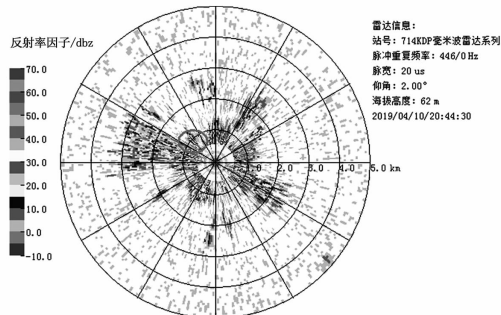


(c) 光学摄像输出结果界面

图 7 雷达监测系统监测界面



(a) 20:42:16



(b) 20:44:30

图 8 2°仰角火点监测结果

设备建设安装完成后,于晚间 20:37—21:30 进行了人工放火毫米波雷达监测试验。试验前期,对山火雷达整机进行组装,20:20 山火雷达开机后,实时显示软件正常运行,并能捕捉周边地物情况,说明山火雷达整机系统工作正常,满足预期效果,图 7 为系统实时监测界面。

火点试验预设地点距离山火雷达 1 ~ 1.5 km,方位为 315°左右(雷达正北方向为 0°),点火前雷达监测结果如图 7(b) 所示。其中,20:23 为雷达刚开启阶段,还没有进行点火。因此,图 7(b) 中方位 315°、1 km 左右的回波强度较小,此为雷达噪声,其余回波均为地物回波,探测无预警发出。

1) 2°仰角火点监测试验

图 8(a) 和(b) 所示分别为 20:42:16 和 20:44:30 雷达监测人工点火试验阶段结果,雷达天线仰角为 2°。因此,图 8 中方位 315°、1 km 左右出现了回波,面积为 2.0 m²左右(共有 6 个有效监测点)且强度值大于 20 dBZ 回波区域,其他回波面积和大小保持不变。因此,新增的回波疑似为火点回波。

2) 5°仰角火点监测试验

图 9(a) 和(b) 所示分别为 20:45:18 和 20:51:28 雷达监测人工点火试验阶段结果,雷达天线仰角为 5°。因此,图 9 中方位 315°、1 km 左右出现了较强的回波区域,回波面积约为 2.7 m²(共有 9 个有效

监测点),其他回波面积和大小保持不变,为疑似火点。回波较强主要是由于天线仰角变高,探测到的烟尘颗粒造成。

3)8°仰角火点监测试验

图 10 所示为 20:53:40 雷达监测人工点火试验阶段结果,雷达天线仰角为 8°。因此,图 10 中方位 315°、1 km 左右,由于仰角增大、探测高度增加、由火势扩散等因素造成的影响减小,高强度回波区域消失。

试验过程中红外相机通过与雷达天气的绑定,并随天线一起转动。相机能准确地进行火点预警。

大致发生的方位,但无法获取火点的面积和距离。毫米波雷达在确定方位的情况下,结合识别算法,能有效地监测疑似火点发生的具体方位和距离(根据雷达位置能得出具体的地理位置)以及火点发生的面积。

因此,联合红外相机和毫米波山火雷达,能准确识别、监测及预警火点,同时通过毫米波雷达显示的回波可得到火点较为准确的面积、距离和地理位置,可以对火点发生全过程进行有效的监测。

参考文献

[1] 陆佳政,周特军,吴传平,等. 某省级电网 220 kV 及以上输电线路故障统计与分析[J]. 高电压技术,2016,42(1):200-207.

[2] 蔡展强. 输电线路“六防”在线路初步设计中的应用研究[J]. 通讯世界,2017(23):248-249.

[3] 舒胜文,张深寿,许军,等. 基于新一代天气雷达组网监测的输电线路山火自动识别算法研究[J]. 中国电机工程学报,2020,40(13):4200-4210.

[4] 周游,隋三义,陈洁,等. 基于 Himawari-8 静止气象卫星的输电线路山火监测与告警技术[J]. 高电压技术,2020,46(7):2561-2569.

[5] 周特军,李波,谭艳军,等. 输电线路山火无人机监测与灭火技术研究[J]. 消防科学与技术,2020,39(2):239-242.

[6] 刘宏,王天正,张海,等. 基于毫米波雷达山火监测技术研究[J]. 武汉大学学报(工学版),2020,53(1):72-80.

[7] 吴永利,林洪文. 新一代气象雷达回波探测在输电线路防山火中的应用[J]. 电气工程学报,2019,14(1):30-34.

[8] 王天正,亢银柱,刘宏,等. 基于毫米波雷达的输电走廊山火监测研究[J]. 科技通报,2018,34(11):178-182.

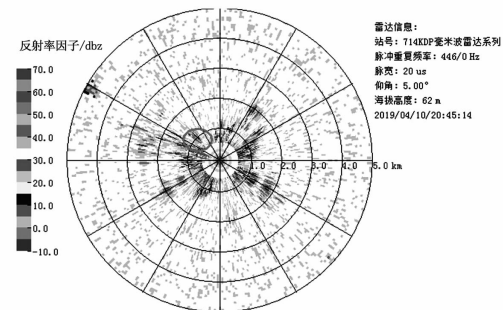
[9] 赖世祺,吴凡,吴永利,等. 基于气象雷达识别的输电线路山火预警系统[J]. 电气应用,2017,36(16):63-67.

[10] 全浩,黄学能,罗朝宇,等. 输电线路山火光谱雷达监测系统的实现与应用[J]. 广西电力,2015,38(4):67-71.

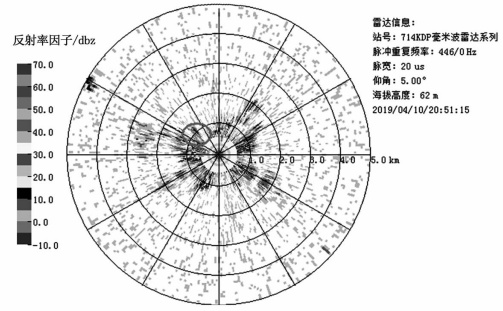
作者简介:

李江(1963),男,学士,主要研究方向为极端条件下(包括战时)雷达设备的通信保障技术以及面向民用设施防外力破坏的雷达监测与预警技术。

(收稿日期:2020-10-10)



(a) 20:45:18



(b) 20:51:28

图 9 5°仰角火点监测结果

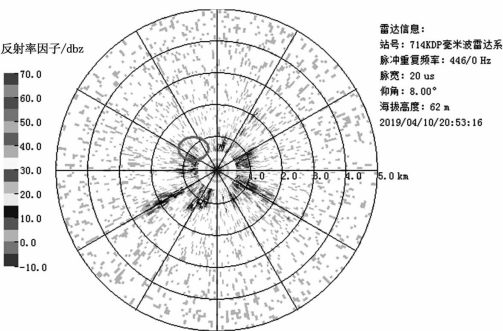


图 10 8°仰角 20:53:40 时火点监测结果

3 结 语

通过相机的红外功能可以准确地判别火点及其

基于 HPLC 在智能电网数据采集中的应用探讨

柯海波

(国网攀枝花供电公司,四川 攀枝花 617000)

摘 要:高速电力线载波通信(HPLC)技术是一种利用电力线作为通信介质进行数据传输的高速电力线通信技术。随着国家电网公司不断扩展的业务需求,基于 HPLC 的高级应用试点以满足国家电网公司快速增长的通信数据需求。HPLC 智能电能表能够具备分钟级数据采集功能,可实现居民用电负荷、电量的实时监测,可广泛应用于任何通过电力线进行高速数据传输的场合,如远程抄表、智能家居、智能楼宇、远程监控、物联网、充电桩及路灯控制等。将 HPLC 基本原理、优势及衍生出的多种深层次的功能应用作为研究重点,深入挖掘用电数据,为居民和企业更好地实施需求侧管理、有序用电提供依据。

关键词:HPLC;高速数据传输;智能电能表;载波通信

中图分类号:TM732 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2021)01-0058-04

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210113

Application of HPLC to Data Acquisition in Smart Power Grid

Ke Haibo

(State Grid Panzhihua Electric Power Supply Company, Panzhihua 617000, Sichuan, China)

Abstract:HPLC (high speed power line carrier communication) technology is a kind of high-speed power line communication technology which uses power line as communication medium for data transmission. Based on the expanding business needs of State Grid, cities all over the country are actively carrying out advanced application pilot based on HPLC to meet the rapid growth of communication data demand of State Grid. The smart electricity meters of HPLC have the function of minute level data acquisition, which can realize real-time monitoring of residents' electric load and electric quantity. It can be widely used in any occasion of high-speed data transfer through power line, such as remote meter reading, smart home, intelligent building, remote monitoring, the Internet of things, charging pile and street lamp control, etc. The basic principles, advantages and derived functions of HPLC are the emphases for research, and the power consumption data are deeply excavated, which can provide the basis for residents and enterprises to better implement DSM and orderly power consumption.

Key words:HPLC; high speed data transmission; smart electricity meter; carrier communication

0 引 言

近年来,随着人工智能、物联网及通信技术的高速发展,用电信息采集不断地为多系统、多专业提供数据和应用支撑,采集数据类型不断增多,数据采集频率和采集速率要求也越来越高,前期使用的窄带载波通信速率慢、路由变化慢、易受干扰、组网进程慢、只能完成抄读日冻结数据、业务单一等问题凸显严重^[1]。为满足快速增长的通信数据需求,国家电网公司已全面推广高速电力线载波通信(high speed power line carrier comccnication,HPLC)新技术应用。

1 HPLC 技术简介

HPLC 技术是一种高速电力线通信技术,是指利用电力线作为通信介质进行数据传输的一种通信技术,采用了正交频分复用(orthogond frequency division multiplexing,OFDM)技术,相比于窄带载波技术,宽带载波技术有更宽的带宽、更强的抗干扰性、更高的通信速率、更多的业务承载能力以及更稳定的网络通信业务^[2]。

高速电力线载波网络是一种实时分布式路由网络,由周期性的信标覆盖整个网络,从而驱动所有节

点实现组网。主节点上电后,会开始发送信标帧,从节点根据主节点信标帧的频段,自适应选择工作频段发起入网请求。所有入网的节点都需要身份验证,称为白名单,只有在白名单的节点才被允许加入网络。入网动作全部由从节点主动发起,主节点进行确认。只有在网节点,才能进行数据业务通信。组网完成后,重要节点仍需要继续维持信标发送,并通过一定的周期网络维护和实时的通信成功率评估、变更路由网络。

2 基于 HPLC 在电能数据采集中的新型功能描述

基于 HPLC 技术,可实现模块互联互通、高频数据采集、停电主动上报、相位拓扑识别、台区自动识别等功能。

2.1 通信模块间互联互通

相对于窄带载波而言,HPLC 高速载波除了通信速率之外,其最大的一个功能就是实现了不同供应商的设备可以相互连接、相互通信,不会影响上层的应用业务,从而解决了窄带时期无法统一采购、统一调配、统一维护的问题。

2.2 电流电压高频数据采集与分析

HPLC 数据采集要求将采集频率从原来的 1 次/d,提升到 1 次/h、1 次/15 min(15 min 曲线),甚至 1 次/5 min(5 min 曲线)。利用 HPLC 通讯速率快的特点,可以有效提升智能电能表采集成功率并保证采集数据质量,同时利用高频数据采集的特性,可以实现对台区下每一用户的电能质量分析。通过对智能电能表电压、电流及电量曲线的大数据比对,可以分析出台区电能质量不合格用户的时间特性和空间特性,为线路和台区改造提供数据支撑。通过高密度的数据采集和大数据分析,还可以实现对用户智能用电和用电行为的分析,提供用能交互和用能增效的方案,进一步提高用电效率^[3]。

从 HPLC 通信角度,主要是提供并发通信的能力,以此来提升应用层通信速率。主要从两方面来并发:1)集中器与电能表之间不采用一问一答制,集中器可以同时抄读多个电能表;2)每帧 Q/GDW 1376.2—2013 协议可以包含多帧电能表协议。

2.3 台区停电主动上报

在 HPLC 子节点通信模块中(如电能表 STA、II

型采集器)配置超级电容,可实现低压户表停电。智能电能表断电后,通过 HPLC 通信单元在规定时间内将停电事件信息实时主动上报集中器并且在智能电能表复电后主动上报复电信息,集中器再上报给主站。主站可以根据上报的电能表停电信息,结合系统档案,及时准确地定位故障类型和故障位置,并通知技术服务人员前往排除故障。由被动抢修变为主动抢修,提高停电故障维修的准确性、及时性,提升客户服务保障能力。通过选取部分台区测试,更换 HPLC 模块后停电事件主动上报平均时长为 37 s,上报准确率可达到 100%。

2.4 台区电能表相位拓扑识别

若供电线路三相负荷不平衡,会增加台区电力线路的损耗,产生零序电流,影响电气设备的安全运行。轻则增加线路和配电变压器的功率损耗,出现局部过热,加速绝缘老化,降低设备寿命;重则会导致配电变电器或用户用电设备烧毁等严重后果。通过 HPLC 通信单元配备的过零检测电路,在正常入网、抄表过程中可实现电能表、采集器相位的智能识别,集中器通过本地通信单元获取电能表相位信息,为台区三相不平衡治理提供基础数据支撑。

基于大数据的相位识别功能:探索通过大数据的方式,分析出台区内节点间的拓扑关系及采集器下表计的相位信息;针对表计间拓扑关系的识别,由于下游节点的电流总和与上游关口节点的数据具有相关性,可以通过电流数据的高频采集进行相关分析;针对采集器下表计的相位识别,可以尝试用集中器的分相电压曲线与采集器下表计分相电压的变化趋势具有相关性的特点,通过电压数据的高频采集进行相关分析;针对台区内所有表计的相位及拓扑关系,可以分析计算台区及各个分支的线损数据,对各类窃电行为都可识别。

由此通过 HPLC 相位识别技术,可以实现自动识别台区电能表相位,提高台区用户电能表相位信息的准确性;能自动识别单相、三相电能表零火线接反,消除接线错误引起的安全隐患,降低安全风险;为台区分相负荷平衡、台区线损和分相线损的计算提供信息支撑,提高供电营销系统信息化、精益化管理水平^[4]。

2.5 台区户变关系自动识别

台区户变关系是保证台区线损计算正确的基本

要求之一,利用 HPLC 的台区自动识别技术,可以准确判断台区下智能电能表所属集中器,有效避免台区串户、跨台区抄表等,提高台区户变关系准确性,提高供电公司台区线损合格率。

台区户变关系识别主要用于电力用户台区归属、户变关系判断及相位识别,为梳理台区户变关系、线损分析和台区精细化管理提供真实、准确的基础数据。在日常线损管控中,通过采集成功率异常和线损合格率低的特征,在数据库中筛选问题台区进行台区识别业务,针对性地根据台区户变关系识别进行线损和采集消缺。

HPLC 通信模块实现台区户变关系自动识别,主要是利用不同台区、不同负荷导致的工频周期差异,通过比对全网络中节点的工频周期等数据,准确判断电能表的供电台区,给出准确可靠的台区归属,可有效辅助供电企业对计量自动化系统档案的管理,为线损治理、台区负载均衡提供准确的依据。

通过 HPLC 台区户变关系自动识别技术,可以解决由于台区归属关系混乱引起的台区抄表成功率低、台区线损计算不准确等问题;可以有效替代台区识别仪,甚至现场停电人工判定台区归属关系的方式,实现自动判定台区归属。

3 HPLC 在智能电网数据采集中的实践应用

HPLC 采用 OFDM 自适应调制方式、并发抄表技术,将给定信道分成若干相互正交的子信道,将高速数据转成并行低速子数据流,在每个子信道上进行调制,各子信道数据并行传输。正交信号可以通过在接收端采用相关技术来分开,减少子信道间的相互干扰,即使在信道受严重干扰时,也能够切换到抗干扰能力好、速率高的调制方式进行数据传输^[5]。

3.1 数据测试方法及场景说明

试点台区为高层小区,台区负荷较稳定,峰谷用电明显,每个台区变压器都是在单元楼地下室通过电缆进入电井入户,现场信号强度稳定且相当,台区台户关系正确,不存在跨台区抄表的情况。数据采集通过用电信息采集系统对单户数据进行点抄记录数据返回时间,取多户平均值测算数据采集平均响应时间。采集成功率分为日冻结

采集成功率和点抄一次采集成功率,均以台区为单位进行统计。日冻结采集成功率为用电信息采集系统制定抄表任务,对每日 0 时电能表冻结数据进行多次采集;最后,对台区下电能表数据采集情况进行统计,点抄一次采集成功率为通过用电信息采集系统手动对台区下所有电能表进行数据单次随机采集,统计电能表数据采集情况。台区线损为台区损耗电量与台区供入电量的比值,合格台区线损标准为 0% ~ 8% 的线损率。

3.2 测试结果分析

所选的攀枝花某高层小区包含 10 个供电台区,台区大小和供电范围相当,通过测试采集平均响应时间、台区数据采集成功率、台区线损合格率及停电上报和相位识别功能进行分析。现场测试数据如表 1 所示。

表 1 高层居民小区测试数据

测试地点	测试项目	测试模块	测试结果
攀枝花某高层居民小区	日冻结采集成功率/%	窄带载波模块	99.75
		HPLC 模块	100
	点抄一次采集成功率/%	窄带载波模块	83
		HPLC 模块	100
	抄表平均响应时间/s	窄带载波模块	3.38
		HPLC 模块	2.12
	停电电上报	窄带载波模块	采集失败
		HPLC 模块	功能良好
	相位识别	窄带载波模块	错误
		HPLC 模块	功能良好
	电流电压采集	窄带载波模块	采集失败
		HPLC 模块	功能良好
攀枝花某三供一业老旧改造小区	台区线损稳定性/%	窄带载波模块	99
		HPLC 模块	100

3.2.1 数据采集平均响应时间

通过对攀枝花某高层居民小区 10 个装有窄带载波模块的不同台区的 600 户进行系统数据采集测试,数据采集通道均经由集中器 4G 模块连接用电信息采集系统主站,窄带载波模块系统数据采集平均响应时间为 3.38 s,相同台区更换 HPLC 模块后系统数据采集平均响应时间为 2.12 s,数据采集平均响应数据提升 37.28%。

3.2.2 采集数据质量及成功率

选取攀枝花某高层居民小区 10 个台区,共计安

装的 600 块智能电能表进行测试。数据采集通道均经由集中器 4G 模块连接用电信息采集系统主站,在原窄带载波通信时,通过采集主站召测测试台区日冻结数据,平均一次采集成功率仅为 83%,电压、电流、停复电上报、相位识别等功能数据存在采集失败或错误。全部更换为 HPLC 通信模块后,平均一次采集成功率达到 100%,每个台区 2 min 内可以完成一次采集数据的召测,抄表成功率 100%,电压、电流、停复电上报、相位识别等功能应用良好。

3.2.3 台区线损合格率

选取攀枝花某三供一业老旧改造台区,结合用电信息采集系统抽取台区线损不合格台区 10 个,开展 HPLC 模块在台区线损中深化应用。在全部更换为 HPLC 通信模块后,台区采集成功率基本稳定在 100%,台区分相线损计算正常。结合用电信息采集系统 HPLC 深化应用数据分析判断,通过现场核实其中 3 个台区线损由不合格达到合格,3 个台区户变关系错误,1 个台区存在窃电情况。

4 结 语

综上所述,HPLC 技术能够提高实时性、通讯速率、抗干扰性、可靠性、安全性、稳定性。在建设坚强

(上接第 19 页)

- [12] Xiuyun Wang, Zhenyuan Lv, Rutian Wang, et al. Optimization Method and Stability Analysis of MMC Grid – connect Control System Based on Virtual Synchronous Generator Technology[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 182: 106209.
- [13] 肖芳磊. 中压柔性直流配电网过电压与绝缘配合方案研究[D]. 广州:华南理工大学, 2019.
- [14] 周浩, 沈扬, 李敏, 等. 舟山多端柔性直流输电工程换流站绝缘配合[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 879 – 890.
- [15] 李泓志, 吴文宣, 贺之渊, 等. 高压大容量柔性直流输电系统绝缘配合[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1903 – 1908.
- [16] 陈晴, 薛源, 王克, 等. 用于海上风电并网的柔性直流系统过电压和绝缘配合研究[J]. 高压电器, 2019, 55(4): 178 – 184.
- [17] 孙海峰, 郑陈达, 武晓明, 等. 柔性直流换流站宽频模型及雷电过电压计算[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 103 – 109.
- [18] 张宇凡. 某 35 kV 变电站雷电侵入波过电压分析及

智能电网过程中,能够保证实时、高效、安全、稳定、可靠的数据采集要求,有效提升台区采集成功率及台区线损合格率,满足台区下用户精细化管理、数字化管理、智能化管理的的要求,保证低压配电网安全稳定运行的水平,搭建用户与电网沟通桥梁,极大地满足了用电信息采集需求,实现智能电网的全面可持续发展。

参考文献

- [1] 伊玉云. 关于高速电力线载波(HPLC)技术的应用和探讨[J]. 华东科技(综合), 2019(10): 272.
- [2] 肖冬阳. 浅析高速电力线载波技术的采集终端信号加强方法[J]. 技术与市场, 2019, 26(7): 135 – 136.
- [3] 牛春霞. 电力用户用电信息采集[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [4] 吴朝阳, 张希刚, 陈炜. 基于宽带载波和物联网技术的低压集抄系统研究[J]. 电工技术, 2018(22): 63 – 64.
- [5] 邱志辉, 伍栋文, 刘水, 等. 基于 HPLC 通信模块的智能电表深化应用研究[J]. 江西电力, 2018(10): 25 – 29.

作者简介:

柯海波(1989),男,大学本科,工程师,研究方向为用电信息采集的深化应用。

(收稿日期:2020 – 10 – 12)

防护研究[D]. 郑州:郑州大学, 2018.

- [19] 胡俊俊. 35 kV 输电线路防雷技术分析与方案应用[J]. 通讯世界, 2017(20): 111 – 112.
- [20] 陈炜炜, 周懋坤, 詹跃东, 等. 雷电流数学模型仿真及对比分析[J]. 电瓷避雷器, 2019(6): 7 – 12.
- [21] 刘浩, 陈长富, 杨杰, 等. 基于 PSCAD 的配电线路耐雷水平建模研究[J]. 电工技术, 2019(1): 28 – 30.
- [22] 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范: GB/T 50064—2014[S], 2014.

作者简介:

陈 卓(1990),女,工程师,主要从事智能电网、智慧能源的相关研究;

蒋艾町(1994),女,硕士,助理工程师,从事智能电网技术、综合能源系统的研究工作;

梁亚博(1988),男,本科,工程师,从事智能电网技术、综合能源系统的研究工作;

夏 雪(1981),男,硕士,高级工程师,从事电气一次、综合能源系统的研究工作。

(收稿日期:2020 – 07 – 08)

考虑宏观政策的能源需求组合预测模型

黄 欣¹, 吴杰康², 李红玲², 李逸欣¹, 郑敏嘉¹, 李 猛¹, 吴伟杰¹, 张伊宁¹

(1. 广东电网规划研究中心, 广东 广州 510000; 2. 广东工业大学自动化学院, 广东 广州 510006)

摘 要:针对目前能源需求预测考虑影响因素单一、忽视宏观政策影响因素、预测精度不足等问题,提出了一种融合灰色关联度分析和 BP 神经网络的能源需求组合预测方法。首先,根据宏观政策的针对性和方向性进行领域划分,分析各领域的指标;其次,利用灰色关联度分析法对分析后的各领域宏观政策初始指标进行关联度计算、排序、筛选;最后,将筛选出的初始指标作为 BP 神经网络的输入,利用神经网络预测能源需求,并进行实例仿真分析能源需求组合预测的预测结果。实例结果表明,所提出的能源需求组合预测方法着重考虑了宏观政策影响,且有效地提高了预测精度,具有实用性和可靠性。

关键词:能源需求预测;宏观政策;灰色关联度分析;BP 神经网络;组合预测

中图分类号:F206 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2021)01-0062-08

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210114

Combination Forecasting Model for Energy Demand Considering Micro Policy

Huang Xin¹, Wu Jiekang², Li Hongling², Li Yixin¹, Zheng Minjia¹, Li Meng¹, Wu Weijie¹, Zhang Yining¹

(1. Guangdong Power Grid Planning Research Center, Guangzhou 510000, Guangdong, China;

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

Abstract: Aiming at the current problems of considering influence factors of energy demand forecasting in a single way, ignoring influence factors of macro policy and lacking in forecasting accuracy, a combined energy demand forecasting method together with grey correlation analysis and BP neural network is proposed. Firstly, the fields are divided according to the pertinence and direction of the macro policy, and then the indicators are analyzed in each field. Secondly, the grey correlation analysis method is used to calculate, sort and filter the initial indicators of the macro policy after the analysis. Finally, the selected initial indicators are used as the input of BP neural network, the neural network tools are used to achieve the purpose of energy demand forecasting, and a case simulation is performed to analyze the results of energy demand combination forecasting. The example results show that the proposed energy demand combination forecasting method focuses on the impact of macro policies, which effectively improves the forecasting accuracy and is practical and reliable.

Key words: energy demand forecasting; macro policy; grey correlation analysis; BP neural network; combination forecasting

0 引 言

近些年来,能源需求预测研究已经成为国内外学者的关注热点。随着国民经济的发展,能源瓶颈问题越来越显著,为了更好处理能源需求与供应平衡问题^[1],对能源需求的预测不仅可以有效避免能

源短缺情况,而且对于经济发展、工业发展起着一定的促进作用。政策作为一个宏观、复杂的因素,它影响着经济发展、能源消费结构、产业结构等^[1],并进一步影响着能源需求,对这个综合性的因素进行研究显得尤为重要。

大部分国内外学者的能源需求预测研究侧重于研究能源需求与经济增长^[2](GDP)、人口^[3]、产业结构、城镇化^[4]等因素之间的联系,影响因素可量化且过于单一,没有考虑难以直接量化的综合性因

基金项目:广东省科技计划项目(2020A050515003);广州市科技计划项目(202002030463);广东电网有限责任公司科技计划项目(037700KK52190004)

素,往往也忽视了各影响因素之间的相互作用和影响。目前,研究能源需求预测的方法主要有:神经网络^[1-4]、线性回归法^[5]、灰色预测模型^[6] GM(1,1)、时间序列法等。采用线性回归法可以反映各因素之间的线性关系,但是对于非线性数据难以建立模型;灰色预测模型 GM(1,1)简单直接地以历史数据预测未来数据,是以关键因素作为变量的单变量模型,对于多变量的场景预测精准度偏低。考虑到传统的灰色预测模型存在的缺陷,研究学者不断改进该模型,进一步提出了基于离散 DGM 模型^[7]、新陈代谢模型^[7]等的灰色预测方法。较为常见的时间序列法^[8],预测精准度有所提高,但是其需要大量的历史数据作为算法的实现基础,缺乏高效性和便捷性。各类神经网络的预测模型优缺点并存,预测精准度不一。后期,渐渐地出现了组合预测^[9-11]模型,其本质就是将两种甚至多种算法进行权值组合优化,在算法上和预测精确度上都有所优化和改进。但是,组合模型最大的问题就在于加权平均系数^[12]的确定,选择最优的加权平均系数有待进一步优化研究,并且缺乏考虑宏观政策这一综合宏观影响因素。

对于考虑宏观政策的能源需求预测,其预测模型的相关研究和算法并不多,主要是考虑微观指标的能源需求预测,如经济增长、产业结构、居民生活水平、人口增长等。能源需求预测主要分为两种预测方法:一种是相关关系预测方法,例如回归模型^[13]、能源消费弹性系数法^[14]、部门预测法等^[15];另一种是时间序列分析预测法,例如误差修正模型^[16](error correction model, ECM)、自回归滑动平均(auto-regressive moving average, ARMA)模型等。基于代理(agent)的智能模拟系统^[17]用来模拟仿真宏观政策在能源需求预测中的影响,很好地处理了宏观政策的模糊性、复杂性和主观性,但是由于宏观政策各方面的力度、方向以及重点不同,系统的仿真环节难以做出人性化的最优决策。

下面,就考虑宏观政策这一综合影响因素,针对能源需求预测,提出了灰色关联度分析与 BP 神经网络的组合预测方法。考虑到宏观政策的广泛性和模糊性,根据宏观政策的性质,将宏观政策分为投资、进出口、节能减排 3 个主要的方面;采用灰色关联度分析对每个方面的多个指标进行关联度计算、排序;最后,筛选出关联度最大的即影响力最大的 3 个宏观政策指标。

1 宏观政策及其指标

宏观政策作为一个宏观、复杂、抽象的影响能源需求的重要因素,将其直接用单一指标表示出来存在一定的困难和不可靠性。对此,根据政策的内容,针对性地划分为 3 个方面:投资、进出口、节能减排。对于不同类型的政策,采用不同的数据指标进行表示。

1.1 投资政策及其指标

历史数据表明,中国对于能源工业方面的投资政策会根据实际经济发展状况,加大或减少某方面的投资力度。以广东省的能源投资为例,可以了解各行业的投资情况。图 1 为 2003—2016 年广东省能源工业各行业投资数据(数据来源于历年《广东统计年鉴》^[18],以下同)。

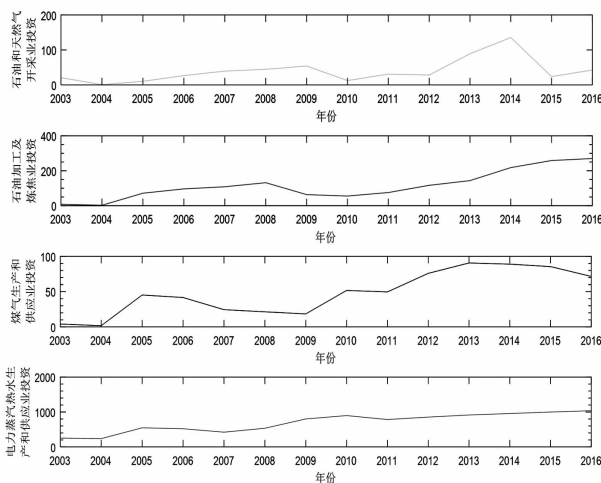


图 1 2003—2016 年广东省能源工业投资数据

根据图 1 中的数据曲线可以看出:石油和天然气开采业逐年的投资不算稳定,跟当时的开采技术水平以及产地的勘探技术有关;石油加工、煤气生产以及电力蒸汽等生产和供应的投资则呈现上升的趋势,尤其是清洁能源(如电力、热力等)的生产供应投资。

为体现能源投资方面的全面性,以图 1 中的 4 个数据作为宏观政策中投资方面影响能源需求的初始指标:石油和天然气开采业;电力、蒸汽及热水生产和供应业;石油加工及炼焦业;煤气生产和供应业。

1.2 进出口政策及其指标

中国作为一个进出口大国,对外贸易政策是中

国确保自身发展和经济利益的准则,即便是在新冠肺炎防控乃至金融危机期间,中国政府都出台了一系列的助力进出口的政策,并将其落到实处。可见,中国于进出口方面给予很大的重视。广东作为贸易大省,其贸易政策对能源的影响尤为突出。以广东省境内进出口数据为例,可以分析该省的进出口情况。图 2 为 2003—2016 年广东省境内进出口总额数据^[18]。

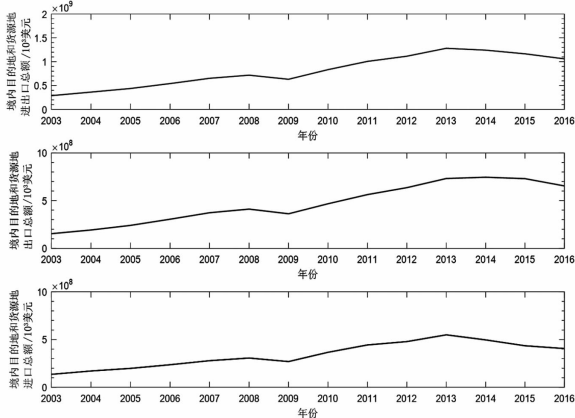


图 2 2003—2016 年广东省境内进出口总额数据

根据图 2 中的数据曲线可以看出:对外贸易一直都是广东省经济发展的一个重要方面,除了 2009 年的经济危机,进出口贸易稍微有所下降,后期经济恢复和发展后,进出口总额又恢复了持续增长的趋势。

宏观政策中进出口方面影响能源需求的初始指标为境内目的地和货源地进出口总额、出口总额和进口总额。

1.3 节能减排政策及其指标

近些年来中国提倡走节约发展、清洁发展的工业化道路,注重环境保护和限制污染物的排放。2020 年作为全面建成小康社会的决胜阶段,广东省正在加快完成“十三五”节能减排目标任务。以广东省为例,图 3 为 2003—2016 年广东省节能减排指标数据。

根据图 3 的两种不同趋势的数据曲线可知,由于广东省广大市民响应节能减排政策,故城市天然气用气人数在不断增加,减排政策限制二氧化硫的排放量,废气排放量逐年减少。

为了更好体现宏观政策中节能减排方面对能源需求的影响,考虑节能减排政策对能源需求的影响的初始指标为二氧化硫排放量和城市天然气用气人口。

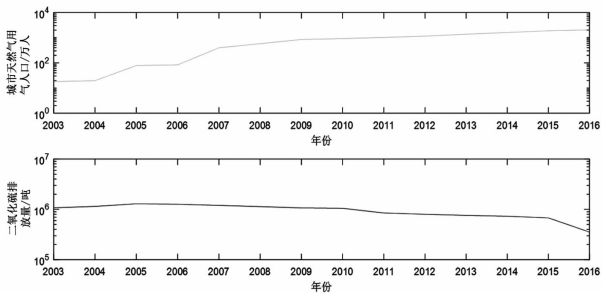


图 3 2003—2016 年广东省节能减排指标数据

2 能源需求的组合预测模型

建立灰色关联度分析 (grey relation analysis, GRA) 与 BP 神经网络组合 (GRA - BP) 预测模型,用 GRA 来分析处理宏观政策指标,以宏观政策指标为输入,构建 BP 神经网络系统,预测能源需求量。

2.1 灰色关联度分析理论

灰色关联度分析将反映研究对象的一系列数值拟合在一条曲线上,与影响研究对象的各因素所组成的曲线簇进行比较,并分别进行量化,计算出研究对象与各影响因素之间的关联度,通过比较各关联度的大小来判断各影响因素对研究对象的影响程度。简言之,它是一种在众多因素中进行影响度排序的多因素分析方法,它能为一个系统发展变化态势提供量化的度量,适合动态历程分析^[19]。

灰色关联分析的具体步骤如下:

1) 确定分析指标体系,收集分析数据,确定比较数列和参考数列。

影响系统行为的因素组成的数据序列,称为比较数列,记为

$$X'_i = (x'_i(1), x'_i(2), \cdots, x'_i(m))^T \quad (1)$$

式中, $i = 1, 2, \cdots, n$ 。

反映系统行为特征的数据序列,称为参考数列,记为

$$X'_0 = (x'_0(1), x'_0(2), \cdots, x'_0(m))^T \quad (2)$$

2) 对参考数列、比较数列进行无量纲化处理。

由于系统中各因素的物理意义不同,导致数据的量纲也不一定相同,不同量纲的数值一般不能直接进行比较。因此,在进行灰色关联度分析时,一般都要对数据进行无量纲化处理。常用的无量纲化处理有均值化和初值化,分别为:

$$x_i(k) = \frac{x'_i(k)}{\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m x'_i(k)} \quad (3)$$

$$x_i(k) = \frac{x'_i(k)}{x'_1(1)} \quad (4)$$

式中: $i = 0, 1, \dots, n$; $k = 1, 2, \dots, m$ 。

3) 计算灰色关联系数矩阵 $\xi_i(k)$ 。

所谓关联程度,实际上是指曲线之间的拟合程度。因此,可以通过曲线对应点的差值大小来作为衡量关联程度的尺度。一个参考数列 X'_0 一般有若干个比较数列 X'_i , 各比较数列 $(X'_1, X'_2, \dots, X'_n)$ 与参考数列 X'_0 在各个时刻存在对应的关联系数矩阵,其推导式为

$$\begin{aligned} \xi_i(k) &= \frac{\min_i |x_0(k) - x_i(k)| + \rho \cdot \max_i |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \rho \cdot \max_k |x_0(k) - x_i(k)|} \\ &= \frac{\Delta_{0i\min}(k) + \rho \cdot \Delta_{0i\max}(k)}{\Delta_{0i}(k) + \rho \cdot \Delta_{0i\max}(k)} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $\Delta_{0i}(k)$ 为各比较数列 x_i 曲线上的每一个点与参考数列 x_0 曲线上的每一个点的绝对差值; $\Delta_{0i\min}(k)$ 、 $\Delta_{0i\max}(k)$ 分别为绝对差值的最小值和最大值; ρ 为分辨系数,通常在 $(0, 1)$ 内取值,若 ρ 越小,关联系数间差异越大,区分能力越强。通常 ρ 取值为 0.5。

4) 计算关联度 r_i 。

对影响系统行为的因素(比较数列)分别计算其各指标与参考数列对应元素的关联系数的平均值,用以反映各影响因素与参考数列的关联关系,即关联度 r_i , 计算式为

$$r_i = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m \xi_i(k) \quad (6)$$

5) 关联度排序。

将所求的关联度进行大小排序,关联度越大,其影响程度就越大,说明系统行为越受其影响。

2.2 BP 神经网络

BP 神经网络(back propagation neural network)是由 Rumelhart 和 McClelland 等学者提出的一种算法,是一个输入顺向传播和误差逆向传播循环进行,通过改变权值使误差达到一定范围的多层前馈网络。典型的 BP 神经网络一般由 3 层组成:输入层(input layer)、隐含层(hidden layer)和输出层(output layer)。输入层主要作为接收信号的端口;隐含层作为中间存储信号,可以有多个隐含层;输出层是对输入层接收的信号进行处理;各层之间均是完全连接的。3 层 BP 神经网络的结构拓扑图如图 4 所示。

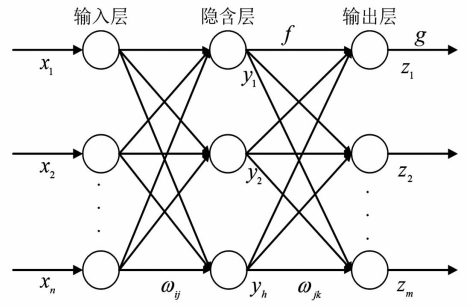


图4 BP神经网络结构拓扑图

假定神经网络的输入层有 n 个单元,隐含层有 h 个单元,输出层有 m 个单元,则输入矩阵为 $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$; 隐含层输出矩阵为 $\mathbf{y} = (y_1, y_2, \dots, y_h)^T$; 输出层输出矩阵为 $\mathbf{z} = (z_1, z_2, \dots, z_m)^T$ 。假设输入层到隐含层的权值为 ω_{ij} , 隐含层到输出层之间的权值为 ω_{jk} , 隐含层到输出层之间的传递函数为 f , 输出层的传递函数为 g 。于是可得:

1) 隐含层第 j 个单元输出

$$y_j = f\left(\sum_{i=1}^n \omega_{ij} x_i - \theta\right) = f\left(\sum_{i=0}^n \omega_{ij} x_i\right) \quad (7)$$

式中: $\omega_{0j} = \theta$; $x_0 = -1$ 。

2) 输出层第 k 个单元输出

$$z_k = g\left(\sum_{j=0}^m \omega_{jk} y_j\right) \quad (8)$$

BP 算法主要包括两部分内容:数据的正向传输和误差的反向传递。其实数据的正向传输是网络输出加变相误差计算的过程。若网络输出与期望输出存在较大误差,则需进入反向传递过程。在反向传递中,从输出到输入的方向调节各连接处的阈值和权值。正向传输的过程为:输入信号(数据)由输入层进入,经过隐含层,再经由输出层数据处理,得到网络输出。根据网络输出与期望输出的误差值来决定是否进入反向传递过程。反向传递的过程为:首先,根据误差逆向传播的特性,在调节各层间权值时应该遵守逆向原则,即先调整隐含层到输出层的权值 ω_{jk} ; 然后,再调整输入层到隐含层的权值 ω_{ij} , 使网络输出值与实际值的误差值减小,转而进入正向传播。网络反复进行迭代处理,使得两者的误差减小到设定的值,以便网络输出能够尽可能地接近甚至达到期望输出的水准。BP 神经网络算法的执行步骤如图 5 所示。

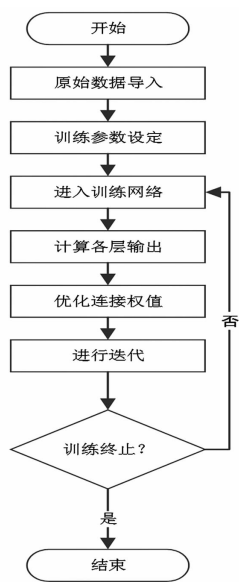


图 5 BP 神经网络算法流程

3 实例分析

3.1 原始数据

考虑到广东省宏观政策的针对性和方向性,按前面所述将其划分为投资、进出口、节能减排 3 个主要方面,将这 3 个方面共 9 个指标作为宏观政策的初始指标。

根据《广东统计年鉴》(2003—2016 年)。数据整理了广东省 2003—2016 年能源投资、进出口、节能减排 3 个方面的各指标数据,如表 1 所示。在投

资方面,政府对于电力、蒸汽生产供应的投资从 2003 年的 252.75 亿元持续增长到 2016 年的 1036.36 亿元,投资金额翻了 4 倍左右,这种迅猛的增长也是政府响应节能环保政策的结果。石油、天然气开采方面的投资从 2003 年的 20.56 亿元,于 2004 年骤降到 0.75 亿元,而又在 2014 年达到高峰的 135.52 亿元。这方面的投资跟诸多因素有关,例如石油存储地的发现、海底天然气的可开采性、开采技术的研究等。相对于开采能源方面的投资波动性,无论是产品能源(电力、煤气、蒸汽等)的生产还是石油的加工焦炼,政府给予的投资总趋势是增长性的。

大自然中现存的能源有限,应加大对能源的充分利用力度。广东省作为贸易大省的,进出口总额从 2003 年的约 2892 亿美元持续增长到 2011 年的超 10 067 亿美元。不到 10 年的时间,投资翻了近 4 倍。社会发展的进程中,政府乃至人民大众都希望环境与发展友好相处,人们绿色环保、节能减排的意识开始觉醒,城市天然气使用人口才会从 2003 年 18 万人左右到 2016 年 2043 多万人,平均每年增长 100 多万人。二氧化硫排放量从 2003 年 107.52 万吨大幅度降到 2016 年的 35.369 万吨。

国民经济的发展与社会的进步都会促使能源的消耗增加。表 2 是 2003—2016 年广东省一次能源总消耗量,从 2003 年的约 10 462.09 万吨标准煤,持续增长到 2016 年的超 28 179.17 万吨标准煤。十几年的时间,能源消耗量翻了近 3 倍。

表 1 2003—2016 年广东省宏观政策相关数据

年份	石油和天然气开采业 投资/亿元	石油加工及炼焦业 投资/亿元	煤气生产和供应业 投资/亿元	电力、蒸汽、热水生产和供应业 投资/亿元	境内目的地和货源地 进出口总额/ 亿美元	境内目的地和货源地 出口总额/ 亿美元	境内目的地和货源地 进口总额/ 亿美元	城市天然气 用气人口/ 万人	二氧化硫 排放量/ t
2003	20.56	8.38	4.08	252.75	289.229 940	153.709 920	135.520 020	18.04	1 075 200
2004	0.75	2.64	1.75	237.78	363.353 600	192.410 670	170.942 930	19.66	1 148 000
2005	10.24	71.62	45.24	546.80	439.184 106	240.975 111	198.208 995	78.53	1 294 000
2006	26.51	96.31	41.70	520.41	541.829 876	305.464 308	236.365 568	83.73	1 267 000
2007	39.43	108.51	24.45	421.80	652.413 970	373 360 854	279.053 116	398.60	1 203 019
2008	44.47	131.84	21.39	534.12	717.776 810	411.250 554	306.526 255	581.99	1 136 000
2009	54.03	63.63	18.45	801.02	631.988 524	362.390 490	269 598 040	850.36	1 070 488
2010	12.30	55.40	51.72	897.40	834.006 174	467.177 014	366.829 160	921.68	1 050 508
2011	30.87	75.50	49.60	784.43	1 006.793 963	563.216 000	443.577 963	1 028.13	847 728
2012	28.15	116.72	75.96	854.00	1115.328 415	636.221 692	479.106 723	1 154.71	799 223
2013	89.18	143.79	90.67	914.48	1 281.191 589	731.763 406	549.428 183	1 380.26	761 896
2014	135.52	218.20	88.99	955.96	1 241.942 533	745.309 548	496.632 985	1 618.67	730 147
2015	23.74	258.70	85.51	999.49	1 165.188 477	730.187 959	435.000 517	1 885.40	678 341
2016	42.48	270.15	71.59	1 036.36	1 060.123 561	654.136 517	405.987 043	2 043.08	353 693

表 2 2003—2016 年广东省一次能源消耗数据^[18]

年份	能源消费/万吨标准煤
2003	10 462. 09
2004	12 013. 14
2005	13 086. 58
2006	15 281. 00
2007	17 344. 10
2008	17 679. 13
2009	19 235. 86
2010	21 942. 15
2011	23 318. 44
2012	23 786. 60
2013	24 930. 93
2014	25 636. 29
2015	26 999. 64
2016	28 179. 17

3.2 宏观政策指标的灰色关联度分析

根据灰色关联度分析理论,将宏观政策中所划分的 3 个方面分别进行灰色关联度分析,将 9 个指标数据作为灰色关联度分析的比较序列,能源消费量数据作为参考序列。根据灰色关联分析具体步骤,通过仿真计算出各指标的关联度,投资、进出口和节能减排 3 个方面的关联度计算结果如表 3 至表 5 所示。

表 3 广东省投资方面指标的关联度计算结果

指标	石油和天然气开采业投资	石油加工及炼焦业投资	煤气生产和供应业投资	电力、蒸汽、热水生产和供应业投资
关联度	0. 708 2	0. 757 2	0. 762 4	0. 900 8

表 4 广东省进出口方面指标的关联度计算结果

指标	境内目的地和货源地进出口总额	境内目的地和货源地出口总额	境内目的地和货源地进口总额
关联度	0. 892 6	0. 884 6	0. 897 2

表 5 广东省节能减排方面指标的关联度计算结果

指标	城市天然气用气人口	二氧化硫排放量
关联度	0. 745 3	0. 711 8

根据表 3 至表 5 所计算出的各方面关联度进行关联度排序,筛选出其中最大的指标作为主要指标,分别为:电力、蒸汽、热水生产和供应业投资(记为 A)、境内目的地和货源地进口总额(记为 B)和城市天然气用气人口(记为 C)。

3.3 能源需求预测

为了验证该组合模型的有效性和可靠性,采用 3.2 节中的指标筛选结果,用电力、蒸汽、热水生产

和供应业投资,境内目的地和货源地进口总额和城市天然气用气人口 3 个指标作为 BP 神经网络输入层输入信号(数据),能源需求总量作为神经网络的输出信号。

采用 Matlab 的 BP 神经网络工具箱进行仿真。用 newff 构建一个 3 层的 BP 神经网络,根据输入指标和输出指标,确定输入层节点数为 3,隐含层节点数为 8,输出层节点数为 1,隐含层的传递函数采用 tansig 函数,输出层的传递函数采用 purelin 函数,网络训练学习函数采用 traingdx 函数,神经网络训练的目标误差设置为 0. 001,学习率设置为 0. 035,最大迭代次数设置为 2000。

以 2003—2016 年广东省的数据作为网络训练数据,将 2010—2019 年广东省宏观政策 3 个方面的相关指标数据导入训练好的神经网络;再用于能源需求预测网络系统中,经过网络仿真处理,将网络预测输出的结果与实际能源需求量进行曲线拟合对比,拟合图如图 6 所示。导出的网络输出和预测误差百分比结果如表 6 所示。

表 6 广东省 2010—2019 年能源需求量预测结果

年份	实际值/万吨标准煤	预测值/万吨标准煤	预测误差百分比/%
2010	21 942. 15	22 092. 65	-0. 685 9
2011	23 318. 44	22 975. 83	1. 469 3
2012	23 786. 60	24 029. 61	-1. 021 6
2013	24 930. 93	24 914. 01	0. 067 8
2014	25 636. 29	25 560. 91	0. 294 0
2015	26 999. 64	27 046. 61	-0. 174 0
2016	28 179. 17	28 154. 98	0. 085 9
2017	29 253. 74	29 268. 24	0. 0 000
2018	30 154. 66	30 137. 11	0. 0 582
2019	31 122. 99	31 133. 10	-0. 032 5

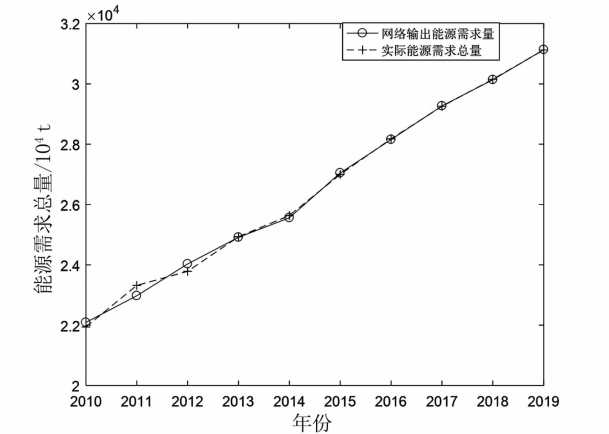


图 6 BP 神经网络输出拟合曲线

从图 6 可以看出,实际能源消耗曲线与预测能源消耗曲线在个别年份(例如 2014 年、2015 年)贴合度略微有些许偏差,但是实际能源消耗曲线与预测能源消耗曲线在整体的趋势上具有一致的变化特性,两者之间贴合得比较密切,初步可以看出预测效果比较好。

根据表 6 所示的 2010—2019 年广东省能源需求量网络预测结果可以看出,实际能源需求值与预测能源需求值之间相差不大,最大的误差也在 400 万吨以内,最小的误差也就只有几万吨。误差大小无法直观地表现出预测的优劣。预测误差百分比就是一个比较显著的作为反映预测效果的指标。从表 6 中可以看出,实际值与预测值之间的误差百分比最大也仅仅是 1.1%,最小可以达到 0.005 4%。可见,根据所用的 2010—2019 年能源需求量数据进行网络仿真预测,其预测误差百分比均控制在 $\pm 1\%$ 以内。

综合表 6 中的实际值与预测值的比较及图 6 的拟合曲线,充分验证了 GRA - BP 组合预测模型的有效性和可靠性。

4 结 语

影响能源需求的因素众多,学者们热衷于对这方面进行研究^[20-22],但近些年来的研究常常忽略了宏观政策这一极具综合性、复杂性的重要因素。上面着重考虑宏观政策对能源需求的影响,在融合灰色关联度分析法和 BP 神经网络(GRA - BP)的基础上,提出了考虑宏观政策影响的能源需求组合预测方法,主要得出的结论如下:

1)采用灰色关联度分析(GRA)法对宏观政策指标进行分析和筛选,确定了衡量宏观政策对能源需求影响的 3 个主要指标:电力、蒸汽、热水生产和供应业投资(记为 A)、境内目的地和货源地进口总额(记为 B)和城市天然气用气人口(记为 C)。

2)衡量宏观政策的 3 个主要指标 A、B、C 的关联度分别为:0.8961、0.6189、0.6794。关联度均在 0.6 以上,其与能源需求的联系最为紧密。对于指标 A,投资额越多,能源需求也就越大,反之亦然;对于指标 B,进口总额增加,这部分对能源需求有所减少;对于指标 C,人口增加,能源需求也就相应增加。

3)以广东省 2003—2016 年的相关数据作为网络训练数据,对 2010—2019 年能源需求进行仿真与

分析,结果表明所提 GRA - BP 组合预测模型既考虑了宏观政策因素,又有效地提高了预测精度,该组合预测方法具有可行性和实用性。

参考文献

[1] 邓志茹. 我国能源供求预测研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2011.

[2] 佟阿思根,侯俊芝. 中国能源消费现状及能源需求预测[J]. 内蒙古民族大学学报,2008,14(3):83-85.

[3] 芦森. 基于组合模型的中国能源需求预测[D]. 成都:成都理工大学,2010.

[4] 孙涵,成金华. 中国工业化、城市化进程中的能源需求预测与分析[J]. 中国人口·资源与环境,2011,21(7):7-12.

[5] 路亮,柳璐,程浩忠,等. 经济转型对西南地区能源需求的影响及预测[J]. 电力系统及其自动化学报,2019,31(7):117-122.

[6] 尤广芬,王萍. 用灰色模型预测我国能源的需求量[J]. 四川理工学院学报(自然科学版),2009,22(3):121-124.

[7] 秦晋栋. 基于熵权灰色组合预测模型的区域能源需求预测研究[J]. 价值工程,2012,31(4):289-291.

[8] 张文丽,翟明娟,白刚. 时间序列模型在山西省能源需求预测中的应用[J]. 长治学院学报,2015,32(2):54-56.

[9] 魏云云. 组合的灰色关联度和 GA - BP 模型对能源需求的预测分析[J]. 兰州文理学院学报(自然科学版),2018,32(5):27-30.

[10] 孟凡生,李美莹. 组合模型在能源需求预测的应用[J]. 哈尔滨工业大学学报,2013,45(11):106-111.

[11] Gabriel Happle, Jimeno A. Fonseca, Arno Schlueter. Effects of Air Infiltration Modeling Approaches in Urban Building Energy Demand Forecasts[J]. Energy Procedia,2017,122:283-288.

[12] 赵国忻,王明涛. 一种变权重组合预测方法研究[J]. 西安工程科技学院学报,2000,14(3):226-232.

[13] 徐明德,李杰杰. 线性回归分析与能源需求预测[J]. 内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版),2003,32(1):17-20.

[14] 高广阔,张能进. 中国能源需求预测及供给对策[J]. 电力技术经济,2005,17(3):9-13.

[15] 杨明,杜萍静,刘凤全,等. 能源消费发展及预测方法综述[J]. 山东大学学报(工学版),2020,50(1):56-62.

[16] 张传平,周倩倩. 我国能源消费影响因素研究——基于长期均衡和短期波动的协整分析[J]. 中国能源,2013,35(3):35-38.

[17] 焦晓佑,胡兆光,周渝慧. 分布式智能控制及其在宏观政策对电力供需影响模拟中的应用[J]. 电工技术学报,2008,23(5):121-127.

[18] 广东统计局. 广东统计年鉴(2003 年—2019 年)[A/OL]. [2020-11-16]. <http://stats.gd.gov.cn>.

[19] 徐志芬,王书俊. 基于灰色理论和 BP 神经网络串联组合的能源需求预测[J]. 山东电力高等专科学校学报,2013,16(4):7-12.

[20] Jiaoliao Chen,Jiangxin Yang,Jiangwu Zhao,et al. Energy Demand Forecasting of the Greenhouses Using Non-linear Models Based on Model Optimized Prediction Method[J]. Neurocomputing,2016,174:1087-1100.

[21] Lin J,Su L,Yan Y J,et al. Prediction Method for Power Transformer Running State Based on LSTM_DBN Network[J]. Energies,2018,11(7):1880.

(上接第 13 页)

位混凝土运输量及浇筑量,方案 1 降幅达 70% 以上,方案 2 降幅约 24%;方案 1 余土量只有传统人工挖孔桩基础的 23%,方案 2 只有 74%,具有明显的经济效益。成孔工艺可参考沉井基础的作业模式,以主体钢管作为护壁措施,极大地提高了施工安全性。

3 结 语

针对高特峻地区线路设计的特殊性和复杂性,从全过程经济性、可靠性、可行性以及环保性综合考虑,针对送电结构专业提出了一些创新措施:

- 1) 针对不同的地形坡度,推荐采用不同的钢架延长腿型式;
- 2) 在狭窄山梁或山脊塔位,可以采用各类门型直柱塔;
- 3) 陡峭塔位,考虑经济性、安全性、施工难度以及环保性,推荐优先选用三腿塔;
- 4) 因地制宜的采用子母基础和创新型钢管桩基础,作为工程环保综合解决方案。

高特峻地区线路设计作为目前输电线路设计的新生事物,各种相应的研究还不多,对其各方面问题的认识也尚显不足,但是随着输电技术和施工工艺的不断发展,其解决方案也将日渐成熟和呈现多元化趋势。但是,无论时代如何进步,技术如何发展,安全可靠、经济环保、施工方便仍然将是研究的重

[22] 叶艺勇. 广东省能源需求预测模型构建及实证分析[J]. 经济数学,2015,32(3):64-72.

作者简介:

- 黄欣(1987),女,高级工程师,研究方向为电力系统规划;
- 吴杰康(1965),男,教授,博士生导师,工学博士,研究方向为电力系统运行与控制等;
- 李红玲(1997),女,硕士研究生,研究方向为电力系统规划、运行与控制等;
- 李逸欣(1994),女,工程师,研究方向为电力系统规划;
- 郑敏嘉(1992),女,工程师,研究方向为电源规划;
- 李猛(1991),男,工程师,研究方向为电力系统规划;
- 吴伟杰(1979),男,高级工程师,研究方向为电力系统规划;
- 张伊宁(1991),女,工程师,研究方向为电力系统规划。

(收稿日期:2020-11-16)

点,也将是后期深入研究的方向。

参考文献

[1] 柏晓路,刘利林,张益修,等. ± 500 kV 直流输电线路地线融冰方案研究[J]. 电力勘测设计,2020(3):37-42.

[2] 徐彬,曾二贤,白强,等. 陡峭山区输电线路新型子母基础设计[J]. 电力勘测设计,2017(1):55-58.

[3] 黄兴. 一种用于山区架空输电线路的大直径人工挖孔钢管桩[J]. ZL 2019 2 0874128.9

[4] 架空输电线路基础设计技术规程:DL/T 5219—2014[S]. 北京:中国计划出版社,2014.

[5] 建筑桩基技术规范:JGJ 94—2008[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.

[6] 钢结构设计标准:GB 50017—2017[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2017.

[7] 混凝土结构设计规范:GB 50010—2010[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2015.

[8] 型钢混凝土组合结构技术规程:JGJ 138—2001[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2001.

作者简介:

- 辜良雨(1979),男,高级工程师,主要研究方向为输电线路结构设计;
- 蒋锐(1984),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为输电线路结构设计;
- 甘运良(1979),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为输变电工程项目管理;
- 翟洪利(1974),男,工程师,主要从事高压输电线路建设管理相关工作。

(收稿日期:2020-08-14)

考虑可再生能源配额分配的电力零售市场设计

崔东君^{1,2}, 和敬涵², 程晓春¹, 程 宏¹, 王 宇¹, 李冬梅¹

(1. 首都电力交易中心有限公司, 北京 100031; 2. 北京交通大学, 北京 100093)

摘 要:随着中国电力市场化快速推进,不同用电需求的电力用户入市交易,参与市场化交易的电力用户数量剧增。根据国家发改委可再生能源配额制文件要求,各类市场主体应承担可再生能源消纳任务。在这种发展趋势下,研究如何让售电公司在批发市场中发挥对价格波动的平抑作用,在零售市场中发挥电价调节供需关系的作用,用以解决清洁能源消纳问题,是建设多元性、开放性、竞争性的零售市场的关键要素。在了解国内外零售市场建设情况下,针对零售市场中出现的现货与中长期衔接时偏差电量承担问题,以及固定零售套餐、固定加权直接交易价格限制售电公司与零售用户自主选择的问题,提出了建立新型零售市场的设计方案。为电力零售市场中市场主体设计或选择符合自身需求的电力零售套餐提供借鉴。

关键词:电力市场;电力交易;可再生能源;配额制;零售市场

中图分类号:F426 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2021)01-0070-07

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210115

Design of Electricity Retail Market Considering Quota Allocation of Renewable Energy

Cui Dongjun^{1,2}, He Jinghan², Cheng Xiaochun¹, Cheng Hong¹, Wang Yu¹, Li Dongmei¹

(1. Capital Power Exchange Center Co., Ltd., Beijing 100031, China;

2. Beijing Jiaotong University, Beijing 100093, China)

Abstract:With the rapid development of electricity market in China, the number of power users participating in the power exchange market has increased dramatically, and power users with different power consumption characteristics and energy demand enter the market for transaction. According to the requirements of the renewable energy quota document written by the National Development and Reform Commission of China, all kinds of market entities should undertake the task of renewable energy consumption. In this background, the research of power retailer to stabilize the price fluctuation in the wholesale market and regulate the relationship between supply and demand by electricity price became very important, which is the key factor to build a diversified, open and competitive retail market. Firstly, the construction of retail market at home and abroad is introduced. Then, under the situation of electricity market reform in China, it is necessary to design a power exchange mechanism that can meet the requirements of clean energy quota for each market participants, and to formulate a new retail market mechanism that reflecting the synergy between the wholesale and retail markets. The proposed new mechanism can provide a reference for the construction of power market and fulfilling the responsibility of clean energy consumption.

Key words:electricity market; power trading; renewable energy; quota; retail market

0 引 言

2015 年 3 月颁布的中发[2015]9 号文件,正式拉开了新一轮电力体制改革的帷幕。2019 年国家

基金项目:国网北京市电力公司资助项目(“三型两网”模式扩大可再生能源消纳机制研究)

发改委发布《关于建立健全可再生能源电力消纳保障机制的通知》,明确各类市场主体对可再生能源的消纳责任。如何在市场化交易的机制下完成可再生能源消纳目标是当前市场机制设计需要着重考虑的问题。各省市也在经历五年电力体制改革之后,先后印发相关政策文件,将售电公司与零售用户组成的零售市场视为今后电力市场建设和配额制实施

的重要场景之一^[1-4]。可见售电公司在零售市场中平抑各类交易价格的波动,激励零售用户消纳清洁能源的作用将直接影响可再生能源消纳任务的完成情况。英国、澳大利亚和新加坡等一些国家零售市场建设起步较早,并且各有特色,对中国零售市场建设很有借鉴意义^[5]。伴随各省现货交易实施细则出台,形成中长期交易与现货交易共存,常规能源与清洁能源共同参与交易的局面,使交易品种呈现交叉性、多元化特征,这给电力零售市场的机制建设带来新的挑战。

下面首先介绍国外零售市场建设情况以及山西、山东、云南等省零售市场的建设动态。其次,结合电力市场顶层设计思路,考虑可再生能源配额消纳任务的实际形势,分析现行零售市场运行过程中零售套餐僵化、未考虑配额在零售市场分配的问题,研究建立一种灵活高效的零售市场交易机制。最后,在新型交易机制下,介绍了利用 Hamilton 函数计算配额指标和零售价格耦合的零售套餐设计方法。使用该方法可根据零售用户对可再生能源配额占比和零售价格不同需求设计零售套餐,充分激发零售市场活力。

1 国内外发展现状

英国、美国、澳大利亚等国都已建立了电力零售市场。总结欧美各国的零售市场机制设置,其资金流与电力流的流向是统一的,即谁付钱谁购得电能,谁收钱谁提供电能^[6-7]。以同属亚洲的新加坡电力零售市场为例,与中国类似,根据用户年用电量,新加坡的电力用户被分为拥有自选电力供应资格的用户和不拥有自选电力供应资格的用户。前者可以通过定制价格配套向电力零售商购电,或者选择通过新能源服务有限公司(传统供电公司)间接向电力批发市场购电,或者直接在电力批发市场购电,或者与后者一样,继续以管制定价向新能源服务有限公司购电;而后者只能以管制定价向新能源服务有限公司购电^[8]。如图 1 所示。

与中国电力市场顶层设计不同的是新加坡电力零售市场的电费收取方式。新加坡市场机制设计为根据电力用户选择不同,用户付费方式也不同:用户如果选择从零售商处购电,将供电费、服务费、输配电费以及代收税金一并支付给零售商,再由电力零

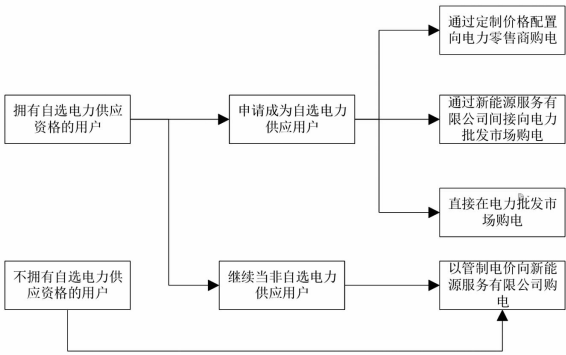


图 1 新加坡电力用户选择

售商代理其与市场服务商结算;用户如果选择从市场服务商处购电,则可以将上述费用一并支付给市场服务商,由其代理完成各项费用的结算。而对于电力零售商来讲,向电力用户收取全部费用时,部分费用是代理市场服务商收取,存在一定的欠费风险,因此,电力零售市场交易规则就规定零售商须向市场服务商缴纳支付保证金,以规避市场服务商可能受到客户带来的欠款风险。

中国电力市场化建设与国外不同之处在于是以电网公司作为电费收取的中间节点。零售用户向电网公司支付电费,电网公司向售电公司支付服务费,电网公司向发电企业支付发电费用。

中国各省均考虑到有售电公司参与交易的零售市场建设,但各省对售电公司的放开程度不同。大部分省已准许售电公司参与市场化交易,初步建立了以售电公司代理零售用户购电为主,以虚拟电厂、储能商等聚合体在个别省试点开展的零售市场。随着国家发改委可再生能源配额制文件的印发,各类市场主体如何在市场中完成配额消纳任务,成为中国零售市场建设的新特点。2020 年,山西、山东、云南省在准许售电公司入市,形成由售电公司、零售用户组成的零售市场的基础上,再印发相关文件规范电力零售市场建设。其中山东改变了原有售电公司与零售用户协商零售价格、服务费的方式,变为零售用户与售电公司协商选定零售套餐,缩短了结算周期,规范了零售市场行为。山西支持售电公司开发第三方零售交易平台与交易中心平台数据对接,售电公司通过自有平台管理其代理的零售用户,拓宽了售电公司对零售用户的管理范畴。云南由省级交易中心统一建立了零售交易平台,支持多代理关系管理、多种收益分配模式选择等功能。冀北率先开展虚拟电厂机制研究,通过聚合发、储、用电等各

类市场主体实现削峰填谷,减少发电机组频繁启停,提高各市场主体的经济效益。随着各项改革文件出台,部分零售市场已不能适应新的指导文件要求,发展适应国家顶层设计的零售市场是亟待解决的问题。

2 新型电力零售交易机制设计

从上述国内外的电力零售市场建设情况看,零售用户的多样化需求,是引导电力零售市场竞争性发展的主要原因。另外,可再生能源配额制指标将刺激零售用户选择具有价格和配额指标优势的售电公司,也是影响售电公司以至整个零售市场的关键因素^[9]。随着中国电力市场建设日趋成熟,将形成现货市场和中长期市场协同发展,可再生能源与常规能源共同竞争的格局^[10-11]。为适应改革进程,需解决的问题有:优化工作流程,提高各相关单位效率;电费结算周期不同步,影响短周期交易开展;零售套餐较单一,不利于激发市场活力。为解决以上问题,设计了一套适应中国电力市场顶层设计的电力市场零售交易机制,改变现有批发侧、零售侧的交易机制,为建立灵活高效的零售市场提供机制保证。

2.1 批发侧交易机制设计

未建立市场化时,电网企业承担输、配、售业务,各项业务之间的衔接属于电网公司内部工作。市场化改革后,内部工作流程需拆分给不同的市场主体,在工作机制设计上需要有所改变。

为适应市场化改革,批发侧交易机制设计需解决以下两个问题:

1) 电网企业结算问题。

考虑到中国电力市场在建设初期阶段,市场化前由电网公司负责输、配、售环节建设和运营,计量表计产权属于电网公司,并且已经建立了自动化的计量表计自动抄录的系统,若直接照搬国外由零售商收缴电费的电力市场建设模式,将造成大量重复投资,不适用于中国国情和现实条件。因此,交易机制设计为:由独立的电力交易机构负责市场化交易结算,并向发电企业、批发用户、零售用户、售电公司、电网公司等各类市场主体出具结算单,作为市场化电量、电费结算的依据。现阶段暂由电网公司负责各市场主体的费用流转,即:电网公司根据交易机构出具的结算单向批发用户、零售用户、非市场化用

户抄表收费,向售电公司、发电企业支付电费。电网公司在执行电费收缴时可能遇到欠费情况,对于批发、零售用户的电费催缴由电网公司负责,用户欠费风险也由电网公司承担;售电公司服务费由电网公司支付,但出现由于售电公司原因造成服务费为负的情况时,由电网公司代收该部分费用,若售电公司无法支付费用,则依据交易合同约定由金融机构调用售电公司履约保函;发电企业费用由电网公司支付,如果发电企业未能履约,则由发电企业支付合约和对应现货时段的差价,若发电企业无法支付该部分费用,则依据交易合同约定由金融机构调用发电企业履约保函。电费收缴关系如图 2 所示。

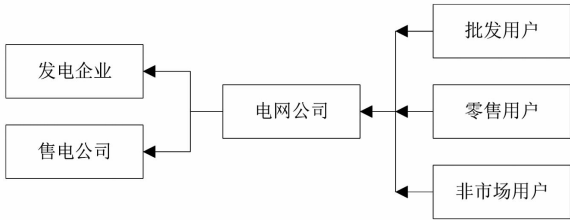


图 2 电费收缴关系

2) 电量偏差考核问题。

目前市场化交易产生的偏差电量采用偏差考核或滚动调整的方式,即在发电侧产生偏差后,偏差电量滚动至次月补齐;用电侧产生偏差后,用户需对偏差电量进行免考核说明,若无免考核说明则在次月缴纳考核费用,与次月电费一并缴纳。为缩短结算清算周期,新交易机制设计为:发、用电侧电量偏差在现货市场中予以平衡,由于电量偏差产生的中长期合约与现货价格的差值由产生偏差的一方承担。此种方式缩短了结算周期,偏差电量在当次结算周期即可结清,根据现货价格结算费用也体现了市场化交易的公平性。

2.2 零售侧交易机制设计

售电公司与发电企业达成购电协议后,需再将电能转卖给其代理的零售用户。目前中国大部分省采用的是固定的零售套餐模式,即规定几款固定条款的零售套餐,由售电公司与零售用户协商选择其中一个套餐。此种方式虽然能够规范零售市场的交易行为,但由于固定的套餐并不能涵盖所有零售用户需求,也限制了售电公司在零售市场的自主权,并且在批发侧使用直接交易的加权价传导至零售侧,限制了售电公司对其代理的零售用户价格自主的作用,具有较大的局限性。尤其是在可再生能源配额

制实施后,部分零售用户既不想直接参与市场化交易,避免现货价格波动对本企业购电成本的影响,又想提高清洁能源消纳比重;售电公司也会比较参与清洁能源交易与直接购买绿色电力证书之间的付出成本。因此,需要打破现有固定零售套餐模式,设计出由售电公司根据零售市场需求,自主设计零售套餐的零售市场。

零售侧交易机制设计需解决的问题如下:

1) 零售套餐僵化问题

新型零售侧交易机制下,交易中心不再设置固定的零售套餐,改由售电公司与其代理的零售用户协商确定零售电量、电价、可再生能源配额比例,自由制定零售套餐。考虑某时段,某区域有多个售电公司参与电力零售市场竞价交易,用 $N = \{1, 2, i, \dots, n\}$ 表示售电公司的集合, $M = \{1, 2, j, \dots, m\}$ 表示同一售电公司下代理的零售用户集合。交易中心按各零售用户的实际用电量及签订的零售合同进行 $N \times M$ 次运算,虽然结算计算量增加,但也增大了售电公司管理其代理的零售用户的灵活性。

2) 使用固定的加权价格结算问题

改变用户与多家发电企业达成交易时,采用批发侧取加权价作为零售侧的基准电价的形式,将批发侧电价与零售侧电价解耦,售电公司与发电企业的批发电价不影响售电公司与零售用户间的零售侧电价。

图3是售电公司的购售电交易框架。在零售市场竞价交易中,售电公司 $i (i \in N)$ 通过降低批发市场报价 P_i ,同时合理配置其在零售市场的报价 L_{ij} 来追求自身利润最大化。售电公司 i 的竞价交易电量 X_i 与其代理的零售用户需求 and 市场价格趋势有关,所有售电公司的零售电量均购于电力批发市场,而批发市场价格 P_i 随供求关系的变化而变化。

根据现行的输配电价形式,售电公司在批发市场购电量可表示为

$$X_i = W + \sum X_{ij} \quad (1)$$

式中: W 为网损; X_{ij} 为代理的零售用户需求电量。

电价关系可表示为

$$L_{ij} = P_{ij} + P_s + P_z + P_f \quad (2)$$

式中, P_{ij} 、 P_s 、 P_z 、 P_f 分别为批发电价、输配电价(含网损)、政府基金及附加、售电公司收益。

售电公司设置用户侧的落地价作为零售套餐价格供零售用户选择,此方法使得批发价格和零售价

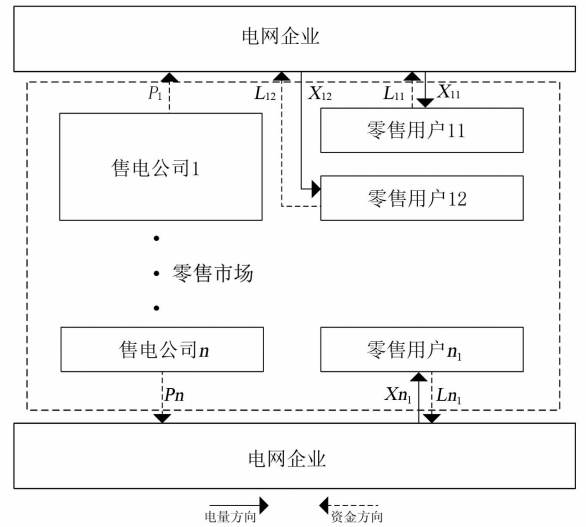


图3 零售市场能量资金关系

格脱钩^[12-14]。售电公司可任意设置用户落地价格套餐供零售用户选择。同时,售电公司可根据用户对可再生能源的需求程度,有针对性地设置可再生能源配额套餐供用户选择。

3 考虑配额与价格的零售套餐设计

售电公司会根据零售用户的需求设计零售套餐,考虑国家发改委印发可再生能源配额制指标,各省参与交易的购电主体均应承担配额任务,而且消纳清洁能源也是企业节能减排的重要指标。因此,零售用户在选择零售套餐时不仅希望价格低,而且希望获得更多的清洁能源配额指标。由于电能的质量是相同的,售电公司间相互竞争只能靠提高配额份额,或降低零售价格^[15-18]。目前可再生能源配额消纳任务是大于可再生能源总量的,所以争取更多的配额意味着提高零售价格。

3.1 建立售电公司利润模型

售电公司在设计零售套餐时需要考虑配额指标和电价两方面因素。考虑有 i 个售电公司在 $t (t \in \{0, \infty\})$ 时刻向入市的零售用户推荐价格为 $L_i(t)$ 、含可再生能源配额为 $q_i(t)$ 的套餐。售电公司的售电成本为 $c_i + \mu q_i(t)$, 其中 $c_i (\geq 0)$ 是批发市场购电成本; $\mu q_i(t)$ 为售电公司购买可再生能源的成本, $\mu (\geq 0)$ 为配额成本的线性系数。售电公司还可通过投入资金,提高自身运营管理水平,用 $u_i(t)$ 代表自身改进程度,则售电公司的改进成本 $C_{ui}(t)$ 为

$$C_{ui}(t) = \frac{\beta}{2} u_i(t)^2 \quad (3)$$

设零售用户对售电公司推出的套餐有价格敏感系数 θ 和配额敏感系数 δ , 并且售电公司在零售市场中有初始的市场占有率 y_i , 则在同一市场中竞争的零售用户需求函数 $D_i(t)$ 可表达为线性函数, 即

$$D_i(t) = y_i - \theta(l_i(t) - l_j(t)) + \delta(q_\Delta(t)) \quad (4)$$

式中, 下标 Δ 代表相互比较的变量的差。

当售电公司给出的价格和配额指标都没有差别的时候, 零售用户会选择原本市场占有率就大的售电公司。但通过售电公司间的竞争, 一方面可以提高自身运营水平; 另一方面可以利用占有市场中更多的配额指标来争取更多的零售用户。

售电公司间的竞争是个动态的过程, 可表示为自身挖潜和配额占有的线性函数:

$$q_i(t) = \gamma u_i(t) - \xi q_i(t) \quad (5)$$

式中: γ 为占有市场中配额的系数, $\gamma \geq 0$; ξ 为企业经营效率系数^[21-24], $\xi \geq 0$ 。

售电公司 i 的利润函数可表示为

$$L_i(l_i, u_i, t) = \int_0^\infty e^{-rt} \{ [l_i(t) - c_i - \mu q_i(t)] \cdot [y_i - \theta(l_\Delta(t)) + \delta(q_\Delta(t))] - \frac{\beta}{2} u_i(t)^2 \} dt \quad (6)$$

式中: r 表示折现率; $y \geq 0$ 。由式(6)可以看出, 提高零售套餐的配额会带来更多的零售用户, 但同时配额增加也提高了经营成本。

3.2 利润模型分析

考虑售电公司通过改变自身经营效率和获得更多的配额指标来相互竞争, 可构建考虑约束条件的微分方程:

$$\begin{aligned} \max_{p_i, u_i} L_i(l_i, u_i) &= \int_0^\infty e^{-rt} \{ (l_i - c_i - \mu q_i) [y_i - \theta(l_\Delta) + \delta(q_\Delta)] - \frac{\beta}{2} u_i(t)^2 \} dt \\ \text{s. t.} \end{aligned} \quad (7)$$

$$q_i = \gamma u_i - \xi q_i \quad (8)$$

$$q_j = \gamma u_j - \xi q_j \quad (9)$$

$$q_i(0) = Q_{0i} \quad (10)$$

$$q_j(0) = Q_{0j} \quad (11)$$

上述方程中: q_i 为占有的配额指标状态变量; 售电公司自身提升 $u_i \geq 0$ 和零售价格 p_i 为控制变量。式

(8)、式(9)为状态变量, 式(10)、式(11)为初值约束。

构造 Hamilton 函数:

$$\begin{aligned} H_i(p_i, u_i) &= (p_i - c_i - \mu q_i)(l_i - \theta(p_\Delta) + \delta(q_\Delta)) - \frac{\beta}{2} u_i^2 + \lambda_{ii}(\gamma u_i - \xi q_i) + \\ &\quad \lambda_{ij}(\gamma u_j - \xi q_j) \end{aligned} \quad (12)$$

式中, λ_{ii} 和 λ_{ij} 为最优化问题的协态变量, 其经济学含义为企业从自身改进或对手改进中获得的边际收益。设初始时刻的边际收益 $\lambda_{ii}(0) = \lambda_{0i} > 0$, 计算 Hamilton 函数的最优解, 且最优解满足如下方程:

$$\frac{\delta L_i}{\delta l_i} = \theta l_i + q_i \delta + l_i - \theta(l_i - c_i - \mu q_i) = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\delta L_i}{\delta u_i} = -\mu \beta_i + \gamma \lambda_{ii} = 0 \quad (14)$$

$$\frac{\delta L_i}{\delta \lambda_{ii}} = q_i \quad (15)$$

$$\frac{\delta L_i}{\delta \lambda_{ij}} = q_j \quad (16)$$

其中, 式(13)、式(14)为最优化约束, 式(15)、式(16)为状态约束。

根据上述分析计算, 可令横轴为价格敏感程度 θ , 纵轴为质量敏感程度 δ , 并按配额与价格敏感程度分为配额不敏感、低配额敏感型、中配额敏感型、高配额敏感型 4 个类型, 绘制价格与配额的关系图如图 4 所示。

从图 4 可以看出, 配额与价格敏感的相差程度是设计零售套餐的关键条件。该条件将坐标图划分为 4 个区域, 各区域中的配额 - 价格关系分别呈现出不同的特点。4 个区域按配额与价格敏感程度分别为: 配额不敏感型、低配额敏感型、中配额敏感型、高配额敏感型。各区域所代表的竞争格局是动态的, 随着市场中配额考核指标以及可再生能源的产能变化而改变, 售电公司设计零售套餐的策略也将随之变化。

售电公司根据零售用户需求, 结合自身盈利模式, 可制定多种零售套餐。结合目前零售用户需求, 可设计如下几类零售套餐^[19-26]:

1) 分时段电价套餐。根据每日不同时段, 售电公司与零售用户协商各时段电价。此类套餐考虑了每日不同时段的电价变化, 时段可由售电公司与零售用户协商定制, 甚至工作日和节假日各时段电价

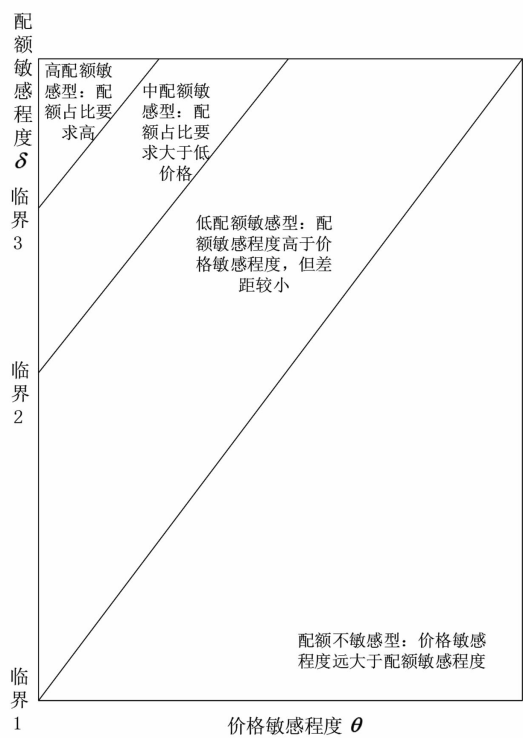


图 4 配额 - 价格分位关系

也可不同,最终达到以价格激励的方式鼓励零售用户削峰填谷。此类也适用于价格敏感型零售用户。

2)固定单价套餐。合同期内电度电价以及可再生配额百分比固定不变,由售电公司承担价格波动,零售用户只需按用电量支付电费。此类套餐适用于价格敏感性高、中型零售用户。

3)量价联动套餐。可设置为阶梯递增电价的形式,分档设定不同阶梯的电量值标准和对应的分档电价,每个阶梯设定可再生能源配额比例。此类套餐适用于价格敏感性高、中型零售用户。

4)固定配额套餐。零售用户要求按固定配额指标结算电费,此类套餐适用于价格敏感性低的零售用户。

以上例举了几类典型的零售套餐,售电公司可根据配额、价格敏感程度以及市场中可再生能源与常规能源价格行情设计出更多类型的套餐满足零售用户需求。

4 结 语

随着改革的持续深化和市场的进一步发展,零售市场建设对电力系统和电力市场组织和运行的影响将会增大。在设计零售市场时既要保证市场的有

序和活力,鼓励更多市场主体参与市场,又要引导市场行为符合国家政策导向,支持可再生能源配额高效消纳。

所提出的新型零售市场的设计方案仅在机制设计上进行了阐述,并对配额与价格共同影响零售套餐情况进行了分析。下阶段可借助 Bertrand 模型等经济学方法,建立售电公司参与零售市场竞价交易的博弈均衡模型,可通过模糊聚类等方法发掘不同零售用户的用能需求,为售电公司提供差异化的服务策略,提供理论支持。

参考文献

[1] 姚星安,曾智健,杨威,等. 广东电力市场结算机制设计与实践[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(2):76-85.

[2] 闵子慧,陈红坤,林洋佳,等. 新电改背景下大用户直购双边博弈模型[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(6):77-84.

[3] 吴敬慧,张杰,潘舒妍,等. 电力现货市场中标准零售套餐设计——基于用户分群的分析[J]. 价格理论与实践,2019,426(12):132-136.

[4] 赵琛,张少华. 考虑用户切换行为的电力零售市场博弈模型[J]. 电力自动化设备,2020,40(2):162-168.

[5] 肖谦,杨再敏,杨悦勇,等. 国外电力差价合约模式及其启示[J]. 广东电力,2020,33(2):27-34.

[6] 张小平,李佳宁,付灏. 英国电力零售市场的改革与挑战[J]. 电力系统自动化,2016,40(11):10-16.

[7] 陈博. 澳大利亚电力改革对我国电力零售市场的启示[J]. 科技创新与应用,2018(36):15-16.

[8] 袁黎. 新加坡电力零售市场改革的经验启示[J]. 中国电力企业管理,2017(2):51-53.

[9] Kamyab F, Amini M, Sheykha S, et al. Demand Response Program in Smart Grid Using Supply Function Bidding Mechanism[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016,7(3):1277-1284.

[10] 陈皓勇,陈玮,朱刚毅,等. “电力市场设计学”的基本概念及方法论[J]. 电力大数据,2018,21(6):1-8.

[11] 陈晓林,刘俊勇,宋永华,等. 利用差价合同和金融输电权的组合规避电力市场风险[J]. 中国电机工程学报,2005,25(10):75-81.

[12] KEE E D. Vesting Contracts: A Tool for Electricity Market Transition[J]. The Electricity Journal, 2001,14(6):11-22.

[13] Hausman, Hornbyr, Smith A. Bilateral Contracting in Deregulated Electricity Markets[R]. New York: American Public Power Association, 2008.

[14] Chang Y. The New Electricity Market of Singapore: Regulatory Framework, Market Power and Competition[J]. Energy Policy, 2007, 35(1): 403 – 412.

[15] 李晨, 周黎莎, 曾鸣. 新能源并网对电力市场影响的系统动力学建模与仿真[J]. 华东电力, 2012(10): 1675 – 1679.

[16] 刘敦楠, 李瑞庆, 陈雪青, 等. 电力市场监管指标及市场评价体系[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(9): 16 – 21.

[17] 张晓萱, 薛松, 杨素, 等. 售电侧市场放开国际经验及其启示[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(9): 1 – 8.

[18] 罗琴, 宋依群. 售电市场环境下的计及可中断负荷的营销策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(17): 134 – 139.

[19] Zarnikau J W. Demand Participation in the Restructured Electric Reliability Council of Texas Market[J]. Energy, 2010, 35(4): 1536 – 1543.

[20] Wild P. Determining Commercially Viable Two – way and One – way ‘Contract – for – Difference’ Strike Prices and Revenue Receipts [J]. Energy Policy, 2017, 110: 191 – 201.

[21] 洪江涛, 黄沛. 基于微分博弈的供应链质量协调研究[J]. 中国管理科学, 2016, 24(2): 100 – 107.

[22] Wang S, Hu Q, Liu W. Price and Quality – based Competition and Channel Structure with Consumer Loyalty [J]. European Journal of Operational Research, 2017, 262(2): 563 – 574.

[23] 李金溪, 易余胤. 考虑产品节能激励的双寡头竞争

博弈模型[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(6): 1522 – 1530.

[24] Pan X, Li S. Dynamic Optimal Control of Process – product Innovation with Learning by Doing [J]. European Journal of Operational Research, 2016, 248(1): 136 – 145.

[25] Lin K Y, Sibdari S Y. Dynamic Price Competition with Discrete Customer Choices [J]. European Journal of Operational Research, 2009, 197(3): 969 – 980.

[26] Martinez – de – Albeniz V, Talluri K. Dynamic Price Competition with Fixed Capacities [J]. Management Science, 2011, 57(6): 1078 – 1093.

作者简介:

崔东君(1984), 男, 博士研究生, 高级工程师, 主要从事电力交易组织工作, 主要研究方向为电力市场与电力交易;

和敬涵(1964), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统保护与电力市场;

程晓春(1970), 男, 高级工程师, 主要从事电力市场建设、电力交易组织运营等工作;

程 宏(1971), 男, 高级工程师, 主要从事电力市场建设等工作;

王 宇(1970), 男, 高级工程师, 主要从事电力市场化交易管理等工作;

李冬梅(1966), 女, 高级工程师, 主要从事电力交易组织管理工作。

(收稿日期: 2020 – 07 – 15)

(上接第 4 页)

域中, 附近 100 m 内有输电线路杆塔的配电网杆塔, 均为较高及以上的风险等级。高土壤电阻率和强地闪密度区域的杆塔, 大部分为较高及以上的风险等级。风险评估结果较为合理。

参考文献

[1] 刘振亚. 国家电网公司配电网工程典型设计 10 kV 配电分册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.

[2] 赵磊, 张健文, 夏云忠. 20 kV 架空绝缘电缆防雷措施的研究[J]. 高压电器, 2010, 46(10): 52 – 55.

[3] 李琳, 齐秀君. 配电线路感应雷过电压计算[J]. 高电压技术, 2011, 37(5): 1093 – 1099.

[4] 边凯, 陈维江, 李成榕, 等. 架空配电线路雷电感应过电压计算研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(31): 191 – 199.

[5] H. K. Høidalen. Analytical Formulation of Lightning – induced Voltages on Multiconductor Overhead Lines

above Lossy Ground [J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2003, 45(1): 92 – 100.

[6] H. K. Høidalen. Calculation of Lightning – induced Voltages in MODELS Including Lossy Ground Effects [C]. International Conference on Power System Transient, New Orleans, 2003.

[7] 雷潇, 刘强, 刘守豹, 等. 土壤电阻率对 10 kV 架空线路雷害风险的影响研究[J]. 电瓷避雷器, 2016(6): 116 – 119.

[8] 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合: DL/T 620—1997[S], 1997.

[9] 雷区分级标准与雷区分布图绘制规则: Q/GDW 10672—2017[S], 2017.

作者简介:

雷 潇(1988), 男, 博士, 高级工程师, 从事输配电线路雷电防护技术研究。

(收稿日期: 2020 – 12 – 15)

基于运行最优模拟的综合能源系统经济评价方法

马 超, 肖 汉, 李嘉逸

(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610021)

摘 要:基于综合能源项目全生命周期分析法,通过系统运行优化调度模拟,提出了一种聚合燃气轮机、锅炉、风机、光伏、电热储能、电负荷、热负荷等的综合能源协调优化调度模型和全生命周期的经济分析模型的经济评价方法,解决了综合能源规划设计中粗放式经济分析估算的问题;并以重庆某一园区 CHP 型综合能源系统为例,通过对供能调度模拟及经济指标的分析,验证了该经济评价方法的有效性。结果表明,所提出的基于运行最优模拟的综合能源系统经济评价方法能够极大地提高综合能源规划设计经济分析的精确性和灵活性,能够更好地评价系统方案的合理性和可操作性。

关键词:综合能源;全生命周期;优化调度;经济评价

中图分类号:F407 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2021)01-0077-06

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210116

Economic Evaluation Method of Integrated Energy System Based on Operational Optimal Simulation

Ma Chao, Xiao Han, Li Jiayi

(CPECC Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610021, Sichuan, China)

Abstract:Based on the life cycle analysis method of integrated energy project and considering the optimal dispatching strategy of system operation, an economic evaluation method is proposed with integrated energy coordination and optimal dispatching model and full life cycle economic analysis model together, including gas turbine, boiler, fan, photovoltaic, electro-thermal energy storage, electric load and thermal load, which solves the problems of extensive economic analysis and estimation in comprehensive energy planning and designing. Taking CHP-type integrated energy system of a park in Chongqing for example, the effectiveness of the proposed economic evaluation method is verified through the analysis of energy supply dispatch and economic indicators. The results show that the economic evaluation method of integrated energy system based on the proposed optimal operation simulation can greatly improve the accuracy and flexibility of economic analysis of integrated energy planning and designing, and can better evaluate the rationality and operability of the system scheme.

Key words:integrated energy; whole life cycle; optimal dispatch; economic evaluation

0 引 言

随着中国能源结构的持续调整,一种能够实现节能减排、有效提高能源利用效率促进绿色健康发展的新型一体化能源系统(综合能源系统)得到越来越多的关注。作为新型能源系统,其具有多元、耦合、协调的鲜明特征。如何让系统能够满足用户多变的能源需求。同时实现效率最大化,是亟需研究的问题^[1-4]。

目前,各类综合能源示范系统大多以热电联供系统(combined heat and power, CHP)为供能核心,聚合风能、太阳能、地热、储能等系统联合构建一个完整的供能系统。根据用户的电、热负荷情况,采用合理的运行策略和供能模式对联供系统运行性能的提高有很大帮助^[5-6]:一方面可以减少非可再生能源消耗,优化电源结构;另一方面可以促进新能源消纳,改善电能清洁度。中国正在加速能源系统的多能协同、互补发展,新能源微电网示范项目朝着“源-网-荷-储”一体化方向发展建设^[7-8]。

下面从综合能源规划设计角度出发,将综合能源优化调度与项目全生命周期经济分析相结合,提出了基于运行最优模拟的综合能源系统经济评价方法。外层为全生命周期的经济评价模型,内层为生产模拟的 0-1 混合整数规划模型,通过调节能源供给生产运行方式和状态,实现对系统综合效益的分析评价。

1 综合能源系统结构

综合能源系统是指以电力网为载体,融合热网、天然气网等多种能源网络,涵盖多能源的生产、传输、供给的系统。目前应用和推广较多的一般是以三联供系统为核心,辅以风电/光伏系统、储能系统等构成的多能源综合供给系统,系统结构如图 1 所示。

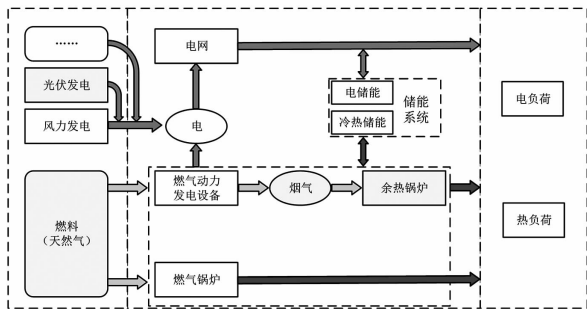


图 1 一般综合能源系统结构

2 经济评价分析模型

经济评价分析模型是在项目全生命周期内,综合考虑能源系统的生产协调调度优化问题,聚合不同供能单元间和不同能源品类间的能量传输供给,实现电、热等能量的平衡,从而准确地计算出工程项目的经济性。所建经济评价分析模型由外层模型和内层模型构成,外层模型为全生命周期的建设项目经济评价模型,内层模型为生产模拟的最大运行收益优化模型。在设定目标收益值下,不断调整边际参数,通过内外层的循环迭代,计算得到满足工程需求的边界值来分析工程项目的经济可行性,从而为工程的规划咨询设计提供数据支持,其算法流程如图 2 所示。

2.1 经济评价分析模型

一般对于工程的经济性分析以盈利能力分析为主,清偿能力分析为辅,通过各种分析指标评价判断

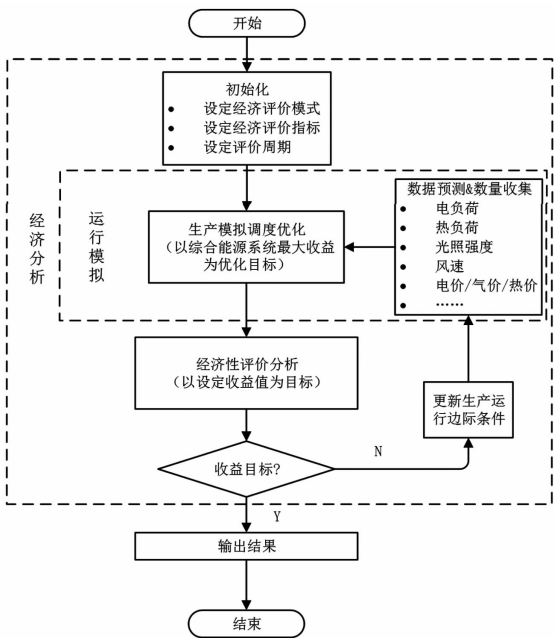


图 2 运行最优模拟的综合能源系统经济评价流程

项目在经济上的可行性。这里主要从盈利分析的角度建立经济分析模型,依据《建设项目经济评价方法与参数》^[9],主要从融资前和融资后两个角度分析项目的经济可行性。主要指标包括财务内部收益率(F_{IRR})、投资回收期(P)、财务净现值(F_{NPV})等。

1) 财务内部收益率

$$\sum_{t=1}^n (C_{\text{sale}} - C_{\text{run}} - C_{\text{oth}})_t (1 + F_{IRR \cdot \text{aim}})^{-t} = 0 \tag{1}$$

式中: C_{sale} 为销售收入,包含售电、售热等收入之和; C_{run} 为运行成本包括原料成本、维修成本或购电成本等; C_{oth} 为借贷费用及税费支出等; $F_{IRR \cdot \text{aim}}$ 为设定财务内部收益率; n 为项目运营计算周期。

2) 项目投资回收期

$$\sum_{t=1}^{P_t} (C_{\text{sale}} - C_{\text{run}} - C_{\text{oth}})_t = 0 \tag{2}$$

式中, P_t 为项目投资回收期,投资回收期一般以年为单位,宜从建设期开始算起。

3) 财务净现值

$$F_{NPV} = \sum_{t=1}^n (C_{\text{sale}} - C_{\text{run}} - C_{\text{oth}})_t (1 + i_c)^{-t} \tag{3}$$

式中: F_{NPV} 为项目财务净现值; i_c 为按照行业基准选取的基准收益率。

2.2 运行模拟调度优化模型

2.2.1 目标函数

内层优化调度模型以最大收益为优化目标,在

设定目标收益值的情况下,综合能源系统主要收益来源为售电、售热收入,运行成本主要是系统运行费用、维护费用以及电网电量购入费用^[10-16]。其优化目标函数可以表示为

$$\max \sum_{h=1}^T (C_{\text{sale},h} - C_{\text{run},h}) \quad (4)$$

式中: $C_{\text{sale},h}$ 为 h 时段能源系统销售收入; $C_{\text{run},h}$ 为 h 时段能源系统的运行成本; T 为优化调度计算周期。

综合能源系统的销售收益为

$$\begin{aligned} C_{\text{sale},h} &= C_{\text{ele},h} + C_{\text{heat},h} \\ &= \sum_{i=1}^{n_p} \lambda_{\text{ele},i}^h P_i^h + \sum_{i=1}^{n_q} \lambda_{\text{heat},i}^h Q_i^h \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $C_{\text{ele},h}$ 为 h 时段的系统售电收入; $C_{\text{heat},h}$ 为 h 时段的售热收入; $\lambda_{\text{ele},i}^h$ 为 h 时段系统第 i 种电能的销售价格; P_i^h 为 h 时段系统第 i 种电源的出力; $\lambda_{\text{heat},i}^h$ 为 h 时段系统第 i 种热源的销售价格; Q_i^h 为 h 时段系统第 i 种热源的出力。

综合能源系统的运行成本为

$$\begin{aligned} C_{\text{run},h} &= C_{\text{fuel},h} + C_{\text{ope},h} + C_{\text{grid},h} \\ &= \sum_{i=1}^{n_{\text{chp}}} \lambda_{\text{fuel},i}^h f(P_i^h) + \sum_{i=1}^{n_{\text{gb}}} \lambda_{\text{fuel},i}^h f(Q_i^h) \\ &\quad + \lambda_{\text{ope}}^h + \lambda_{\text{grid}}^h P_{\text{grid}}^h \end{aligned} \quad (6)$$

式中: $C_{\text{fuel},h}$ 表示 h 时段的系统燃料费用; $C_{\text{ope},h}$ 为 h 时段系统运维费用; $C_{\text{grid},h}$ 为 h 时段购电费用; λ_{fuel}^h 为 h 时段天然气价格, f 为耗量特性曲线; P_i^h 为第 i 台燃气轮机的电功率输出, Q_i^h 为第 i 台调峰燃气锅炉的功率输出; λ_{ope}^h 为系统 h 时段的运维费用; λ_{grid}^h 为 h 时段购电或售电价格; P_{grid}^h 为 h 时段的系统购电量。

2.2.2 约束条件

综合能源系统优化调度模型的约束条件包括功率平衡约束、设备运行约束、设备容量约束等。

1) 电功率平衡方程式

$$\sum_{i=1}^{n_p} P_i^h + P_{\text{grid}}^h + P_{\text{store},\text{out}}^h - P_{\text{store},\text{in}}^h = P_{\text{load}}^h \quad (7)$$

式中: P_i^h 为 h 时段第 i 台机组发电功率; P_{grid}^h 为 h 时段从电网的购电量; $P_{\text{store},\text{out}}^h$ 、 $P_{\text{store},\text{in}}^h$ 分别为 h 时段蓄电池充放电输出和输入电功率; P_{load}^h 为 h 时段的负荷需求。

2) 热功率平衡方程式

$$\sum_{i=1}^{n_q} Q_i^h + Q_{\text{Hstore},\text{out}}^h - Q_{\text{Hstore},\text{in}}^h = Q_{\text{load}}^h \quad (8)$$

式中: Q_i^h 为 h 时段第 i 台机组输出的热功率; $Q_{\text{Hstore},\text{out}}^h$ 、 $Q_{\text{Hstore},\text{in}}^h$ 分别为 h 时段蓄热装置的输出、输入热功率; Q_{load}^h 为 h 时段系统热负荷需求。

3) 设备出力约束

$$\begin{aligned} P_{i,\text{min}} &\leq P_i^h \leq P_{i,\text{max}} \\ P_{\text{grid},\text{min}} &\leq P_{\text{grid}}^h \leq P_{\text{grid},\text{max}} \\ P_{\text{store},\text{out},\text{min}} &\leq P_{\text{store},\text{out}}^h \leq P_{\text{store},\text{out},\text{max}} \\ P_{\text{store},\text{in},\text{min}} &\leq P_{\text{store},\text{in}}^h \leq P_{\text{store},\text{in},\text{max}} \\ Q_{i,\text{min}} &\leq Q_i^h \leq Q_{i,\text{max}} \\ Q_{\text{Hstore},\text{out},\text{min}} &\leq Q_{\text{Hstore},\text{out}}^h \leq Q_{\text{Hstore},\text{out},\text{max}} \\ Q_{\text{Hstore},\text{in},\text{min}} &\leq Q_{\text{Hstore},\text{in}}^h \leq Q_{\text{Hstore},\text{in},\text{max}} \end{aligned} \quad (9)$$

式中: $P_{i,\text{max}}$ 、 $P_{i,\text{min}}$ 分别为第 i 台机组电功率的上、下限; $P_{\text{grid},\text{max}}$ 、 $P_{\text{grid},\text{min}}$ 分别为向电网购电的上、下限; $Q_{i,\text{max}}$ 、 $Q_{i,\text{min}}$ 分别为第 i 台机组热功率的上、下限; $P_{\text{store},\text{out},\text{max}}$ 、 $Q_{\text{Hstore},\text{out},\text{max}}$ 、 $P_{\text{store},\text{in},\text{max}}$ 、 $Q_{\text{Hstore},\text{in},\text{max}}$ 、 $P_{\text{store},\text{out},\text{min}}$ 、 $Q_{\text{Hstore},\text{out},\text{min}}$ 、 $P_{\text{store},\text{in},\text{min}}$ 、 $Q_{\text{Hstore},\text{in},\text{min}}$ 分别为储能蓄电与蓄热装置的单位时间输入、输出功率上、下限。

4) 储能装置能量约束

$$\begin{aligned} W_{e,\text{store},\text{min}} &\leq W_{e,\text{store}}^h \leq W_{e,\text{store},\text{max}} \\ W_{h,\text{store},\text{min}} &\leq W_{h,\text{store}}^h \leq W_{h,\text{store},\text{max}} \end{aligned} \quad (10)$$

式中: $W_{e,\text{store}}^h$ 、 $W_{h,\text{store}}^h$ 为 h 时段储能装置的能量状态; $W_{e,\text{store},\text{max}}$ 、 $W_{h,\text{store},\text{max}}$ 、 $W_{e,\text{store},\text{min}}$ 、 $W_{h,\text{store},\text{min}}$ 分别为储能装置的最大和最小储能。

2.3 模型求解方法

经济评价模型求解的核心在于内层生产优化调度的模型求解。内层函数为含有耗量特性曲线、热电比曲线的非线性函数模型,通过分段线性化的方法将问题转化为 0-1 混合整数线性规划问题,求解标准形式为^[10]

$$\begin{cases} \min c^T x \\ \text{s. t. } Ax = b \\ x_{\min} \leq x_i \leq x_{\max}, i \in I \\ x_j \in \{0,1\}, j \in J \end{cases} \quad (11)$$

式中: x 为源类设备的出力、转换设备的输入、储能的输入和输出、电网购电量的优化变量;等式约束为能量平衡方程式以及储能设备的储能关系式;不等式约束为各设备运行约束。由于约束条件中包含耦合变量,如蓄电池的充放电功率、电网的购电和回购功率等,因此在模型中引入 0-1 变量。

针对上述模型,可采用常用线性规划软件如 CPLEX 等对其求解,这里采用 Matlab 编写了基于 CPLEX 优化引擎的算法求解程序对该模型进行求解。

3 实例分析

3.1 边际条件

该案例位于重庆某规划工业园区,总面积约为 4.6 km²,是以环保及装备制造、医药化工、特色轻工产业功能为主的产业聚集区。园区用电负荷约为 30.96 MWh,热负荷约为 26 t/h。图 3 为园区典型日负荷曲线,由于工业园区生产型企业居多,且其倒班轮换的工作机制使得工业园区一般都具有较为稳定的电、热负荷。工业园区各类负荷都比较大,受季节性变化影响较小,案例中假设每月逐天的需求相同。园区综合能源系统方案如表 1 所示,对其 CHP 系统、光气互补系统进行评价比较。通过调研分析,该系统投资造价、负荷及光伏预测出力数据如表 2、表 3 所示。

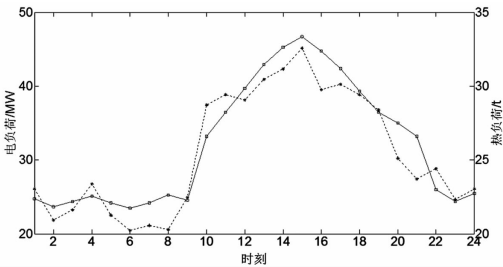


图 3 园区典型日电热负荷需求

表 1 园区综合能源系统方案

方案	综合能源系统方案
1	CHP 系统;电网 + CHP 系统
2	光气互补系统:电网 + CHP 系统 + 光伏机组

表 2 综合能源系统投资估算

系统设备	投资估算/万元
CHP 系统	16 531
中低压配电网	6808
光伏发电系统	2200

3.2 结果分析

为了验证所提经济评价方法的有效性,采用基于运行最优模拟的经济评价分析方法对两种设定的供能方案分别进行计算分析,分析边际条件如表 4 所示,两种方案优化计算结果如表 5 所示,日间热电调度情况如图 4、图 5 所示。该分析计算结果为假

定热价不变的情况下,以电价为测算指标进行计算。

表 3 光伏出力和负荷分布

序号	时刻	电负荷/ MW	热负荷/ (t · h ⁻¹)	光伏预测 功率/ MW
1	00:00—01:00	26.05	22.37	0
2	01:00—02:00	21.86	21.83	0
3	02:00—03:00	23.26	22.19	0
4	03:00—04:00	26.74	22.55	0
5	04:00—05:00	22.56	22.10	0
6	05:00—06:00	20.46	21.74	0.25
7	06:00—07:00	21.16	22.10	0.90
8	07:00—08:00	20.60	22.64	1.55
9	08:00—09:00	24.93	22.28	2.15
10	09:00—10:00	37.44	26.60	2.60
11	10:00—11:00	38.84	28.22	2.85
12	11:00—12:00	38.14	29.84	3.20
13	12:00—13:00	40.93	31.46	3.10
14	13:00—14:00	42.33	32.63	2.70
15	14:00—15:00	45.12	33.35	2.15
16	15:00—16:00	39.54	32.36	1.50
17	16:00—17:00	40.24	31.19	0.90
18	17:00—18:00	38.84	29.66	0.30
19	18:00—19:00	36.75	28.22	0
20	19:00—20:00	30.23	27.50	0
21	20:00—21:00	27.44	26.60	0
22	21:00—22:00	28.84	23.00	0
23	22:00—23:00	24.65	22.19	0
24	23:00—24:00	26.05	22.73	0

表 4 综合能源系统方案测算边际条件

参数	数值	参数	数值
融资比/%	0.2	天然气/Nm ³	1.8
贷款利率/%	4.9	容量电价/(元/kVA · 月)	24
贷款期限/a	10	建设期/a	1
运营期/a	30	网损率/%	0.5

表 5 两种方案分析结果比较

方案	发电/ MW	产热/ GJ	生产成本/ 万元	目标收益率/ %	电价/ 元
1	85 029	597 568	16 375	5	0.603 1
2	93 095	597 568	16 183	5	0.596 5

注:分析结果按锁定项目资本金内部收益率 5% 的情况下进行测算。重庆市 110 kV 目录电价为 0.565 7 元/kWh,10 kV 目录电价为 0.605 7 元/kWh,含政府基金 0.049 7 元/kWh。

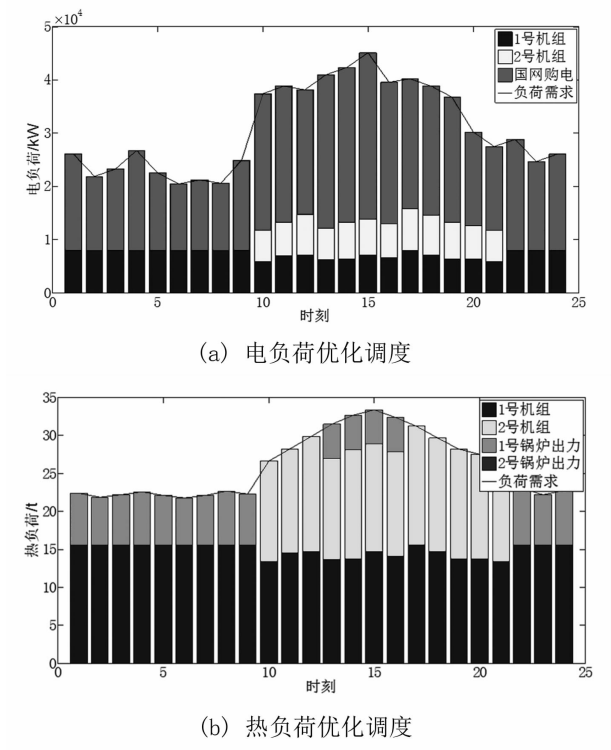


图 4 电热负荷调度优化情况(方案 1)

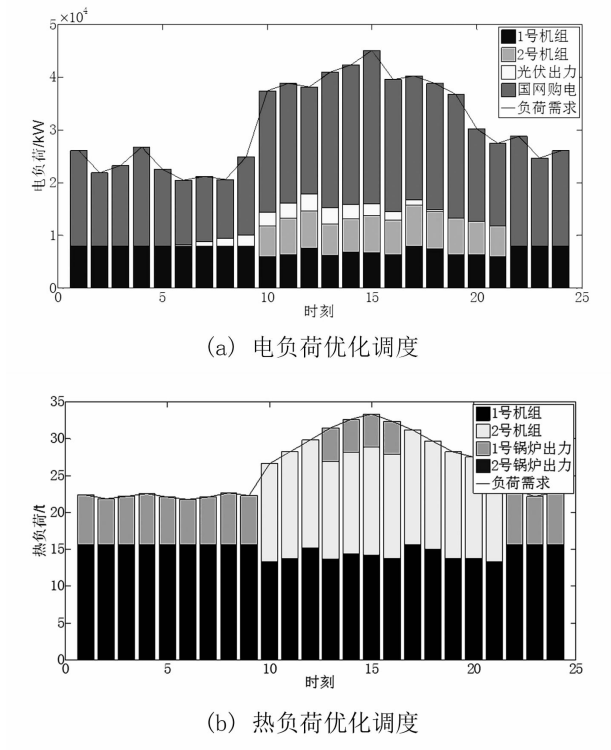


图 5 电热负荷调度优化情况(方案 2)

对比方案 1 和方案 2 可以发现,通过增加光伏系统实现光气互补,能够在满足工程项目收益的情况下有效降低用户侧的用能成本,同时模拟得到全

生命周期的优化调度生产曲线。
在实际工程生产中,通常需要对销售侧电热价格进行比选计算,下面通过运行最优模拟的经济评价方法,将热价、电价作为双变量进行分析计算,给出了在方案 2 的基础上,当电力市场热价格浮动 5% 的情况下的对应电价格曲线,如图 6 所示。通过计算曲线,能够根据不同客户需求,制定不同热电市场交易套餐,即不同的热电价格组合,从而更有利于推进工程项目落地实施。

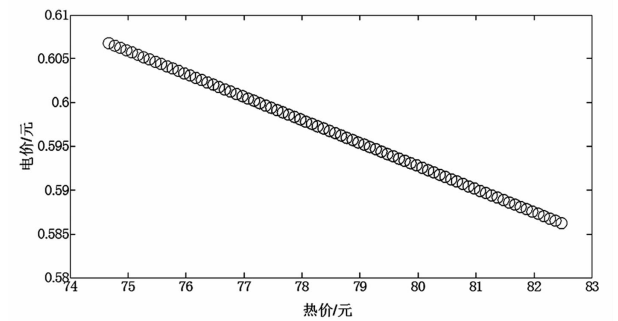


图 6 目标收益下终端电价、热价变化

4 结 语

前面提出了基于运行最优模拟的综合能源系统经济评价方法,建立了聚合燃气轮机、锅炉、风机、光伏、电热储能、电负荷、热负荷等的综合能源协调调度优化模型和全生命周期经济分析的经济评价模型,解决了传统综合能源规划设计中粗放式分析估算的问题。以重庆某园区 CHP 型综合能源系统为例,通过对不同供能方案下经济性的分析,验证该经济评价分析方法的有效性。结果表明,所提出的基于运行最优模拟的综合能源系统经济评价方法能够极大地提高综合能源规划设计分析的精确性和灵活性,能够更好地实现自然资源的合理配置和系统方案设计。

参考文献

[1] 贾宏杰,王丹,徐宪东,等. 区域综合能源系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化,2015,39(7):198-207.
[2] 张东霞,姚良忠,马文媛. 中外智能电网发展战略[J]. 中国电机工程学报,2013,33(31):1-14.
[3] 胡燕飞,吴静怡,李胜. 冷热电联供系统的优化运行分析[J]. 华北电力大学学报,2010,31(1):5-9.
[4] Siddiqui A S, Firestone R M, Ghosh Srijay, et al. Distribu-

ted Energy Resources Customer Adoption Modeling with Combined Heat and Power Applications [R]. Berkeley, CA, USA: California Energy Commission, 2004.

[5] 荆有印,白鹤,张建良. 太阳能冷热电联供系统的多目标优化设计与运行策略分析[J]. 中国电机工程学报, 2012,32(20):82-87.

[6] 李赞,黄兴华. 冷热电三联供系统配置与优化策略的优化[J]. 动力工程,2006,26(6):894-898.

[7] 蒋润花,蔡睿贤,韩巍,等. 太阳能与冷热电联产系统集成[J]. 工程热物理学报,2009,30(5):721-724.

[8] 张世翔,吕帅康. 面向园区微电网的综合能源系统评价方法[J]. 电网技术,2018,42(8):2431-2438.

[9] 国家发展改革委建设部. 建设项目经济评价方法与参数[M]. 北京:中国计划出版社,2006.

[10] 王成山,洪博文,郭力,等. 冷热电联供微网优化调度通用建模方法[J]. 中国电机工程学报,2013,33(31):23-33.

[11] 于波,孙恒楠,项添春,等. 综合能源系统规划设计方法[J]. 电力建设,2016,37(2):78-84.

[12] 夏永洪,吴虹剑,辛建波,等. 考虑风/光/水/储多源互补特性的微网经济运行评价方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(7):63-69.

[13] 王锐,顾伟,吴志. 含可再生能源的热电联供型微网经济运行优化[J]. 电力系统自动化,2011,35(8):22-27.

[14] 郑漳华,艾芊,徐伟华. 智能电网经济运行的多目标调度优化策略[J]. 电网技术,2010,34(2):7-13.

[15] Mago P J, Chamra L M. Analysis and Optimization of CCHP Systems Based on Energy, Economical, and Environmental Considerations [J]. Energy and Buildings, 2009,41(10):1099-1106.

[16] [泰]威拉昆·昂撒考(Weerakorn Ongsakul),[越]天·语·屋(Dien Ngoc Vo)著. 连晓峰译. 人工智能在电力系统优化中的应用[M]. 北京:机械工业出版社,2015.

作者简介:

马 超(1990),男,硕士研究生,工程师,主要从事综合能源规划、工程经济性分析、智能配电网方面的研究工作。

(收稿日期:2020-08-08)

(上接第 37 页)

查找线路单相接地故障点试送时,根据需要,可临时退出接地跳闸出口压板。

3) 推广使用 CT 自产零序电流。从保护装置算法等方面升级,采用自产零序的方式,避免外接零序 CT 带来的一系列问题。

4 结 语

随着城市配电网的不断发展,电缆线路越来越密集,电缆沟道数量急剧增加,对快速切除电缆线路单相接地故障的要求越来越高,对比开展了小电流接地系统单相接地故障时快速切除故障的研究与试点。

首先,对灵活并小电阻选线跳闸、灵活并中电阻选线跳闸、主动干预灭弧、分布式选线跳闸、集中式选线跳闸共 5 种接地选线跳闸方案的动作逻辑、主要优缺点进行了介绍及评述;然后,通过某电力公司试点建设的动作数据及运行经验,分析认为通过二次设备改造的分布式、集中式选线方案准确率较高,且不会对一次系统造成影响;最后,通过逐级配合选线跳闸后不会扩大停电范围,建议已投运变电站推荐集中式单相接地选线跳闸方案,新建与改造变电

站推荐分布式单相接地选线跳闸方案。

参考文献

[1] 艾冰,张如恒,李亚军. 小电流接地故障选线技术综述[J]. 华北电力技术,2009,45(6):45-49.

[2] 李建鸿,夏金亮,蒋伟. 小电流接地系统单相接地故障分析及预防措施[J]. 山东电力技术,2019,41(6):46-50.

[3] 董雷,何林. 中性点接地方式对配电网可靠性的影响[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(1):96-101.

[4] 李科峰,张海台,樊晓峰,等. 小电流接地故障选线技术探讨[J]. 山东电力技术,2017,44(241):41-49.

[5] 李谦,赵东生,肖磊石,等. 广东电网小电流接地系统中性点接地方式优化对策[J]. 广东电力,2017,30(12):124-129.

[6] 何满,梁庆光. 配电网小电流接地选线情况分析及提升措施[J]. 电气开关,2016(2):11-12.

作者简介:

周 兰(1983),女,本科(工程硕士),高级工程师,主要从事电力系统继电保护方面的工作与研究;

尚 超(1988),男,硕士研究生,工程师,主要从事电力系统调度与运行方式方面的工作与研究。

(收稿日期:2020-06-30)

计及经济因素的混合模型电量预测研究

徐久益¹, 李自明¹, 姚剑峰², 杨晓雷², 屠一艳², 李 杰¹
(1. 国网浙江桐乡市供电有限公司, 浙江 桐乡 314500;
2. 国网嘉兴供电公司, 浙江 嘉兴 314000)

摘 要:精确的电量预测是进行电网规划和建设的重要依据。为解决月度用电量预测方法思路单一、预测模型通用性不强、预测精度低等问题,通过对区域用电量与经济的历史数据研究分析,提出了一种计及经济因素影响的混合模型月度用电量预测方法。该方法将回归分析法和指数平滑法这两种预测方法相结合,建立电量预测模型,取得了较高的预测精度;最后,将本模型运用于浙江嘉兴地区月用电量预测,结果表明,该模型预测平均绝对百分误差为 2.31%,从而验证了该模型的有效性与通用性。

关键词:月度电量预测;混合模型;经济因素;回归分析法;指数平滑法

中图分类号:TM74 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2021)01-0083-06

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210117

Research on Electricity Consumption Prediction under Mixed Model Considering Economic Factors

Xu Jiuyi¹, Li Ziming¹, Yao Jianfeng², Yang Xiaolei², Tu Yiyan², Li Jie¹
(1. State Grid Tongxiang Electric Power Supply Co., Ltd., Tongxiang 314500, Zhejiang, China;
2. State Grid Jiaxing Electric Power Supply Company, Jiaxing 314000, Zhejiang, China)

Abstract:Precise electricity consumption prediction provides an important basis for layout and construction of power grid. In order to solve the problems of single method, weak universality and low accuracy of prediction models, a monthly electricity consumption prediction method under mixed model on the basis of economic factors is proposed through analyzing the historical data of electricity consumption and economy. The regression analysis method and exponential smoothing method are combined to set up a mixed model of electricity consumption prediction, which contributes to the high prediction accuracy. At last, the proposed model is applied to the monthly electricity consumption prediction of Jiaxing area. The results show that its mean absolute percentage error (MAPE) is 2.31%, which verifies the effectively and universality of the model.

Key words:monthly electricity consumption prediction; mixed model; economic factor; regression analysis method; exponential smoothing method

0 引 言

电力系统规划设计和运行管理依赖用电量数据。同时,用电量又是经济变化的“风向标”。因此,月度用电量的准确预测既是实现电网安全、经济运行的基础,也对把握宏观经济发展趋势起到至关重要的作用^[1-2]。

月度用电量预测是电力需求侧管理重要的市场
基金项目:国家电网有限公司 QC 项目(JDTX-2019F)

预测技术手段,精确的用电量预测对于平衡区域电力电量、精准的电网投资、电力现货市场交易、有效实施电力需求侧管理和节能降耗战略等^[2]都有着十分重要的意义。

传统的电量预测方法如回归分析法、时间序列预测法、灰色预测、神经网络等预测方法^[3-6],其预测精度已经不能满足当前电网发展需求。目前,电量预测技术和理论不断涌现,一些学者对月度用电量的预测方法进行研究,在传统预测方法上面不断改进,也取得新的成果。文献[7]在传统时间序列

预测模型基础上,提出了考虑经济因素时滞效应的月度电量预测方法。文献[8]从影响月度用电量的因素出发,利用计量经济学中的协整检验以及格兰杰因果检验来分析经济因素与用电量的关系,提出一种基于协整-格兰杰因果检验和季节分解的月电量预测方法。近年来,中国的经济发展进入转型期,各地区月度用电量的变化也呈现差异性和多样性,因此,这些预测方法的运用也存在一定的局限性。基于此,通过对区域历史数据的研究分析,挖掘其发展的规律和特点,并结合两种算法优势建立电量预测模型,创新性地提出了一种计及经济因素的混合模型电量预测新方法,为地区月度用电量预测提供了一种新选择。

1 数据分析与挖掘

电量预测的核心是根据区域用电量的历史数据以及对用电量产生影响的经济、气候等因素的历史数据,建立数学模型来表述用电量发展变化规律。因此,在建立数学模型之前,首先需要对历史数据进行分析 and 处理,研究和挖掘出历史数据发展的内在规律性^[9]。

1.1 数据分析

所用数据来源于中国中西部某区域电网公司,如表 1 和表 2 所示。

1.2 数据预处理

通过分析半年度电量与半年度经济总量的关系

表 1 中西部某区域电网公司近年各月电量情况

单位:GWh

年份	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	合计
2014 年	4456	4314	4698	4809	4890	4905	5357	5259	4937	4709	4761	4330	57 425
2015 年	5460	4243	5023	5419	5110	5565	5920	6125	5678	5438	5477	5605	65 063
2016 年	5782	5287	5786	5821	5805	5948	6003	6428	5749	5544	6122	6592	70 867
2017 年	6140	6260	6497	6457	6128	6342	6899	6897	6470	6300	6211	6038	76 639
2018 年	6312	6218	6522	6535	6333	6455	6901						

表 2 中西部某区域相关经济数据

经济数据	2014 年		2015 年		2016 年		2017 年	
	1—6 月	1—12 月	1—6 月	1—12 月	1—6 月	1—12 月	1—6 月	1—12 月
规模以上工业增加值/亿元	2830	6188	3002	6625	2792	6430	2965	6383
资产投资/亿元	4844	10 519	5782	12 576	6340	13 997	6795	15 147
社会消费品零售总额/亿元	2841	5827	3186	6589	3532	7332	3933	8114
出口总值/美元	1435	3731	1813	4375	1574	4438	1862	4837

可以发现,电量以及相关 4 类经济数据具有较强的时序特征,但 2015 年和 2016 年上半年的电量与经济总量的增长率存在明显的不一致性,其余年份对应的电量与经济总量增长率基本保持一致。

针对以上非一致性问题,将对原始数据进行预处理,主要是数据清洗,即对原始数据中的明显错误值、缺失值、异常值、可疑数据,选择合适的方法进行“清理”,使“脏”数据变为“干净”数据,也包括对重复记录进行删除。这里通过比较多种方法进行数据预处理,鉴于篇幅,仅介绍最终选择的箱形图检测方法,箱形图原理如图 1 所示,即对于一组数据,计算中位数、上下四分位数和上下限,若数值超过上下限则为异常值。下、中、上四分位数的位置计算方法为

$$f(Q_i) = i(n + 1)/4 \tag{1}$$

式中, $n = 12$,表示数据个数。经电量数据检测发现,存在异常的月份有 2014 年 7 月,2015 年 2 月、8 月,2016 年 2 月、8 月和 12 月,共 6 个月份。

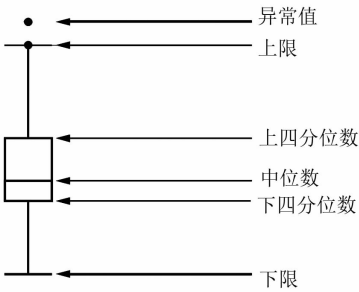


图 1 箱形图检测法的基本原理

检测出异常值后,需要通过分箱法对异常值进

行平滑处理,具体实现方法:若存在纵向两个数据则取纵向两个数据的均值 a ,再取横向两个数据的均值 b ,再取 a 、 b 的均值作为异常点的替代值。最终将上述存在异常的 6 个月用电量数据依次替换为 5082、5021、5821、5518、6194、5822 GWh。

2 建立月度售电量预测新方法

2.1 模型的建立

建立合适的电量预测模型,是电量预测核心,针对本项目原始数据分析,2014—2018 年电量曲线波动不大、趋势平稳,且原始样本数据量小。而现代预测方法如神经网络、时间序列^[10]等需要大量数据进行训练才能得到比较准确的模型,对于本项目数据量较小的情况下,预测效果不好。

研究采用传统的回归分析法和指数平滑法^[11]相结合来建立电量值的预测模型,优点是这两种预测方法比较成熟,模型参数设置较少,几乎不需要人为调参,且在数据量较小的情况下仍能得到比较准确的结果。本项目所提模型和算法的整体流程如图 2 所示。

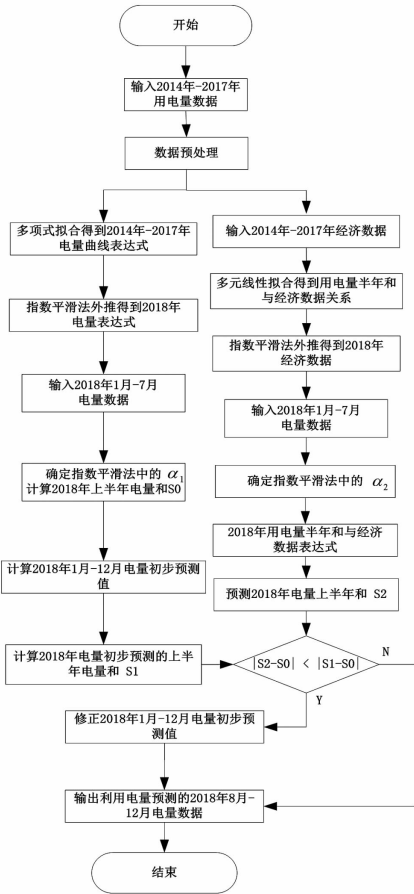


图 2 月用电量预测模型流程

1)区域用电量曲线具有一定的周期性、时序性,一般以年为单位,每年电量曲线变化趋势相同。选取同样次数的多项式分别拟合 2014—2017 年的用电量曲线,多项式的系数采用最小二乘法^[12]原则确定,即误差平方和最小,得到用电量与时间的关系式。多项式次数的选择采用自动寻优,选择效果最好的值。自动寻优找出最优拟合次数 9 次。

2)指数平滑法是一种数据预测方法,利用预测数据的变化在短期内保持历史数据的惯性特征,当前的数据与历史数据有关,且离现在时刻越近,对当前数据影响越大。本模型采用线性指数平滑模型:

$$F_{t+m} = a_t + b_t m \tag{2}$$

式中:

$$a_t = 2S_t^{(1)} - S_t^{(2)}; b_t = \frac{\alpha}{1 - \alpha}(S_t^{(1)} - S_t^{(2)}) \tag{3}$$

将步骤 1 中得到的 2014—2017 年的多项式函数的系数运用指数平滑法外推,得到 2018 年用电量与月份的关系:

$$\begin{aligned} f(x) = & 0.000\ 081\ 38\ x^9 - 0.004\ 741\ 82\ x^8 + \\ & 0.116\ 814\ 56\ x^7 - 1.584\ 389\ 12\ x^6 + \\ & 12.920\ 345\ 13\ x^5 - 65.031\ 307\ 13\ x^4 + \\ & 199.920\ 938\ 01\ x^3 - 358.480\ 374\ 09\ x^2 + \\ & 337.644\ 679\ 21\ x - 62.318\ 446\ 43 \end{aligned} \tag{4}$$

然后便可计算出 2018 年 1—12 月电量预测值,这是一个初始预测值,后续需要做修正。

3)采用多元线性回归法^[13],将用电量与其影响因素(即 4 类经济因素)进行拟合。用多元线性表达式来拟合半年电量和与这些经济数据的关系,表达式为

$$h(x_1, x_2, x_3, x_4) = ax_1 + bx_2 + cx_3 + dx_4 \tag{5}$$

式中: $h(x_1, x_2, x_3, x_4)$ 为半年电量和; x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 分别为规模以上工业增加值、固定资产投资、社会消费品零售总额和出口总值。2018 年上半年的经济数据与用电总量关系拟合表达式为

$$\begin{aligned} f(x) = & 0.043\ 239\ 8\ x_1 + 0.014\ 314\ 24\ x_2 + \\ & 0.072\ 597\ 81\ x_3 - 0.326\ 030\ 59\ x_4 - \\ & 46.704\ 427\ 381 \end{aligned} \tag{6}$$

4)作为一个多输入系统而言,考虑越多输入量对系统的输出预测越准确,但是为了简化电量预测模型,需要找到影响程度较大的因素,这就需要进行相关性分析。

相关性分析是指对两个或多个具备相关性的

变量元素进行分析,从而衡量两个变量因素的相关密切程度。相关性的元素之间需要存在一定的联系或者概率才可以进行相关性分析^[14]。分析不同元素的相关性需要计算它们之间的相关系数,其定义为

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_i)(y_i - \bar{y}_i)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_i)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2}} \quad (7)$$

式中: r 为样本相关系数; n 为样本总数; x 、 y 为样本观测值,在本项目中 x 为电量, y 为经济性因素。

需要计算各经济指标因素与电网电量的相关系数,找出对电网电量的影响大且影响较为稳定的因素,相关性结果如表 3 所示。

表 3 4 类经济因素与电量的相关性

经济因素	规模以上 工业增加值	固定资产 投资	社会消费品 零售总额	出口 总值
与电网电量的 相关系数	0.955	0.998	0.999	0.989

从表 3 可以看出,4 类经济数据与电网电量的相关度均较高,相关系数均大于 0.95,其中社会消费品零售总额相关度最高,因此,将 4 类经济数据作为电量预测建模研究的关键因素。

5)用半年电量和修正初始预测值,如果经济数据得到的 2018 年上半年电量和与步骤 2 中得到的初始预测数据的 2018 年上半年电量和相比,更接近实际数据,那么经济数据得到的 2018 年下半年电量和也会更接近,故用经济数据得到的电量和对步骤 2 得到的初始预测数据做修正。如果经济数据得到的 2018 年上半年电量和更不接近于实际数据,则不对初始电量预测数据进行修正。

修正的具体方法为整体倍数法:

$$\beta = (S_1 + S_2)/2 \quad (8)$$

式中: S_1 为经济数据得到的 2018 年下半年电量和; S_2 为步骤 2 中得到的 2018 年下半年电量和,对于 2018 年 8—12 月的初始预测数据都乘以 β ,得到本模型最终的预测结果。

3 算例分析

3.1 模型的验证

为了验证所提方法的实际运用效果,对给定的中国中西部某区域电网公司 2018 年 1—7 月的月用

电量进行了预测,与目前使用最广泛的 BPNN 预测、灰色预测进行比对,并计算平均绝对百分误差 (mean absolute percentage error,MAPE)。三者预测结果见表 4。

由表 4 可以看出,所提方法预测平均绝对百分误差最小,为 0.83%,由此可见,所提方法预测精度得到了有效提高,且具有更高的稳定性。

所建模型对未知的 2018 年 8—12 月的电量进行预测,并用经济数据对预测结果进行修正,结果如表 5 所示。

3.2 模型的应用

3.2.1 力助电力部门辅助决策

在已知浙江嘉兴地区月用电量数据与 4 类经济数据的前提下,将所建模型运用于与中西部区域电量波动、气候条件以及经济结构完全不同的嘉兴地区,对预测精度及通用性进行验证。表 6 为浙江嘉兴地区 2018 年 8—12 月份月用电量预测值。

经计算,所建模型预测的 MAPE 为 2.31%,证明其具有较高的预测精度且通用性强,可适用于不同地区的电量预测。

通过月用电量预测,进一步勾勒出嘉兴地区电量预测曲线,如图 3 所示,可更加精准地对地区用电量特性进行分析,为电网公司或电力部门提供辅助决策^[15],包括:为发展策划部门提供规划、决策、投资的依据;为财务部门提供电力现货交易市场的清晰判断;为营销部门提供增供扩销形势的判断。

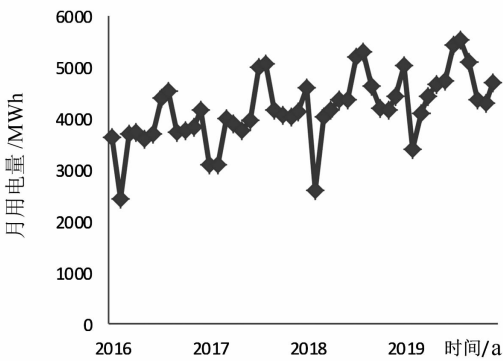


图 3 嘉兴地区月用电量预测曲线

3.2.2 提升主动服务能力

所建模型运用于某水泥厂大用户月用电量预测,可以了解用户电力消耗发展趋势,预测曲线如图 4 所示。

通过大用户电量预测曲线分析,供电公司可以为企业客户提升主动服务能力^[16],包括提前感知客

表 4 不同预测方法预测结果对比

时间	原始数据/ GWh	BPNN		灰色预测		所提方法	
		模型数据/ GWh	相对误差/ %	模型数据/ GWh	相对误差/ %	模型数据/ GWh	相对误差/ %
1 月	6312	6313	0.02	6331	0.30	6318	0.10
2 月	6218	4317	30.57	6251	0.53	6375	2.52
3 月	6522	5803	11.02	6345	2.71	6521	0.02
4 月	6535	5791	11.38	6289	3.76	6474	0.93
5 月	6333	6313	0.32	6253	1.26	6225	1.71
6 月	6455	6313	2.20	6436	0.29	6424	0.48
7 月	6901	6915	0.20	6797	1.51	6896	0.07
平均绝对误差/%		7.95		1.48		0.83	

表 5 2018 年 8—12 月的电量预测结果修正

单位:GWh

时间	修正前预测值	修正后预测值
8 月	6917	6933
9 月	6465	6480
10 月	6324	6339
11 月	6417	6432
12 月	6291	6306

表 6 嘉兴 2018 年 8—12 月月用电量预测值

单位:GWh

时间	实际值	预测值
8 月	5309	5269
9 月	4637	4273
10 月	4225	4185
11 月	4183	4181
12 月	4431	4339

4 结 语

将回归分析法和指数平滑法这两种预测方法相结合,建立电量预测模型,模型中所有参数都采用算法自动寻优,减少了人工干预带来的误差。通过对中西部区域实际历史数据精细和深入的挖掘,先用历史电量数据初步预测未来几个月电量,再用与电量相关性很高的经济因素修正电量初步预测值,新方法实际预测精度得到了有效提高。

算例分析的结果表明,预测 MAPE 为 0.83%,而模型在客观条件完全不同的嘉兴地区进行预测,MAPE 也仅为 2.31%,证明模型具有通用性。所提预测方法为地区电量预测工作提供了一种可供选择的新思路,同时,也为供电公司加强电力需求预测和供电负荷管理等工作提供了有益的方法支撑和必要的决策手段。

参考文献

[1] 陈国平,梁志峰,董昱. 基于能源转型的中国特色电力市场建设的分析与思考[J]. 中国电机工程学报, 2020,40(2): 369–378.

[2] 黄宏和,吴臻,琚军,等. 基于数据挖掘技术的配电网精准投资策略研究[J]. 浙江电力,2019,38(3):92–97.

[3] 徐俊,徐文辉,曾鑫,等. 基于大数据挖掘电量预测方法的创新及应用[J]. 电力大数据,2018,21(10):57–61.

[4] 程超. 基于时间序列法和回归分析法的改进月售电量预测方法研究[D]. 重庆:重庆大学,2016.

[5] 钟全辉,张以全,肖少华,等. 基于灰色预测理论的区域电量概率预测方法及其应用[J]. 浙江电力,2018, 37(1):19–22.

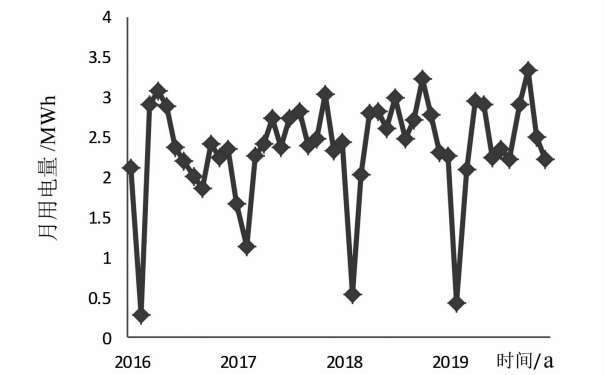


图 4 大用户月用电量预测曲线

户的容量变化需求、有的放矢地为客户提供增容等业务支持、辅助企业确定节能方法、为用户提供有竞争力的差异化服务等用途。

[6] 李瑞杰. 基于 BP 神经网络的地区售电量预测新方法研究[D]. 西安:西安科技大学,2018.

[7] 郭鸿业,陈启鑫,夏清,等. 考虑经济因素时滞效应的月度负荷预测方法[J]. 电网技术,2016,40(2):514-520.

[8] 刘俊,赵宏炎,刘嘉诚,等. 基于协整-格兰杰因果检验和季节分解的中期负荷预测[J]. 电力系统自动化,2019,43(1):73-80.

[9] 赵亮,刘友波,余莉娜,等. 基于深度信念网络的光伏电站短期发电量预测[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(18):11-19.

[10] 张凤珠. 基于历史数据的光伏发电量预测方式的组合应用[J]. 通信电源技术,2020,37(5):190-191.

[11] 邵臻. 基于半参数统计模型的中长期电量负荷预测应用研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2012.

[12] 张颖,王琳,王丽华,等. 基于最小二乘法和聚类的用电数据异常分析算法[J]. 河北电力技术,2019(5):4-6.

[13] 史松奇. 试析现代统计分析方法及其应用[J]. 科技经济导刊,2019,27(24):214.

[14] Yuc N, Mirowski, Ho T K. A Sparse Coding Approach to Household Electricity Demand Forecasting in Smart

Grid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(2):738-748.

[15] 李翔,欧阳森,冯天瑞,等. 一种基于用电行业分类的中长期电量预测方法[J]. 现代电力,2015,32(6):86-91.

[16] 葛风雷. 基于线性回归的电网夏季降温负荷与气温相关性分析[J]. 农村电气化,2017(4):9-11.

作者简介:

徐久益(1991),男,工程师,主要从事电网调度运行与控制工作;

李自明(1989),男,工程师,主要从事电网调度运行与控制工作;

姚剑峰(1977),男,高级工程师,主要从事电网调度运行工作;

杨晓雷(1981),男,高级工程师,主要从事电网调度运行及新能源管理工作;

屠一艳(1983),女,工程师,主要从事电网调度负荷预测及新能源管理工作;

李 杰(1989),男,工程师,主要从事电力系统继电保护工作。

(收稿日期:2020-06-24)

=====

(上接第 46 页)

[36] 张立佳,徐国宁,赵向阳,等. 基于神经网络的老化锂电池 SOC 估算方法的研究[J]. 电源学报,2020,18(1):54-60.

[37] 刘征宇,杨俊斌,张庆,等. 基于 QPSO-BP 神经网络的锂电池 SOC 预测[J]. 电子测量与仪器学报,2013,27(3):224-228.

[38] 刘征宇,杨俊斌,张庆,等. 基于 QPSO-BP 神经网络的锂电池 SOC 预测[J]. 电子测量与仪器学报,2013,27(3):224-228.

[39] 尹安东,张万兴,赵韩,等. 基于神经网络的磷酸铁锂电池 SOC 预测研究[J]. 电子测量与仪器学报,2011,25(5):433-437.

[40] 雷肖,陈清泉,刘开培,等. 电动车电池 SOC 估计的径向基函数神经网络方法[J]. 电工技术学报,2008(5):81-87.

[41] 齐智,吴锋,陈实,等. 利用人工神经网络预测电池 SOC 的研究[J]. 电源技术,2005,29(5):325-328.

[42] 陈小军,韩晓娟,梁亮. 基于小波复合模型的锂电池阻抗特性研究[J]. 电源技术,2012,36(1):67-70.

[43] 刘征宇,黎盼春,朱诚诚,等. 基于组合模型的锂电池参数辨识和电池荷电状态在线联合估计[J]. 中国机械工程,2020,31(10):1162-1168.

[44] 李荣波,陈勇. 基于 AFFDRLS-AHIF 对动力锂离子电池单体 SOC 估计[J]. 北京交通大学学报,2020,44(2):129-135.

[45] 吴忠强,尚梦瑶,申丹丹,等. 基于神经网络和 MS-

AUKF 算法的蓄电池荷电状态估计[J]. 中国电机工程学报,2019,39(21):6336-6344.

[46] 莫易敏,叶鹏,骆聪,等. 基于改进的双卡尔曼滤波的锂电池 SOC 估计[J]. 电源技术,2020,44(5):732-735.

[47] 何志刚,李尧太,盘朝奉,等. 基于 AIUKF 的锂离子电池 SOC 估算[J]. 电源技术,2020,44(4):518-521.

[48] 李超然,肖飞,樊亚翔,等. 基于门控循环单元神经网络和 Huber-M 估计鲁棒卡尔曼滤波融合方法的锂离子电池荷电状态估算方法[J]. 电工技术学报,2020,35(9):2051-2062.

[49] 魏孟,李嘉波,叶敏,等. 基于高斯混合回归的锂离子电池 SOC 估计[J]. 储能科学与技术,2020,9(3):958-963.

[50] 贺林,胡敏康,石琴,等. 一种分阶段锂离子电池荷电状态估计算法[J]. 电力电子技术,2020,54(2):8-11.

[51] 刘树林,崔纳新,李岩,等. 基于分数阶理论的车用锂离子电池建模及荷电状态估计[J]. 电工技术学报,2017,32(4):189-195.

[52] 孙冬,陈息坤. 基于离散滑模观测器的锂电池荷电状态估计[J]. 中国电机工程学报,2015,35(1):185-191.

[53] 蒋波. 带有模型参数提取的电池管理系统监控平台的设计[D]. 天津:天津大学,2011.

作者简介:

王晓辉(1990),男,硕士研究生,主要研究方向为变电运维技术。

(收稿日期:2020-08-21)

基于主从区块链技术的区域能源交易架构

杨 亭,雷 霆

(国网四川省电力公司绵阳供电公司,四川 绵阳 621000)

摘 要:区域能源交易主要通过集中式的交易服务平台提供买卖合同,配合电网进行电力供应与输送,存在服务成本高、交易效率低、用户隐私缺乏安全保障等问题。通过分析区域能源交易主体的特点以及不同类型区块链的适用范围,提出了基于主从区块链技术的区域能源交易架构;建立了适用于区域能源交易的主从区块链模型;证明了该模型具有高度安全性,并对构建的架构平台进行详细设计;最后,通过仿真平台测试证明了该交易架构和模型的可行性和安全性,为区域能源交易的方式提供了一种新的思路。

关键词:主从区块链;区域能源交易;交易主体;智能合约

中图分类号:TP311.13 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2021)01-0089-06

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210118

Regional Energy Transaction Architecture Based on Master – slave Blockchain Technology

Yang Ting, Lei Ting

(State Grid Mianyang Electric Power Supply Company, Mianyang 621000, Sichan, China)

Abstract:Regional energy transactions mainly provide sales and purchase transaction contracts through a centralized transaction service platform, and cooperate with power grid for power supply and transmission, which has high service costs, low transaction efficiency and is lack of security guarantees for user privacy. The characteristics of regional energy transaction entities and the application scope of different types of blockchains are analyzed, a regional energy transaction architecture based on master – slave blockchain technology is proposed, and a master – slave blockchain model suitable for regional energy transactions is established. The proposed model has a high degree of security, and the construction of architecture platform is designed in detail. Finally, the feasibility and security of the transaction architecture and model are proved through the simulation platform test, which provides a new way of thinking for regional energy transactions.

Key words: master – slave blockchain; regional energy transaction; transaction subject; smart contract

0 引 言

随着能源结构和电力体制的改革步伐越来越快以及信息技术的快速进步,能源产业改革迫在眉睫^[1-3],而市场化的能源交易是产业改革的前哨,急需转变传统交易模式和交易方法来应对能源产业的变革。

现阶段的能源交易主要以交易方法和模式为主,能源企业通过第三方服务平台进行售电交易并管理交易过程^[4]。在目前的区域能源交易中存在交易主体少、平台维护成本高、交易效率低、安全性低等问题^[5-6]。因此,需要因地制宜、以多元化主体

的区域能源交易平台解决传统交易存在的效率低、安全性低等问题,扩大交易边界,提升区域能源交易效率。

目前区块链技术在能源交易中的研究已经取得了一定进展。在相关研究中,以分布式能源的点对点交易为主。文献[7-10]主要从区块链的去中心化的特点出发,提出了点对点交易的能源结算模式。文献[11]主要分析了区块链在电力交易中的应用,给出了区块链未来的发展趋势。文献[12-16]给出了区块链技术在传统电网调度中的应用,如通过用区块链技术对电网中出力不稳定的新能源进行优化调度,通过区块链的去中心化架构建立虚拟电厂更好地对电能资源进行配置。文献[17-20]给出

了区块链技术在分布式能源交易中的应用,如通过博弈论模型解决分布式能源问题、通过联盟链技术解决分布式能源交易中的信任问题等。

以上文献运用的区块链技术多数是在分布式交易中进行,并且运用单一类型的区块链技术,而随着市场上不同主体及各种能源类型的不断加入,单一的点对点交易模式已经无法满足现有多方交易的现实。因此,下面从区域能源交易的实际出发,建立主从区块链模型满足多方交易的需求,同时满足了交易安全性的问题;接着构建适合区域能源交易的基于主从区块链技术的区域能源交易架构解决多方交易的问题,并通过仿真测试证明了该交易架构和模型的可行性。

1 区块链在区域能源交易中的可行性分析

1.1 区域能源交易主体

在区域能源交易中,主要涉及到以下 4 类主体:1)源端主体,包含各类传统电厂、新能源发电厂以及部分拥有分布式能源点大用户;2)电网端主体,包含国家电网、南方电网等大的电网公司以及地方电网公司;3)能源聚合商主体,主要由民营售电公司和综合能源公司组成;4)用户端主体,主要由区域内的工业、商业大用户、一般用户和拥有微网系统的新能源用户组成。

1.2 主从区块链在区域能源交易中的可行性分析

目前区块链的类型主要有 3 种:公有链、联盟链和私有链。它们的主要区别在于节点的开放程度上。公有链完全开放用户节点,这就导致参与主体多的时候,运行处理速度较慢;由于挖矿机制耗能高,但完全开放程度使得其安全性最高,同时由于完全开放的用户节点,使得所有参与主体都有通过挖矿方式获取区块读写的权限。联盟链半开放用户节点,与公有链相比速度较快,能耗低,但安全性比公有链稍低;由于对用户节点进行了权限设定,仅有权限的节点可以获取区块读写的权限。私有链是不开放用户节点,与公有链、联盟链相比,运行处理数据速度快,反应及时,但安全性低;同时仅不开放节点拥有区块读写权限,其他节点则无法参与。区块链的主要类型和特点如表 1 所示。

表 1 区块链类型和特点

类型	开放程度	权限	安全性	速度
公有链	完全开放	任何区块	高	较慢
联盟链	半开放	部分区块	较高	较快
私有链	不开放	较少区块	低	快

公有链由于任何人都可通过挖矿方式获取权限,因此此类区块链不可逆且稳定性高,但维护成本较大,不适合大规模的区域能源多主体交易。联盟链半开放的特点适合区域电网中多主体需要权限控制的情况,不同主体互动时,交易的协调优化会涉及到利益的分配,因此联盟链由于其特点可支持多用户节点间的利益分配、资金转移、交易结算等应用。私有链的特点适用与某一特定类型的交易服务,把交易数据存储在区块里,可供其他节点检索提取数据。

根据对 3 种区块链特点的分析,考虑到区域能源交易主体的构成,选择联盟链 + 私有链的模式进行交易平台的构建,以联盟链为主链网络、私有链为从链网络的结构建立主从区块链模型。

2 基于主从区块链的区域能源交易架构

下面采用多链形式实现区域电网内各主体内部的可信及协同自治,确保各主体间信息公开、可信互联,进一步保障区域能源电网交易应用的可追溯性和安全高效性,深入研究区域电网多方交易场景与区块链技术的匹配性。

基于主从区块链技术的区域能源交易系统具有匿名性、安全性、公开性的特点,即可以实现匿名的交易双方互信、交易安全以及信息公开。图 1 所示的区域能源交易架构以区块链网络连接。该架构有能源端、电网端、能源聚合商和用户端 4 类主节点,节点之间通过区块链网络互相连接,形成多方点对点交易模式,多方协同,用能优化互补,进而提高区域能源交易的效率和效益。

分属 4 类主节点的从链网络具有如下功能:1)源端节点和能源聚合商节点下的从链网络包括风、火、光、储等分节点,分节点间能源优化互补,形成分节点间协同效果;2)电网节点下的从链网络以能源调度为基础,同时开展能效分析、综合监测和用能服务等增值业务;3)用户端节点下的从链网络包括工

业、商业、一般用户、电动汽车等分节点。

上述各主节点和其拥有的分链网络构成了交易公开、可信、安全的主从区块链交易架构。主链网络通过联盟链进行链上交易,信息公开互享,主节点下的从链网络通过私有链进行链上交易。同时可以赋予政府监管权限,即政府拥有对各主节点交易数据查看的权限,可以随时查看并溯源。主链网络上的各主节点拥有主链和从链网络的管理员权限,如对主链和从链区块的设置、发布交易需求、交易资产以及与交易网络中的其他节点(主、从节点)进行交互等功能。各主节点下的从链网络节点仅有在本从链网络中的相关权限和向主链上传从链内容的权限。

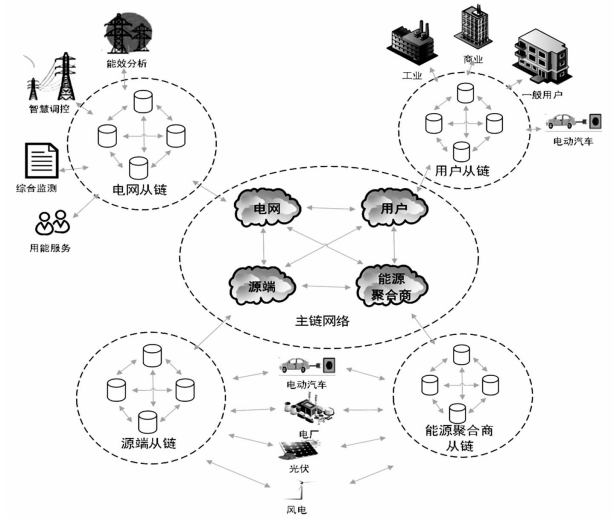


图 1 基于主从区块链的区域能源交易总体架构

3 主从区块链模型

3.1 模型建立

由前面分析可知区域电网下的交易涉及到多方交易,并不是传统意义上区块链点对点的单一交易模式,目前所研究的基于区块链的分布式能源交易模型并不适合所述的多方交易。因此,在研究联盟链的基础上,加入私有链,建立了采用多链形式的主从区块链模型。这样既能保证区块链的安全互信和去中心化,也能进行多方交易,提升区块链模型的高效和信任问题,同时也提高了区域能源交易的开放程度。

如图 2 所示的主从区块链模型由两部分组成:主链网络和从链网络。主链部分主要由源端、电网、用户、能源聚合商等主节点以及交易过程中形成的关键数据节点组成。主链节点主要记录着用户 ID、交易设置、交易需求、交易资产和节点间的交互功能

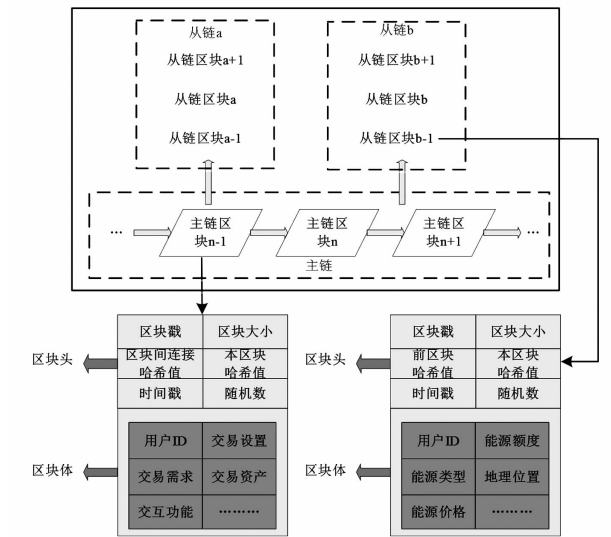


图 2 主从区块链模型

等关键信息。每个主链节点和关键数据节点构成了主链网络。

从链部分主要由功能节点和加密节点组成。功能节点是具有相应功能的从链节点,如电网端的能效分析、综合监测等节点,加密节点主要为主从网络的数据交换提供安全保障。从链节点主要记录用户 ID、能源额度、能源类型、地理位置、能源价格、加密数据等交易参数和加密参数。主链节点下的所有功能节点和加密节点构成了从链网络。

3.2 安全性分析

由于所采用的主从区块链模型与单一类型的区块链模型不同,单一类型的区块链模型所具有的不可篡改性质,主从区块链模型仍需具有。因此下面对所建模型进行安全性分析证明。

假定在主从区块链模型下,构建主链区块和从链区块的共识算法中,拜占庭容错节点不超过总节点一半,即

i < (j + 1) / 2 (1)

式中:i 为拜占庭容错节点;j 为节点总个数。

由上述假设知,在区块形成过程中,区块总结点个数大于拜占庭节点数,则某一时刻由拜占庭节点构成的区块可能性 X 为

X = i / j (2)

由式(1)可知,拜占庭节点产生无效区块的可能性小于 0.5,依据区块生效原则,若要使得区块生效,则该区块需要成为前驱区块并且高度增加。因此,无效区块转化为有效区块的概率以 0.5 为底的指数增加,随着数据的增加和链的增长,该概率趋向于 0。

由上述结论可知,任意时间内由拜占庭节点产生的无效区块转化为有效区块的概率趋向于 0,同时,由于所述的主从多链模型具有哈希链接方法,改变一个区块则需改变链接的所有区块,由于区块相互连接,需全网更改才会生效。因此可得如下结论:任意时间内,区块具有不变性。

综上可知,所采用的主从区块链模型,其任一区块在任意时间内具有不变性,即不可更改性,所以该模型具有安全性。

3.3 交易流程

产消者是生产者与消费者的一体化,在区域电网中,各方主体都是产消者。如电网公司不仅可以作为售电方,也可以在负荷过载的时候向源端电厂、能源聚合商以及用户(拥有电动汽车、微网等电源的用户)购电;水电厂不仅可以作为卖方,在枯水期也可以作为买方向电网公司、能源聚合商以及用户购电。因此,各主体间都有可能作为买卖双方并且存在互相交互的关系。基于主从区块链的区域能源交易流程如图 3 所示。

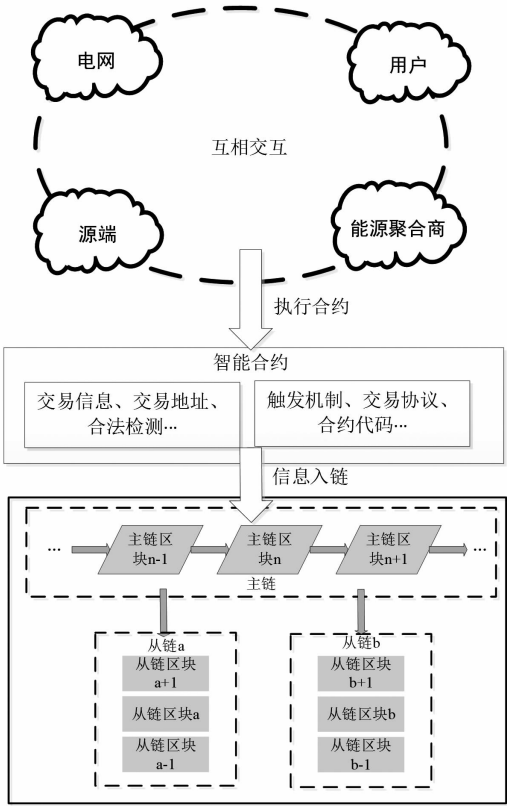


图 3 基于主从区块链的区域能源交易流程

当能源聚合商发出购电请求时,区域内产消者通过查看智能计量装置获取内部电量信息,若存在剩余电量会发出售电信息,此时能源聚合商会与此

产消者进行交互,发出交易请求触发智能合约程序,并投放到区块链网络中,交易方根据得出的清算价格进行交易,并执行合约内容。交易完成后信息广播到主链网络和从链网络中,最后详细交易信息写入各产消者对应的从链网络区块链中,同时关键信息记入各产消者对应的主链网络区块链中。

3.4 智能合约设计

使用 Solidity 语言设计和实现智能合约,对于适用多方交易的智能合约而言,应当满足市场交易的基本条件,即用户可自愿发布及参与交易、匹配交易对象并自动结算与储存交易信息。图 4 所示为区域能源交易下的智能合约设计流程图。

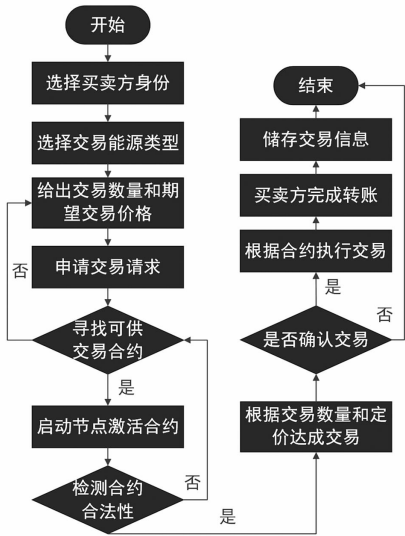


图 4 区域能源交易下的智能合约设计流程

1) 选择交易身份和申请交易。根据该区域电网内不同的交易主体选择买卖双方身份,确定本次交易的交易身份,然后选择所需交易的能源类型,给出交易数量和期望的交易价格,发出交易请求。

2) 寻找可供交易合约。通过确认交易身份、交易能源类型和期望交易价格,寻找满足上述条件的交易合约。在寻找可供交易合约时,会调用相关函数,根据交易主体提供的基本信息进行排序,综合分析各方能源类型、交易数量、交易价格等因素,完成匹配,确定可供交易合约。若不能完成匹配则返回交易价格和交易数量步骤,调整交易目标。

3) 检测合约合法性。在寻找到可供交易的合约后,启动区块节点激活合约并检查合约是否合法;若非法,返回寻找可供交易合约步骤。

4) 达成交易意向。根据交易合约内容,达成交易意向。

5)确认意向和存储交易信息。在完成交易之前给交易各方一个犹豫阶段,是否确认交易,若确认交易,则完成转账;若放弃交易,则直接结束智能合约流程。最后,交易过程形成记录存储在从链网络区块链中,供用户调用查看。

4 仿真测试

为正确评估所设计的区域能源交易架构、主从区块链模型的高效性,以以太坊为智能合约发布平台对交易进行仿真分析,同时运用文献[16]的单一链模型与所采用的主从链模型进行对比分析。该交易平台包括源端、电网端、用户和能源聚合商4种类型的产消者,本次测试共有10名用户,电网交易供需情况如表2所示。

表 2 电网交易市场供需初始情况

买方	状态	发布量/ kWh	剩余量/ kWh	发布价/ 元
用户 1	发布	600	600	0.37
用户 2	发布	360	360	0.40
用户 3	发布	240	240	0.41
用户 4	发布	350	350	0.33

卖方	状态	发布量/ kWh	剩余量/ kWh	发布价/ 元
用户 5	发布	240	240	0.41
用户 6	发布	280	280	0.39
用户 7	发布	700	700	0.43
用户 8	发布	230	230	0.37
用户 9	发布	150	150	0.37
用户 10	结束	300	0	0.36

从上述交易信息可以看到,在整个过程中,依次完成了6笔交易,成交最终结果如表3所示。成交量和成交价格按交易顺序如图5所示。

随着买方进入市场,低价的能源相继售空,成交价逐渐升高。而成交量则根据买卖双方的需求决定,逐次出清。同时,在这样的供大于求的市场中,买方更拥有主动权,买方进入市场后,系统会对当前卖方所有报价由低到高排序,依次与买方进行撮合,例如用户1,以0.37元的价格求购,发布量为600 kWh,最终以0.36元成交300 kWh,以0.37元的价格成交300 kWh,即买方均以低于等于自身发布价的价格成交,当然,卖方成交价也不会低于自己的发布价,符合合约规则预期。同时,部分用户报价过于偏离,

表 3 平台交易结束后供需情况

买方	状态	发布量/ kWh	剩余量/ kWh	发布价/ 元
用户 1	结束	600	0	0.37
用户 2	结束	360	0	0.40
用户 3	结束	240	0	0.41
用户 4	结束	350	350	0.33

卖方	状态	发布量/ kWh	剩余量/ kWh	发布价/ 元
用户 5	结束	240	0	0.41
用户 6	结束	280	0	0.39
用户 7	结束	700	700	0.43
用户 8	结束	230	0	0.37
用户 9	结束	150	0	0.37
用户 10	结束	300	0	0.36

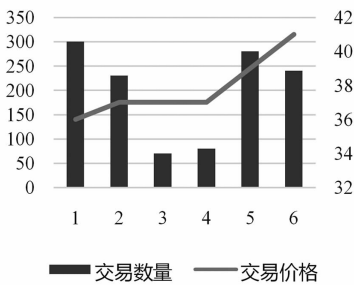


图 5 交易成交数量和成交价格

没能完全完成交易,例如用户4在进入市场后,市场上满足自身发布价的能源数量少于自身需求,故未能成交,其需求会继续保存在市场,等待条件满足后匹配交易。对于卖方用户7来说,由于报价高于当前市场所有报价,故未能达成交易。

在验证了模型的可行性后,对使用单一链模型和主从链模型进行对比分析。由图6可知,在进行的6次交易中,采用主从区块链模型时,每次的交易时间都比单一链模型使用的时间短。同时,采用单一链模型下的总交易时间为0.28 ms,而所采用的主从区块链下总交易时间为0.22 ms,交易效率提升了21.43%。由此说明了采用主从区块链模型能有效提升区域能源交易的效率。

通过以上分析可知,整个交易过程按照设计的智能合约规则进行,根据市场供需关系,依次匹配,最终完成交易。由对比分析可知,主从链模型相比单一链模型能更快地完成交易,提高了区域交易的效率。在该区域能源交易平台中,每次交易详细信息计入各从链网络中的区块中,区块数据公开、安全,可供有权限用户随时调用,与单一链模型相比,使数据更安全且取用灵活。同时在保障各方利益的

前提下,提高了交易效率和流程。

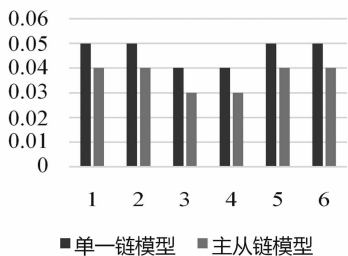


图 6 两种模型交易时间对比

5 结 语

从区域电网多方交易的现实出发,克服了区块链 P2P 的单一交易模型,在联盟链的基础上,运用联盟链 + 私有链的主从多链模型实现多方交易,得到如下成果:

1)分析主从区块链在区域能源交易中的可行性,得到了主从区块链模型初步方案。

2)从区域能源交易主体出发,分析了主从区块链在区域电网中的运用方法,考虑了各方主体的需求和交互作用,建立了基于主从区块链的区域能源交易架构。

3)在交易架构的基础上,从交易流程、智能合约设计以及模型安全性分析 3 个方面,对主从区块链模型进行详细建模,得到了主从区块链模型。同时通过仿真测试证明了所提架构和模型的可行性。

由于平台计算性能的限制,所提的交易次数较少,不能很好地显示出主从链模型的显著优势,后面将优化平台性能进一步验证分析主从链模型的高效性。

参考文献

[1] 周孝信,曾嵘,高峰,等. 能源互联网的发展现状与展望[J]. 中国科学:信息科学,2017,47(2):149-170.

[2] 李彬,曹望璋,祁兵,等. 区块链技术在电力辅助服务领域的应用综述[J]. 电网技术,2017,41(3):736-744.

[3] 张俊,高文忠,张应晨,等. 运行于区块链上的智能分布式电力能源系统:需求、概念、方法以及展望[J]. 自动化学报,2017,43(9):1544-1554.

[4] 肖谦,陈政,朱宗耀,等. 适应分布式发电交易的分散式电力市场探讨[J]. 电力系统自动化,2020,44(1):208-218.

[5] 李彬,曹望璋,张洁,等. 基于异构区块链的多能系

统交易体系及关键技术[J]. 电力系统自动化,2018,42(4):183-193.

[6] 王德文,柳智权. 基于智能合约的区域能源交易模型与实验测试[J]. 电网技术,2019,43(6):2010-2019.

[7] 徐嘉辉,马立新. 区块链技术在分布式能源交易中的应用[J]. 电力自动化设备,2020,40(8):17-22.

[8] 沈巍,王丹. 基于区块链的分布式能源市场化交易架构及应用机制[J]. 华北电力大学学报(社会科学版),2019,118(2):28-38.

[9] 何涛. 适用于分布式能源交易场景的区块链关键算法与技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2020.

[10] 胡可昕. 分布式能源发展现状及未来需求[C]. 2019 供热工程建设与高效运行研讨会论文集(下),2019.

[11] 龚钢军,王慧娟,张桐,等. 基于区块链的电力现货交易市场研究[J]. 中国电机工程学报,2018,38(23):6955-6966.

[12] 胡伟,姚文慧. 基于区块链的能源电力供需网调度优化模型[J]. 系统管理学报,2019(6):1134-1142.

[13] 龚钢军,张桐,魏沛芳,等. 基于区块链的能源互联网智能交易与协同调度体系研究[J]. 中国电机工程学报,2019,39(5):1278-1290.

[14] 余维,胡跃,杨晓宇,等. 基于能源区块链网络的虚拟电厂运行与调度模型[J]. 中国电机工程学报,2017,37(13):3729-3736.

[15] 谢红玲,郑雅男,李燕青. 基于能源区块链网络的微电网经济调度模型[J]. 华北电力大学学报(自然科学版),2019,46(3):17-25.

[16] 杨明通,周步祥,董申,等. 区块链支持下的微网电力市场设计及调度优化[J]. 电力自动化设备,2019,39(12):155-161.

[17] 平健,严正,陈思捷,等. 基于区块链的分布式能源交易市场信用风险管理方法[J]. 中国电机工程学报,2019,39(24):7137-7145.

[18] 何涛. 适用于分布式能源交易场景的区块链关键算法与技术研究[D]. 成都:电子科技大学,2020.

[19] 韩冬,张程正浩,孙伟卿,等. 基于区块链技术的智能配电交易平台架构设计[J]. 电力系统自动化,2019,43(7):89-99.

[20] 陈冠廷,张利,刘宁宁,等. 基于区块链的面向居民用户需求响应交易机制[J]. 电力自动化设备,2020,40(8):9-17.

作者简介:

杨 亭(1993),女,工程师,研究方向为区块链技术在电力系统中的应用;

雷 霆(1989),男,工程师,研究方向为区块链技术在电力系统中的应用。(收稿日期:2020-10-09)