

四川电力技术

SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY

第46卷第1期

2023年2月

四川省电机工程学会

四川电力科学研究院



ISSN 1003-6954



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

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

四川省新型电力系统研究院



四川省新型电力系统研究院有限公司（以下简称“四川新研院”）于2022年1月由时任四川省副省长曹立军授牌成立，是全国首个省级新型电力系统研究平台。四川新研院定位于四川能源行业新型智库，始终坚持理论引领、科技驱动的发展方式，以服务四川经济社会和能源电力发展为主要任务，近期依托国网四川经研院、国网四川电科院和国网四川信通公司，远期汇集行业“产学研”和“网源荷储”多方力量，打造新一代水、风、光消纳和配置平台，构建新型电力系统四川样板和全国标杆。

当前，四川新研院谋划了新型电力系统八大研究方向和46项攻关计划，先后与高校、科研院所、行业领军企业开展交流研讨，加快推进课题成果输出，重点围绕全光伏汇集、流域水风光互补、分布式光伏规模化开发、电力辅助服务市场等打造具有四川特色的示范场景。

期待各界专家学者交流合作！

◎地址：四川省成都市高新区蜀绣西路366号
◎邮编：610041 电话：13541700045 陈女士
◎传真：028-68132538

《四川电力技术》
编辑委员会

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

目 次

· 极端自然环境下电网灾害防控 ·	
±500 kV 德宝线大档距线路段防振方案试验研究	
····· 刘敬华,赵 彬,邹 赫,李 鹏,李孟轩,汉京善,杨 知(1)	
滑坡对输电线路的危害及防治措施····· 于 强,郭艳军,包 涛,刘 泉,刘福海(6)	
10 kV 线路防雷用反冲多间隙结构灭弧装置理论与试验研究	
····· 唐佳雄(12)	
极端自然环境下配电网快速复电弹性研究	
····· 樊国旗,汪 科,李 剑,周金辉,林 振,李 鹏(18)	
· 电网技术 ·	
基于综合协调优化的两阶段配电网动态重构研究 ····· 王鲁明,程 静,岳 雷(22)	
提高风电并网系统调度计划可信度的 HESS 经济效益计算	
····· 蔡高雷,刘桂龙,蔡静静(30)	
市场环境下的区域电网安全校核方法 ··· 熊志杰,张大伟,王彦沅,邓志森,杨 茜(39)	
多端柔性直流输电系统交流故障穿越仿真研究 ····· 张世豪,石若林,丁义轩(43)	
· 电力检修技术 ·	
变压器局部放电检测声阻抗匹配研究	
····· 涂彦明,张 劲,何宇航,薛志航,姚 晓,丁登伟(50)	
基于短时互相关的低压脉冲法电缆故障定位	
····· 周 涛,万子逸,段永生,吴辰阳,钱 琪(54)	
CQ6 型气动操动机构断路器合后即分故障分析 ····· 黄楷敏(59)	
一种高精度优化 Faster-RCNN 变电站安全帽检测方法	
····· 张彦凯,余飞鸿,夏 岩,刘 勇,张 蕊(62)	
基于机器视觉的瓦斯继电器油位异常检测 ····· 蒙 媛,莫钦森,陈 坤(69)	
· 经验交流 ·	
一起变压器铁芯油道堵塞导致过热的缺陷分析与治理 ····· 李馨博(73)	
一起 220 kV 主变压器有载分接开关触头烧损缺陷分析	
····· 梁弘毅,吴 雄,吴晓晖,骆欣瑜,刘 睿(78)	
一种基于图像的配电网单相接地故障选线方法 ····· 岑 俊,覃苏玲,李琪林(83)	
一起 3/2 接线方式敞开式隔离开关发热故障分析····· 王来源,雷昌成(90)	
封面图片由李兴宇提供	

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

2023 年第 46 卷第 1 期(总 283 期)

主管单位:四川省电力公司

主办单位:四川省电机工程学会

四川电力科学研究院

发行范围:公开

主 编:李富祥

副 主 编:程文婷

编辑出版:《四川电力技术》编辑部

发 行:四川电力科学研究院

地 址:成都市高新区锦晖西二街 16 号

邮政编码:610041

电话:(028)69995169/5168/5165

邮箱:cdsdljs@163.com

设 计:四川科锐得实业集团有限公司
文化传播分公司

印 刷:四川和乐印务有限责任公司

国内定价:每册 12.00 元

[期刊基本参数]CN 51-1315/TM * 1978 *

b * A4 * 94 * zh * P * ¥ 12.00 * 3000 * 17

* 2023-02

CONTENTS

• Power Grid Disaster Prevention and Control under Extreme Natural Environment •

Research on Anti-vibration Optimization Design of Line Section with Large Span for ±500 kV Debao Line
..... LIU Jinghua, ZHAO Bin, ZOU He, LI Peng, LI Mengxuan, HAN Jingshan, YANG Zhi(1)

Landslide Hazard to Transmission Line and Its Prevention and Treatment Measures YU Qiang, GUO Yanjun, BAO Tao, LIU Quan, LIU Fuhai(6)

Theoretical and Experimental Study on Arc Extinguishing Device with Multi-gap Structure against Lightning for 10 kV Line TANG Jiaxiong(12)

Research on Rapid Restoration Resilience of Distribution Network in Extreme Natural Environments
..... FAN Guoqi, WANG Ke, LI Jian, ZHOU Jinhui, LIN Zhen, LI Peng(18)

• Power System Technology •

Research on Two-stage Dynamic Reconfiguration of Distribution Network Based on Comprehensive Coordinated Optimization
..... WANG Luming, CHENG Jing, YUE Lei(22)

Economic Benefit Calculation of HESS for Improving Credibility of Dispatching Plan of Wind Power Grid-connection
..... CAI Gaolei, LIU Guilong, CAI Jingjing(30)

Security Checking Method of Regional Power Grid under Market Environment
..... XIONG Zhijie, ZHANG Dawei, WANG Yanfeng, DENG Zhisen, YANG Qian(39)

Simulation Research on AC Fault Ride-through of MMC-MTDC Transmission System ZHANG Shihao, SHI Ruolin, DING Yixuan(43)

• Maintenance Technology •

Research on Acoustic Impedance Matching of Partial Discharge Detection for Transformer
..... TU Yanming, ZHANG Jing, HE Yuhang, XUE Zhihang, YAO Xiao, DING Dengwei(50)

Cable Fault Location Using Low Voltage Impulse Method Based on Short-time Cross-correlation
..... ZHOU Tao, WAN Ziyi, DUAN Yongsheng, WU Chenyang, QIAN Qi(54)

Fault Analysis on Instant Opening after Closing of CQ6 Pneumatic Operating Mechanism for Circuit Breaker HUANG Kaimin(59)

A Detection Method for Safety Helmet in Substation Based on Improved High-precision Faster-RCNN
..... ZHANG Yankai, YU Feihong, XIA Yan, LIU Yong, ZHANG Rui(62)

Abnormal Oil Level Detection of Gas Relay Based on Machine Vision MENG Yuan, MO Qinsen, CHEN Kun(69)

• Experience Sharing •

Analysis and Treatment on Transformer Core Overheating Caused by Blockage of Oil Channel LI Xinbo(73)

Analysis of Burning Damage Defects of Contacts of On-load Tap-changer in 220 kV Main Transformer
..... LIANG Hongyi, WU Xiong, WU Xiaohui, LUO Xinyu, LIU Rui(78)

An Image-based Single-phase Grounding Fault Line Selection Method in Distribution Network CEN Jun, QIN Suling, LI Qilin(83)

Heating Fault Analysis of Open-type Isolation Switch under 3/2 Connection Mode WANG Laiyuan, LEI Changcheng(90)

±500 kV 德宝线大档距线路段防振方案试验研究

刘敬华¹, 赵彬², 邹赫³, 李鹏², 李孟轩², 汉京善², 杨知²

(1. 国家电网有限公司, 北京 100031; 2. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100055;

3. 中国电力技术装备有限公司, 北京 100052)

摘要:受冷空气过程影响, 四川北部地区时常出现突发性降温及大风天气, 导致架空导线微风振动动弯应变接近常规线路段安全阈值(200 $\mu\epsilon$), 超过大跨越线路段安全阈值(120 $\mu\epsilon$)的情况频繁发生; 现有导线端部位置及常规防振锤长时间处于高强度工作状态, 严重威胁四川电网运行安全。针对此问题, 文中以1437 m档距的±500 kV 德宝线424号至425号塔线路段为例, 依照现有大跨越线路段防振设计标准, 开展了防振设计效果评估试验优化研究, 给出了更适用于川北大风区大档距线路段的防振设计形式。推荐的防振设计方案是在室内试验档上经过模拟试验、分析和优选后得到, 满足防振相关技术要求, 可最大程度降低输电线路大档距线路段出现致命缺陷的风险, 确保区域电网长期安全稳定运行。

关键词: 电网运维; 输电线路; 低温强风; 防振设计

中图分类号: TM 75 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2023)01-0001-05

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230101

Research on Anti-vibration Optimization Design of Line Section with Large Span for ±500 kV Debao Line

LIU Jinghua¹, ZHAO Bin², ZOU He³, LI Peng², LI Mengxuan², HAN Jingshan², YANG Zhi²

(1. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China; 2. China Electric Power

Research Institute Co., Ltd., Beijing 100055, China; 3. China Electric Power

Technology and Equipment Co., Ltd., Beijing 100052, China)

Abstract: Affected by the cold air, northern Sichuan is easy to suffer from sudden low temperature and strong wind, which causes the dynamic bending strain of aeolian vibration of overhead conductors to approach the safety threshold (200 $\mu\epsilon$) for ordinary section, or even exceed the safety threshold (120 $\mu\epsilon$) for large-crossing section frequently. The end position of the existing conductor and the conventional vibration damper are in high-intensity working state for a long time, which seriously threatens the operation safety of Sichuan power grid. Aiming at this problem, taking No. 424 ~ 425 line section with a span of 1437 m in ±500 kV Debao line for example, and according to the existing anti-vibration design standards of large-span line section, the optimization research for the effect evaluation test of anti-vibration design is carried out, and the anti-vibration design which is more suitable for large-span line section in sudden low temperature and strong wind area in northern Sichuan is given. The recommended anti-vibration design scheme is obtained through simulation test, analysis and optimization in the indoor test, which meets the relevant technical requirements of anti-vibration. It is of great significance to avoid fatal defects in large-span line sections of transmission lines and ensure the long-term safe and stable operation of regional power grid.

Key words: grid operation and maintenance; transmission line; low temperature and strong wind; anti-vibration design

0 引言

四川地区地域广阔, 东有四川盆地, 西接川藏高

原, 具有山地多、地貌复杂等客观自然条件。目前, 四川500 kV线路已实现全省覆盖, 形成“梯格状双环”布局, 500 kV线路里程和变电站运营规模位居电力系统前列。而且, 四川电网通过“八交四直”超、特高压线路, 东与华东和华中、西与西北和西藏

基金项目: 国家电网有限公司科技项目“输电线路通道资源保护利用与通道扩容技术研究”(5500-202118138A-0-0-00)

区域实现能源互联,每年送出大量水利清洁能源,成为中国能源可持续发展的关键环节,在现代能源供应体系中发挥着重要的枢纽作用。然而,由于四川地区秋冬季节时常受到西北地区冷空气的影响^[1-2],四川北部地区部分输电线路易受到风振影响而出现故障^[3],加之全球气候异常演化加剧,传统方式下的四川地区线路风振防治工作面临较大挑战。

四川地区由于特殊的水文、地貌条件,大跨越线路段相对较少,但大档距(≥ 1000 m)线路段较多,在 500 kV 及以上电压等级线路中共有 1000 余处。由于现阶段输电线路结构设计标准体系中,对川北地区特殊的突发性低温、大风环境条件考虑不足,传统防振设计难以满足全寿命周期下大档距线路段的安全防护需求,导致近年低温和大风作用下的微风振动现象^[4]、架空导线动弯应变接近常规线路段安全阈值($200 \mu\varepsilon$)、超过大跨越线路段安全阈值($120 \mu\varepsilon$)的情况频繁发生^[5-6]。由于微风振动对导线的影响每时每刻都存在,若防振措施不当,则极易发生导线疲劳断股、断线、防振锤失效等故障。

为了降低大档距线路段出现致命缺陷的风险,下面基于现有防振设计原则和思路、实地风振状态监测情况以及大跨越电路段防振试验方案^[7-9],开展了防振设计效果评估等一系列试验研究工作。作为川北地区典型大跨越线路之一,对 1437 m 档距的 ± 500 kV 德宝线 424 号至 425 号塔线路段进行分析并推荐了防振优化设计方案,保证导线各夹固点的最大动弯应变单峰值小于 $120 \mu\varepsilon$,为四川地区电网防灾减灾和线路安全运维工作提供借鉴和参考。

1 现有防振设计方案

± 500 kV 德宝线是陕西宝鸡至四川德阳的跨区域电力互联线路,这里重点分析的 424 号至 425 号塔线路段,属于西南—东北走向档段,行政区划位于四川省广元市,周围地貌以低山为主,如图 1 所示,海拔高度约为 880~1100 m。历史气象数据资料统计显示,该地区为亚热带湿润季风气候^[10],冬寒夏凉,且由于地处秦岭南麓,副热带高压边缘气压极不稳定,秋冬季节时常遭遇来自青藏高原的冷空气影响,气温下降快,并伴随出现持续性大风天气,加上

此线路区段所处“两山夹一沟”的西北—东南导流效应,大风与线路段走向夹角约 $80^\circ \sim 90^\circ$ 。

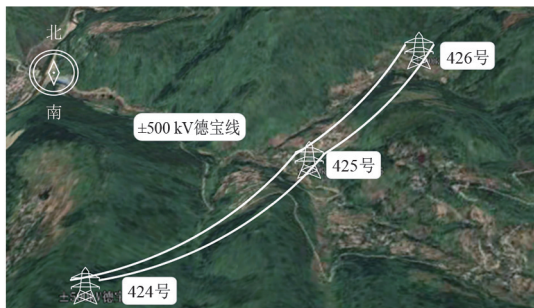


图 1 ± 500 kV 德宝线 424 号至 425 号塔线路段走向及周围地貌

同时,424 号至 425 号塔线路段采用了传统的 $4 \times \text{ACSR}-720/50$ 形式,依照现有相关设计规程和防振标准^[11],最大允许动弯应变按照 $200 \mu\varepsilon$ 控制。现有防振设计如图 2 所示,在每根子导线的两端分别布置 3 个 FR-4 型防振锤,采用等间距方式,间距 $S_0 = 1.28$ m,测试点位置 $S_c = 0.089$ m。

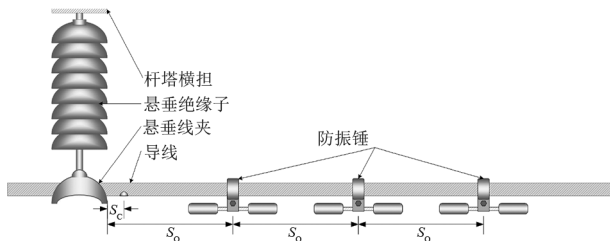


图 2 现有防振设计方案

2 防振方案效果监测

在德宝线投运 10 年后,考虑到该线路段的重要性,对部分关键档段的导线风振水平进行实地监测分析,获取导线端部动弯应变数据,为现有防振设计优化和防振效果提升提供可靠数据支撑。

首先,为了不影响线路正常运行,采用非接触式测振装置,对 424 号至 425 号塔间导线微风振动状态开展持续监测。该设备是基于激光测试技术研发^[12-14],具有不影响被测体状态、便捷性好、测试精度高等优势和特点。具体测试位置见图 2 所示,测试设备安装情况及导线测点见图 3。

经长期监测分析(统计结果见图 4 所示),现有防振设计方案下,微风振动导致架空导线端部位置动弯应变接近常规线路段安全阈值($200 \mu\varepsilon$)、超过大跨越线路段安全阈值($120 \mu\varepsilon$)的情况频繁发生,



(a) 测试设备安装



(b) 导线测试点位

图 3 微风振动状态测试

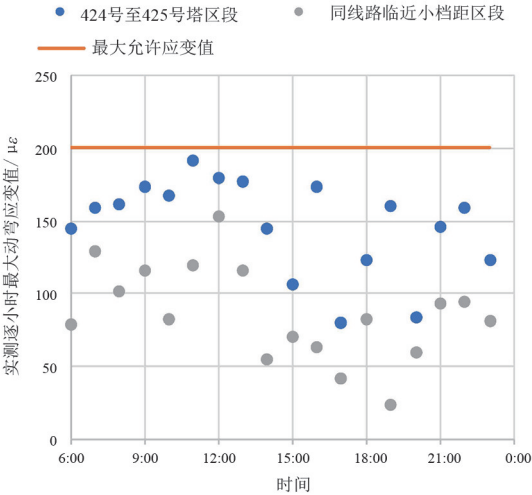


图 4 微风振动水平监测结果分布
(基于 2021 年 11 月 7 日测试数据)

表明导线和防振锤长时间处于高强度工作状态,给德宝线的正常运行带来极为不利影响。而且,相比 424 号至 425 号塔大档距段,临近地区较小档距段导线端部动弯应变值则处于较低水平。

初步分析表明,424 号至 425 号塔间线路导线

端部应变较大的主要原因在于该线路段档距大,且附近风速较大,动弯应变载荷处于较恶劣状态,风振问题较为突出。因此,此档线路段虽不属于大跨越形式,但常规标准下的防振设计无法满足实际运行要求,需要考虑参考大跨越区段的防振设计标准来降低导线动弯应变水平。

3 防振设计优化

现有大跨越工程防振设计方案,一般采用“β 阻尼线+防振锤”的组合形式^[15-17],见图 5 所示,防振锤一般采用 1~3 个,阻尼线长度一般为 1~4 m 间隔分布。



图 5 “β 阻尼线+防振锤”组合设计形式

其基本工作原理是改变导线局部的刚度、阻尼以及质量分布,调整导线作为长柔度体的振动模式,通过导线和阻尼线内部绞线的摩擦,来消耗系统整体的振动能量,减弱导线端部动弯应变集中效应。该组合方案具有原理清晰明确、原材料工艺成熟、经济性好、可靠性高等优点,是目前超、特高压线路大跨越区段常用的防振装置设计和安装方案。

推荐采用的防振锤型号为 FDY-6(保持原型号不变),β 阻尼线型号为 JL/G2A-300/40,实物如图 6 所示。考虑 β 阻尼线不同花边长度(即相邻固定线夹之间的间隔)的频率特征响应情况,选择不



图 6 β 阻尼线(左)和防振锤(右)

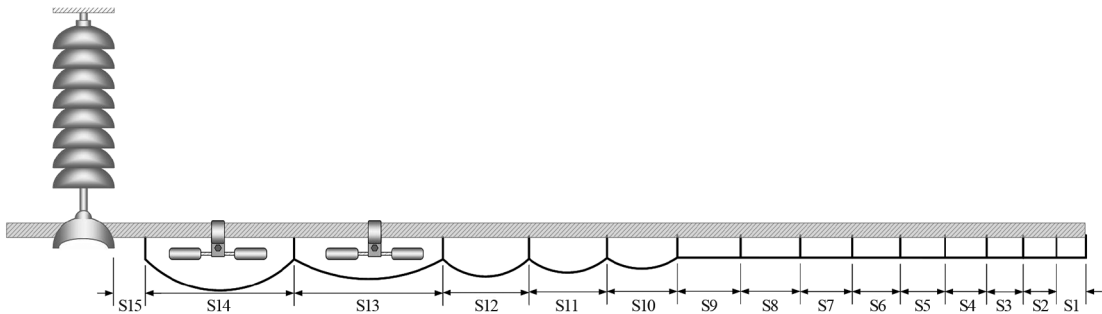


图 7 拟分析的 β 阻尼线+防振锤防振设计

同花边长度组合方案,使其在 10~70 Hz 风振频率范围内均具有良好的耗能防振作用;同时在左侧花边(靠近档端)中间安装防振锤,来调整不同频率区间的位移响应及耗能效果。

拟分析的防振装置安装设计方案及试验室内测试安装见图 7 和图 8,其中需要说明的是,对右侧(靠近档中侧)的 S1 至 S5 共 5 个花边进行剥层处理,进一步优化该区域响应频率、幅值,改善防振设计方案的频响特性。

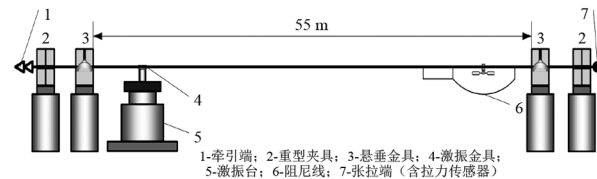


图 8 防振效果评估试验所用模拟试验档内布置情况

表 1 阻尼线线夹固定位置及剥层处理情况

编号	长度/ m	剥层 处理	编号	长度/ m	剥层 处理	编号	长度/ m	剥层 处理
S15	1.0	不剥 层	S10	2.4	不剥 层	S5	1.4	剥掉 最外层
S14	4.0		S9	2.0		S4	1.3	
S13	3.6		S8	1.8		S3	1.2	
S12	3.2		S7	1.6		S2	1.1	
S11	2.8		S6	1.4		S1	1.0	

4 防振效果试验评估与对比

根据 DL/T 1099—2021《防振锤技术条件和试验方法》^[11]相关要求,重要线路段开展防振方案设计,需针对导线-防振装置耦合系统的位移、频率以及应力应变峰值等特性开展试验测试,旨在明确防振方案调整前后微风振动特性的差异,以及安装后是否可以将各共振频率点下的应变峰值降低至技术条件要求的阈值之下,满足该大档距导线在运行过程中的防振需求。其中,室内防振效果评估试验是

大跨越工程防振设计方案过程中最为重要的试验,试验结果可直接表征防振效果的优劣。

现有防振设计在进行效果评估时,需要在相同型号的导线上开展模拟分析试验,采用的室内模拟档如图 8 所示。试验测试方法、流程和数据分析方面完全遵照 DL/T 1099—2021 的相关要求。为了引入低温环境条件,充分利用北京地区遭遇寒潮的时间(2022 年 1 月 9 日至 11 日)开展相关试验,试验期内试验档所在室内温度约 5℃~10℃,可充分体现±500 kV 德宝线 424 号至 425 号塔线路段环境实际特征情况。

对比方案设置方面,传统大跨越线路在设计防振方案时,一般采用导线自阻尼试验、防振锤功率特性试验与防振效果评估试验相结合的方式,来验证防振装置自身防振效果以及耦合形式下防振方案整体对导线的保护效果。而针对在运线路进行防振方案分析研究,旨在进一步地优化功能和提升效果,所以不需要考虑导线或防振锤自身单独的耗能特性,仅需考虑图 2 所示的原有防振设计方案(以下简称原方案)以及图 7 所示优化后的组合防振设计方案(以下简称组合方案),来进行效果评估和对比分析。

试验过程中,通过在 10~70 Hz 内调整风振频率,并依照 DL/T 1099—2021 附录所述风功率曲线,测试该频率区间内,各主模态下主频率点对应的悬垂线夹、防振锤线夹、阻尼线夹出口处最大动弯应变响应情况,分析试验数据,得到结果如图 9 至图 11 所示。

由图 9 至图 11 可知,阻尼线和防振锤组合使用的防振效果,可以大大提升线路在不同风振频率下的防振能力,主要体现在:

1)悬垂线夹出口处导线的最大动弯应变出现在风振频率 16.92 Hz 时,为 113 $\mu\epsilon$,满足小于 120 $\mu\epsilon$ 的防振要求;阻尼线夹出口处的最大动弯应

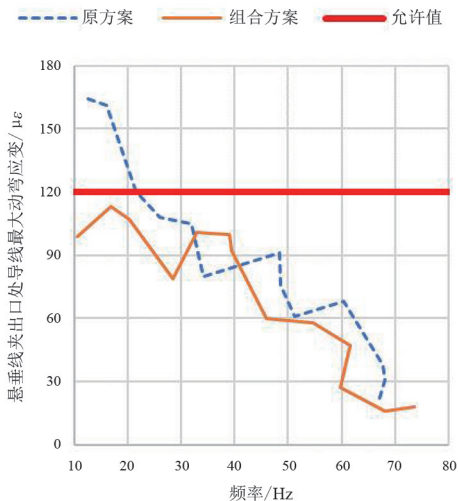


图 9 悬垂线夹出口处最大动弯应变响应

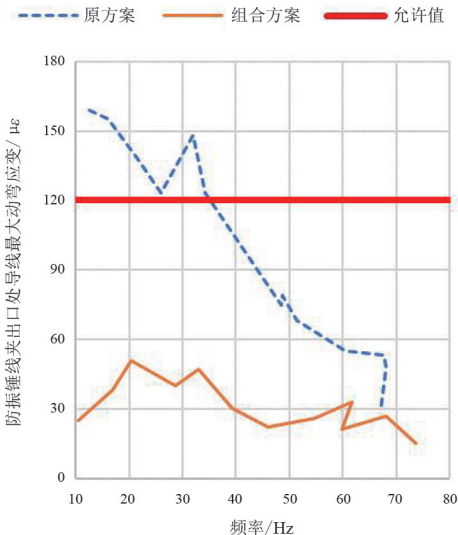


图 10 防振锤线夹出口处最大动弯应变响应

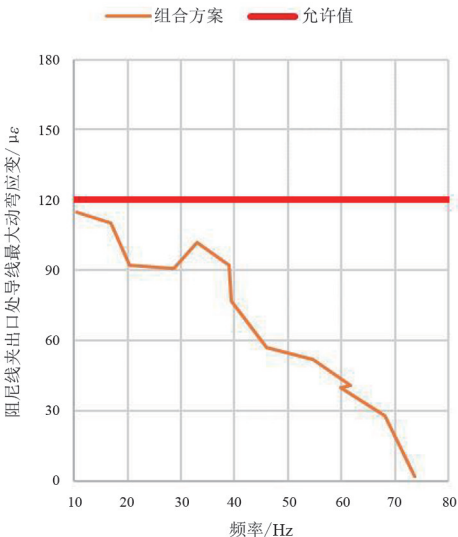


图 11 阻尼线夹出口处最大动弯应变响应

变出现在风振频率 10.55 Hz 时,为 115 $\mu\epsilon$,同样满足小于 120 $\mu\epsilon$ 的防振要求。

2)“ β 阻尼线+防振锤”组合形式中,按照花边位置来进行不同的剥线设置。一方面可以减轻导线整体负荷,降低线夹处导线的动态载荷水平;另一方面可以改变该区域花边的响应频率,改善防振设计方案的频响特性。

3)通过引入阻尼线,悬垂线夹和防振锤线夹出口处导线峰值应变均有大幅降低,相比原方案,组合方案导线上出现的最大动弯应变值可降低约 30%。

4)防振锤线夹附近的动弯应变值降低至 50 $\mu\epsilon$ 以下;同时,由于安装数量的减小,可大大减小导线、金具的故障风险及其维护成本。

由此可见,二者联合使用并调整优化布置位置,可使整个防振性能达到最佳。

5 结 论

上面充分考虑了四川广元地区环境条件,利用大跨越防振设计原则和方法,对川北地区典型大档距线路段(±500 kV 德宝线 424 号至 425 号塔间)开展了现场测振和防振方案优化试验。结果表明,利用“ β 阻尼线+防振锤”组合防振设计形式,可大大降低导线上出现的最大动弯应变。优化后,悬垂线夹与阻尼线线夹出口处的最大动弯应变试验测试值均满足“ $\leq 120 \mu\epsilon$ ”的防振要求,故所推荐方案为±500 kV 德宝线 424 号至 425 号塔线路段所采用。

参考文献

- [1] 李大勇,李颖慧.微气象条件对输电线路的影响及防御措施[J].四川电力技术,2013,36(5): 91-94.
- [2] 刘翔云,黄兴,廖邢军,等.高烈度地震触发山区输电线路震害发育分布规律[J].四川电力技术,2020,43(5): 11-13.
- [3] 赵隆.输电线路导线微风振动在线监测系统的设计[D].西安:西安工程大学,2012.
- [4] ZHAO B, LI P, YANG Z, et al. Analysis on data of galloping and wind deviation sensors in eastern mongolia during the winter of 2021[C]. 2nd International Conference on Consumer Electronics and Computer Engineering (ICCECE)2022: 261-264.
- [5] 安慧蓉,王旭锋,辛鹏.750 kV 送电线路大档距 OPGW 防振设计[J].电力系统通信,2006,27(8):11-14.

(下转第 58 页)

滑坡对输电线路的危害及防治措施

于 强¹, 郭艳军¹, 包 涛¹, 刘 泉², 刘福海²

(1. 四川电力设计咨询有限责任公司, 四川 成都 610041;

2. 国网经济技术研究院有限公司, 北京 102209)

摘 要:滑坡是输电线路最常见的灾害之一, 具有严重的危害性。文中针对滑坡对输电线路的危害以及防治措施进行了研究。首先, 从自然因素和人为因素分析了输电线路滑坡诱因; 然后, 根据实际工程经验分别阐述了滑坡灾害对输电铁塔和基础不利影响的分析方法, 并归纳总结了输电线路设计时预防滑坡灾害的工程措施; 最后, 分析了抗滑桩和桩板挡墙、锚杆(索)格构梁、重力式挡墙、微型桩等输电线路工程中几种常见滑坡治理方法的优劣, 为输电线路滑坡灾害的预防和治理提供借鉴。

关键词:输电线路; 滑坡; 灾害分析; 防治措施

中图分类号: TM 726 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2023)01-0006-06

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230102

Landslide Hazard to Transmission Line and Its Prevention and Treatment Measures

YU Qiang¹, GUO Yanjun¹, BAO Tao¹, LIU Quan², LIU Fuhai²

(1. Sichuan Electric Power Design & Consulting Co., Ltd., Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract: Landslide is one of the most common disasters in transmission lines and has serious harmfulness. In order to study the harm of landslides to transmission lines and its prevention and control measures, firstly the landslide inducing factors of transmission lines are analyzed, which are mainly divided into natural factors and human factors. Then according to the practical engineering experiences, the adverse effect of landslide disaster to transmission towers and foundations is described respectively, and the engineering measures in transmission line design to prevent landslide disaster are summarized. Finally, several common landslide treatment methods in transmission line engineering such as the anti-slide pile and pile retaining wall, anchor rod (rope) lattice beam, gravity retaining wall and micro pile etc, are introduced. The research results will provide experiences for the prevention and treatment of landslide disaster in transmission lines in the future.

Key words: transmission line; landslide; hazard analysis; prevention and treatment measures

0 引 言

随着经济的迅速发展和社会电力需求的不断增加, 中国电网建设蓬勃发展。然而, 输电线路途经区域气候条件变化多端, 地质地形条件复杂, 容易遭受到大风、覆冰、滑坡、泥石流、滚石、崩塌、地震等自然灾害的影响, 输电线路的安全运行受到严重威胁^[1-2]。据统计, 电力系统 75% 的事故由地质气象

灾害所造成^[3]。

滑坡是输电线路最常见的灾害之一, 根据中国电力科学研究院有限公司统计的 2018—2021 年输电线路地质灾害隐患点排查结果, 滑坡灾害占 25% 左右^[4]。滑坡会引起输电线路铁塔和基础的破坏, 导致线路停运供电中断, 造成巨大损失。已有众多研究人员对输电线路滑坡灾害开展了相关的研究工作^[5-7], 但是主要集中在滑坡灾害风险评估研究方面, 缺少输电线路滑坡灾害实际工程防治方面的研

究工作。

下面从工程实际经验出发,分析输电线路滑坡的诱发因素,阐述滑坡灾害对铁塔和基础的影响分析方法,总结归纳滑坡灾害预防措施和治理措施,为输电线路滑坡灾害防治提供实践经验借鉴。

1 滑坡灾害诱因

滑坡是指斜坡上的岩土体层,受雨水冲刷、浸泡、地震、坡体堆载以及人工切坡等因素影响,在重力作用下沿着软弱面顺坡向下滑动的现象。输电线路滑坡灾害的诱发因素主要分为自然因素(降雨、水流冲刷、浸泡、地震)和人为因素(坡体堆载、人工切坡、爆破等)。

大部分滑坡是在降雨、水流冲刷、浸泡、地震等自然条件下发生的,其中暴雨和长时间连续降雨是产生滑坡最主要的因素^[4]。结构松散的岩土体斜坡,受降雨、地震等因素的影响使边坡的稳定性在短时间内发生明显变化,最终导致坡体失稳诱发滑坡。这类滑坡可以归为自然诱发型滑坡,例如图1所示。



图1 降雨诱发滑坡

坡体堆载也是诱发输电线路滑坡灾害的常见因素。输电线路基础施工时,基坑开挖施工弃土,一般有塔基摊平堆放和外运综合利用两种处理方式。对于地形坡度较陡而弃土需要外运的塔位,施工单位往往直接将弃土向塔位下方倾倒(如图2所示),导致松散堆积岩土体沿基岩面的下滑力明显增大,改变了原来边坡的应力状态,且松散岩土体导致渗入地下的降水增多,在降雨冲刷浸泡作用下诱发滑坡。这类滑坡可称之为坡体堆载诱发型滑坡。



图2 施工弃土堆载诱发滑坡

人工切坡容易造成开挖坡脚应力集中,造成坡体地下水渗流场改变,使边坡稳定性进一步下降,引起坡体的抗滑力减弱,边坡的变形破坏从坡脚开挖面附近开始逐渐向坡体的上部发展,最终导致整体滑动。输电线路塔基应地形坡度较陡峭,需要开方降基或者开挖施工平台,这也是属于人工切坡范畴,易引发滑坡。这类滑坡可称之为人工切坡诱发型滑坡,如图3所示。



图3 公路切坡诱发滑坡

滑坡发生后,首先要对滑坡产生的原因进行分析,为下一阶段滑坡灾害评估和滑坡治理提供依据。滑坡原因分析主要有以下方面:

1)滑坡现状和滑坡类型特征调查。要掌握滑坡的类型,从理论上分析滑坡的基本特征,调查滑坡的现状,包括滑坡范围、滑坡体厚度、滑坡与塔基的距离、滑坡裂缝等情况。

2)滑坡区域地质、地形勘察。采用专业的地质勘探手段,查明滑坡区域地质、地形条件,包括滑坡范围地形坡度、覆盖层厚度、滑动面深度等条件。

3)收集近期区域内的降雨情况,调查了解是否有地震等其他自然因素诱发滑坡的可能性。

4)调查是否存在人为活动诱发滑坡,包括修筑道路路脚开挖、弃土堆载、爆破、挖矿等活动。

5)滑坡发展变化趋势分析。分析滑坡是否仍在不断发展过程中,是否危及塔位安全。如滑坡边界条件继续恶化滑坡危及塔位,应尽早采取人工干预措施,保证塔基安全。

6)滑坡稳定性分析。根据现场调查结果、施工图勘察资料及测绘数据,运用专业边坡分析软件,对滑坡稳定性进行定量计算分析,如图 4 所示,得到场地稳定性结论。

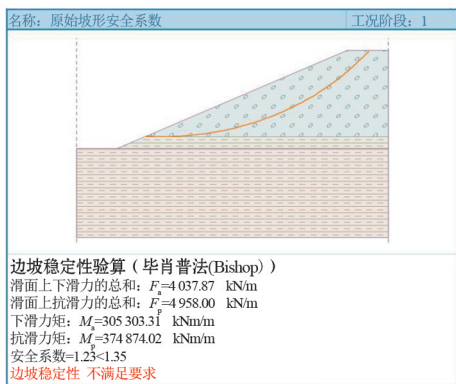


图 4 某塔位滑坡区域稳定性分析

2 滑坡灾害影响

输电线路滑坡会导致铁塔基础发生不均匀沉降和基础倾斜变形,从而改变铁塔结构的受力情况,引起铁塔杆件变形、破坏,甚至引起铁塔倒塌。

2.1 滑坡对基础的影响

滑坡对基础的影响主要是导致基础发生不均匀沉降、水平位移和基础倾斜变形,而基础本体结构强度发生破坏的情况较少。滑坡发生后,基础周围土体常见裂缝、脱离等现象,如图 5 所示。

可以利用全站仪等仪器对基础平面和高程数据进行测量。将实测基础高差和设计高差进行对比,判定基础是否发生不均匀沉降;将实测基础根开(即基础间距)与设计根开对比,判定基础是否发生水平位移。实测的高差和根开的偏差,可以与 GB 50233—2014《110 kV~750 kV 架空输电线路施工及验收规范》^[8] 有关规定进行对比,核实基础变形数据是否超限,以评估滑坡对基础的影响。



图 5 基础周围土体裂缝和脱离

2.2 滑坡对铁塔的影响

滑坡对铁塔的影响,主要是基础不均匀沉降、水平位移导致铁塔受力发生改变,引起铁塔杆件变形、破坏甚至倒塌,如图 6 所示。

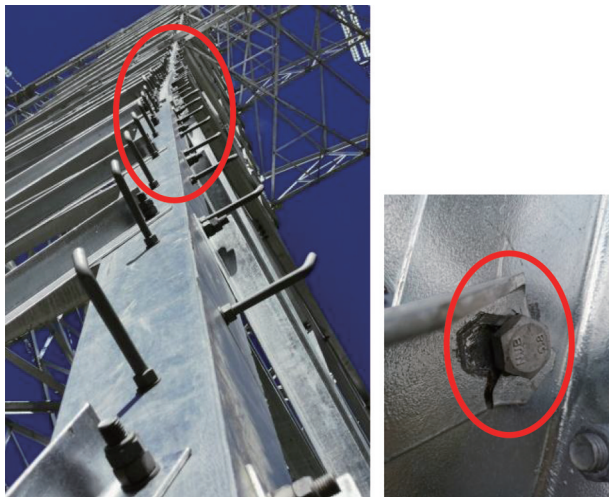


图 6 铁塔杆件变形和断裂

滑坡发生后,通过现场观测,判定铁塔杆件是否有弯曲变形、断裂以及铁塔是否有整体倾斜变形等情况。同样,可以利用全站仪、激光雷达、倾斜摄影等测量技术手段,测量铁塔主材边缘、交叉斜材交点、横隔面材、横担主材等位置,对铁塔的整体变形情况进行测量评估。

2.3 滑坡影响实例分析

2020 年 10 月,四川省阿坝州局部地区发生强降雨。受暴雨影响,某 220 kV 输电线路工程 N56 号塔附近发生滑坡,滑坡体距离 BC 腿基础边缘 10 m 左右,现场滑坡裂缝发育,基础有明显位移现象,铁塔杆件有损坏但未倒塔。对铁塔和基础进行测量和整理,测量数据结果见表 1、表 2。同时,将基础和铁塔上的位置测点进行水平面投影,如图 7 所示。

表 1 基础高差测量数据

腿别	设计高差/ m	实测高差/ m	实测值与 设计值差/mm
A-B	6.0	5.968	-32
A-C	6.0	5.971	-29
A-D	2.0	1.969	-31
B-C	0.0	0.003	3
B-D	-4.0	-3.999	1
C-D	-4.0	-4.002	-2

表 2 基础根开测量数据

腿别	设计值/ mm	偏心值/ mm	实测值/ mm	实测值- (设计值+ 偏心值)/ mm	比例/ %
AB	9 536.0	212	9 670.8	-77.2	-0.79
BC	10 196.0	212	10 562.5	154.5	1.48
CD	9 756.0	212	10 253.3	285.3	2.86
DA	9 096.0	212	9 308.8	0.8	0.01
AC	13 486.0	300	14 057.5	271.5	1.97
BD	13 797.1	300	14 048.1	-49.0	-0.35

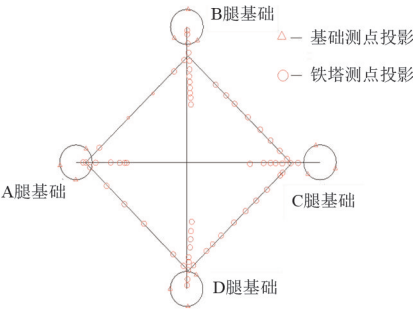
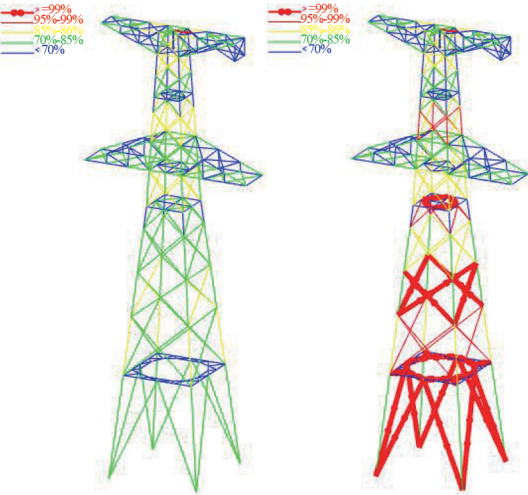


图 7 测量数据平面投影

GB 50233—2014 规定:基础高差允许值不超过 5 mm;基础根开偏差允许值不超过 $\pm 2\%$ 。由表 1 和表 2 可知,各腿之间高差值和根开值均超过了规范要求。同时,由图 7 可知,铁塔主材的测量点并不在基础中心连线上,明显朝 CD 腿侧偏移。由此可以判断,基础发生了不均匀沉降且基础之间存在相对水平位移,同时铁塔也发生了整体弯曲的现象。

2.4 位移对铁塔受力影响

根据实测的基础不均匀沉降值和水平位移值对铁塔进行校核,验算铁塔在正常运行工况下基础发生位移后的受力情况,并对铁塔受力进行评估,判断采取何种措施来治理滑坡灾害。例如某 220 kV 单回路塔,基础未发生位移以及一个基础发生水平和竖向位移 10 mm 的铁塔验算结果如图 8 所示。可以看到,基础发生位移后,铁塔杆件出现应力超限情况。这种情况下,建议更换应力超限杆件或者做改线方案。



(a) 基础无位移 (b) 基础有位移

图 8 位移对铁塔受力影响

3 滑坡灾害预防

对于输电线路工程,一般采取跨越、避让措施等来避开滑坡等不良地质作用。输电线路设计时,可以采取相应的措施来预防滑坡灾害对输电线路的影响^[9]。

1)采用原状土基础。原状土基础可以充分利用原状土高承载力的特点,减少基础尺寸,同时可以减小基坑开挖对边坡地质条件的破坏,减小对原来稳定地基的扰动,降低塔基滑坡的风险。

2)铁塔高低腿与不同露出地面高度基础结合。由于地形原因,塔位上边坡开挖易形成高边坡,如果处理不当则造成人工切坡诱发型滑坡,影响塔基安全。铁塔高低腿与不同露出地面高度基础设计就是根据塔基断面调节塔腿,适应实际地形坡度,再配合不同基础露出高度作为塔腿长度的补充,有效解决可能出现的降基面问题,使塔位基本做到“零基面”,避免形成高边坡情况。

3)正确处理施工弃土。施工弃土一般有塔基内摊平堆放、修筑弃土堡坎堆放和弃土外运综合利用等 3 种处理方式。对于需要外运或者修筑弃土堡坎的塔位,施工时往往为了便捷,施工人员直接将施工弃土向塔位下边坡倾倒,诱发滑坡。因此,对于塔基场地狭窄且地形坡度较陡的塔位,施工弃土必须外运,严禁在塔位附近随意堆放。

4)保证塔基排水通畅。塔基内排水不畅极易造成坡体力学性质改变,导致塔基发生滑坡。“治

坡先治水”，塔位应利于表面散水外流,保证塔基排水畅通。对于汇水面较大的塔位,应在塔位上方修建截排水沟,将上方汇水引向塔位较远的的下坡侧。

5)水土保持措施。对于易形成高陡边坡的塔位,可以考虑修筑堡坎和护坡来保持塔基土体的稳定性,也可以考虑植被护坡、播撒草籽等其余水土保持措施。

4 滑坡灾害治理

对于已建输电线路工程,滑坡发生后,需要对滑坡灾害造成铁塔和基础的影响进行评估,并采取合理的治理措施,包括临时措施、滑坡治理、线路改迁等。

4.1 临时措施

滑坡发生后,在滑坡治理之前,为了避免滑坡持续发展造成倒塔等严重事故,需要对滑坡体和铁塔基础采用一定的临时措施:1)加强巡视和观测,监测滑坡体是否扩张加剧、铁塔变形发展等情况,必要时可以加装监测基础位移、铁塔倾斜变形的在线监测装置;2)在铁塔上增加临时拉线措施,减轻铁塔变形加剧情况;3)有条件时可以考虑将塔腿或者基础顶部绑定,减轻基础侧移和铁塔根开变化的不利影响;4)塔基周围做好防水、排水等措施,避免过多雨水浸泡塔基周围土体使其达到饱和状态,引发进一步滑坡发生。

4.2 滑坡治理措施

目前,输电线路滑坡治理主要为“截排水+支护措施”的治理方案,主要支护方案有抗滑桩、桩板挡墙^[10]、锚杆(索)格构梁^[11]、重力式挡墙、微型桩^[12]等。需要根据滑坡性质、地质地形条件、交通运输条件,选择经济合理且安全可靠的治理方案。在支护的同时要考虑植被恢复、塔基地面硬化等水土保持措施。

1)抗滑桩和桩板挡墙。抗滑桩是将桩(钢筋混凝土桩、钢管桩)插入滑坡滑面以下的稳固地层内,利用稳定地层岩土体的锚固作用以平衡滑坡推力,从而稳定滑坡的一种结构物。抗滑桩的抗滑能力强,支挡效果好,施工安全。若滑动土体较厚,地形较为陡峭,也可以考虑“抗滑桩+混凝土挡板”的方案(即桩板挡墙)来治理滑坡,如图 9 所示。抗滑桩和桩板挡墙方案相比于其他治理方案,更适用于滑坡土

体较厚、土质松散地区。但是抗滑桩开挖施工对坡体扰动相对较大,特别是地形陡峻滑坡区,施工可能会进一步加剧边坡的不稳定性。

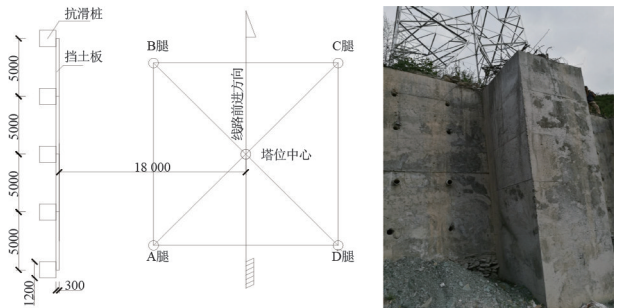


图 9 抗滑桩和桩板挡墙方案

2)锚杆(索)格构梁。锚杆(索)格构梁技术是一种较新的边坡支护技术。格构的主要作用是将坡体的下滑力传递给格构结点处的锚杆(索),然后通过锚杆(索)传递给稳定岩层,从而使边坡体处于稳定状态,如图 10 所示。锚杆(索)格构梁对坡体的扰动少,采用机械化施工,安全风险小,能够保证边坡强度及稳定性,且布置灵活形式多样。锚杆(索)格构梁适用于滑坡面下有稳定基岩的情况,对于已经形成滑坡的松散土体作用较小。这是因为松散土体在雨水冲刷作用下极易流走,锚杆(索)的锚固力下降,从而使格构梁失去支撑而丧失其支护作用。同时由于锚杆(索)钻孔需要大型钻孔设备,在交通条件不便利的地区,锚杆(索)格构梁的使用会受到限制。

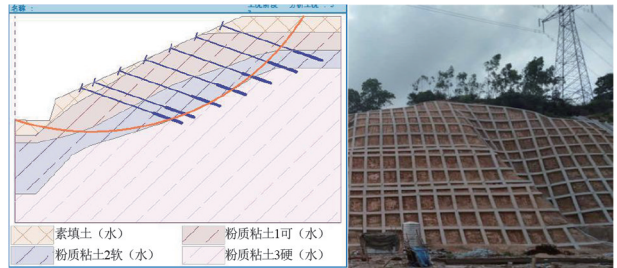


图 10 锚杆(索)格构梁方案

3)重力式挡墙。重力式挡墙是靠墙身自身的重力来抵抗土体中的侧压力的一类挡土墙,其截面形式普遍采用梯形,如图 11 所示。为了增强挡墙效果,也可以考虑在挡墙底部增设锚杆、微型钢管等措施,进一步提高边坡稳定性。重力式挡墙的突出优点就是施工方便,具有良好的经济效果。重力式挡墙适用于场地地形相对平缓且挡墙基底地层或岩层稳定性能较好的地区。当地形陡峭或

者挡墙底部为软弱地基,挡墙的承载力会受到限制,挡墙不再适用。

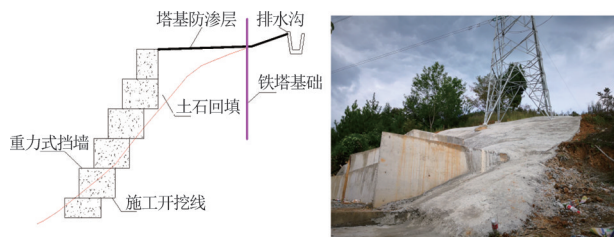


图 11 重力式挡墙方案

4) 微型桩。微型桩(微型混凝土桩或微型钢管桩)直径通常小于 400 mm,是一种新型的抗滑桩加固技术,属于抗滑桩范畴,具有“小径高强”的特点,其布置灵活,施工时间短,如图 12 所示。相比于抗滑桩,微型桩具有对土体扰动小、可机械施工的优势,同时可以采取压力注浆工艺改善桩周土体性能。目前微型桩已广泛用于滑坡治理等工程。微型桩可以单独使用,也可同其他支护结构配合使用,如“微型桩+喷锚支护”“微型桩+锚索支护”等。

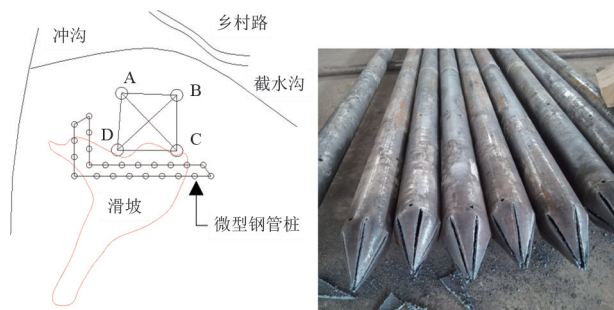


图 12 微型桩方案

5 结 论

上面针对输电线路滑坡灾害,从实际工程经验出发,开展了滑坡灾害预防和治理研究,得出以下结论:

1) 输电线路滑坡可分为自然诱发型、坡体堆载诱发型和人工切坡诱发型滑坡;

2) 输电线路滑坡会导致基础发生不均匀沉降或倾斜,改变铁塔结构的受力情况,引起铁塔杆件变形、破坏,因此需要从多方面对滑坡灾害进行分析;

3) 输电线路设计时,应考虑采用原状土基础、铁塔高低腿与不同露出地面高度基础结合、保证塔基排水通畅和其余水保措施等方法,来预防滑坡灾害;

4) 工程中可以采用抗滑桩和桩板挡墙、锚杆(索)格构梁、重力式挡墙、微型桩等方法治理滑坡。

参考文献

- [1] 朱家良.输电线路地质灾害危险性评估的基本特点与认识[J].电力勘测设计,2006(4):9-12.
- [2] 程永锋,朱照清,丁士君,等.输变电工程地质灾害防治技术研究[J].智能电网,2017,5(6):612-615.
- [3] 程永锋,丁士君,赵斌滨,等.输变电工程滑坡灾害危险和风险性评估方法研究[J].中国农村水利水电,2015(6):148-152.
- [4] 刘书豪.降雨条件下的输电线路滑坡风险评估与预警技术研究[D].武汉:中国地质大学,2021.
- [5] 陈英,马东涛,杨敏.超高压输电线路塔基滑坡灾害特征分析与治理[J].电网建设,2014,35(10):69-73.
- [6] 郭艳军,吴数伟,于强.滑坡区输电铁塔安全性及评价分析[J].低碳技术,2020,10(12):79-80.
- [7] 黄晨忱.输电线路杆塔基础滑坡风险研究[D].武汉:中国地质大学,2021.
- [8] 中国电力企业联合会.110 kV~750 kV 架空输电线路施工及验收规范:GB 50233—2014[S].北京:中国计划出版社,2015.
- [9] 肖洪伟,黄兴,肖兵.输电线路含碎石粘性土边坡滑坡特性及预防措施[J].电力建设,2007,28(10):64-66.
- [10] 叶小波.桩板挡墙在陡峻山区线路滑坡治理中的应用[J].低碳技术,2017,7(11):54-56.
- [11] 万飞.锚杆格构梁在四川山区某 500 kV 输电线路滑坡治理中的应用[J].低碳技术,2020,10(12):97-98.
- [12] 辛永福.微型钢管桩在滑坡治理工程中的应用[J].陕西水利,2011(6):82-84.

作者简介:

于 强(1990),男,硕士,工程师,从事输电线路结构设计工作;

郭艳军(1981),男,硕士,高级工程师,从事输电线路结构设计工作;

包 涛(1987),男,硕士,高级工程师,从事输电线路结构设计工作;

刘 泉(1984),男,硕士,高级工程师,从事特高压工程设计管理工作;

刘福海(1984),男,博士,高级工程师,从事特高压工程设计管理工作。

(收稿日期:2022-08-20)

10 kV 线路防雷用反冲多间隙结构灭弧装置 理论与试验研究

唐佳雄

(国网四川省电力公司广安供电公司, 四川 广安 638000)

摘要:针对配电网线路易受雷击引起绝缘子闪络造成线路停电的难题,文中研究了一种基于“疏导-灭弧式”思想的反冲多间隙结构灭弧装置。该装置利用绝缘配合先于绝缘子击穿闪络泄放雷电流入地,同时利用其反冲结构和多断口结构迅速熄灭电弧。首先,对装置的结构和灭弧原理进行了介绍;然后,对反冲结构和多断口结构的灭弧过程用数学模型进行了描述;接着,探讨了影响电弧熄灭的主要因素,得出提高气流速度是提高灭弧效率和缩短灭弧时间的有效方式;最后,通过工频大电流灭弧试验论证了该装置具有良好的灭弧效果,能够在4 ms内将幅值为2 kA的电弧熄灭,并且该装置在4片绝缘伞裙下也能控制电弧进入其内部。

关键词:配电网;闪络;绝缘配合;电弧;气流速度

中图分类号:TM 86 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2023)01-0012-06

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230103

Theoretical and Experimental Study on Arc Extinguishing Device with Multi-gap Structure against Lightning for 10 kV Line

TANG Jiaxiong

(State Grid Guang'an Electric Power Supply Company, Guang'an 638000, Sichuan, China)

Abstract: Aiming at the difficult problem that the lines of distribution network are subject to lightning stroke which causes insulator flashover resulting in power failure, a device called arc extinguishing device with multi-gap structure is studied based on the idea of "dredging-arc extinguishing". The device uses insulation coordination to discharge lightning current into the ground before insulator breakdown, and at the same time, uses its recoil structure and multi-fracture structure to extinguish the arc rapidly. Firstly, the structure and arc extinguishing principle of the device are introduced. And then the arc extinguishing process of recoil structure and multi-fracture structure are described by mathematical model. And next, the main factors that affect the arc extinction are discussed, and it is concluded that increasing gas velocity is an effective way to improve the arc extinction efficiency and shorten the arc extinction time. Finally, the arc extinguishing test with high power frequency current proves that the proposed device has good arc extinguishing effect, and can extinguish the arc with 2 kA in 4 ms, and under four pieces of insulator shed, this device can also control the arc to get into its interior.

Key words: distribution network; flashover; insulation coordination; electric arc; air velocity

0 引言

近年来随着电网规模的不断扩大,配电网线路长度和走廊宽度不断增加,高杆塔、大档距、交叉跨越、同塔多回、导线换相等情况出现得越来越多,雷

基金项目:国家自然科学基金项目(51467002)

击线路造成的事故也逐渐增多^[1]。当雷电流超过线路耐雷水平时易发生绝缘闪络,接续产生的工频续流会灼烧绝缘子和线路,引起绝缘子破裂和线路断线等事故^[2]。因此,提高配电网线路防雷水平对于电力系统安全运行具有十分重要的意义。

目前针对配电网线路防雷,主要有架设避雷线、降低杆塔接地电阻、架设耦合地线、采用不平衡绝缘和安装避雷器等阻塞型措施^[3-4]。这些防雷措施能

够在一定程度上提高线路防雷性能和减少雷击跳闸率。但由于地理环境和防雷手段自身运用受限,配电网线路遭受雷击事故仍不断发生。并联间隙是配电网线路疏导型防雷措施的有力补充,但其在多次动作后电极会严重烧蚀,使绝缘配合劣化^[5]。同时自动重合闸频繁动作会对变压器、断路器等电气设备造成严重的过电压冲击,使系统绝缘耐电寿命缩短^[6]。

近些年来国内外学者相继研发出能够快速熄灭电弧的装置。文献[7-8]介绍了一种多断点结构灭弧装置,该装置利用断点结构将电弧多点截断,并利用电弧自身高温膨胀灭弧室内的气体产生气流将其喷出灭弧室;但该装置适用于熄灭较小雷击电弧,对较大雷击电弧仍束手无策。文献[9]研究了一种多间隙结构灭弧装置,该装置能在电流过零时将工频续流切断进而熄灭电弧;但该装置针对高电压等级线路需串联较多的间隙结构,会在较大程度上削弱线路的防雷性能,导致线路跳闸率不降反升。文献[10]介绍了一种多段微孔结构的防雷装置,该装置通过雷电击穿多球隙之间的电极,然后利用电弧加热灭弧室内的空气受热膨胀产生气流,在气流的带动下将电弧喷出;但该文献只做了相关的灭弧结构仿真分析,未见相关试验报道。文献[11]研制了一种多腔室防雷装置,该装置利用电弧自身高温烘烤装置内的有机材料以产生气流熄灭电弧;但该装置受制于多次动作后材料会消耗过快而导致后续产气能力弱难以熄灭电弧的情况。

针对上述配电网防雷措施在实际运用上均有一定的缺陷性,下面基于“疏导-灭弧式”思想提出了一种反冲多间隙结构灭弧装置,能够有效解决配电网线路雷击防护漏洞,为配电网线路防雷提供一种崭新的思路。该装置的核心思想是:允许线路遭受雷击,同时疏导巨大雷电冲击电流沿电弧闪络通道入地,并利用导弧电极吸引电弧进入装置内部,利用反冲结构产生反冲力将电弧从入口处喷出,阻断后续电弧进入管内;进入装置后的电弧被多点截断形成小电弧,管内空气受热膨胀产生纵吹气流将各处电弧全部喷出,从而保护线路和绝缘子免遭雷击。

1 反冲多间隙结构灭弧装置及原理

1.1 反冲多间隙结构灭弧装置的结构

图1是反冲多间隙结构灭弧装置平面剖面图,

该装置由反冲管、反射壁、压缩管、导弧电极、喷弧口、接地电极组成。反冲管和反射壁是耐高温绝缘材料制成,反冲管直径为12 mm,长度为60 mm,反射壁具有反射电弧的作用。压缩管直径为8 mm,长度为40 mm,由耐高温陶瓷制成。反冲管内的导弧电极长度为2 mm,其余导弧电极直径为4 mm,由导电性能较好的复合铜制材料制成;导弧电极具有诱导电弧进入反冲管内和通过库仑力作用约束工频电弧沿压缩管特定路径运动的作用。装置共有5片绝缘伞裙,每层伞裙间有两处喷弧口,喷弧口是压缩气流将电弧喷射出外界出口。接地电极作用是泄放雷电冲击电流入地。

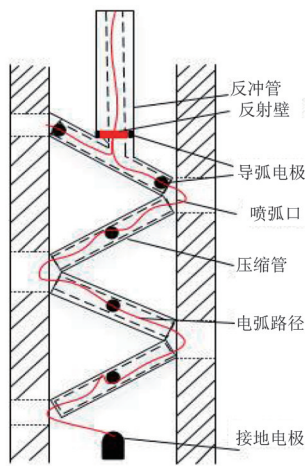


图1 反冲多间隙结构灭弧装置平面剖面图

图2是反冲多间隙结构灭弧装置安装图。该装置与柱式绝缘子并联安装,用螺栓上下将其固定,装置接地端与线路绝缘子低压端相连。装置通过控制绝缘伞裙直径尺寸来增加电弧爬电距离,防止电弧沿面闪络。为保证雷电击中线路时,装置先于绝缘子击穿从而有效保护线路及绝缘子,装置的击穿电压必须低于绝缘子的击穿电压。因此,装置高压端与绝缘导线之间应保持一定的雷电冲击放电间隙,从而将雷电放电路径限制在装置内部。

1.2 反冲多间隙结构灭弧装置的灭弧原理

当线路正常运行时,装置承受的是正常工作电压,因而装置相当于绝缘体。而当雷电击中线路或杆塔时,雷电以波的形式沿杆塔两边传导,抵达装置后迅速击穿放电间隙形成电弧。装置灭弧可划分两个过程:1)反冲灭弧过程;2)压缩气流灭弧过程。这两个过程是同步发生、同步作用于电弧的。

当电弧被诱导至反冲管后,灭弧过程如下:1)一部

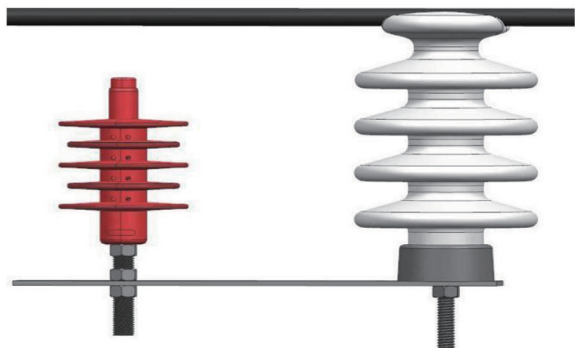


图 2 反冲多间隙结构灭弧装置安装

分电弧因受到壁面的反射,立即产生与入口电弧运动方向成 180° 的高温高密反射电弧,反射电弧迅速向反冲管外运动阻断后续电弧进入管内,打破后续灌注电弧的连续性,同时裹挟后续电弧一同喷出反冲管外。反射电弧能量与入口电弧能量成正比关系,入口电弧能量越大,产生的反射电弧能量越大,越有效阻断后续电弧的灌入。2) 与此同时另一部分电弧在导弧电极库仑力约束下进入装置主体,装置主体由一系列灭弧腔室按照特殊的空间排列方式构成,电弧沿装置内部特殊的空间结构运动,在各处断口被物理性强制多点折断成多条小电弧。小电弧在灭弧腔室内被极度挤压形成压缩态,电弧所受的径向压力转化为轴向压力。同时高温电弧加热腔室内的气体产生压缩气流,相邻管道之间的电弧由于气流对冲和急速弯折使电弧的突变拐点变为能量脆弱点,直接受到纵吹气流的作用,被强制沿喷嘴口喷射出外部空间,电弧与外部冷空气完成复合、置换成为绝缘介质,进而电弧熄灭。

2 冲击波和气流耦合电弧数学模型

由第 1.2 节可知,电弧进入装置后将同步经历两个灭弧过程,而这两个灭弧过程的灭弧原理又是完全不同的。针对上述两过程分别建立不同的数学模型,以用于描述两者不同的物理变化过程。

2.1 反冲电弧冲击波模型

电弧放电会引起高温电弧通道内存在温度和密度剧烈变化的等离子体,随着电弧通道内热量的释放,电弧通道以超音速向外膨胀挤压着电弧通道周围的气体产生冲击波^[12-14]。因此利用冲击波理论来描述反冲灭弧过程,将电弧通道能量视为爆炸源,在电弧压缩空气过程中形成冲击波。工频电弧

被电极诱导进入反冲管内,即视为有一冲击波以 D_1 的速度垂直向装置反射壁面入射,如图 3(a) 所示。冲击波波阵面前后参数的关系为:

$$D_1 - u_0 = v_0 \sqrt{\frac{p_1 - p_0}{v_0 - v_1}} \quad (1)$$

$$u_1 - u_0 = -\sqrt{(p_1 - p_0)(v_0 - v_1)} \quad (2)$$

$$\frac{\rho_0}{\rho_1} = \frac{v_1}{v_0} = \frac{(k-1)p_1 + (k+1)v_0}{(k+1)p_0 + (k-1)p_1} \quad (3)$$

式中: D_1 为入射波波速; p_0 、 ρ_0 、 v_0 、 u_0 分别为冲击波入射时的初始压力、密度、比容、质点运动速度; p_1 、 ρ_1 、 v_1 、 u_1 分别为冲击波波阵面后的压力、密度、比容、质点运动速度; k 为绝热指数。

冲击波垂直入射到反冲装置的壁面后,由于壁面为刚性结构表面不会发生变形,冲击波会发生正反射,则波阵面后的气体流速 u_1 成为 0,壁面处的气体压力和密度也发生急剧变化。而此刻,流速为 u_1 的气体介质动能转化为静压势能,受到二次压缩的气体反过来作用于已被入射波压缩过的气体,即形成反射波远离壁面向反冲管外传播,如图 3(b) 所示。

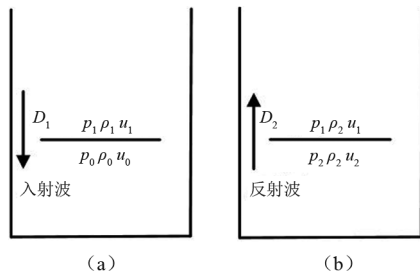


图 3 冲击波在壁面上的反射

由于反射波是已受入射波压缩过的气体介质传播的,则反射波传播后的参数可表示为:

$$D_2 - u_1 = -v_1 \sqrt{\frac{p_2 - p_1}{v_1 - v_2}} \quad (4)$$

$$u_2 - u_1 = -\sqrt{(p_2 - p_1)(v_1 - v_2)} \quad (5)$$

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{(k-1)p_2 + (k+1)p_1}{(k-1)p_2 + (k-1)p_1} \quad (6)$$

式中: D_2 为反射波波速; p_2 、 ρ_2 、 v_2 、 u_2 分别为反射波的压力、密度、比容、质点运动速度。

假设 $u_0 = 0$, 并且由壁面条件知 $u_2 = 0$, 即联合式(2)和式(4)可得

$$\sqrt{(p_1 - p_0)(v_0 - v_1)} = \sqrt{(p_2 - p_1)(v_1 - v_2)} \quad (7)$$

将式(7)两边平方整理后得

$$\frac{(p_1 - p_0)}{\rho_0} \left(1 - \frac{\rho_0}{\rho_1} \right) = \frac{(p_2 - p_1)}{\rho_1} \left(1 - \frac{\rho_1}{\rho_2} \right) \quad (8)$$

将式(3)和式(6)代入式(8)中,可得

$$\frac{p_2}{\rho_1} = \frac{(3k - 1)p_1 - (k - 1)p_0}{(k - 1)p_1 - (k + 1)p_0} \quad (9)$$

式(9)即反射波波阵面压力和反射波波阵面压力的关系式。

当入射波压力很大时,由于 $p_1 \gg p_0$, 故 p_0 忽略不计,将式(9)简化为

$$\frac{p_2}{\rho_1} = \frac{3k - 1}{k - 1} \quad (10)$$

对于电弧压缩的气体 k 可取 1.4, 即得 $p_2 = 8p_1$, 这表明入射波在壁面反射后, 反射波波阵面的压力是入射波波阵面压力的 8 倍。

将式(8)代入式(6)中, 整理可得

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{kp_1}{(k - 1)p_1 + p_0} \quad (11)$$

对于冲击波压力较大的情况下, p_0 可以忽略, 则有

$$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{k}{k - 1} \quad (12)$$

当 k 取 1.4 时, 即得 $\rho_2 = 3.5\rho_1$, 这表明入射波经壁面反射后, 反射冲击波阵面后介质密度能达到入射冲击波阵面后介质密度的 3.5 倍。特别对于很强的冲击波, 理想气体介质压缩程度至少为 6 倍^[15], 由此 $\rho_2 = 21\rho_0$, 表明电弧经壁面反射后, 反射电弧密度能达到入口电弧初始密度的 21 倍。

根据上述分析可知, 刚进入反冲装置的电弧在受到壁面的反射后, 产生压力、密度分别为入射时的 8 倍、21 倍。如此高压高密度反射电弧, 对后续灌入管内的电弧造成巨大的破坏作用, 阻断后续电弧的进入; 同时强大反射电弧能够裹挟后续电弧共同喷出反冲管外, 实现反冲管外灭弧。

2.2 压缩气流耦合电弧数学模型

电弧进入装置内, 部分电弧会受到壁面反射回到装置外, 另一部分电弧会进入装置内部。进入装置内部电弧会被多断口结构截断成若干小电弧, 多条小电弧迅速加热腔室内部空气, 气体受热膨胀气压增大, 与外界形成气压差, 高温气体带动电弧圆柱沿喷口向外喷出。在此采用磁流体动力学 (magnetohydrodynamic, MHD) 模型描述压缩气流

耦合电弧过程。

1) 质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot u) = 0 \quad (13)$$

式中: ρ 为电弧密度; u 为压缩气流速度矢量。

2) 动量守恒方程

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = \nabla \cdot \left[-pI + \mu(\nabla \mu + (\nabla u)^T) \right] - \frac{2}{3}\mu(\nabla u)I \quad (14)$$

式中: p 为气体压强; I 为二阶单位张量; μ 为粘性系数。

3) 能量守恒方程

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T - \nabla \cdot (k \nabla T) = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{5k_B T}{2q} \right) (\nabla T \cdot J) + E \cdot J + Q_{\text{rad}} \quad (15)$$

式中: C_p 为恒压热容; λ 为导热系数; k_B 为玻尔兹曼常数; q 为电弧电荷; J 为电弧电流密度; E 为电弧场强; Q_{rad} 为辐射散热量; T 为温度。

4) 气体状态方程

$$p = \rho RT \quad (16)$$

式中, R 为气体常数。

5) 电流守恒方程

$$\begin{cases} \nabla \cdot (-\delta \nabla \varphi) = 0 \\ J = -\nabla \varphi \sigma - \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \sigma u \times B + \frac{\partial D}{\partial t} \\ \nabla \times B = J\mu_0 \end{cases} \quad (17)$$

式中: σ 为电弧电导率; φ 为电弧电势; A 为磁矢位; D 为电场感应强度矢量; μ_0 为真空磁导率; t 为时间。

式(13)至式(17)表示压缩气流耦合电弧过程各种物理场的平衡关系。

3 影响交流电弧的熄灭因素

根据第 2.1 节分析可知, 反冲灭弧过程仅与电弧能量存在正比关系, 而腔室气流灭弧过程不仅与电弧能量有关, 还与断口数量、腔室空间排列方式、相邻腔室间形成的角度有关。下面进一步探讨灭弧腔室内影响电弧熄灭时间和灭弧效率的主导因素, 对于进一步改进和提高装置的灭弧效率和缩短灭弧

时间具有指导性意义。

首先建立稳定燃烧的电弧功率方程式。

$$p_k = \rho c_p v \nabla T \quad (18)$$

式中: c_p 为热容系数; v 为电弧运动速度。

电弧运动过程中在受到自身重力影响作用下, 电弧自身会产生对流现象。假如周围气流没有对电弧产生干扰, 结合流体力学, 有

$$\rho \frac{dv}{dt} = -\nabla p + \rho g = 0 \quad (19)$$

式中: ∇p 为弧柱压力梯度; g 为重力加速度。

将式(19)移项, 得

$$\nabla p = \rho g \quad (20)$$

由于电弧弧柱内的气体在电弧高温作用下, 气体会温度急剧上升, 同时密度会不断减小为 ρ' , 即

$$\rho \frac{dv}{dt} = -\rho g + \rho' g = g(\rho' - \rho) < 0 \quad (21)$$

所以根据式(21)可知: 电弧运动方向与重力方向相同, 是因为装置内部的电极诱导电弧进入装置内部, 电弧向下运动, 所以电弧合力为竖直向下的。

腔室内冷空气受电弧加热膨胀形成纵向气流, 因此对电弧实行纵吹。则电弧受纵向气流的情况下散热功率为

$$\rho'_k = \frac{\pi}{4} v' d^2 \int_{T_0}^{T_c} c dT \quad (22)$$

式中: d 为电弧直径; v' 为气流运动速度; T_c 为电弧平均温度; T_0 为电弧初始温度; c 为电弧热容系数。

$$c = \frac{k_1}{T} = \frac{0.41}{T} \quad (23)$$

将式(23)代入式(22)中, 可得:

$$\int_{T_0}^{T_c} c dT = \int_{T_0}^{T_c} \frac{k_1}{T} dT = k_1 \ln \frac{T_c}{T_0} \quad (24)$$

$$\rho'_k = \frac{\pi}{4} v d^2 \times 0.41 \times \ln \frac{T_c}{T_0} = 0.322 d^2 v \ln \frac{T_c}{T_0} \quad (25)$$

分析式(25)可知: 气流速度与电弧对流散热成正比, 与电弧温度、直径呈反比。即提高气流速度, 能加速电弧熄灭, 提高灭弧效率和缩短灭弧时间。而提高腔室内气流速度可以通过改变反冲管直径、灭弧腔室数量和直径、装置内部拐点角度、灭弧腔室空间排列等方式实现。

4 工频电流灭弧试验

4.1 试验方案

为了研究反冲多间隙结构灭弧装置的熄弧效果以及观察在 4 片绝缘伞裙下装置能否将电弧运动路径控制在其内部, 搭建了工频电流试验回路, 如图 4 所示。工频电流灭弧试验是模拟雷击闪络后装置熄灭工频电流的试验, 用于检验装置灭弧性能和耐受电弧灼烧能力^[16]。图 4 中: G 为工频电源; TT 为试验变压器; SS 为可控硅; R_p 为试验回路保护电阻; SG 为放电球隙; L 为电感; C 为电容; R 为电阻; TO 为试品; CT 为电流互感器; DSO 为数字测波仪。

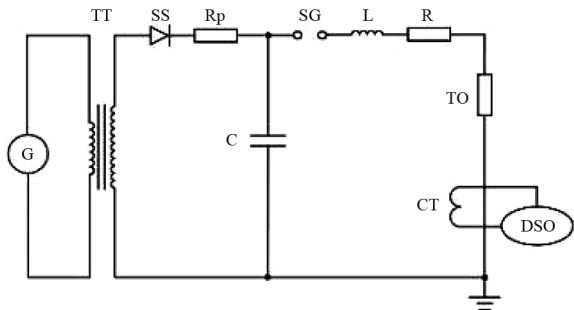


图 4 试验回路

试验主要步骤: 1) 搭建试验回路, 取下装置上的一片伞裙, 依次将 4 片伞裙移动至每层上下处喷口中间, 然后将装置接入试验回路。并调整试验回路参数和整定继电保护时间, 使试验电源输出满足试验条件要求。同时将高速摄像机调整好角度并固定。2) 启动电源, 逐渐升高电压, 向装置施加幅值为 2 kA 的工频电流, 不断减小放电球隙间距直至放电; 3) 当间隙击穿形成工频电弧, 装置迅速熄灭电弧时, 用高速摄像机记录下电弧从反冲管和灭弧腔室内喷出直至完全熄灭的过程。

4.2 试验结果及分析

图 5 为所测得的工频电流波形图。从图中可以看出, 反冲多间隙结构灭弧装置仅在 4 ms 内将幅值为 2 kA 的工频电流完全熄灭, 并且经检测电弧并未发生重燃。

图 6 为高速摄像机所记录下的装置熄灭电弧全过程。从图 6(a) 中看出放电间隙被击穿后, 电弧并未沿绝缘伞裙闪络, 而是被导弧电极诱导进入反冲管内, 说明在 4 片绝缘伞裙下电弧也能够沿放电路径进入装置内部。同时首次进入反冲管内的电弧经

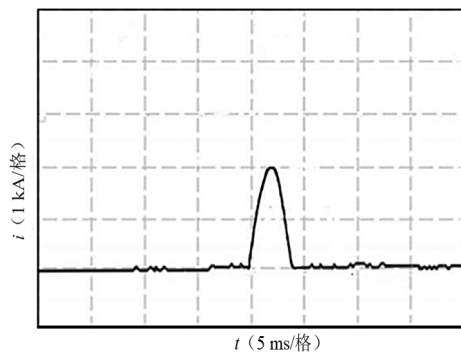


图5 工频电流波形

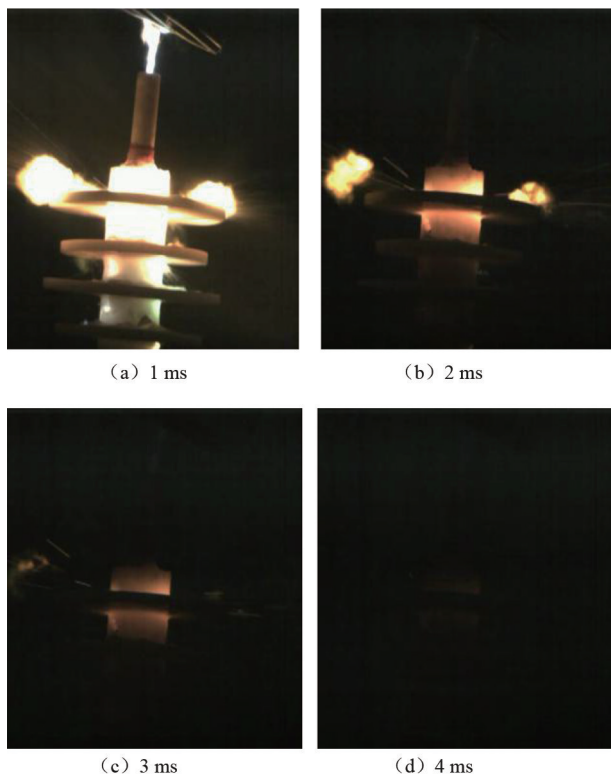


图6 装置熄灭电弧过程

壁面反射后形成高速、高密、高压的反射电弧,但是此时初始反射电弧能量并不强,对后续电弧阻断效果不明显(需后续电弧不断经壁面反射后,积累足够强的反射能量才能有效阻止源源不断的电弧注入),只携带少量电弧喷出反冲管外。同时在压缩强气流纵吹作用下,大量电弧从第一片伞裙上方的两个喷口处喷出,电弧能量被大幅度削弱。从图 6(b)中看出,随着反冲管内的反射电弧有效阻断后续电弧并携带大量电弧喷出后,反冲管内的电弧已经完全湮灭。而由于没有后续电弧能量的持续注入,灭弧腔室内的电弧电流也逐渐减小,电弧亮度逐渐减弱,并且大量电弧被气流逐渐喷射出腔室外。从图 6(c)中看出,在腔室气流持续作用于电弧下,腔室

内只剩下残余带电粒子,已经不能维持电弧的正常燃烧。从图 6(d)中可以看出,电弧能量完全衰减完毕,电弧未出现重燃迹象。所记录的灭弧全过程验证了反冲多间隙结构灭弧装置具有优良的灭弧效果。

5 结 论

上面主要对反冲多间隙结构装置进行了理论模型研究和试验验证,得出以下结论:

1)入射电弧经壁面反射后,反射电弧能达到入射电弧压力的 8 倍、密度的 21 倍,高压高密反射会对后续电弧造成剧烈的破坏;同时腔室内气流受电弧高温急剧膨胀产生纵吹气流加速电弧熄灭。

2)气流速度是电弧熄灭快慢的主导因素,提高气流速度可对装置内部结构进行升级改造实现。

3)通过工频大电流灭弧试验验证了反冲多间隙结构装置灭弧性能优异,能在 4 ms 内熄灭 2 kA 的电弧,并且在 4 片伞裙下也能控制电弧进入装置内部。

反冲多间隙结构装置已经在云南部分地区推广应用,并取得了良好的运行效果。但该装置目前只限制应用于 10 kV 和 35 kV 线路,后期将进一步开展该装置应用于更高电压等级线路的理论研究。

参考文献

- [1] 周志成,马勇,陶风波,等. 雷击地线档距中央的反击性能分析[J]. 江苏电机工程,2012,31(6):11-14.
- [2] 赵淳,陈家宏,王剑,等. 电网雷害风险评估技术研究[J]. 高电压技术,2011,37(12):3012-3021.
- [3] 葛俊,何金良,曾嵘. 输配电线路防雷保护[M]. 北京:清华大学出版社,2013:181-187.
- [4] 何金良,曾嵘,陈水明. 输电线路雷电防护技术研究(三):防护措施[J]. 高电压技术,2009,35(12):2917-2923.
- [5] 陈维江,孙昭英,李国富,等. 110 kV 和 220 kV 架空线路并联保护间隙防雷保护研究[J]. 电网技术,2006,30(13):70-75.
- [6] 陈维江,孙昭英,王献丽,等. 35 kV 架空送电线路防雷并用并联间隙研究[J]. 电网技术,2007,31(2):61-65.
- [7] 戴琦,王巨丰,郑传啸,等. 配电网雷击防护压缩效应切分电弧游离特性[J]. 电网技术,2017,41(7):2401-2406.

(下转第 77 页)

极端自然环境下配电网快速复电弹性研究

樊国旗¹, 汪科², 李剑³, 周金辉², 林振¹, 李鹏²

(1. 国网金华供电公司, 浙江 金华 321001; 2. 国网浙江省电力公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310014;
3. 国网台州供电公司, 浙江 台州 318000)

摘要:极端自然环境对电网有着极大的威胁。配电网作为电网中相对薄弱部分,更易受到自然环境的影响,而配电网和用户直接相关,因此急需提升配电网快速复电弹性。文中基于极端自然环境提出了一种“灾前-灾中-灾后”三阶段弹性提升策略。首先,从薄弱地点硬件能力方面提升灾前预先准备能力;随后,从事故预案方面提升灾中抵御吸收、响应适应能力;然后,从全感知配电网自愈技术方面提升灾后快速恢复能力;最后,介绍了浙江地区配电网在快速复电弹性、抗台风和雷电方面的实际工程经验,为其他地区在极端自然环境下配电网快速复电弹性建设提供参考。

关键词:极端自然环境;配电网;快速复电弹性

中图分类号:TM 734 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2023)01-0018-04

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230104

Research on Rapid Restoration Resilience of Distribution Network in Extreme Natural Environments

FAN Guoqi¹, WANG Ke², LI Jian³, ZHOU Jinhui², LIN Zhen¹, LI Peng²

(1. State Grid Jinhua Electric Power Supply Company, Jinhua 321001, Zhejiang, China;
2. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, Zhejiang, China;
3. State Grid Taizhou Electric Power Supply Company, Taizhou 318000, Zhejiang, China)

Abstract: The extreme natural environments are the great threat to power grid. As the relatively weak part of power grid, the distribution network is more vulnerable to natural environments. Moreover, the distribution network is directly related to the customers, so it is urgent to improve the rapid restoration resilience of distribution network. Therefore, a three-stage resilience enhancement strategy based on "pre-disaster-disaster-post-disaster" is proposed for extreme natural environments. Firstly, the pre-disaster preparation capability is improved in terms of hardware capability at weak location. Secondly, the resilience and absorption, response and adaptation capability in the disaster are enhanced in accident plan, and then the post-disaster rapid recovery capability is enhanced in terms of full-awareness distribution grid self-healing technology. Finally, the actual engineering experiences in Zhejiang region in terms of rapid restoration resilience, typhoon and lightning resistance are introduced, which will provide a reference for other regions in building rapid restoration resilience of distribution grid under extreme natural environments.

Key words: extreme natural environment; distribution network; rapid restoration resilience

0 引言

电力系统是关系到国民经济命脉的重要基础设施,电力安全关乎社会的稳定运行^[1]。当前,极端自然环境影响的频率、强度、空间范围及持续时间都呈显著加剧趋势,电网安全稳定运行受到严重的威

胁。由于配电网架构相对主网较薄弱,且直接面对用户,因此提升配电网在极端自然环境下的快速复电弹性具有重要意义^[2-4]。

综合现有文献来看,大多数的研究均是从理论研究的角度出发,对配电网的弹性策略进行研究。文献[5-7]通过分段断路器改变电网拓扑结构组成多个供电网络,实现孤岛状态下配电网的灵活运行和可靠供电。文献[8]采用网络拓扑结构和潮流方

向构造网络描述矩阵的方法,判断故障区域,提升灾后电力恢复能力。文献[9-10]通过将移动储能作为黑启动电源,以储能和电动汽车作为供电保障,进一步提升配电网弹性,最大化减少负荷损失。文献[11]从故障模式识别、故障容错恢复、设备潜力挖掘等技术提升弹性电网恢复力并改善电网性能。但是在实际电网运行中,需要结合工程经验来适配电网生产运行。因此,下面结合理论研究,从浙江地区实际工程出发,提出了一种基于极端自然环境的“灾前-灾中-灾后”三阶段弹性提升策略。灾前阶段主要考虑硬件能力提升策略;灾中阶段主要根据事故预案进行处理;灾后阶段通过全感知配电网自愈技术,最大限度地恢复电网正常运行。最后,结合实际工程分析“量子+北斗”智能断路器在故障定位、黑启动和移动储能快速接入等保电具体建设项目方案,验证所提策略的有效性及其可行性。

1 极端自然环境下快速复电弹性

1.1 极端自然环境

台风自然灾害在其他地区相对较少,而在浙江沿海地区出现较多,通过对浙江地区抗台风的快速复电弹性经验,来为其他地区应对极端自然环境提供参考。台风、暴雨等极端自然环境会对电力系统造成极大风险,严重时会导致多点同时停电,极端自然环境发生后电力系统仅能部分恢复正常运行水平,其发生概率较低,而规划和运行中主要考虑危害较小的风险,此类风险发生后电力系统能完全恢复正常运行或较好地恢复正常运行,因此极端自然环境在运行和规划中考虑较少^[1,6]。

1.2 快速复电弹性

快速复电弹性分为三阶段,即灾前、灾中和灾后,包括灾前的预先准备、灾中的抵御与吸收、灾中的响应与适应以及灾后的快速恢复^[1,6]。

- 1)灾前阶段主要包括薄弱地点硬件能力提升。为减轻暴雨洪涝对供电影响,将地下开关室、配电房迁移至地上;为减少台风对电杆影响,将易受台风影响路径下的水泥杆更换为铁塔钢管,并加固田边、溪边的电杆地基;为加快台风后抢修速度,将山上杆塔迁移至路边。

为应对传统避雷器保护范围有限的缺点,在浙江省金华市采用拒雷器,通过自主释放与云层相反

的电荷,使雷云与大地之间的电场强度不能达到击穿强度,从而“拒绝”雷击发生,近而达到保护范围更大、安全系数更高的目的。

- 2)灾中阶段主要依据事前指定的预案,依靠切机、切负荷和事故解列等措施,提高电网供电可靠性。

- 3)灾后阶段主要通过全感知配电自愈技术,采取最佳的电网恢复策略最大限度恢复电网正常运行。

浙江省台州市建设了全感知配电网。当电网因自然灾害发生故障时,通过“量子+北斗”智能断路器实现故障定位,解决人工巡视时人力不足的问题;偏远山区容易发生通信故障,可通过北斗智能断路器遥控快速复电,减少人工合闸时间;当上级电源失电后,通过黑启动恢复部分负荷供电。

2 全感知配电网自愈技术

2.1 “量子+北斗”智能断路器

智能断路器为一二次融合断路器,安装于 10 kV 线路上,具备状态感知、远程控制功能。

而量子智能断路器是基于 5G 专网的量子加密智能断路器,不仅可实现断路器数据的实时监视,还可对断路器进行远程控制,减少偏远地区配电网断路器的运维工作量;依托量子智能断路器,还可实现配电网的故障自愈,提高供电可靠性。

由于部分位置偏远的山区,GPRS 信号弱,设备信号传输易掉线,无法保证量子智能断路器运行稳定性和数据实时性。配电线路故障时,智能断路器虽然能对故障进行隔离,但是在故障消失后无法通过远程遥控合闸,必须采取就地手动合闸,极大程度影响供电可靠性。因此在偏远山区采取“量子+北斗”智能断路器方案,利用北斗系统远程遥控柱上智能断路器分合闸动作,替代人工手动合闸操作,实现减少故障区域停电时间、降低相关线路停电损失等目标。

2.2 “量子+北斗”智能断路器方案系统

“量子+北斗”智能断路器方案系统架构如图 1 所示。图中所有智能断路器均具备量子通信功能,每个智能断路器安装 5G 路由模块,通过基站收发台传输分断状态和控制信息,完成配电自动化主站与每个智能断路器的通讯。偏远山区智能断路器额外安装北斗模块后,可通过北斗卫星完成通信。在

通信良好的情况下,所有智能断路器均采取量子通信方式;而当偏远山区量子通信不好不具备遥控能力时,采用北斗通信方式。

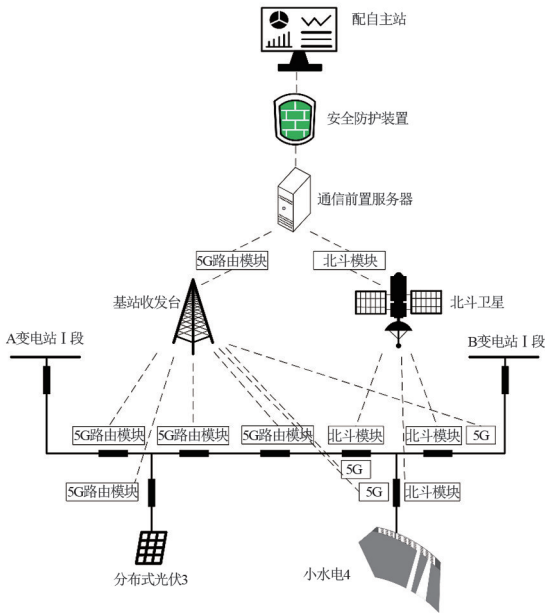


图 1 “量子+北斗”智能断路器方案系统架构

“量子+北斗”智能断路器遥控过程如图 2 所示,共需 5 步量子通信完成遥控。由于北斗通信每帧数据发送需要间隔 1 min,主站向智能断路器发送 2 帧数据,智能断路器向主站发送 3 帧数据,因此遥控最少需要 3 min,而人工合闸需要数小时的时间,相比人工合闸北斗通信方案可以有效减少时户数损失。北斗通信方案能够满足 2020 年浙江省电力公司在线路故障智能化率考核中,主线跳闸故障恢复时间不超过 15 min 的要求。

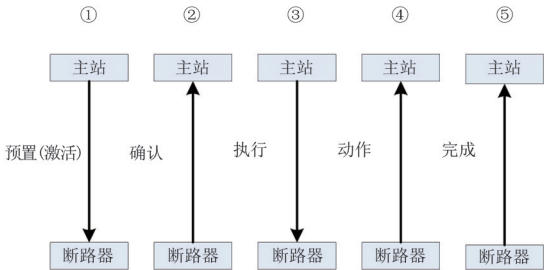


图 2 断路器遥控过程

2.3 “量子+北斗”智能断路器故障定位

将图 1 中的智能断路器和区域以序号命名,如图 3 所示,假设断路器 3 和断路器 4 之间发生故障,则潮流见图 3 中箭头所示。

以某区域相邻断路器潮流正向该区域记为 1,相邻断路器潮流反向该区域记为-1,区域和断路器不相邻记为 0,则会得到描述矩阵 Z 。

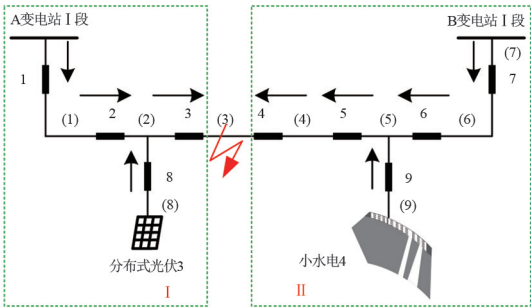


图 3 故障潮流

$$Z = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

定义为 A 信息矩阵,描述矩阵与信息矩阵的卷积为判断矩阵 M 。

$$A = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 1]^T \quad (2)$$

$$M = Z * A = [0 \ 1 \ 2 \ 0 \ 1 \ 0 \ -1 \ -1 \ -1]^T \quad (3)$$

根据基尔霍夫定律,故障发生区域的流入区域电流会大于流出区域,则对应的某区域 M 值会大于 0。

T 型区域和 3 个断路器有关,故障时,3 个断路器均会流向该区域, M 数值大于 3。

非故障时,以区域(2)为例,会出现 2 反向 1 正向(断路器 2、断路器 3 和图中相同,断路器 8 反向),此时 M 值为-1;当分布式电源不发电时,假设该节点有负荷,则会出现 2 正向 1 反向,此时 M 值为 1。

T 型区域非故障的 M 值为 1 和-1,因此 M 值大于 1 为故障区域,故障区域数值 M 为 3,不大于 1 为非故障区域。

非 T 型区域只和两个断路器有关,故障时会有两个断路器流向该区域,数值 M 为 2,因此当 M 值大于 1 为故障区域;等于 0 的为非故障区域。

此外,以非 T 型区域(8)为例,断路器 8 潮流反

向区域(8),则对应的 M 值会小于 0。
T 型区域非故障的 M 值为 0 和-1,因此 M 值不大于 0 为非故障区域,大于 0 为故障区域。

通过判断矩阵 M 和上述判断可知,故障在区域(3);对区域(3)进行故障隔离,并形成图 3 中的 I、II 两个供电网络。

2.4 “量子+北斗”智能断路器黑启动方案

“量子+北斗”智能断路器黑启动方案相对常规通信方案,可以通过移动网络进行通信,减少专用通信线路建设成本;可以在偏远山区移动网络故障时,通过北斗通信实现对断路器遥控。目前已在台州市黄岩区屿头镇安装 30 台量子智能断路器和 4 台北斗智能断路器。

当发生台风极端自然事件导致上级电源全部失电且分布式光伏和小水电脱网时,配电网断路器如图 4 所示,可通过“量子+北斗”智能断路器黑启动方案实现部分复电。

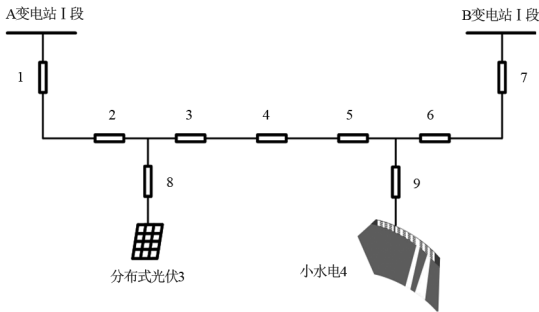


图 4 配电网断路器

由于分布式电源不具备黑启动能力^[5],因此需要通过小水电作为第一启动电源。小水电共计 2 台机组,容量均为 1250 kW;为减轻小水电无功压力,宜在小水电处配备一定量的储能,容量为 300 kW/300 kWh。储能可以提高启动阶段成功概率,并能够在启动成功后克服小水电响应速度不足的缺点,适应负荷快速功率波动的特点,提升小水电功率调节能力和监控人员应对裕度。

黑启动过程如图 5 所示,黑启动过程中,小水电转为离网运行模式。当上级电源恢复后,小水电发电频率和电压需要和大电网同步,完成锁相调节;然后合上断路器 1 和断路器 7(由于 A、B 变电站在 10 kV 低压合环,上级电源为同一供区,不存在相位偏差问题),完成离网转并网运行方式切换。

2.5 基于移动储能快速接入的供电保障方案

由第 2.4 节可知,黑启动过程中,可能存在发电

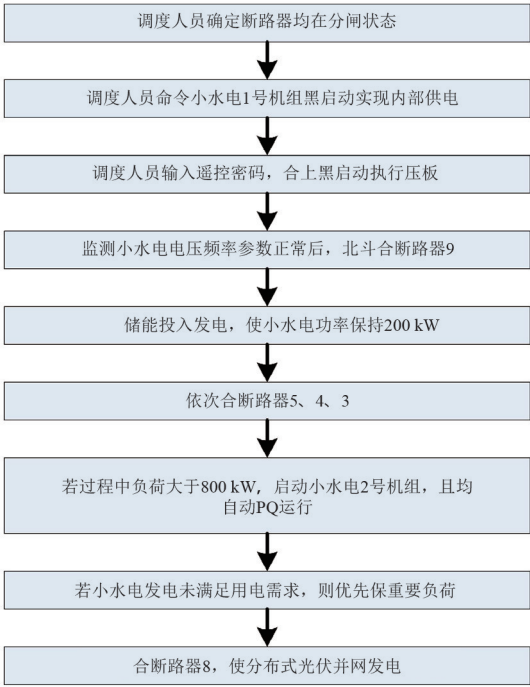


图 5 黑启动过程

不能满足用电需求的情况,此时需要优先保障重要负荷,所以会导致损失一定的其他负荷。而配备的储能在此过程中需充当辅助小水电调节的作用,并不能放电保障负荷供电需求。

移动储能(应急电源车)相对固定电源具有移动灵活的优点,对抢险复电有着重要的作用。但当前移动储能缺少快速接入电网的方式,需现场抢修人员临时施工接入,其施工工艺难以保证,极大影响保电效率。如在电网薄弱环节按照统一标准预设快速接入装置,实现多同场景下快速插拔式接入的全覆盖,可以将接入时间缩短至 10 min 内,停电时间压缩比例最高可达 95%。

快速接入装置具有共享性、高效性和安全性的特点:共享性体现在既可以作为应急保供电快速入口,又能作为电源输出口;在中压、低压、室内、室外、电缆和架空多场景建设发电快速接入口,快速接入装置能提高应急保供电的高效性;采用快速插拔对接自锁技术,连接器连接装置下防护安全级别可达到 IP67(整体防止灰尘接入、防护短暂浸泡),能保证作业的安全性。快速接入装置满足了先进性、经济性和灵活性之间协调统一的需求。

快速接入装置配置了壳体、断路器、铜排、数字电流表、数字电压表、抗凝露装置、带电显示,10 kV 快速接入装置还配有五防闭锁。

基于综合协调优化的两阶段配电网动态重构研究

王鲁明¹, 程 静², 岳 雷³

(1. 国网重庆市电力公司建设分公司, 重庆 401120; 2. 新疆大学“可再生能源发电与并网技术”教育部工程研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830011;
3. 新疆铁道勘察设计院有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830017)

摘 要:针对配电网动态重构,常需要考虑长时间尺度下的合理规划综合考虑负荷功率变化以及光伏、风电等分布式电源的出力变化,及时调整网络拓扑结构使得网络损耗和电压偏差尽可能地小,同时还需顾及网络拓扑结构改变时断路器动作次数与断路器组合冲突问题。为此,文中提出了一种基于综合协调优化的两阶段配电网动态重构法,将配电网动态重构分为两个阶段:1)以网损最低为目标,以基于有序环网的启发式规则灰狼静态重构算法对配电网所有时段进行重构寻优;2)对最优解进行综合协调优化,并提出削减规则策略与时段融合策略,按顺序缩减动态重构的断路器动作次数。仿真结果表明,该方法不仅可以有效降低网损,提高配电网各个节点的电压值,且大幅度降低断路器动作次数。

关键词:配电网动态重构;综合协调优化;改进灰狼算法;断路器削减策略;时段融合策略

中图分类号:TM 727 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2023)01-0022-08

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230105

Research on Two-stage Dynamic Reconfiguration of Distribution Network Based on Comprehensive Coordinated Optimization

WANG Luming¹, CHENG Jing², YUE Lei³

(1. Construction Branch of State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 401120, China;
2. Engineering Research Center of Renewable Energy Power Generation and Grid Technology for Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi 830011, Xinjiang, China; 3. Xinjiang Railway Survey and Design Institute Co., Ltd., Urumqi 830017, Xinjiang, China)

Abstract:For the dynamic reconfiguration of distribution network, it is usually necessary to consider the rational planning of distribution network under a long time scale. And it should consider the load variation and output changes of solar, wind and other distributed power, change the network topology in time to make the network loss and voltage deviation as small as possible, and at the same time it also needs to consider the conflicts of switching times and the combination of circuit-breaker when network topology changes. So a two-stage dynamic reconfiguration method of distribution network based on comprehensive coordinated optimization is proposed, which is divided into two stages: in the first stage, taking minimum network loss as object, the grey wolf static reconfiguration algorithm with heuristic rules based on ordered ring is used to reconstruct and optimize the whole periods of distribution network, and in the second stage, the optimal solutions of whole periods are comprehensively coordinated and optimized, and the switching times of dynamic reconfiguration are reduced sequentially according the proposed reduction rule strategy and period fusion strategy. The simulation results show that the proposed method can not only reduce the network loss and improve the voltage value of each node, but also greatly reduce the switching times.

Key words:dynamic reconstruction of distribution network; comprehensive coordinated optimization; improved grey wolf optimizer algorithm; reduction strategy for circuit-breaker; period fusion strategy

0 引 言

配电网是智能电网的核心之一^[1]。随着分布式电源渗透率的提升,配电网中潮流以及电能不断发生变化^[2],影响着用电质量与用电安全。配电网的重构作为经济效益最优的解决方案,只需改变分段断路器与联络断路器的状态,不需要额外增加设备就能改变其网络拓扑结构,实现负荷平衡,降低有功损耗,提高电压水平^[3]。

在实际配电网中,负荷以及分布式电源出力均是实时变化的,但配电网静态重构只在一个时间断面下进行重构^[4],因此配电网静态重构常用于配电网规划,难以用于长时间尺度的配电网优化重构。而配电网动态重构考虑了长时间下的功率损耗、断路器动作次数以及综合成本等因素,可以有效地随着负荷变化实时调整配电网的网络拓扑结构^[5]。

在配电网动态重构中,网络中的分段断路器和联络断路器会随着分布式电源的出力变化和负荷波动而频繁地进行操作控制。这在一定程度上会减少断路器的使用寿命、增加断路器的操作费用。所以在动态重构研究中不仅需要考虑如何降低网络损耗、提高电压质量,还需要尽可能降低断路器操作的次数^[6]解决断路器“冲突”问题。在文献[7]中以配电网系统运行成本与电压质量作为目标函数,利用自适应策略和基于可行解优越性的约束处理技术,对 IEEE 33 节点系统求解得出最优的重构方案;虽然最终求解的重构方案提高了电压质量,但并未考虑断路器操作次数过多,使断路器寿命受到一定影响。文献[8]提出了利用混合整数非线性规划法对配电网进行网络重构并优化了电容器的配置,但如何对时段进行划分并未具体说明。文献[9]通过分析负载率并利用 AHP 产生多准则决策进行实时动态重构;但该方法求解重构方案较慢,并且方案精准度较差。文献[10]在文献[8]的基础上,虽然考虑了 DG 电源出力不断波动,但是仍未考虑断路器操作次数的约束。文献[11]需要对全时段分别进行求解,然后通过一定规则动态规划出全局最优解;但是当研究区间长、时间断面多时,该方法的计算量巨大且难以寻找到全局最优解。文献[12]使用最优模糊 C 均值聚类的方法,对重构的时段进行划分;但划分结果并不连续,需要进一步的平滑处理,当划

分后的时间点较为分散时,平滑处理较为困难,且容易出现误差较大的情况。文献[13]提出基本环矩阵编码方式,并使用改进和声算法对其进行求解,虽然改进后求解速度更快但是容易陷入局部最优。因此下面首先在文献[13]的基础上提出一种有序环网编码方式,减少配电网重构解空间的峰值,进而提高算法寻优效率;并利用启发式规则改进了灰狼算法^[14],使狼群保证种群多样性的同时,提高其局部搜索能力。其次,将有序环网编码法与启发式规则结合灰狼算法应用到动态重构第一阶段,能够快速得到重构方案;并在第二阶段动态重构中提出断路器削减策略与时段融合策略,对重构方案进行断路器削减。区别于传统的动态重构法,所提方案更加灵活并高效得到重构方案,提高电压质量,降低网损并使断路器动作次数更少,延长断路器寿命的同时保证了配电网运行的安全性^[15]。

1 配电网动态重构模型

实际经验表明,配电网网络损耗以及电压偏差基本上呈正相关^[16],即配电网网络损耗较小时,通常电压偏差也较小。因此在配电网动态重构中以系统总网损最少作为目标函数^[17]。

$$f = \min P_{\text{loss}} \quad (1)$$

$$P_{\text{loss},p} = \sum_{l \in L} r_l \frac{P_{l,p}^2 + Q_{l,p}^2}{V_{l,p}^2} \quad (2)$$

式中: P_{loss} 为配电网运行一段时间的系统总网损; $P_{\text{loss},p}$ 为第 p 时段的网络总损耗; $P_{l,p}$ 和 $Q_{l,p}$ 分别为 p 时段的第 l 条支路末端的有功功率和无功功率; r_l 为支路 l 的电阻; $V_{l,p}$ 为 p 时段支路 l 的结尾节点电压幅值; L 为配电网的支路集合。

约束条件^[18]:

1) 功率平衡约束

$$P_{i,p} = P_{Li,p} + V_{i,p} \sum_{j=1}^N V_{j,p} (G_{ij} \cos \theta_{ij,p} + B_{ij} \sin \theta_{ij,p}) \quad (3)$$

$$Q_{i,p} = Q_{Li,p} + V_{i,p} \sum_{j=1}^N V_{j,p} (G_{ij} \sin \theta_{ij,p} - B_{ij} \cos \theta_{ij,p}) \quad (4)$$

式中: $P_{i,p}$ 和 $Q_{i,p}$ 分别为 p 时段配电网中节点 i 的注入有功、无功功率; $P_{Li,p}$ 和 $Q_{Li,p}$ 分别为 p 时段 i 节点负荷的有功、无功消耗量; V_p 为所有 p 时段节点电

压集合。

2) 节点电压约束

$$\min(V_p) > V_{\min} \quad (5)$$

$$\max(V_p) < V_{\max} \quad (6)$$

式中, $\min(\cdot)$ 和 $\max(\cdot)$ 分别为求最大值和最小值运算。

3) 支路潮流约束

$$S_l \leq S_{l,\max} \quad (7)$$

式中, S_l 、 $S_{l,\max}$ 分别为支路 l 实际潮流及其最大容量。

4) 配电网辐射状结构约束

$$g \in G \quad (8)$$

式中: g 为重构后的网络拓扑结构; G 为连通的辐射状拓扑结构的集合。

5) 断路器操作次数约束

$$M_{SC} \leq N_{TSC} \quad (9)$$

式中: N_{SC} 为在所有时间段内断路器切换的次数总和; N_{TSC} 为所有时间段内断路器切换的次数上限。

2 两阶段配电网动态重构法及分析

2.1 第一阶段配电网动态重构

在配电网动态重构第一阶段中, 仅以网络损耗作为目标函数, 对配电网在某一时间区段内的所有时段分别进行配电网重构^[19]。因此在本阶段中, 需要进行大量的配电网静态重构, 此时要求配电网重构算法具有较高的寻优速度和寻优效率。所以采用文献[14]中基于有序环网矩阵编码的启发式规则灰狼算法对配电网进行静态重构, 因为此方法具有收敛速度快, 迭代次数少等特点, 能快速得到重构方案并保证每个时段的方案均为最优解。

使用 IEEE 33 节点系统进行动态重构仿真, 将一天计划分成为 24 个原始时间段, 并使用文献[20]所提供的日负荷数据以及在 24 个时间段内的风力发电输出功率以及光伏发电的输出功率数据进行仿真。并加入分布式电源 (distributed generation, DG), 在节点 15 接入光伏发电电源 DG1, 节点 31 接入风力发电电源 DG2, 接入 DG 后的 IEEE 33 节点系统见图 1, 风力发电电源与光伏发电电源的日出力数据见图 2 和图 3。使用基于有序环网矩阵编码的启发式灰狼算法对该配电网进行重构并快速地得到重构方案, 重构方案如表 1 所示。由表 1 可以看

出经过第一阶段快速重构后各时段网损均明显降低, 重构前后的有功网损对比见图 4。

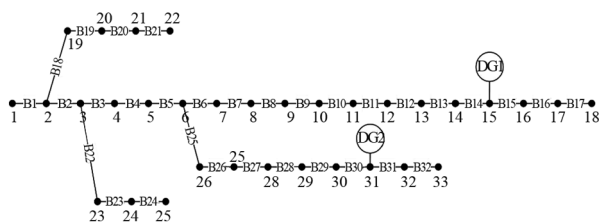


图 1 接入 DG 后 IEEE 33 节点系统

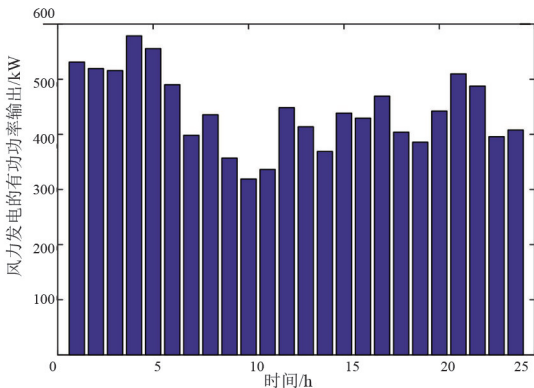


图 2 风力发电有功功率日出力

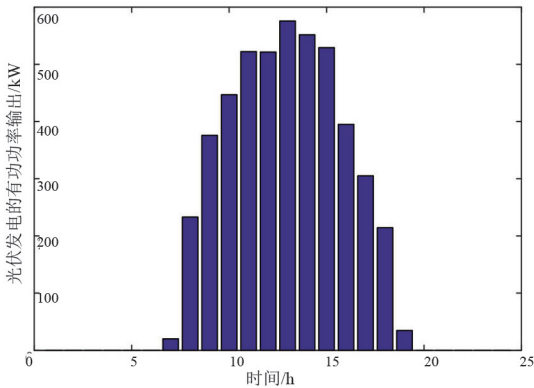


图 3 光伏发电有功功率日出力

在第一阶段中, 采用基于有序环网矩阵编码的启发式规则灰狼算法对配电网进行静态重构, 总计重构次数为 24 次, 用时 73.2 s; 重构后总损耗电能为 721.99 kWh, 相对于原始总损耗电能 972.63 kWh, 全天节约总电能 250.64 kWh, 节约了总损耗电能的 25.77%。断路器动作共计 52 次。从图 4 中也能清晰看出经过第一阶段重构后各时间段功率损耗明显降低。

以上数据表明, 配电网动态重构第一阶段能够对该时间区段的全时段进行快速重构, 获得每个时段的最优方案, 极大减少了网络损耗; 但断路器动作次数过多, 严重影响其寿命, 且由于过度追求减少网

表 1 重构方案

时段	重构方案	重构后网损/kW	原网损/kW
1	33-34-21-8-22	3.58	7.86
2	33-34-21-8-22	3.35	7.42
3	20-34-21-8-4	3.67	7.90
4	18-34-21-6-22	8.90	13.97
5	33-34-21-9-22	3.76	9.67
6	33-34-35-9-23	2.86	6.84
7	7-34-9-12-24	3.15	5.64
8	7-34-35-28-24	4.50	5.18
9	6-10-8-32-37	28.96	33.54
10	7-34-8-31-28	43.56	52.58
11	7-34-8-31-37	46.00	55.23
12	7-34-35-29-37	36.31	42.51
13	6-34-35-29-37	22.78	27.18
14	7-10-8-29-37	28.87	35.18
15	7-9-8-29-37	35.25	42.17
16	7-34-9-32-37	64.40	78.86
17	7-34-10-32-37	66.54	84.41
18	7-14-9-32-37	61.86	81.21
19	7-14-9-36-37	65.08	93.56
20	7-14-9-17-37	87.30	128.57
21	7-14-9-17-37	75.33	112.00
22	7-14-9-15-37	16.70	25.63
23	7-34-10-14-28	6.94	10.92
24	33-34-8-12-24	2.35	4.59

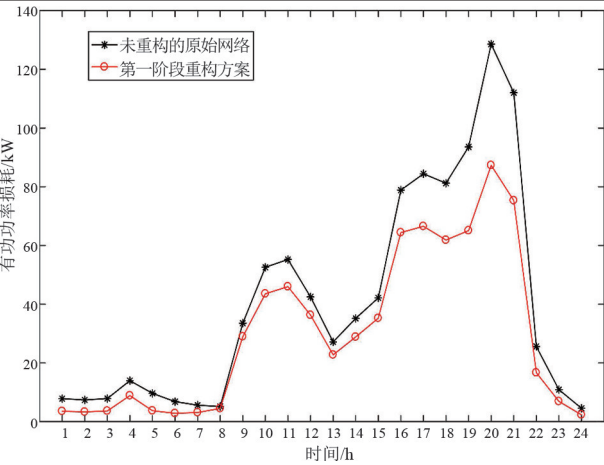


图 4 24 时段重构前后网损对比

络损耗,易导致不必要的断路器频繁动作。因此,需要对第一阶段的重构方案进行优化以减少断路器动作次数。

2.2 第二阶段配电网动态重构

为解决配电网动态重构第一阶段中存在的断路器频繁动作问题,提出了断路器动作次数削减规则来指导综合协调优化削减断路器动作次数。

1)规则 1:应首先对负荷功率较小时段的断路器次数进行削减优化。

2 规则 2:在连续的多个时段中,若出现 A-B-A 断路器组合,则将中间时段改为与两侧相同的断路器,即将 A-B-A 改为 A-A-A 组合。

3)规则 3:在相邻两时段中,若出现 A-B 断路器组合,且 A 和 B 断路器为相邻断路器,则应优先考虑对其进行修改,经过潮流计算后,根据网络损耗进行选择修改成 A-A 或者 B-B。

4)规则 4:若连续几个时段中,出现 A-B-C-D-E 断路器组合时,即每个时段的断路器组合均不同时,则可以使用枚举法将所有断路器组合带入潮流计算中,进行求解这几个时段的网络损耗,选出其中网络损耗最小的。

规则 1 能够尽量减少因为动作次数减少时增加的网络损耗。其主要原因是在负荷功率较小时产生的网络损耗也较少,此时由于综合协调优化而进行切换其他断路器时,增加的网络损耗也较少。规则 2 一般需要进行验证,其中间时段需要进行潮流计算,验证该网络是否满足连通辐射状约束和潮流收敛约束;同时,规则 2 不局限于在 3 个时段内,可对该规则进行拓展应用,如对于 A-A-B-C-A-A 这种情况,也可应用该规则削减为 A-A-A-A-A-A。规则 3 和规则 4 则为补充规则,若在削减过程中没有满足条件的削减方案且断路器动作次数仍未达到要求时,应当使用时段融合策略对两个时段的断路器进行融合。

以上削减规则均为指导思想,以期在进行综合协调优化减少断路器动作次数时有所依据。综合协调优化时,所有对断路器进行的修改均应当对其进行连通辐射状约束和潮流收敛约束的校验。下面以表 1 的重构方案为例进行综合协调优化。首先,将所有时段的第 n 个动作断路器看为第 n 个环网,将表 1 重构方案以环网形式提取改写为如表 2 所示。

对表 2 中的重构方案进行综合协调优化时,应该分别对所有环网中断开的断路器进行优化,例如第一个环网中,断开的断路器划分为“33 33 20 18 33 33 || 7 7 6 7 7 7 6 7 7 7 7 7 7 7 7 7 || 33”,根据上述断路器削减规则策略调整断开断路器:

1) 将“33、33、20、18、33、33”调整为“33、33、33、33、33、33”。

表 2 重构方案对应表

时段	重构方案中断开的断路器					网络 损耗/kW
	第一个 环网	第二个 环网	第三个 环网	第四个 环网	第五个 环网	
1	33	34	21	8	22	3.58
2	33	34	21	8	22	3.35
3	20	34	21	8	4	3.67
4	18	34	21	6	22	8.90
5	33	34	21	9	22	3.76
6	33	34	35	9	23	2.86
7	7	34	9	12	24	3.15
8	7	34	35	28	24	4.50
9	6	10	8	32	37	28.96
10	7	34	8	31	28	43.56
11	7	34	8	31	37	46.00
12	7	34	35	29	37	36.31
13	6	34	35	29	37	22.78
14	7	10	8	29	37	28.87
15	7	9	8	29	37	35.25
16	7	34	9	32	37	64.40
17	7	34	10	32	37	66.54
18	7	14	9	32	37	61.86
19	7	14	9	36	37	65.08
20	7	14	9	17	37	87.30
21	7	14	9	17	37	75.33
22	7	14	9	15	37	16.70
23	7	34	10	14	28	6.94
24	33	34	8	12	24	2.35

2) 将“7、7、6、7、7、6、7、7、7、7、7、7、7、7、7”调整为“7、7、7、7、7、7、7、7、7、7、7、7、7、7、7”。

3) 由于第 24 时段的后一时段为第二天的第一时段,且第 24 时段断开的断路器与第一时段断开的断路器相同。则经过上述调整后,在第一个环网中全天的断路器动作次数由原来的 9 次降低为 2 次。

同理,第二个环网经过削减后的断路器排列为“34、34、34、34、34、34、34、34、34、34、34、34、34、34、34、34、14、14、14、14、14、34、34”,全天的断路器动作次数由原本的 7 次降低为 2 次。

第三个环网削减后的断路器排列为“21、21、21、21、35、35、35、8、8、8、35、35、8、8、9、9、9、9、9、9、9、9”,全天断路器动作次数由原来的 12 次降低为 6 次。

第四个环网削减后的断路器排列为“8、8、8、8、9、9、9、31、31、31、31、29、29、29、29、32、32、32、32、17、17、17、17、17”,全天断路器动作次数由原来的 14 次降低为 6 次。第三个环网和第四个环网经过削减后断路器动作次数仍较多,后续应当采用时段融合方法进一步削减断路器动作次数。

第五个环网削减后断路器排列为“22、22、22、22、22、22、24、24、37、37、37、37、37、37、37、37、37、37、37、22、22”,断路器动作次数由原来的 10 次降低为 3 次;虽然断路器动作次数已大幅减少,但是 7 时和 8 时仍然有可以削减的空间,仍可以采用时段融合方法进一步削减断路器动作次数。

最终,削减后的重构方案断路器动作次数已经大幅削减,由原来的 52 次降低为 19 次。总损耗电能由原来的 721.99 kWh 提升至 735.59 kWh,即损耗 13.60 kWh 的电能节约了 33 次的断路器动作次数。由此表明该削减规则可以有效地保证在网络损耗较低的情况下,减少断路器动作的次数。各时段最优的重构方案网损对比折线如图 5 所示。

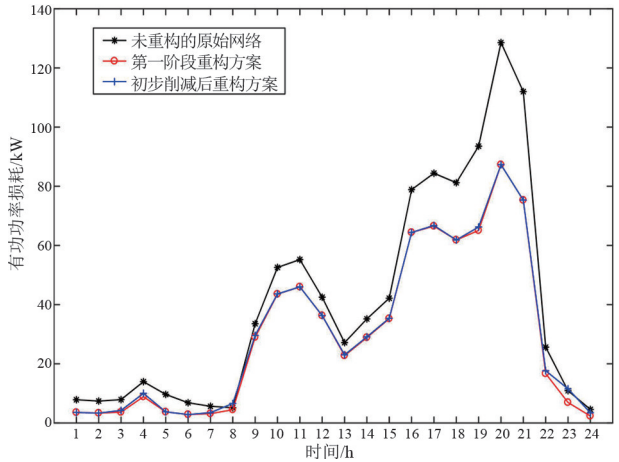


图 5 24 时段网损对比

3 基于第二阶段时段融合策略的动态重构及分析

为了进一步降低断路器动作次数,对需要进行时段融合中环网进一步削减断路器动作次数。

第三个环网中,全天的断路器动作次数为 6 次,即将全天 24 h 分为 6 个时段,时段融合具体步骤为:先将第二至第六时段的断路器依次修改为前一时段的断路器断开方案,第一时段修改为最后时段,则产生 6 种情况;再将原来的断路器排列中,第一至第五时段的断路器依次修改为后一时段的断路器断开方案,最后时段修改为第六时段,再次生成 6 种情况;最后,分别求解这 12 种情况的网络损耗,筛选出总网损最小的方案。该 12 种情况的第三个环网中 24 h 的断路器组合以及对应的网络损耗如表 3 所示。

表 3 第三个环网组合方案

情况	24 时段的断路器组合	总损耗/ kWh
1	35,35,35,35,35,35,35,35,8,8,8,35,35,8,8,9,9,9,9,9,9,9,9	736.8
2	21,21,21,21,21,8,8,8,8,8,8,35,35,8,8,9,9,9,9,9,9,9,9	—
3	21,21,21,21,21,35,35,35,35,35,35,35,35,8,8,9,9,9,9,9,9,9,9	741.7
4	21,21,21,21,21,35,35,35,35,35,35,35,35,8,8,9,9,9,9,9,9,9,9	743.7
5	21,21,21,21,21,35,35,35,8,8,8,35,35,9,9,9,9,9,9,9,9,9,9	735.6
6	21,21,21,21,21,35,35,35,8,8,8,35,35,8,8,21,21,21,21,21,21,21	805.5
7	9,9,9,9,9,35,35,35,8,8,8,35,35,8,8,9,9,9,9,9,9,9,9	—
8	21,21,21,21,21,21,21,21,8,8,8,35,35,8,8,9,9,9,9,9,9,9,9	736.5
9	21,21,21,21,21,35,35,35,35,35,35,35,35,8,8,9,9,9,9,9,9,9,9	741.7
10	21,21,21,21,21,35,35,35,8,8,8,8,8,8,8,9,9,9,9,9,9,9,9,9	743.7
11	21,21,21,21,21,35,35,35,8,8,8,35,35,35,35,9,9,9,9,9,9,9,9,9,9	736.8
12	21,21,21,21,21,35,35,35,8,8,8,35,35,8,8,8,8,8,8,8,8,8,8	750.4

由表 3 可以看出,第二种情况和第七种情况会出现不满足约束的方案,即此时的潮流计算不收敛,故将其剔除。然后再从剩下的 10 种情况种挑选总电能损耗最低的情况,即第四种和第十种情况。通过比对,发现二者的断路器组合相同,此时第三个环网的全天断路器动作次数由 6 次降低为 4 次。根据配电网的具体需要,可再次地对其进行时段融合,进一步将断路器动作次数降低。若设定每个环网一天中断路器动作次数不超过两次,则第三个环网最终的断路器动作组合为“21、21、21、21、21、21、21、9、9、9、9、9、9、9、9、9、9、9、9、9、9”。

同理,对第四个、第五个环网进行时段融合操作。设定每个环网一天中断路器动作次数不超过两次,得到第四个环网最终的断路器动作组合为“9、9、9、9、9、9、32、32、32、32、32、32、32、32、32、32、32、32、32、32、32”;第五个环网最终的断路器动作组合为“22、22、22、22、22、22、24、24、24、24、24、24、24、24、24、24、24、24、22、22”。

最终得到满足断路器约束的配电网动态网络重构方案,并将其与第一阶段生成的配电网各时段最优的重构方案进行对比,如表 4 所示。将表 4 整理后,可以得到重构方案性能对比见表 5。

表 4 重构方案对比

时段	原始网络网损/ kW	第一阶段 重构方案	第一阶段 重构后网损/ kW	第二阶段 重构方案	最终重构后网损/ kW
1	7.86	33-34-21-8-22	3.58	7-34-9-32-22	3.61
2	7.42	33-34-21-8-22	3.35	33-34-9-32-22	3.37
3	7.90	20-34-21-8-4	3.67	33-34-21-9-22	4.28
4	13.97	18-34-21-6-22	8.90	33-34-21-9-22	10.09
5	9.67	33-34-21-9-22	3.76	33-34-21-9-22	3.76
6	6.84	33-34-35-9-23	2.86	33-34-21-9-22	2.90
7	5.64	7-34-9-12-24	3.15	33-34-21-9-22	3.78
8	5.18	7-34-35-28-24	4.50	33-34-21-9-22	5.69
9	33.54	6-10-8-32-37	28.96	7-34-21-9-24	29.36
10	52.58	7-34-8-31-28	43.56	7-34-21-32-24	46.24
11	55.23	7-34-8-31-37	46.00	7-34-9-32-24	49.45
12	42.51	7-34-35-29-37	36.31	7-34-9-32-24	38.16
13	27.18	6-34-35-29-37	22.78	7-34-9-32-24	26.57
14	35.18	7-10-8-29-37	28.87	7-34-9-32-24	33.40
15	42.17	7-9-8-29-37	35.25	7-34-9-32-24	38.67
16	78.86	7-34-9-32-37	64.40	7-34-9-32-24	64.40
17	84.41	7-34-10-32-37	66.54	7-34-9-32-24	66.77
18	81.21	7-14-9-32-37	61.86	7-34-9-32-24	61.86
19	93.56	7-14-9-36-37	65.08	7-34-9-32-24	66.24
20	128.57	7-14-9-17-37	87.30	7-14-9-32-24	89.78
21	112.00	7-14-9-17-37	75.33	7-14-9-32-24	79.32
22	25.63	7-14-9-15-37	16.70	7-14-9-32-24	20.73
23	10.92	7-34-10-14-28	6.94	7-14-9-32-24	12.65
24	4.59	33-34-8-12-24	2.35	7-14-9-32-24	4.17

表 5 重构方案性能对比

对比项	原始网络	第一阶段 重构方案	第二阶段 重构方案
总损耗电能/kWh	972.63	722.00	765.26
总节约电能/kWh	0	250.63	207.37
降损率/%	0	25.77	21.32
总断路器动作次数	0	52	8

结合表 4 和表 5 可以看出:1) 未重构时全天的总电能损耗为 972.63 kWh,采用改进灰狼算法优化后的第一阶段重构后的总电能损耗为 722.00 kWh,表明若不考虑断路器动作次数,最大限度地降低网络损耗最多可以节约电能 250.63 kWh,降损率为 25.77%;但此时的断路器动作次数为 52 次。在实际配电网动态重构中,断路器反复动作是不被允许的,因此难以满足断路器动作次数的约束。2) 采用综合协调优化后的第二阶段重构后的总电能损耗为 765.26 kWh,比第一阶段重构方案的网损高 43.26 kWh,降损率由原来的 25.77%降低至 21.32%,降低了 4.45 个百分点;但断路器动作次数

由 52 次降低为 8 次,即综合协调优化以每天多损耗 43.26 kWh 的电能,换取了 44 次的断路器动作次数,大大降低了断路器动作次数,很好地提高了配电网网络断路器的操作寿命。

各时段网损对比曲线如图 6 所示,最低电压对比如图 7 所示。

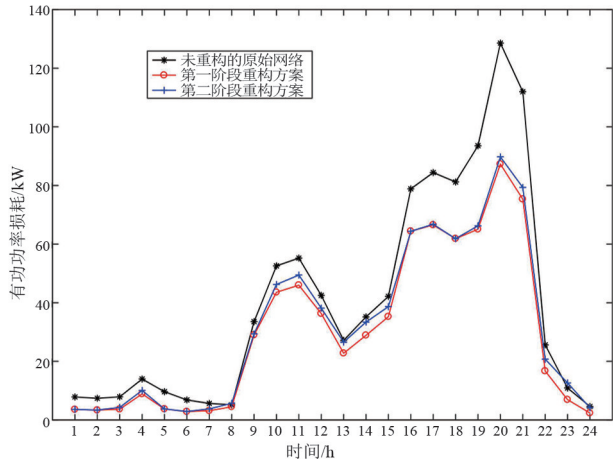


图 6 各阶段重构方案网损对比

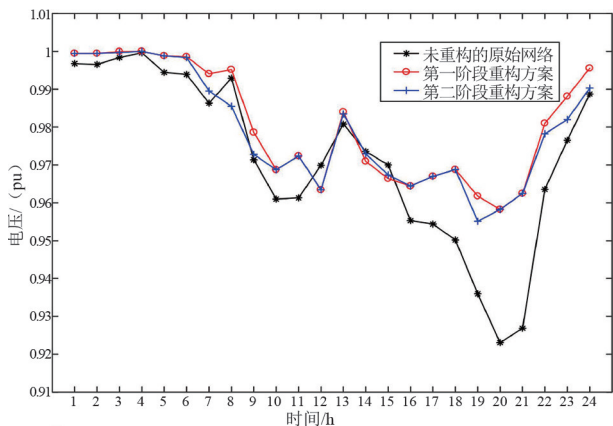


图 7 重构前后 24 时段最低电压对比

由图 6 可以看出:1)在 1 时至 8 时负荷较低,网络损耗也较低,两个重构方案下的配电网网络损耗与原始网络相差不大,即此时的网络重构效果并不明显。由此可以推出,应当优先对这时段的断路器动作次数进行削减,验证了削减规则 1。2)在负荷较高时,例如 16 时至 21 时,两个重构方案下的配电网网络损耗与原始网络相差较大,表明所提方法可以有效地降低网络损耗。3)纵观第二阶段重构方案下的网络损耗与第一阶段重构下网络损耗曲线走势,可以看出,两条曲线非常接近,表明所提综合协调优化方案可以在保证网损较低的情况下,降低断路器动作次数。

由图 7 可以看出:1)3 条曲线中未重构的原始

网络电压最低,且在负荷功率较大的 20 时有全天最低电压,此时电压标幺值为 0.923 1 pu。2)在负荷较轻的时段中,原始网络电压相对较高,此时配电网重构对电压的提升并不大;然而,在负荷较重的时段中,两种重构方案中系统的最低电压均有大幅度提升,且提升后的最低电压均在 0.95 pu 以上。表明两种重构方案均可以在降低网络损耗时有效地提高电压。3)纵观第二阶段重构方案下的最低电压与第一阶段重构下最低电压曲线走势,可以发现二者相差不大,表明此时所提综合协调优化方案可以在提升节点电压的情况下,降低断路器动作次数。

重构过程中断路器动作次数统计如图 8 和图 9 所示,可以清楚地看出经过两阶段的动态重构后断路器动作次数数明显降低,在满足减少网损的同时,极大地减少了断路器动作次数,更加保障了配电网的安全性。

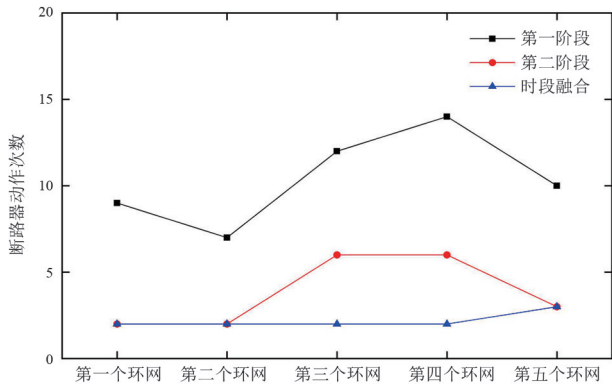


图 8 各环网断路器在不同阶段的动作次数

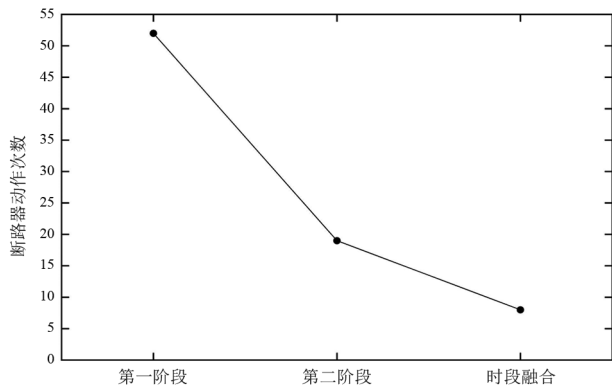


图 9 不同阶段总断路器动作数

4 结 论

上面采用基于综合协调优化两阶段配电网动态重构,对配电网动态重构进行求解。由于基于有序

环网矩阵编码的启发式规则灰狼算法寻优速度快求解效率高,因此第一阶段使用该算法对每个时段进行寻优,可以快速地获取各个时段的最优重构方案。但由于第一阶段中断路器动作次数未加以限制,故断路器动作频繁难以满足配电网的要求。由此引出配电网重构第二阶段,对所有时段的最优解进行综合协调优化。根据所提削减规则策略与时段融合策略按顺序将动态重构的断路器动作次数进行缩减,直至满足断路器动作次数约束。使用 IEEE 33 节点的算例验证了所提方法的可行性,并进行了对比验证。结果表明所提方法具有以下特点:

1) 第一阶段的配电网重构,可以快速地获得各个时段的最优重构方案,此时的重构方案虽然网损较低,但难以满足动态重构的断路器约束;

2) 第二阶段的配电网重构,遵循削减规则策略与时段融合策略以少量网络损耗为代价,将第一阶段配电网重构方案的断路器动作次数进行大量的削减;

3) 两个阶段的配电网重构方案均可以有效地降低网损并提高配电网各个节点的电压值。

基于综合协调优化的两阶段配电网动态重构可以根据配电网需求进行适当的削减断路器动作次数,具有普遍适用性。

参考文献

- [1] 李鑫,杨方,肖湘晨,等.智能电网中用电感知的数据分析需求响应方案研究[J].电测与仪表,2022,59(2):30-37.
- [2] 江泽昌,刘天羽,江秀臣,等.考虑 DG 与负荷不确定性的主动配电网重构[J].电测与仪表,2019,56(19):76-84.
- [3] ABDOLMAJID D, YASHAR F K, HOSSEIN S. Modified branch exchange reconfiguration of active distributed network for simultaneous loss reduction and power quality improvement[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems,2019,29(10):e12065.1-e12065.17.
- [4] 傅长熠,杨镜非,顾家辉.基于双层动态时段划分的配电网重构[J].电力自动化设备,2022,42(6):30-36.
- [5] 刘迪,张强,吕干云.量子粒子群算法在配电网重构中的改进和应用[J].电测与仪表,2022,59(3):58-65.
- [6] 张照堃.含分布式电源的配电网多目标优化重构[D].武汉:湖北工业大学,2021.
- [7] 刘莉,陈学允.基于模糊遗传算法的配电网重构[J].中国电机工程学报,2000,20(2):66-69.
- [8] PFITCHER L L, BERNARDON D P, CANHA L N, et al. Intelligent system for automatic reconfiguration of distribution network in real time[J]. Electric Power Systems Research,2013,97:84-92.
- [9] 吴建中,余贻鑫.最小化运行费用的时变重构全局优化算法[J].中国电机工程学报,2003,23(11):13-17.
- [10] 李振坤,陈星莺,余昆,等.配电网重构的混合粒子群算法[J].中国电机工程学报,2008,28(31):35-41.
- [11] SHARIATKHAH M H, HAGHIFAM M R, SALEHJ J, et al. Duration based reconfiguration of electric distribution networks using dynamic programming and harmony search algorithm[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems,2012,41(1):1-10.
- [12] 王淳,高元海.采用最优模糊 C 均值聚类和改进化学反应算法的配电网动态重构[J].中国电机工程学报,2014,34(10):1682-1691.
- [13] 陈春,汪飒,刘蓓,等.基于基本环矩阵与改进和声搜索算法的配电网重构[J].电力系统自动化,2014,38(6):55-60.
- [14] 王鲁明,程静,王维庆.基于改进灰狼算法的含分布式电源配电网重构研究[J].现代电力,2022,39(1):56-63.
- [15] 徐俊斐,高志强,周雪松,等.考虑负荷与 DG 随机性特征的配电网多目标动态重构[J].电测与仪表,2020,57(21):32-39.
- [16] 付学谦.考虑配电网损和电能质量的分布式电源优化配置[D].广州:华南理工大学,2015.
- [17] 徐嘉斌.含分布式电源的配电网重构模型与方法[D].青岛:山东科技大学,2019.
- [18] 田书欣,刘浪,魏书荣,等.基于改进灰狼优化算法的配电网动态重构[J].电力系统保护与控制,2021,49(16):1-11.
- [19] 王梦莹.基于改进人工搜索群算法的配电网重构研究[D].天津:河北工业大学,2020.
- [20] 杨胡萍,彭云焰,熊宁.配网动态重构的静态解法[J].电力系统保护与控制,2009,37(8):53-57.

作者简介:

王鲁明(1997),男,硕士,研究方向为智能电网;

程静(1980),女,博士,副教授,研究方向为高比例新能源并网技术;

岳雷(1979),男,高级工程师,从事综合能源优化配置工作。

(收稿日期:2022-07-10)

提高风电并网系统调度计划可信度的 HESS 经济效益计算

蔡高雷¹, 刘桂龙², 蔡静静³

(1. 国电投长江氢能科技有限公司, 上海 200120; 2. 中国海诚工程科技股份有限公司, 上海 200031;
3. 上海电力大学, 上海 200090)

摘要:针对风电-氢储能系统的经济性, 文中提出利用氢储能系统(HESS)提高风电并网调度计划的可信度, 分析了 HESS 提高风电并网调度计划的可信度的机理; 然后, 构建了计及风电预测出力、实际出力及调度出力的氢储能系统提高风电并网调度计划可信度的充放电价格策略体系; 最后, 建立了 HESS 收入及成本数学模型。在此基础上, 构建了提高风电并网调度计划可信度的 HESS 全生命周期的经济效益计算数学模型。以某风电场为例对所提模型进行了验证, 并分析了经济效益对调度误差和电价的敏感性, 结果表明所建立的 HESS 经济效益计算模型的正确性。研究结果为风电-氢储能系统前期投建的经济性评价提供了参考。

关键词:风力发电; 氢储能; 调度计划可信度; 充放电; 经济效益

中图分类号: TM 734 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2023)01-0030-09

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230106

Economic Benefit Calculation of HESS for Improving Credibility of Dispatching Plan of Wind Power Grid-Connection

CAI Gaolei¹, LIU Guilong², CAI Jingjing³

(1. State Power Investment Yangtze River Hydrogen Technology Co., Ltd., Shanghai 200120, China;
2. China Haisum Engineering Co., Ltd., Shanghai 200031, China;
3. Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: Aiming at the economic of wind power and hydrogen energy storage system (HESS), HESS is proposed to improve the credibility of dispatching plan of wind power grid-connection. The mechanisms for improving the credibility of dispatching plan of wind power grid-connection is analyzed, and the charging and discharging pricing strategy system is proposed considering output prediction, actual output and dispatching output of wind power of HESS to improve the credibility of dispatching plan of wind power grid-connection. A mathematical model for income and cost of HESS is established, and on this basis, a mathematical model for economic benefit calculation of HESS life-cycle is constructed to improve the credibility of dispatching plan of wind power grid-connection. Taking a wind farm for example, the proposed model is verified, and the sensitivity of economic benefit to dispatching error and electricity price is analyzed. The results show that the proposed economic benefit calculation model for HESS is right and effective, which can provide a reference for the economic evaluation of early construction of HSEE.

Key words: wind power generation; hydrogen energy storage; credibility of dispatching plan; charging and discharging; economic benefit

0 引言

以风能为代表的大规模清洁能源发电并网已成为当今世界各国应对资源枯竭及环境污染压力的

必然手段^[1-4], 然而风电出力具有的波动性、随机性及间歇性是困扰清洁能源大规模发电并网的主要技术“瓶颈”; 与此同时, 风能、光伏等宝贵的清洁能源无法大规模有效低成本存储等原因制约了新能源消纳水平。因此, 能量的合理存储与释放是解决风电

等新能源上网难的方案之一^[5]。具有高能量密度的氢储能系统因其灵活的电功率吞吐特性及实现电能“时空转移”特性被广泛应用于平滑新能源发电出力波动、削峰填谷及辅助服务等领域^[6-7]。合理利用储能技术实现能量“时空转换”,可有效缓解风电并网系统大幅波动,减少对大电网安全稳定运行的影响;同时,可有效拓宽新能源消纳路径及大幅提高新能源消纳水平^[8-9],减缓电网设备扩容,增加设备利用率^[10]。但是,氢储能的接入必然引起系统投资及运营资本结构的变化。因此,如何在突破风电并网难等技术瓶颈的同时兼顾氢储能系统经济性的问题亟待解决。

目前,国内对风电-氢储能研究较少,公开资料显示,研究多集中于风电/光伏制氢储能-燃料电池发电系统架构及对其可行性分析^[11-14]。文献[11]提出风-氢耦合发电系统架构;文献[12-13]建立了基于微电网的氢氧联合循环与风能耦合发电系统,并对系统的效率与经济可行性进行了分析;文献[14]提出了风电-氢储能耦合燃料电池发电系统,并通过净现值等经济指标对系统的经济可行性进行评估;文献[15]构建了风电-氢储能与煤化工多能耦合系统架构并对氢储能子系统基于能量宏观表示法建模、仿真研究。国外对氢储能的研究多集中于耦合氢储能的大规模风电并网系统的研究较少。文献[16-18]提出了含氢储能子系统的风电并网系统,并从氢储子系统可操作性及能量泄漏率方面讨论储氢方法;文献[19-20]重点研究了独立混合式电源发电系统中氢储能系统的能量分配方法;文献[21-22]搭建了耦合氢储能的独立混合式新能源发电系统仿真模型。综上分析,国内外对于氢储能系统(hydrogen energy storage system, HESS)用于提升风电并网系统调度计划可信度的研究鲜见,对其经济性计算的研究几乎空白。

下面,在分析了 HESS 用于风电并网系统调度计划可信度作用机理的基础上,依据风电预测出力、实际出力及调度出力将风电-氢储能-广义负荷(含输配电系统及用电负荷)运营工况进行合理的区间划分。针对不同运营工况区间划分了提升风电并网系统调度计划可信度的 HESS 充放电区间及充放电价格,并进一步建立了其全寿命周期时间尺度的经济效益计算模型,再以某地风电场实际运行数据对

所提方法进行验证。研究成果为氢储能系统投建前期的经济可行性分析提供了参考依据,对于推动中国风电等清洁能源发电并网具有重要的理论和实践价值。

1 提升风电并网系统调度计划可信度的 HESS 充放电作用机理

1.1 作用机理概述

风电并网系统调度计划可信度可定义为:风电调度出力跟踪风电实际出力的程度。众所周知,风电调度计划的制定依据风电上报预测出力及负荷需求状况,风电出力“难调、难控”的特征给系统调度计划可信度的提升带来了挑战^[23]。HESS 不仅具有传统储能的上述特性,还可在 0~100% 额定功率范围内自适应风电功率变化及整个工作过程中的环境友好性^[15]。因此,HESS 被认为是较优的用于提升风电并网系统调度计划可信度的技术手段。

如图 1 所示,HESS 主要包含电解槽、氢氧燃料电池堆和储气系统 3 部分,通过交/直流逆变装置连接于风电场出口及广义负荷(含输配电线路及用电负荷)之间。当风电实际出力值超出调度出力计划值可容忍上限,电解槽利用富余风电电解水并将得到的氢、氧气体通过加压等处理存储于储气系统,即 HESS“充电”,提高风电消纳能力;当风电实际出力值超出调度出力计划值可容忍下限,同时风资源匮乏、风电出力出现缺额时,燃料电池堆将氢气、空气等存储的化学能转化为电能,最大限度补充风电缺额,即 HESS“放电”,提高了风电并网系统调度计划的可信度。

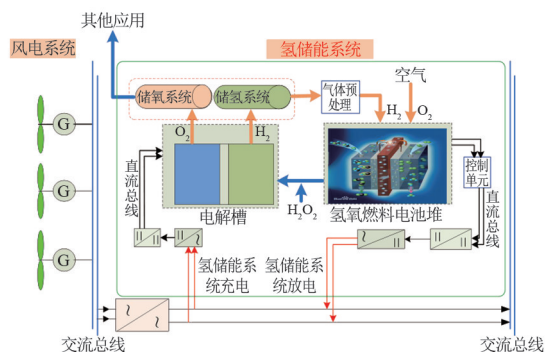


图 1 耦合氢储能的风电并网系统结构

1.2 充放电区间划分

基于上面所述,HESS 提升风电并网系统调度

计划可信度的关键在于其充、放电区间的准确划分及充放电功率的确定。

如图 2 所示,在时间尺度 t 上存在风电场预测出力值 $P'_{w,y}$ 、风电场实际出力 $P'_{w,s}$ 及调度出力 $P'_{w,d}$ 3 个物理量,因调度出力依据风电场上报的预测出力制定,故以调度出力为基准,定义调度误差为 $e_{sd} = P'_{w,s} - P'_{w,d}$,并假定在误差 e_{sd} 范围内风电并网不会威胁系统安全稳定运行。图 2 中所标误差带上限为 $P_t = P'_{w,d} + |e_{sd}|$,误差带下限为 $P_t = P'_{w,d} - |e_{sd}|$,根据三者数值关系并结合现实运营场景,可将整个风电-氢储能-广义负荷实际运营过程划分为 3 个大区域和 8 个子区域,具体划分如下:

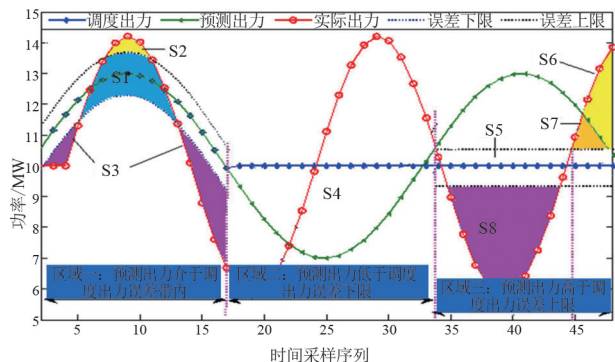


图 2 氢储能充放电区间划分

1) 区域 1: $P'_{w,y} \in [P'_{w,d} - |e_{sd}|, P'_{w,d} + |e_{sd}|]$, 即风电场预测出力处于绝对调度误差可忍受的上、下限范围内。考虑风电场实际出力 $P'_{w,s}$, 将本区域进一步划分为如下 3 个子区域。

子区域 S1: $P'_{w,s} \in [P'_{w,d} - |e_{sd}|, P'_{w,d} + |e_{sd}|]$, 风电场实际出力波动处于电网可忍受范围 e_{sd} 内, HESS 此时不充、不放电, 处于待机状态, 如图 2 中 S1 区域所示。

子区域 S2: $P'_{w,s} > P'_{w,d} + |e_{sd}|$, 风电场实际出力超出电网忍受的范围上限, 此时为避免风电场减出力弃风, HESS 处于深度充电状态, 如图 2 中 S2 区域所示。

子区域 S3: $P'_{w,s} < P'_{w,d} - |e_{sd}|$, 风电场实际出力超出电网忍受范围下限, 此时为保证系统潮流平衡, 氢储能处于放电状态, 如图 2 中 S3 区域所示。

2) 区域 2: $P'_{w,y} < P'_{w,d} - |e_{sd}|$, 即风电场预测出力低于其调度出力下限值, 根据现实运营场景, 风电调度计划的制定依据风电上报预测出力及负荷需求状况, 即至少有 $P'_{w,y} \geq P'_{w,d} - |e_{sd}|$, 因此该场景不符合实际, 故落在本部分的子区域 S4 不予考虑。

3) 区域 3: $P'_{w,y} > P'_{w,d} + |e_{sd}|$, 即风电调度出力上限低于其预测出力, 风电场实际出力 $P'_{w,s}$, 将本区域进一步划分为如下 4 个子区域。

子区域 S5: $P'_{w,s} \in [P'_{w,d} - |e_{sd}|, P'_{w,d} + |e_{sd}|]$, 风电实际出力处于调度误差 e_{sd} 范围内, 但是实际出力高于调度出力, HESS 处于待机状态, 如图 2 中 S5 区域所示。

子区域 S6: $P'_{w,s} \geq P'_{w,y}$, 风电实际出力值高于预测出力值, HESS 处于深度充电状态, 如图 2 中 S6 区域所示。

子区域 S7: $P'_{w,d} + |e_{sd}| < P'_{w,s} < P'_{w,y}$, 风电实际出力处于调度误差上限及预报出力值之间, 储能处于充电状态, 如图 2 中 S7 区域所。

子区域 S8: $P'_{w,s} < P'_{w,d} - |e_{sd}|$, 风电场实际出力低于其调度出力误差下限值, 为保证系统潮流平衡, 储能必须深度放电, 将风电有功输出波动修正至电网可忍受的范围 e_{sd} 内。

综上所述, 图 2 中区域 2 不符合现实运营场景, S4 不予考虑; 区域 1 和区域 3 中, HESS 充电区域为 S2、S6 和 S7, 其中 S2 和 S6 为深度充电状态, 是正常充电状态; 区域 S3 和 S8 为放电状态; 区域 S1 和 S5 为氢储能待机状态。

2 提升风电并网系统调度计划可信度的 HESS 充放电电价策略体系

在电力市场环境下, HESS 与风电场及广义负荷并列作为独立的经济个体, 共同受市场价格规律调控。HESS 充电电源为风电场, 放电对象为广义负荷, 计算 HESS 经济效益应充分讨论所述不同充放电区间所对应的充放电电价。

根据第 1.2 节划分的储能充放电区间, 遵循市场价格规律和“谁受益, 谁买单”的原则, 确定 HESS 充放电电价。假设等效荷电状态(即氢储能实时剩余容量)和最大充放电功率能够满足系统对氢储能装置的要求, 依据所设规定的系统安全稳定运行可忍受的有功绝对误差 e_{dy} , 确定 HESS 充放电功率, 以此建立的提升风电并网系统调度计划可信度的 HESS 充放电电价及充放电功率模型如式(1)~式(4)所示。

1) HESS 充电时的价格及最大充电功率

$$\begin{cases} P_{p,s}^{\text{in}} = \kappa_1 \min\{P_{p,f}, P_{p,h}, P_{p,w}\} + \kappa_2 P_{p,pc} \\ \max P_{s,\text{in}}^t = P_{w,s}^t - (P_{w,d}^t + e_{\text{sd}}) \end{cases} \quad (1)$$

式中, κ_1 、 κ_2 为价格控制因子, 由式(2)确定。

$$\left\{ \begin{array}{l} \kappa_1 = 1, \kappa_2 = 0; P_{w,y}^t \in [P_{w,d}^t - |e_{sd}|, P_{w,d}^t + |e_{sd}|], \\ P_{w,s}^t > P_{w,d}^t + |e_{sd}| \\ \kappa_1 = 1, \kappa_2 = 0; P_{w,y}^t \geq P_{w,d}^t + |e_{sd}|, \\ P_{w,d}^t + |e_{sd}| \leq P_{w,s}^t \leq P_{w,y}^t \\ \kappa_1 = 0, \kappa_2 = 1; P_{w,y}^t \geq P_{w,d}^t + |e_{sd}|, P_{w,s}^t \geq P_{w,y}^t \end{array} \right. \quad (2)$$

2) HESS 放电时的价格及最小放电功率

$$\begin{cases} P_{p,s}^{\text{out}} = \kappa_3 P_{p,w} + \kappa_4 P_{p,\text{vf}} \\ \min P_{s,\text{out}}^t = P_{w,d}^t - e_{\text{sd}} - P_{w,s}^t \end{cases} \quad (3)$$

式中, κ_3 、 κ_4 为价格控制因子, 由式(1)确定。

$$\left\{ \begin{array}{l} \kappa_3 = 1, \kappa_4 = 0; P_{w,y}^t \in [P_{w,d}^t - |e_{sd}|, P_{w,d}^t + |e_{sd}|], \\ P_{w,s}^t \leq P_{w,d}^t - |e_{sd}| \\ \kappa_3 = 0, \kappa_4 = 1; P_{w,y}^t \geq P_{w,d}^t + |e_{sd}|, \\ P_{w,s}^t \leq P_{w,d}^t - |e_{sd}| \end{array} \right. \quad (4)$$

式(1)一式(4)中: $P_{p,w}$ 、 $P_{p,f}$ 、 $P_{p,h}$ 分别为风电、火电及水电上网电价; $P_{p,pc}$ 、 $P_{p,vf}$ 分别为系统调峰、填谷电价,HESS 此时如果担当了系统削峰或者填谷的角色,则认为 HESS 的充放电电价就可以采用系统削峰或者填谷电价。

3 提升风电并网系统调度计划可信度的 HESS 经济效益计算建模

基于第2章所述作用机理及价格区间判断,得到各区间氢储能系统充放电电价,作为输入量,进一步通过以下所建收入、成本和经济效益计算数学模型,输出经济效益指标。已实现经济效益计算软件编制,整个过程由计算软件自动实现。计算流程见图3。

3.1 收入数学模型

3.1.1 直接经济收入

HESS 提升风电并网系统调度计划可信度的直接经济收入由电量收入和补贴收入两部分组成。其中电量收入 I_{EE} 为 HESS 在作用过程中“低充高放”产生的资金积累,如式(5)所示。

$$I_{\text{EE}} = \frac{100t}{6} \cdot (P_{\text{p,s}}^{\text{out}} \cdot P_{\text{s,out}}^i - P_{\text{p,s}}^{\text{in}} \cdot P_{\text{s,in}}^i) + 250 \sum_f^F P_{\text{FC}} \cdot P_{\text{p,wrc}} \quad (5)$$

式中: $P_{s,\text{out}}^i$ 、 $P_{s,\text{in}}^i$ 分别为 i 时段氢储能充、放电功率, MW; $P_{p,s}^{\text{out}}$ 为氢储能放电电价, 元/kWh; $P_{p,s}^{\text{in}}$ 为氢储能充电电价, 元/kWh; P_{FC} 为氢储能系统中单个燃料电池的额定功率, MW; $P_{\text{D}, \text{WT}}$ 为风电备用容量电价, 元/kWh。

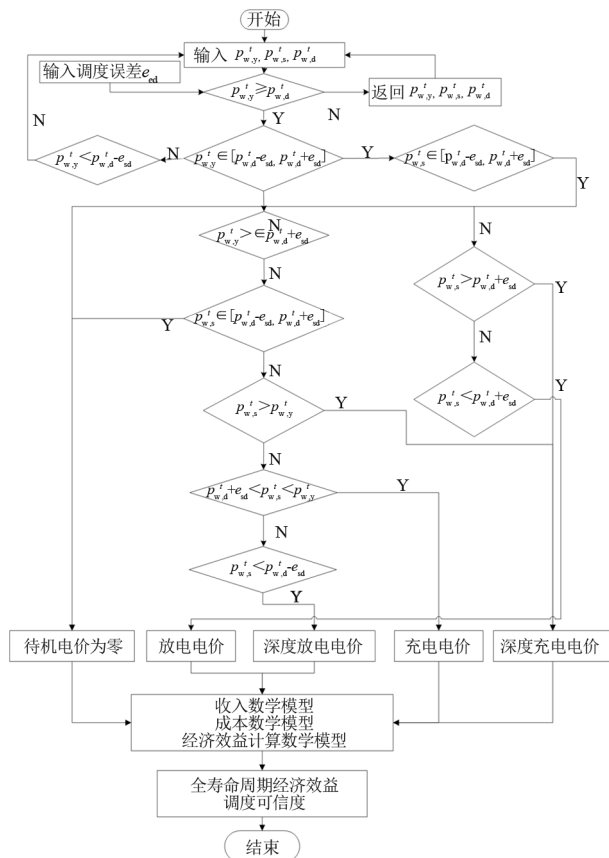


图3 经济效益计算流程

根据财政部、国家发改委关于印发的《电力需求侧管理城市综合试点工作中中央财政奖励资金管理暂行办法》通知中明确指出对通过实施能效电厂和削峰填谷等技术实现永久性节约电力负荷和转移高峰电力负荷。现将该部分补贴纳入储能电站提升风电并网系统调度计划可信度作用过程的收入中,能量转移补贴收入如式(6)所示。

$$I_{\text{PCS}} = 1000 \frac{24}{NT_{\text{pcs}}} \sum_{i=1}^n P_{\text{s,out}}^i \cdot P_{\text{UP}} \quad (6)$$

式中: I_{PCS} 为氢储能能量转移补贴; P_{UP} 为减少单位峰荷补贴的现金; T_{PCS} 为 HESS 年运行小时数; N 为氢储能装置寿命年限。

可中断负荷为调度部门根据事先签订的合同在负荷高峰时段或系统出现故障时向用户发出中断请

求信号,用户根据请求减少或中断的负荷并获得相应的补贴。可中断负荷补贴 I_{ILS} 为因氢储能的能量转移作用而减少的系统可中断负荷次数所节省的费用,如式(7)所示。

$$I_{\text{ILS}} = F(C_{\text{IL}}, \Delta T_{\text{IL}}, N_{\text{IL}}, T_{\text{PIL}}) \quad (7)$$

式中: C_{IL} 为可中断负荷容量; ΔT_{IL} 为可中断负荷时间段; N_{IL} 为可中断负荷次数; T_{PIL} 为可中断负荷提前通知时间。

3.1.2 间接经济收入

用于提升风电并网系统调度计划可信度的氢储能系统引致的环境成本可视为 0, 因此 HESS 的间接经济收益等价于因 HESS 实现能量“时空转移”而节省的煤炭等火电厂发电排放的环境污染治理费用^[22], 如式(8)所示。

$$I_{\text{EC}} = \frac{1000t}{60} \sum_{q=1}^Q (C_{\text{EC},q} \times Q_q) P_{s,\text{out}}^i \quad (8)$$

式中: I_{EC} 为氢储能系统提升风电并网系统调度计划可信度的环境经济效益, 元; Q_q 为常规燃煤发电厂第 q 种污染物排放量, kg/kWh; $C_{\text{EC},q}$ 为治理第 q 种污染物单位环境成本, 元/kg; Q 为排放污染物种类总数。

综上所述, HESS 提升风电并网系统调度计划可信度的全寿命周期上的收入模型如式(9)所示。

$$I_{\text{Tot}} = 365N \left[\sum_{k=1}^k (I_{\text{EE}} + I_{\text{PCS}}) + I_{\text{ILS}} + I_{\text{EC}} \right] \quad (9)$$

式中, k 为采样周期序号, $k=1, 2, 3 \dots k$ 。

3.2 成本数学模型

3.2.1 HESS 各子系统成本数学模型

氢储能系统主要由电解槽、储气系统及燃料电池组子系统 3 部分组成(暂时忽略各联接系统、交直流逆变装置等), 下面针对上述各子系统分别建立其物理参数数学模型。

1) 电解槽额定功率数学模型

氢储能系统中电解槽的额定功率应该满足式(10)。

$$\begin{cases} P_{\text{EC}} = \max\{P_{s,\text{in}}^1, P_{s,\text{in}}^2, \dots, P_{s,\text{in}}^i, \dots, P_{s,\text{in}}^n\} \\ 0 < P_{\text{EC}} \leq P_{\text{EC}}^{\max} \end{cases} \quad (10)$$

式中: P_{EC} 为氢储能系统中电解槽的额定功率, MW; $P_{\text{EC}}^{\max}$ 为氢储能系统中电解槽的额定功率上限(受限于现有技术指标), MW; $P_{s,\text{in}}^i$ 为氢储能系统在第 i 个时段的充电功率, MW。

2) 燃料电池组额定电流数学模型

同样的道理, 燃料电池的功率模型为

$$\begin{cases} \eta_{\text{FC}} \sum_{f=1}^F P_{\text{FC}} = \max\{P_{s,\text{out}}^1, P_{s,\text{out}}^2, \dots, P_{s,\text{out}}^i, \dots, P_{s,\text{out}}^n\} \\ 0 < P_{\text{FC}} \leq P_{\text{FC}}^{\max} \end{cases} \quad (11)$$

式中: P_{FC} 为氢储能系统中单个燃料电池的额定功率, MW; f 为燃料电池的个数; η_{FC} 为燃料电池电堆转换效率; $P_{\text{FC}}^{\max}$ 为氢储能系统中燃料电池的额定功率上限(受限于现有技术指标), MW; $P_{s,\text{out}}^i$ 为氢储能系统在第 i 个时段的放电功率, MW;

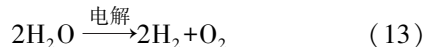
3) 储气系统额定容量数学模型

电解槽电解水制氢的速率, 可用式(12)表示。

$$V_{\text{H}_2} = 418\eta_{\text{H}_2} \cdot P_{s,\text{in}}^i / \sum_{j=1}^J U_j \quad (12)$$

式中: η_{H_2} 为电解槽电解水制氢效率, m^3/h ; J 为电解槽电解单元总数; U_j 为第 j 个电解槽单元电压。

由相关化学知识可知, 电解水生成氢气和氧气的气体比为 2:1, 如式(13)所示。



则电解槽电解水产生氧气的体积为

$$V_{\text{O}_2} = \frac{1}{2} V_{\text{H}_2} \quad (14)$$

储氢罐的体积为

$$V_{\text{GSH}} = \max \frac{1}{60} \left\{ \int_{t_1}^{t_2} V_{\text{H}_2} dt, \int_{t_3}^{t_4} V_{\text{H}_2} dt, \dots, \int_{t_{n-1}}^{t_n} V_{\text{H}_2} dt \right\} \quad (15)$$

储氧罐的体积为

$$V_{\text{GSO}} = \max \frac{1}{60} \left\{ \int_{t_1}^{t_2} V_{\text{O}_2} dt, \int_{t_3}^{t_4} V_{\text{O}_2} dt, \dots, \int_{t_{n-1}}^{t_n} V_{\text{O}_2} dt \right\} \quad (16)$$

3.2.2 HESS 成本数学模型

提升风电并网系统调度计划可信度的 HESS 成本分为初装成本 C_{FC} 和运行维护成本 C_{VC} 。由图 1 可知, HESS 主要由电解池、储气系统及燃料电池 3 部分组成, 因此初装成本计算可表示为

$$\begin{cases} C_{\text{FC}} = C_{\text{F,EC}} + C_{\text{F,GS}} + C_{\text{F,FC}} \\ C_{\text{F,EC}} = K_{\text{UC,EC}} \cdot P_{\text{EC}} \\ C_{\text{F,GS}} = K_{\text{UC,GSH}} \cdot V_{\text{GSH}} + K_{\text{UC,GSO}} \cdot V_{\text{GSO}} \\ C_{\text{F,FC}} = K_{\text{EC,FC}} \cdot P_{\text{FC}} \end{cases} \quad (17)$$

式中: C_{FC} 、 $C_{\text{F,EC}}$ 、 $C_{\text{F,GS}}$ 、 $C_{\text{F,FC}}$ 分别为 HESS 总初装成本、电解池成本、储气系统成本和燃料电池成本, 元; $K_{\text{UC,EC}}$ 、 $K_{\text{UC,GSH}}$ 、 $K_{\text{UC,GSO}}$ 、 $K_{\text{UC,FC}}$ 分别为电解

池、储氢系统、储氧系统、燃料电池单位功率成本,元/kW; P_{EC} 、 V_{GSH} 、 V_{GSO} 、 P_{FC} 分别为电解池额定功率、储氢系统额定容量、储氧系统额定容量、燃料电池额定功率。

分析文献[15]可知,HESS 运行维护成本主要是工作过程中频繁启停各工作单元引起的机械损失,如电解液消耗、离子交换膜老化等。这部分费用一般在 HESS 的折旧费用中已经考虑,因此 HESS 的运行维护成本可表示为

$$C_{VC} = (1 - \alpha - \beta) C_{FC} \tag{18}$$

式中: α 为氢储能系统残值回收费用系数; β 为氢储能系统残值清理费用系数;且 $\alpha + \beta < 1$ 。

HESS 全寿命周期成本为

$$C_{Tot} = C_{FC} + C_{VC} \tag{19}$$

3.3 经济效益数学模型

1) 全寿命周期经济效益

全寿命时间尺度上项目的经济效益是反映一项投资活动的整体可行性优良的重要经济指标。提升风电并网系统调度计划可信度的 HESS 经济效益数学模型为

$$R_{Tot} = I_{Tot} - C_{Tot} \tag{20}$$

2) HESS 可信度数学模型

限于氢储能系统中电解槽子系统和燃料电池子系统技术性能,现实场景中,氢储能系统并不能 100%完全消纳风电实际出力超出调度出力计划误差带上限部分,以及完全满足风电实际出力低于调度出力计划误差带下限部分,也就是说氢储能系统并不能 100%提升风电调度计划的可信度,这样,就存在一个提升度的问题,具体如下:

氢储能系统充电过程中,由式 (21) 可知,若 $P'_{s,in} > P_{EC}^{max}$,超出部分氢储能系统并不能继续充电,即这一过程中的功率损失为

$$\Delta P_{s,in} = \sum_{t=1}^T (P'_{s,in} - P_{EC}^{max}) \tag{21}$$

氢储能系统放电过程中,由式 (22) 可知,若 $P'_{s,out} > P_{FC}^{max}$,超出部分氢储能系统并不能继续放电,即这一过程中的功率损失为

$$\Delta P_{s,out} = \sum_{t=1}^T (P'_{s,out} - P_{FC}^{max}) \tag{22}$$

则调度计划可信度的提升度计算模型表示为

$$\Phi = \left[\sum_{t=1}^T P'_{w,s} - (\Delta P_{s,in} + \Delta P_{s,out}) \right] / \sum_{t=1}^T P'_{w,s} \tag{23}$$

式中: Φ 为调度计划可信度的提升度; $\sum_{t=1}^T P'_{w,s}$ 为风电场统计周期内实际总出力。

4 算例分析

针对某风电场实际运行数据并配置 HESS 装置,校验所建提升风电并网系统调度计划可信度的 HESS 经济效益计算模型的正确性和有效性。

4.1 参数设置

1) 电解槽子系统参数设置。通过对目前国内市场上各大厂家电解水制氢设备的统计,采用的电解槽规格为外送压力 5000 Pa、25 ℃ 的电解温度、单个电解槽电解额定电压为 2 V,各厂家的价位如表 1 所示。

表 1 国内电解水制氢设备参数及厂家报价

厂家名称	产品型号	制氢纯度/ %	制氧纯度/ %	单价/ (万元·kW ⁻¹)
扬州中电制氢设备公司	SDQ 系列	99.999	99.700	0.900
苏州竟立制氢设备公司	DQ 系列	99.800	99.300	2.200
中船重工七一八研究所	HG 系列	99.990	99.500	2.700

2) 储气子系统参数设置。经调研统计,目前国内市场上储气设备(储氢、储氧设备)的规格、参数及价格统计情况如表 2 所示,拟选择表中上海申江压力容器有限公司的产品。

表 2 储氢设备参数及厂家报价

厂家名称	产品容积/ m ³	压强/ MPa	材料 类型	单价/ (万元·m ⁻³)
青岛信泰容器制造公司	200.00	3.50	S304	4.500
上海申江容器公司	150.00	4.10	S31603	5.000
青岛储气罐制造公司	100.00	3.50	S31603	6.000

3) 燃料电池参数设置。经调研统计,目前国内市场上质子交换膜燃料电池的规格、参数及价格统计情况如表 3 所示,拟选择表中上海攀业氢能源科技有限公司的产品。

4) 电价设置

涉及到的多种电源的电价设置如表 4 所示。

4.2 算例计算

1) 氢储能系统充放电区间期对应的充放电价格划分结果

表 5 为氢储能系统充电区间对应的统计时段、充电功率和充电价格;表 6 为氢储能系统放电区间

对应的统计时段、放电功率和放电价格。

表 3 质子交换膜燃料电池参数及厂家报价

厂家名称	产品型号	额定输出	供氢品质/%	供氢流量/L·min ⁻¹	电堆温度/℃	效率/%	价格/(元·kW ⁻¹)
弗尔赛公司	FSE-RDZ3-7K/70-B0110	7.3kW; 70.4V; 100~200 A	干燥, ≥99.90	70.7	<55	65	33 000
攀业氢能公司	EOS-5000	5 kW; 72 V; 69.5 A	干燥, ≥99.95	58.40	<75	50	20 000
河森电器公司	H-1000	1 kW; 42 V; 24 A	干燥, ≥99.99	14.00	<65	75	6000

表 4 各类电源的上网电价 单位:元/kWh

电源类型	风电	水电	火电	调峰电价	填谷电价	备用容量电价
电价价格	0.60	0.35	0.45	1.30	0.25	0.60

表 5 e_{sd} 为 6 MW 时氢储能系统充电区间及价格

时段	区域名称	实际充放电功率/MW	价格/(元·(kWh) ⁻¹)	时段	区域名称	实际充放电功率/MW	价格/(元·(kWh) ⁻¹)
00:15	S7	2.625 8	0.45	13:30	S7	1.457 4	0.45
01:00	S2	1.663 7	0.45	14:15	S7	1.786 7	0.45
01:45	S6	3.243 8	0.25	15:15	S7	0.770 8	0.45
03:00	S6	6.000 0	0.25	15:45	S7	0.097 5	0.45
03:30	S7	3.003 0	0.45	16:45	S2	2.980 5	0.45
06:00	S6	4.996 9	0.25	17:00	S7	0.997 7	0.45
06:15	S6	6.000 0	0.25	17:15	S6	6.000 0	0.25
07:00	S2	2.172 1	0.45	17:45	S7	1.756 7	0.45
07:15	S7	0.299 9	0.45	19:00	S6	4.997 2	0.25
08:15	S7	0.124 6	0.45	19:45	S6	1.936 4	0.25
08:45	S2	4.057 3	0.45	20:45	S6	5.998 3	0.25
09:00	S6	5.239 0	0.25	21:15	S6	2.977 5	0.25
10:45	S6	4.956 9	0.25	21:30	S2	2.012 9	0.45
12:00	S2	2.778 9	0.45	22:15	S7	1.264 3	0.45
12:30	S6	2.688 1	0.25	22:30	S6	3.999 9	0.25
12:45	S7	0.734 5	0.45	23:45	S6	2.760 0	0.25

2) 氢储能系统各子系统额定功率

根据上述计算结果和所建立数学模型,计算得到的氢储能系统中电解槽、燃料电池的额定功率和储氢罐、储氧罐的额定容量如表 7 所示。

3) 氢储能系统成本和收入计算

计算得到的 HESS 成本和收入如表 8 所示。

4) HESS 提升风电并网系统调度计划的可信度

基于所建模型,依参数设置,计算氢储能系统提升风电并网系统调度计划可信度的提升度为 99.81%。图 4 为 HESS 全寿命周期内的经济效益与风电并网系统调度计划可信度的提升度的关系,可

以直观地看到 HESS 经济效益随着调度计划可信度的增加而降低。当提升度为 100%极值时,HESS 全寿命周期的经济效益不足 0.18 亿元,提升度在 [90%,93%] 范围变化时,经济效益随提升度的变化下降的敏感性最强。

表 6 e_{sd} 为 6 MW 时氢储能系统放电区间及价格

时段	区域名称	实际充放电功率/MW	价格/(元·(kWh) ⁻¹)	时段	区域名称	实际充放电功率/MW	价格/(元·(kWh) ⁻¹)
00:00	S3	5.251 1	0.7	13:45	S8	3.478 5	0.8
01:15	S8	3.153 4	0.8	14:00	S3	3.422 3	0.7
02:00	S3	0.158 5	0.7	14:30	S8	4.035 0	0.8
02:15	S8	1.905 1	0.8	15:30	S8	4.767 3	0.8
03:45	S8	6.000 0	0.8	16:30	S8	4.692 0	0.8
04:30	S8	5.745 3	0.8	17:30	S8	6.000 0	0.8
04:45	S8	2.667 5	0.8	18:00	S3	2.7364	0.7
05:15	S8	6.0000	0.8	18:15	S3	5.1847	0.7
06:45	S8	4.002 2	0.8	18:45	S8	4.756 9	0.8
08:00	S8	1.651 0	0.8	19:15	S8	1.882 1	0.8
09:30	S3	3.127 0	0.7	20:00	S3	3.743 9	0.7
10:00	S8	2.995 8	0.8	20:15	S8	1.257 2	0.8
10:30	S3	2.806 7	0.7	22:00	S8	4.610 0	0.8
11:00	S8	3.891 0	0.8	22:45	S8	4.890 8	0.8
11:15	S3	4.405 3	0.7	23:15	S3	5.032 8	0.7

表 7 e_{sd} 为 6 MW 时的 HESS 中各子系统的额定值

序号	名称	计算结果
1	电解槽	6 MW
2	燃料电池	6 MW
3	储氢罐	33.962 5 L
4	储氧罐	16.981 2 L

表 8 e_{sd} 为 6 MW 时 HESS 的成本、收入和效益

项目名称	HESS 成本/万元	HESS 收入/万元	HESS 经济效益/万元
全寿命周期	25 709.3	26 182.1	472.8

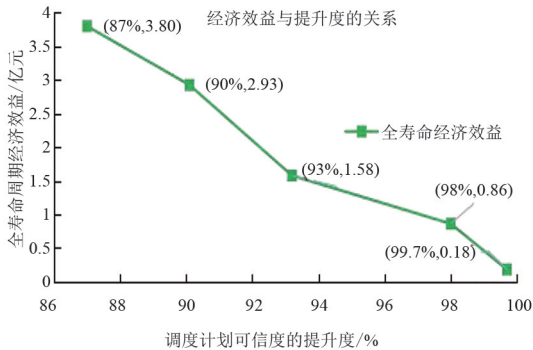


图 4 经济效益与提升度的关系

4.3 HESS 敏感性因素分析

1) 电价对 HESS 经济效益的影响

上面已经提到,氢储能系统通过其“低充、高

放”电能的过程获得经济效益,那么 HESS 经济效益与各类型电源的上网电价有着必然的关系。

图 5 和图 6 为 HESS 经济效益与各类型电源电价变化百分比的关系(以火电为例,电价变化百分比为(电价 1-电价 2)/电价 2×100%)。分析可知,HESS 经济效益对火电、水电和填谷电价具备负相关敏感性,对风电和调峰电价具备正相关敏感性,且 HESS 经济效益对填谷上网电价和调峰电价最为敏感。

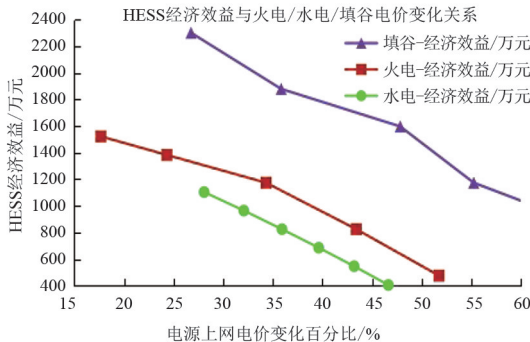


图 5 火电、水电、填谷电价对 HESS 经济效益的影响

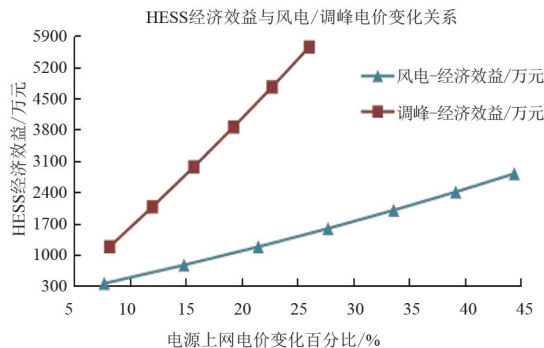


图 6 风电、调峰电价对 HESS 经济效益的影响

2) 调度误差变化对 HESS 经济效益和提升度的影响

上面已经对调度误差做了定义,即允许实际出力偏离调度出力的程度,那么随着调度误差值的增大,需要氢储能系统充放电功率将会减少,意味着 HESS 的作用逐渐被弱化,其经济效益也逐渐降低,具体如图 7 所示。此外,当调度误差在[1 MW, 4 MW]范围变化时,对 HESS 经济效益的影响较小。当调度误差在[4 MW, 6 MW]范围变化时,对 HESS 经济效益影响较明显,呈现急剧下滑态势;随着调度误差的增大,HESS 承受的充放电压力减小,其提升风电并网系统调度计划可信度的提升度逐渐增大。

3) 调度误差和 HESS 额定功率同时变化对 HESS 经济效益的影响

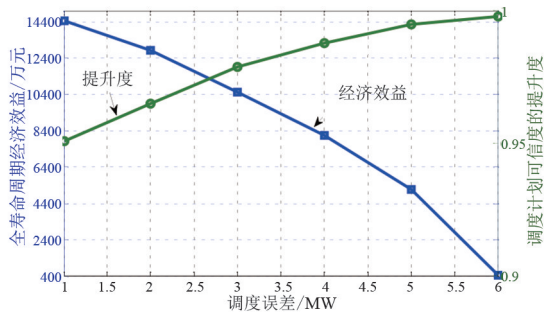


图 7 经济效益、提升度随调度误差变化敏感性变化关系

上面分析了经济效益与 HESS 额定功率和调度误差的单变量关系,得到的结论为提高 HESS 经济效益需最大化调度误差和最小化额定功率。鉴于此并结合实际生产场景,试图在二者之间寻求一个平衡点,图 8 为 HESS 经济效益随其额定功率和调度误差变化的敏感性变化关系。很明显的,图中有个最高点(3.04 MW, 5.89 MW, 17 640 万元),即其他条件不变的前提下,当调度误差和额定功率分别为 3.04 MW 和 5.89 MW 时,HESS 系统可获得最大经济效益 17 640 万元。

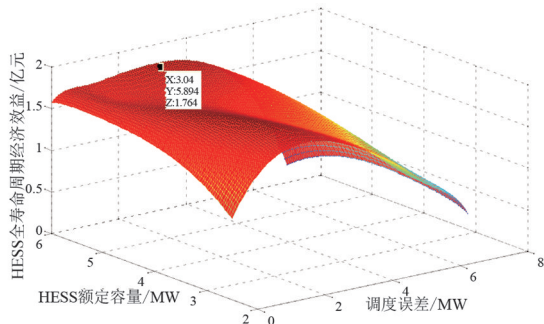


图 8 经济效益随 HESS 额定容量和调度误差的敏感性

5 结 论

所划分的计及风电预测出力、调度出力和实际出力的 HESS 充放电区间、构建的 HESS 充放电价格体系更多地考虑到了电力市场因素,迎合了电力改革导向,具备较强的现实意义并不失理论前瞻性。

上面通过开展对现有市场上 HESS 各子系统购买成本、各类电源上网电价等调研工作,设置了算例参数并得出如下结论:

1) 现有经济技术条件下,氢储能系统仍存在成本居高、电-氢转化效率偏低的现象,使得 HESS 陷入经济效益过低的尴尬境地;

2) 通过对多种电源上网电价对 HESS 经济效益的影响可知,HESS 经济效益对调峰和填谷电价敏感性较强。

参考文献

- [1] 李亚楼,周孝信,林集明,等.2008 年 IEEE PES 学术会议新能源发电部分综述[J].电网技术,2008,20(32):1-7.
- [2] 刘琳.新能源风电发展预测与评价模型研究[D].北京:华北电力大学,2013.
- [3] SOLANGI K H, ISLAM M R, SAIDUR R, et al. A review on global solar energy policy[J]. Renewable and Sustainable Energy Review, 2011, 15(4): 2149-2163.
- [4] LIU W, LUND H, MATHIESEN B V, et al. Potential of renewable energy systems in China[J]. Applied Energy, 2011, 88(2): 518-525.
- [5] DIAZ-GONZALEZ F, SUMPER A, GOMIS-BELLMUNT O, et al. A review of energy storage technologies for wind power applications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, 16(4): 2154-2171.
- [6] 陈星莺,刘孟觉,单渊达.超导储能单元在并网型风力发电系统的应用[J].中国电机工程学报,2001,21(12):63-66.
- [7] LEE T Y. Operating schedule of battery energy storage system in a time-of-use rate industrial user with wind turbine generators: a multipass iteration particle swarm optimization approach[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(3): 774-782.
- [8] 赵波,韦立坤,徐志成,等.计及储能系统的馈线光伏消纳能力随机场景分析[J].电力系统自动化,2015,39(9):34-40.
- [9] NADEESHANI J, PETER W, MOHAMMADAS M. An optimal management strategy for distributed storages in distribution networks with high penetrations of PV[J]. Electric Power System Research, 2014(116): 147-157.
- [10] 汪卫华,张慧敏,陈方.用削峰填谷方法提高供电企业效益的分析[J].电网技术,2004,28(18):79-81.
- [11] 蔡国伟,孔令国,薛宇,等.风氢耦合发电技术研究综述[J].电力系统自动化,2014,38(21):127-135.
- [12] 蒋东方.氢氧联合循环与风能耦合发电系统可行性分析[D].北京:华北电力大学,2012.
- [13] 高小淇.可再生能源电站采用制氢储能解决限电问题的技术分析[C]//2013 电力行业信息化年会论文集.北京:中国电机工程学会电力信息化专业委员会,国网信息通信有限公司,2013.
- [14] 伊立其,闫常峰,郭常青.风电-氢储能耦合燃料电池发电系统的经济性分析[C]//中国化工学会年会论文集.北京:中国化工学会,2015.
- [15] 袁铁江,胡克林,关宇航,等.风电-氢储能与煤化工多能耦合系统及其氢储能子系统的 EMR 建模[J].高电压技术,2015,41(7):2156-2164.
- [16] YU S, MAYS T J, DUNN R W. A new methodology for designing hydrogen energy storage in wind power systems to balance generation and demand[C]// International Conference on 2009 Sustainable Power Generation and Supply, IEEE, 2009:1-6.
- [17] ALI D M. Energy capacity and economic viability assessment of the renewable hydrogen energy storage as a balancing mechanism in addressing the electric system integration issues inherent with variable renewable energy resources[J]. IET Conference on Reliability of Transmission and Distribution Networks(RTDN 2011), 2011:1-7.
- [18] GARGOOM A, HARUNI A M O, HAQUE M E, et al. Hybrid stand-alone power systems with hydrogen energy storage for isolated communities[C]//2010 IEEE PEST & D, 2010:1-6.
- [19] MENDIS N, SAYEEF S, MUTTAQI K M, et al. Hydrogen energy storage for a permanent magnet wind turbine generator based autonomous hybrid power system[C]// 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, IEEE, 2011:1-7.
- [20] YU S, MAYS T J, DUNN R W. Hydrogen energy storage in isolated microgrids with wind generation[C]// 2010 45th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), IEEE, 2010:1-5.
- [21] AL-BADI A H, YOUSEF H, ALAAMRI O, et al. Performance of a stand-alone renewable energy system based on hydrogen energy storage[C]//2014 6th International Symposium on Communications, Control and Signal Processing (ISCCSP), IEEE, 2014:356-359.
- [22] BAGHAEI H R, GHAREHPETIAN G B, KAVIANI A K. Three dimensional Pareto optimal solution to design a hybrid stand-alone wind/PV generation system with hydrogen energy storage using multi-objective Particle Swarm Optimization[C]// 2012 Second Iranian Conference on Renewable Energy and Distributed Generation (ICREDG), IEEE, 2012:80-85.
- [23] 南晓强,李群湛,赵元哲,等.计及风电预测可信度的经济调度及辅助决策方法[J].电力系统自动化,2013,37(19):61-67.

作者简介:

蔡高雷(1986),男,硕士,工程师,主要研究方向为新能源发电及其并网技术;

蔡静静(1984),女,博士,主要研究方向为偏微分方程;

刘桂龙(1982),男,硕士,高级工程师,从事供配电设计工作。

(收稿日期:2022-11-18)

市场环境下的区域电网安全校核方法

熊志杰¹, 张大伟¹, 王彦沅¹, 邓志森¹, 杨 茜²

(1. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041; 2. 国网四川省电力公司经济技术研究院, 四川 成都 610041)

摘要:省级电力现货市场的安全校核一般采用边界等值的模式, 不能保证联络线各支路未来潮流的准确性, 因此需要进行区域电网的安全校核和校正。为此, 文中设计了一种考虑省级电力市场运营的区域电网校核方案: 首先, 各省基于联络线初始计划进行初次出清, 并把出清结果上报区域调度; 其次, 进行区域整体安全校核, 获得准确的设备越限结果, 通过反向等量配对调整建立越限约束和机组的相关性, 并生成各省现货市场对应的区域越限安全约束集; 最后, 下发区域越限安全约束集到相应省份, 各省考虑区域关键安全约束集重新出清, 协调至区域电网满足安全约束。所提出方法通过电网算例进行了验证。

关键词:区域电网; 省级电力市场; 安全校核; 安全校正

中图分类号: TM 734 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2023)01-0039-04

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230107

Security Checking Method of Regional Power Grid under Market Environment

XIONG Zhijie¹, ZHANG Dawei¹, WANG Yanfeng¹, DENG Zhisen¹, YANG Qian²

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

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

Abstract: The security check of provincial power spot market generally adopts the boundary equivalent mode, which can not guarantee the accuracy of future power flow of each member of tie-line, so it is necessary to carry out the security check and correction of regional power grid. Therefore, a regional power grid check scheme considering provincial electricity market operation is designed. Firstly, based on the initial tie-line schedule, each province carries out the initial clearing and reports the clearing result to the regional dispatching. Secondly, the overall regional security check is carried out to obtain the accurate power overrun results, and the correlations between the violated security constraints and the units are established through equal and opposite quantities in pair. Finally, the violated regional security constraint sets are distributed to the corresponding provinces, and provincial electricity markets are cleared again. The proposed method is verified by a power grid example.

Key words: regional power grid; provincial electricity market; security check; security correction

0 引言

“三级调度、两级市场”模式下的区域电网安全校核需要省级市场、省级调度和分中心调度之间协同配合, 校正策略兼顾到市场公平和电网运行的效率, 对传统安全校核提出了新的挑战^[1-2]。由于分中心调度联络线计划分解到物理线路的方式不一样, 造成各省安全校核边界数据不一致, 影响到计算的准确性和各省校核结果的一致性。省内安全校核一般采用边界等值的模式, 存在计算准确性等问题。

市场化运行模式下, 安全校正需要考虑市场运营的影响, 不能随意更改机组出力。

目前国内外在电网的安全校核和校正方面已有不少研究。文献[3]提出了基于原-对偶内点法的输电断面有功安全校正控制方法; 文献[4]提出了基于深度强化学习算法的电网有功安全校正方法; 文献[5-6]提出了适应电力现货市场运营的省级电网安全校核和校正方法。但是这些校核和校正方法主要考虑本地电网, 较少考虑多级电网的协调校正, 而国外的调度机构少有上下级^[7-9], 经验也难以借鉴。目前各省已经陆续开展了电力现货市场建

设,在调度模式及优化目标等方面和区域电网存在较大差别。区域电网对越限设备的校正需要考虑到省级电网的市场公平性,目前尚缺乏考虑省级现货市场运营环境下的多级调度计划协调方法的研究。

为解决上述问题,下面结合各级调度计划和市场的功能定位,通过分析多级安全校核流程现状,提出了一种适应省级电力市场运营的区域安全校核方案。该方案通过关键安全约束生成和协调实现两级调度的协调配合,通过此边界条件编制满足区域校核约束的市场出清结果,并充分考虑了市场的公平性,同时有效提升互联电网的安全性,且能够适应当前的两级调度控制系统架构。

1 电网调度多级校核流程分析

目前的国内调度计划流程中,区域电网主要负责多区域的联络线计划,并进行整体安全校核,而省级调度依托安全约束机组组合/经济调度技术完成省内机组计划编制,具体流程是“自上而下”。当区域进行安全校核中发现支路或断面越限时,可以通过调整区域管辖机组或通知省调修改省内机组进行校正。

但在省级现货市场的大规模建设趋势下,机组的出力修改需要考虑到市场的公平性和出清电价的合理性。区域电网无法对机组出力直接进行调整,需要充分考虑省内市场运营稳定,而省内市场无法获得外网出清情况。对于直联联络线或单起点、单落点的交流联络线上尚可保证外网等值的准确性;但是电网中存在了不少由多条交流线路组成的联络线断面,当联络线落点不同时,在只获知联络线断面总值的情况下无法保证各条联络线及附近区域的潮流准确性。因此需要区域电网进行全网安全校核。

电力现货市场环境下,电网运行方式由市场决定。耦合紧密的电网联络线潮流的分配需要综合考虑各区域、各省电力电量平衡和清洁能源消纳要求。但电网潮流复杂多变,不确定性大。电网安全校核是调度部门摸清电网安全运行底线、评估电网运行薄弱环节、实施调度运行预控措施的基础。分中心调度和省调分别组织区域安全校核,省内考虑安全约束的现货市场出清,形成基于安全约束经济调度的区域电网和省内机组组合以及运行方式安排,实现对电网更全面的电网风险性管控。

通过考虑省级电力市场规则的区域电网安全校

正和省级电力市场出清协同运作方法的研究,提出区域和省级电网安全校核的协同机制。通过对区域和省级电网同时涉及的关键安全约束的快速定位,并考虑对电力市场运营的影响,建立安全校正目标与电力市场规则的一致匹配优化流程。当出现支路或断面越限时,在区域电网范围内实现更为高效的校正调节,为电网运行预留更多的安全裕度,保障市场利益最大化。

2 适应市场环境的区域安全校核流程

近年来省级电力市场的建设和多级协调调度的模式使得计划的编制和执行受到市场交易规则和电网安全运行的双重约束。电网的安全运行和经济运行之间的优化平衡越来越难把控。省级电力市场安全校核缺少精细化的联络线潮流结果;区域电网安全校核缺少各省交易信息。由此,提出区域电网一体化协同安全校核方法。

区域安全校核流程协调优化流程如图 1 所示。

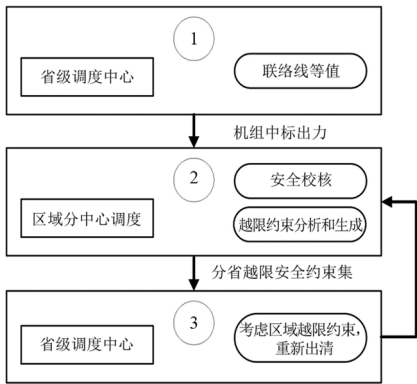


图 1 区域安全校核流程

方案具体流程如下:

- 1) 各省调对联络线各支路进行等值处理;等值后的联络线各支路功率,一般可以采用历史相似日的联络线各支路实际潮流情况,按比例分配进行现货市场出清,并将机组出力结果上传至区域分中心调度。
- 2) 区域分中心调度汇总省调上传的机组出力,并进行全网安全校核计算,获得准确的全网潮流。如果全网无越限,则校核结束;如果有越限,则通过反向等量配对调整方法进行越限分析,获得需要调整的机组出力结果。
- 3) 基于机组出力调整结果,生成分省调整的安全约束集,下发到相应省份;省级电力市场在市场出清模型中增加考虑区域分中心调度下发的安全约束

集,重新出清。返回流程 2 重新进行安全校核。

3 基于反向等量配对调整的越限约束分析

流程 2 中,在区域电网采用反向等量配对调整的越限约束分析。反向等量配对调整法是由清华大学邓佑满等提出的有功安全校正方法,详见文献[10]。反向等量配对调整法为每一台出力的机组找到一个与之配对的减出力的机组,反之亦然。每一配对机组加减出力的值相等,达到以最小的代价消除某个支路或断面越限,同时保持电网功率平衡的效果。

这里在反向等量配对调整基本方法的基础上,增加考虑的原则包括:

- 1) 当机组增加出力,优先在同省内寻找与之配对的减少出力的机组。
- 2) 当机组减少出力,优先在同省内寻找与之配对的增加出力的机组。
- 3) 配对的机组出力的变化值保持一致。
- 4) 当省内机组灵敏度绝对值都小于某阈值时,考虑采用省外机组进行配对,并相应修改联络线计划。
- 5) 优先修改未处于上限或下限出力状态的机组。因为当机组出力在中间状态时,可说明其报价状态与市场出清边际电价更为接近,其出力的修改对市场出清结果的影响较小。

具体模型如下:

优化目标为

$$\min \sum_{u \in U} \Delta P_u + \sum_{d \in D} \Delta P_d + \sum_{n \in N} |\Delta P_n| \quad (1)$$

约束条件为:

$$\sum_{u \in U} S_u \Delta P_u - \sum_{d \in D} S_d \Delta P_d = \Delta P_l \quad (2)$$

$$\sum_{u \in U} \Delta P_u - \sum_{d \in D} \Delta P_d + \sum_{n \in N} \Delta P_n = 0 \quad (3)$$

$$P_{l,\min} \leq P_l - \Delta P_l \leq P_{l,\max} \quad (4)$$

式中: ΔP_u 、 ΔP_d 、 ΔP_n 分别为当支路或断面 l 发生越限时,与其有正、负、零灵敏度机组的功率调整量, u 、 d 、 n 分别代表正、负和零灵敏度机组; U 、 D 和 N 分别为正、负和零灵敏度机组集合; S_u 、 S_d 和 S_n 分别为正、负和零灵敏度机组的灵敏度; P_l 为线路 l 的初始潮流; ΔP_l 为线路 l 的潮流调整量。

反向等量配对调整的步骤详见文献[11]。排序规则中,同省机组次序优先,再次出力未达限值的机组优先;然后,按照灵敏度大小进行排序,当灵敏

度值低于一定门槛而仍然无法消除越限时,则可调用外省机组并修改联络线计划。对于零灵敏度的机组也要尽可能选择同一省份的机组,当选择了不同省份的机组配对时也需要相应修改联络线计划。

4 关键安全约束生成

在流程 3,可以获得与越限支路或断面灵敏度不为零的调整机组,以及尽量与其在同一省份的零灵敏度机组。在不考虑网损的情况下,支路或断面的潮流由全区域所有机组、负荷与对该支路或断面的灵敏度的乘积和组成,可得安全约束变化为

$$\sum_{n=1}^m \sum_{k \in G_n} S_{nkl} P'_{nk} = P_l - \Delta P_l - \sum_L S_L P_L \quad (5)$$

式中: m 为省份总数; S_{nkl} 为第 n 个省的机组 k 对支路(或断面) l 的灵敏度; G_n 为省 n 的机组集合; P'_{nk} 为省 n 的机组 k 的经过反向等量配对调整后的出力; P_L 和 S_L 为负荷 L 和相关的灵敏度。

由此,针对灵敏度不为零且进行了功率调整的机组,对该机组所在省份的关键安全约束为

$$\sum_{k \in G_n} S_{nkl} P_{nk} = \sum_{k \in G_n} S_{nkl} P'_{nk} \quad (6)$$

式中:右侧为经过反向等量配对调整后的计算结果;左侧的灵敏度 S_{nkl} 为区域电网计算的灵敏度结果; P_{nk} 为下发于省级电力市场进行再次出清得到的出清结果。将关键约束下发到相应的调整机组所在省份进行再次出清,按照式(4),可以消除对应的支路或断面越限。

5 算例分析

采用国内某区域电网及下辖某省级电力市场的典型日为实际算例进行计算,对建立的模型进行验证分析。

省级电力市场和外网有 6 条联络线,在丰水期有较多的水电需要外送,电网阻塞情况明显。以某实时断面为基础,区域电网在安全校核时发现某断面过载 198 MW,应对断面越限所做的机组调整结果如表 1 所示。在此算例中,省 R_1 的机组出力整体上调整量为 79 MW,因此联络线计划需要增加 79 MW。

区域电网下发关键约束如式(7)、式(8)所示。

对于省 R_1 :

$$0.546P_A + 0.347P_B - 0.484P_C + \dots =$$

$$\sum_{k \in G_{R_1}} S_{nkl} P'_{nk} = 193.5 \text{ MW} \quad (7)$$

表 1 断面(5 回线潮流之和)过载的校正措施

省调 机组	所属 省份	灵敏度	最大 可调 出力/ MW	机组 原出力/ MW	区域 校核 调整量/ MW	省调 重新 出清 调整量/ MW	措施
A	R ₁	0.546	87	243	87	63	增出力
B	R ₁	0.347	292	308	135	240	增出力
C	R ₁	-0.484	135	270	135	123	减出力
D	R ₁	0	67	533	8	0	减出力
E	R ₂	-0.484	79	179	79	43	减出力

对于省 R₂:

$$0.484P_D + \cdots = \sum_{k \in G_{R_2}} S_{nkl} P'_{nk} = 67.6 \text{ MW} \quad (8)$$

省级电力市场通过在市场出清模型中增加了该关键约束后重新出清。机组的最终出清调整量和区域电网基于灵敏度的校正调整量有所差别,这是因为考虑了市场出清的因素。由于在选择调整机组时考虑了其所在边际电价状态,因此对各省市场影响较小;同时在各省都增加了断面越限的相关约束,因此消除了断面越限。

在春秋季节的枯水期,电网负荷有所下降,但是电网的检修安排较多,因此也可能出现一定的电网阻塞。以某实时断面为例,联络线断面中有一条线路检修,导致了省级和区域电网潮流计算的不一致。应对断面越限所做的机组调整结果如表 2 所示,区域电网调整和各省重新出清所调整的机组和方向基本一致,同时调整的出力大小也相差不大,证明采用所提方法,区域校核可以有效引导各省市场来消除全网范围内的越限。

表 2 枯水期断面过载的校正措施

省调 机组	所属 省份	灵敏度	最大 可调 出力/ MW	机组 原出力/ MW	区域 校核 调整量/ MW	省调 重新 出清 调整量/ MW	措施
F	R ₁	0.512	176	424	176	138	增出力
G	R ₁	0.423	102	198	89	101	增出力
H	R ₁	-0.663	280	580	265	253	减出力

6 结 论

上面以保障省内电力现货市场稳定运营为基础,以解决区域内全网安全校核在市场环境下保障电网安全稳定运行所面临的问题为目的,建立省间、省内两级市场的校核高效协同机制。通过基于反向等量配对调整的越限约束分析,生成关键安全约束,

进行了区域安全校核和多级协调校正的闭环协调,实现了考虑省级电力市场规则的区域电网安全校正和省级电力市场出清协同计算,从而满足电力市场化改革的客观需求,保障电力市场运营环境下区域电网的安全。在后续的研究中可以进一步考虑检修计划或 N-1 等情况下的安全校正方法。

参考文献

[1] 樊国旗,樊国伟,刘昌东,等.基于改进的电力现货交易下调度研究[J].四川电力技术,2020,43(4):15-19.

[2] CAI Zhi, CUI Hui, HAN Bin, et al. Analysis and outlook of future Chinese electricity spot market model[C]. 2nd IEEE Asia Energy and Electrical Engineering Symposium, 2020:875-880.

[3] 孙淑琴,颜文丽,吴晨悦,等.基于原-对偶内点法的输电断面有功安全校正控制方法[J].电力系统保护与控制, 2021, 49(7):75-85.

[4] 孙立钧,顾雪平,刘彤,等.一种基于深度强化学习算法的电网有功安全校正方法[J].电力系统保护与控制, 2022, 50(10):114-122.

[5] 路轶,蔡帜,张国芳,等.适应电力现货市场运营的省级电网安全校核实现方案[J].电力系统自动化, 2021, 45(16): 216-223.

[6] 邓韦斯,吴云亮,孙宇军,等.面向现货市场出清的发电计划校正决策方法[J].电力系统自动化, 2021, 45(2): 164-172.

[7] PATTANAİK J K, BASU M, DASH D P. Review on application and comparison of metaheuristic techniques to multi-area economic dispatch problem[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2: 2-11.

[8] HELM D. The European framework for energy and climate policies[J]. Energy Policy, 2014, 64: 29-35.

[9] European Network of Transmission System Operator for Electricity(ENTSO-E). Statistical Yearbook 2011[R]. Berlin, Germany: Oswald and Martin Werbeagentur, 2012.

[10] 邓佑满,黎辉,张伯明,等.电力系统有功安全校正策略的反向等量配对调整法[J].电力系统自动化, 1999,23(18):5-8.

作者简介:

熊志杰(1977),男,硕士,高级工程师,研究方向为电网调度自动化及网络安全运行管理;

张大伟(1984),男,硕士,高级工程师,研究方向为电网调度自动化运行管理;

王彦洋(1981),男,硕士,高级工程师,研究方向为电网调度自动化及调控运行管理。(收稿日期:2022-06-01)

多端柔性直流输电系统交流故障穿越仿真研究

张世豪¹, 石若林², 丁义轩³

(1. 华北水利水电大学电气工程学院, 河南 郑州 450000; 2. 雅砻江流域水电开发有限公司, 四川 成都 610000; 3. 国网河南省电力公司超高压公司, 河南 郑州 450000)

摘要:针对多端柔性直流输电系统交流侧发生故障, 直流系统与电网公共连接点电压也随之跌落的问题, 文中提出了一种交流故障穿越技术来维持公共连接点电压稳定。根据公共连接点电压跌落程度增发相应的无功功率从而维持公共连接点的电压稳定, 保证系统的有功功率传输。当公共连接点电压跌落程度较大时, 增发的无功功率导致交流系统过电流, 提出通过降低故障端的有功功率参考值, 从而减小交流侧电流幅值, 避免过电流的产生。同时, 针对有功功率的减小将使系统的不平衡功率进一步增大导致直流电压发生较大波动的现象, 通过定直流电压换流站根据直流电压的变化来消纳系统的不平衡功率, 从而达到维持多端柔性直流输电系统直流电压稳定的目的。

关键词:多端柔性直流输电; 交流故障穿越; 公共连接点; 过电流限制; 功率平衡; 直流电压稳定

中图分类号:TM 721.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2023)01-0043-07

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230108

Simulation Research on AC Fault Ride-through of MMC-MTDC Transmission System

ZHANG Shihao¹, SHI Ruolin², DING Yixuan³

(1. College of Electrical Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450000, Henan, China; 2. Yalong River Hydropower Development Co., Ltd., Chengdu 610000, Sichuan, China; 3. State Grid Henan Extra High Voltage Company, Zhengzhou 450000, Henan, China)

Abstract: Aiming at the problem that when failures occur in AC side of MMC-MTDC system, the voltage at the point of common coupling (PCC) between DC system and power grid also drops, an AC fault ride-through technology is proposed to maintain voltage stability of PCC. According to the voltage sag degree of PCC, the corresponding reactive power is increased to maintain the voltage stability of PCC and ensure the active power transmission of the system. When the voltage sag of PCC is large, the additional reactive power will cause the overcurrent of AC system. So it is proposed to reduce the reference value of active power at the fault end, thus reducing the current amplitude in AC side and avoiding the generation of overcurrent. At the same time, in view of the phenomenon that the reduction of active power will further increase the unbalanced power of the system, resulting in large fluctuations in DC voltage, the unbalanced power of the system is absorbed by the constant DC voltage converter station based on the change of DC voltage, thereby to achieve the purpose of maintaining DC voltage stability of multi-terminal flexible DC transmission system.

Key words: MMC-MTDC transmission; AC fault ride-through; point of common coupling; overcurrent limit; power balance; DC voltage stabilization

0 引言

随着电力系统能源结构比例不断的优化调节以及国家大力提倡清洁能源的开发利用,使得以风电

和光伏为主体的新能源参与电网的程度越来越大。但新能源所存在的弊端也是较为明显,其大多分布在较为偏远的地区。随着输电距离的不断加大,采用交流输电和传统直流输电形式在输送新能源上存在着各种各样的问题,也无法隔绝新能源发电对

电网造成的影响^[1]。基于模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的柔性直流输电技术,以不存在换相失败问题、能同时独立地控制有功功率和无功功率、占地面积小等优点,成为风电等新能源接入电网的发展目标^[2]。而多端柔性直流输电系统凭借着多个供电电源、多个受电端的特性使其在电力系统中的比例越来越大^[3-5]。

交流系统发生故障时,换流站与其接入交流电网的公共连接点(point of common coupling, PCC)^[6-7]电压发生跌落。交流故障穿越能力则是指柔性直流输电系统应该在此时充分发挥其控制的灵活性,使换流站能维持与直流电网的连接,尽量保证不脱网持续运行,并保持一定功率输送的能力^[8]。受端电网发生交流故障时,受端换流器控制能力受到影响,导致直流电压发生波动,对电力系统稳定性造成冲击^[9]。在交流故障发生后,若不采取有效的控制措施,系统的不平衡功率会导致直流电压发生波动,威胁整个系统的安全运行^[10]。

文献[11]提出了一种基于动态电流限幅控制的增发无功功率策略来维持故障点电压稳定,同时在直流侧设计了一款辅助电路用来消耗系统多余的不平衡功率,从而保持直流电压的稳定。文献[12]设计了一种多端柔直系统功率自动协调控制策略:交流故障时,故障侧的换流器优先进行无功的补偿,其他站通过协调控制策略对有功进行分配,维持直流电压稳定。文献[13]提出了一种不依赖站间通信的低电压穿越控制策略,交流故障时换流器通过感应直流电压变化量切换控制模式。文献[14-15]对南澳直流工程的调度策略进行分析,提出分段式定有功功率的控制策略,缩小分段可使功率更好地跟随风电场出力。文献[16-17]通过对舟山柔直工程的运行方式、控制模式以及控制保护策略的介绍,指出了控制策略的设计对交流故障穿越的重要性。文献[18-19]对张北柔直工程的交流故障穿越的控制策略进行分析,提出环形直流电网提高了工程运行的灵活性和可靠性,设计相关控制策略极大地提高了故障穿越能力。文献[20]提出了基于电流故障相似度和 Teager 能量算子瞬时能量两种保护方法相结合的控制策略,设计了多端柔直电网保护的整体方案。文献[21]通过对多端柔性直流输电系统的运行状态方程进行数学建模,设计了适用于不同场合的双闭环控制器,同时针对四端系统的控制

策略提出了比例模式、优先模式以及比例-优先模式 3 种控制策略来进行故障穿越。文献[22]针对下垂控制中换流站过载时功率失衡和电压失稳的情况,提出了引入斜率和直流电压控制的改进控制策略,又对环形 MMC-MTDC 系统中控制特性曲线拐点处参考值的确定给出了计算方法。文献[23]针对整流侧发生三相不对称故障导致电压跌落、直流母线电压失稳的情况,采用了 T4 延时法并设计了三相锁相环来消除负序电流;并提出了一种维持直流电压稳定的控制策略,通过系统直流电压和逆变侧电流的变化控制系统自动切换算法,从而维持柔性直流输电系统直流电压的稳定。

上述文献在故障穿越时未考虑维持新能源风电场最大功率输出的同时保持系统直流电压稳定的问题。在以上文献的基础上,下面设计了新能源通过多端柔性直流输电系统并网时交流故障穿越的控制策略。在系统发生交流故障时,电网与换流站之间的 PCC 点电压跌落,故障端的换流站根据 PCC 点电压下降程度调整无功功率参考值,增发相应的无功功率来维持交流电网电压稳定,同时也使得交流电流幅值增大。当换流站增发的无功功率使交流系统电流超过额定值时,改变其有功功率参考值来降低有功功率,从而减小交流系统电流幅值。送电端风电输入的有功功率保持不变,受端有功功率的输出减小导致柔性直流系统不平衡功率增大,定直流电压换流站(抽水蓄能电站)根据直流电压-有功功率下垂曲线增大有功功率输出,消除系统不平衡功率,保证直流电压稳定,实现新能源风电场最大有功功率输出。

1 MMC 的工作原理与数学模型

1.1 MMC 的拓扑结构

MMC 的结构如图 1 所示。每个换流器共有 6 个桥臂,其中每个桥臂又是由 1 个电抗器和 N 个子模块串联组合而成。改变每个桥臂中的子模块个数可以改变桥臂的电压,桥臂中的电抗器还可以抑制相间环流和直流系统的故障电流冲击。

1.2 MMC 的工作原理

图 2 为柔性直流输电系统的单端基波等效电路和电压向量图。图中: U_s 和 U_c 分别为交流电网电压和 MMC 交流出口的电压; δ 为 U_c 滞后于 U_s 的角度; P 、 Q 分别为交流系统向 MMC 输入的有功、无功

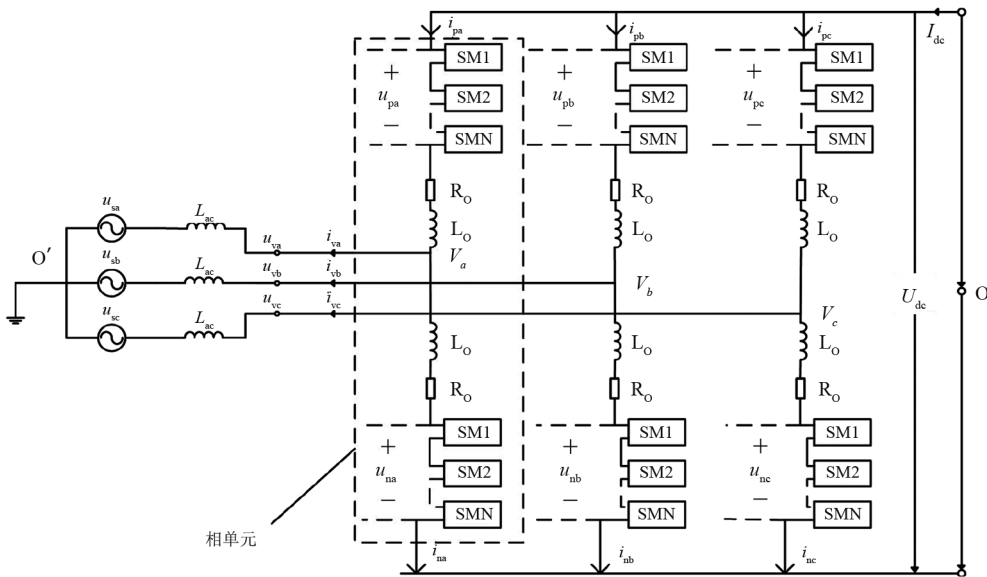


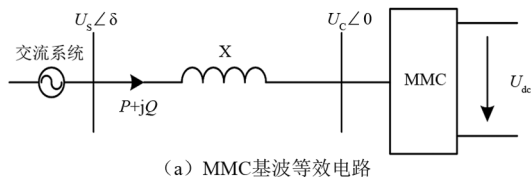
图 1 MMC 结构原理

功率,其数学模型为:

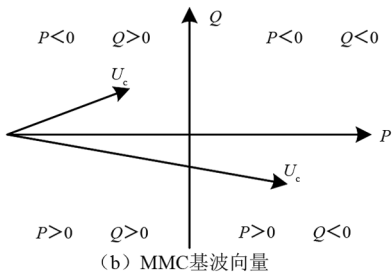
$$P = \frac{U_s U_c}{X} \sin \delta \quad (1)$$

$$Q = \frac{U_s (U_s - U_c \cos \delta)}{X} \quad (2)$$

由式(1)、式(2)可知,有功功率和无功功率的传输主要受控于向角差 δ 和 $U_s - U_c \cos \delta$; 当 $\delta > 0$ 时,MMC 吸收有功功率,此时作为整流器;当 $\delta < 0$ 时,MMC 发出有功功率,此时作为逆变器。当 $U_s - U_c \cos \delta > 0$ 时,MMC 吸收无功功率;当 $U_s - U_c \cos \delta < 0$ 时,MMC 发出无功功率。因此,通过改变 δ 角和 U_c 就可以改变有功、无功功率的大小以及方向。



(a) MMC基波等效电路



(b) MMC基波向量

图 2 MMC 基波等效电路与向量

1.3 MMC 的数学模型

柔性直流输电系统一侧 MMC 的等效电路如图 3 所示。

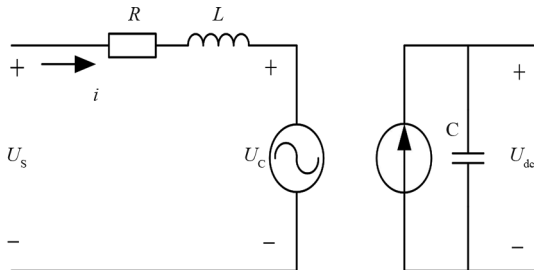


图 3 换流站等效电路

设三相交流系统的电压为:

$$\begin{cases} u_{sa} = U_s \cos \omega t \\ u_{sb} = U_s \cos(\omega t - 2\pi/3) \\ u_{sc} = U_s \cos(\omega t + 2\pi/3) \end{cases} \quad (3)$$

设 MMC 交流侧输出电压为:

$$\begin{cases} u_{ca} = 0.5MU_{dc} \cos(\omega t + \delta) \\ u_{cb} = 0.5MU_{dc} \cos(\omega t - 2\pi/3 + \delta) \\ u_{cc} = 0.5MU_{dc} \cos(\omega t + 2\pi/3 + \delta) \end{cases} \quad (4)$$

对换流站的等效电路图进行分析可得电压状态方程的数学表达式为

$$\begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix} = L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + R \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{ca} \\ u_{cb} \\ u_{cc} \end{bmatrix} \quad (5)$$

为简化换流器的数学模型,需要对式(5)进行 Park 变换。

Park 变换矩阵及其逆矩阵为:

$$T_{3s-dq}(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \cos(\alpha - 2\pi/3) & \cos(\alpha + 2\pi/3) \\ \sin \alpha & \sin(\alpha - 2\pi/3) & \sin(\alpha + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$T_{dq-3s}(\alpha) = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha \\ \cos(\alpha - 2\pi/3) & \sin(\alpha - 2\pi/3) \\ \cos(\alpha + 2\pi/3) & \sin(\alpha + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (7)$$

式(5)经过 Park 变换后可得:

$$L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \end{bmatrix} - R \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} u_{cd} \\ u_{cq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} -\omega L \\ \omega L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (8)$$

整理上面的矩阵表达式可得

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = u_{sd} - Ri_d - u_{cd} - \omega Li_q \\ L \frac{di_q}{dt} = u_{sq} - Ri_q - u_{cq} + \omega Li_d \end{cases} \quad (9)$$

式中: i_d 、 i_q 分别为交流系统电流的 dq 轴分量; u_{sd} 、 u_{sq} 、 u_{cd} 、 u_{cq} 分别为交流系统和 MMC 交流侧电压的 dq 轴分量。 P_s 、 Q_s 在 dq 轴旋转坐标系下的表达式为

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2} (u_d i_d + u_q i_q) \\ Q_s = \frac{3}{2} (u_d i_q - u_q i_d) \end{cases} \quad (10)$$

假设 d 轴定位在交流系统电压向量上, 则交流系统电压向量在 q 轴上的分量为 0, 在 d 轴上的分量为 U_s , 即 $u_d = U_s$ 、 $u_q = 0$, 那么式(10)可表示为

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2} u_d i_d \\ Q_s = \frac{3}{2} u_q i_q \end{cases} \quad (11)$$

由式(11)可知, 有功功率 P_s 只与 d 轴电流 i_d 有关, 无功功率 Q_s 只与 q 轴电流 i_q 有关, 有功、无功功率各自独立调节。通过控制 d 轴分量 i_d 和 q 轴分量 i_q 可实现对有功功率和无功功率的独立控制。

2 交流故障分析

图 4 为单端换流站交流系统。图中: U_s 为交流电网相电压幅值; U_p 为公共连接点相电压幅值; U_c 为 MMC 交流侧相电压幅值。在 dq 坐标系下交流侧系统的数学模型为

$$U_p = U_s - (i_{sd} + j i_{sq}) (R_s + j \omega L_s) \quad (12)$$

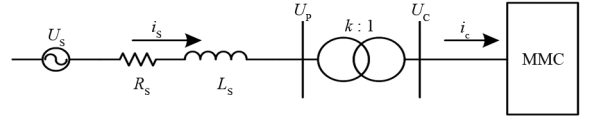


图 4 单端换流站交流系统

为简化计算, 可令 $U_s = U_s \angle 0^\circ$, 且在柔性直流输电系统中 $L_s \gg R_s$, R_s 可忽略不计, 故式(12)可简化为:

$$U_{pd} = U_s + \omega L_s i_{sq} \quad (13)$$

$$U_{pq} = -\omega L_s i_{sd} \quad (14)$$

由于 $U_c = U_p/k$, 由式(10)可得:

$$i_{cd} = \frac{2k(P_s U_{pd} - Q_s U_{pq})}{3U_p^2} \quad (15)$$

$$i_{cq} = \frac{2k(P_s U_{pq} + Q_s U_{pd})}{3U_p^2} \quad (16)$$

由于 $i_s = i_c/k$, 结合式(13)一式(16)可得

$$U_p = \sqrt{(U_s + \omega L_s \frac{i_{cq}}{k})^2 + (\omega L_s \frac{i_{cd}}{k})^2} \quad (17)$$

联立式(15)、式(16)、式(17)可得:

$$U_{pd} = \frac{3U_s U_p^2 (3U_p^2 - 2\omega L_s Q_s)}{\omega^2 L_s^2 \left[\left(\frac{3U_p^2}{\omega L_s} - 2Q_s \right)^2 + 4P_s^2 \right]} \quad (18)$$

$$U_{pq} = \frac{-6P_s U_s U_p^2}{\omega L_s \left[\left(\frac{3U_p^2}{\omega L_s} - 2Q_s \right)^2 + 4P_s^2 \right]} \quad (19)$$

$$U_p = \sqrt{\left[U_s + \frac{2\omega L_s}{3U_p^2} (P_s U_{pq} + Q_s U_{pd}) \right]^2 + \left[\frac{2\omega L_s}{3U_p^2} (P_s U_{pd} - Q_s U_{pq}) \right]^2} \quad (20)$$

化简可得

$$Q_s = -\frac{3U_s U_{pd}}{2\omega L_s} \pm \sqrt{U_{pq} \left(\frac{4\omega L_s P_s U_s}{3U_p^2} - U_s^2 \right) + \frac{4}{9} \omega^2 L_s^2 U_p^2 + U_p^4} \quad (21)$$

式(21)为发生交流故障 PCC 点电压降落时, 系统需要增发的无功功率与交流系统电压幅值、PCC 点电压幅值以及有功功率之间的关系, 可为发生交流故障时无功功率增发量的确定提供理论依据。式(21)中的“ $\pm$ ”号在送端换流站发生交流故障时取正, 在受端换流站发生交流故障时取负。

当增发的无功功率导致过电流时, 系统的有功功率为

$$P_s = \pm \sqrt{(\sqrt{3} U_p I_N)^2 - Q_s^2} \quad (22)$$

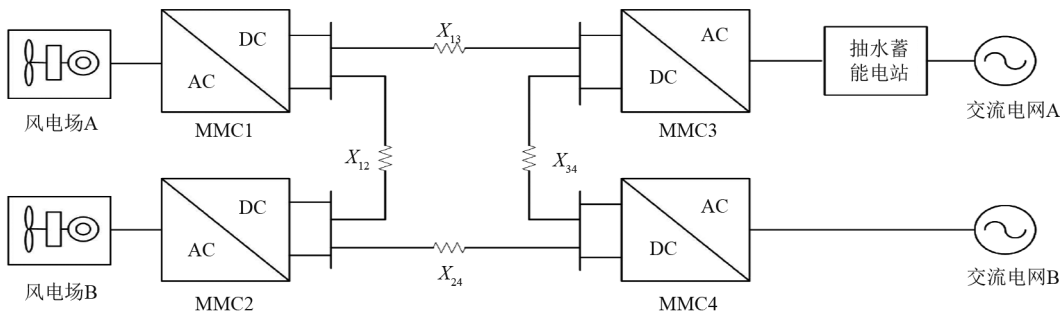


图 5 四端柔性直流输电系统模型

式中: I_N 为交流系统的额定电流; “±”号选取与式(21)相同。当增发的无功功率导致流过换流器的电流超过幅值上限时,可根据式(22)减小有功功率的最大值。但有功功率的减小又会加大系统的有功功率不平衡,此时需要调整换流站的控制策略使有功功率平衡从而来维持系统直流电压的平衡。

3 多端柔性直流系统控制策略

所搭建的四端 MMC-MTDC 模型如图 5 所示。MMC1 和 MMC2 为送端换流站,其交流侧与风电场进行连接;MMC3 换流站作为功率调节站,交流侧接入与电网连接的抽水蓄能电站,对柔性直流系统的不平衡功率进行调节;MMC4 为受端换流站,向交流电网输送功率。

MMC-MTDC 系统主要采用多点直流电压控制的方式,常见的有:带电压裕度的下垂控制、主从控制、下垂控制等。

换流器外环功率控制器主要为有功功率、无功功率、频率、直流电压以及交流电压控制。换流站需要同时对有功、无功两类进行控制,所以控制系统就有多种组合。

3.1 外环功率控制器设计

3.1.1 定直流电压控制

柔性直流输电系统要求其直流电压保持在额定值附近,定直流电压控制是用直流电压参考值减去直流电压的实际值,并将结果进行 PI 调节后输入到内环电流控制器。控制框图如图 6 所示,其数学模型为

$$i_{dref} = (u_{dref} - u_{dc})K_{PI} \quad (23)$$

3.1.2 定有功功率、无功功率控制

将有功、无功功率参考值与实际值求差,将差值进行 PI 调节后输入到内环电流控制器。控制框图

如图 7 所示,其数学模型为:

$$i_{dref} = (P_{ref} - P)K_{PI} \quad (24)$$

$$i_{qref} = (Q_{ref} - Q)K_{PI} \quad (25)$$

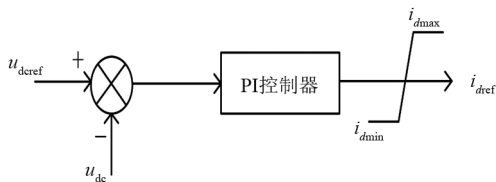


图 6 定直流电压控制

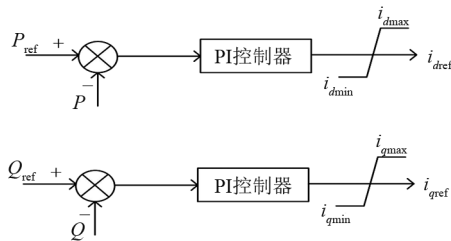


图 7 定有功、无功功率控制

3.1.3 定交流电压、频率控制

定交流电压控制器和定频率控制器也是将参考值与实际值进行求差,将差值经过 PI 调节后输入到内环电流控制器。图 8 是其控制框图,数学模型为:

$$i_{qref} = (u_{sref} - u_s)K_{PI} \quad (26)$$

$$i_{dref} = (f_{ref} - f)K_{PI} \quad (27)$$

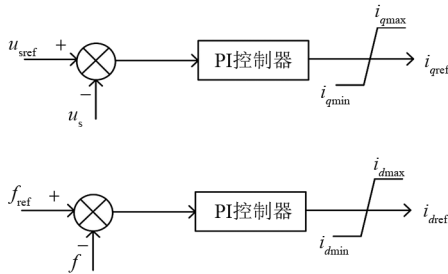


图 8 定交流电压、频率控制

3.2 交流故障穿越控制策略

MMC4 连接的交流电网发生故障,公共连接点电压发生下降,MMC4 根据 PCC 点电压下降程度调整无功功率参考值,增发相应的无功电压来维持

PCC 点电压稳定。当 MMC4 增发的无功功率使得交流系统过电流时,通过降低有功功率的输出减小交流系统电流幅值,柔性直流系统通过定直流电压换流站的调节消除系统的不平衡功率,保证直流电压稳定。结合交流故障分析的原理推导,控制策略流程图如图 9 所示。

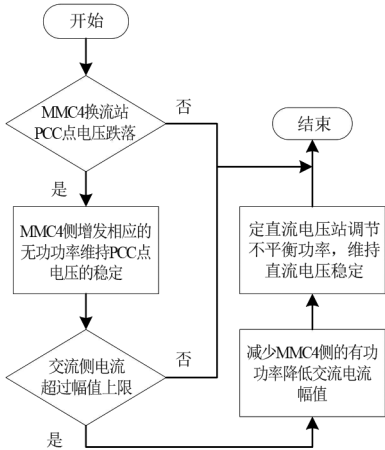


图 9 控制策略流程

4 仿真分析

在 PSCAD/EMTDC 软件上搭建四端柔性直流系统的仿真模型,对所提的控制策略进行仿真并验证。交流系统的额定电流为 1.8 kA,多端柔性直流输电系统模型参数如表 1 所示。

表 1 系统模型参数

换流站	有功控制	无功控制	参考值		
			P_{ref}/MW	Q_{ref}/Mvar	U_{ref}/kV
MMC1	定有功功率	定无功功率	500	0	—
MMC2	定有功功率	定无功功率	400	0	—
MMC3	定直流电压	定无功功率	—	0	630
MMC4	定有功功率	定无功功率	-600	0	—

多端柔性直流系统在仿真 1 s 后逐渐开始趋于稳定。MMC4 换流站所连接的交流电网在 2 s 时发生故障,PCC 点电压降低 10%,此时若不采取相应的控制策略,故障端相关电气量的变化如图 10 所示。

MMC4 连接的交流电网在 2 s 时发生故障,PCC 点电压降低 10%,在 2.05 s 时启动交流故障穿越控制策略,根据式(21)计算可得 MMC4 换流站此时需要发出的无功功率 $Q_c = -356.032\text{ Mvar}$ 。图 11 为启

动交流故障穿越控制策略后故障端相关电气量的波形图。

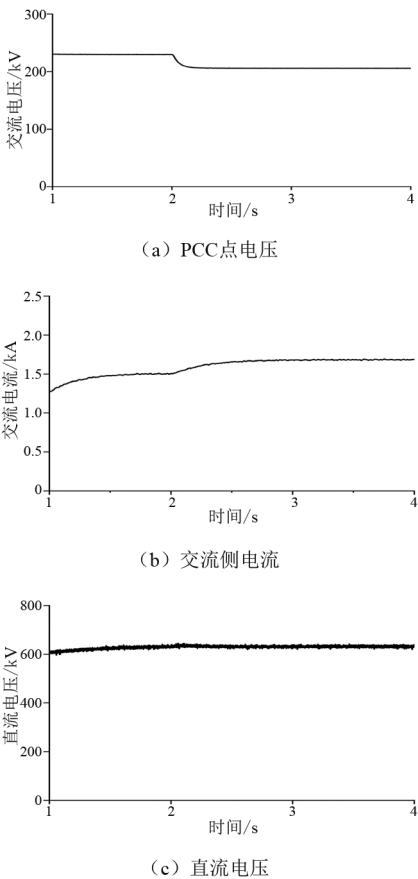


图 10 不采取控制时故障端电气量波形

对比图 10 和图 11 可以知道:若不采取控制措施,PCC 点电压在 2 s 时跌落后则无法恢复,同时交流系统电流也由 1.5 kA 增大到 1.68 kA,交流电压的跌落则会导致有功功率不平衡、直流电压发生波动,凭借系统自身很难恢复到原来的运行状态;在 2.05 s 时启动交流故障穿越,根据图 11 显示,PCC 点交流电压很快恢复到原来的水平,直流电压也在很短时间内恢复到额定水平,由于增发了无功功率,导致交流电流进一步增大到 1.75 kA,但均未超过额定电流。

在增发无功功率时则会进一步增大交流系统电流,若 PCC 点电压跌落程度较大,增发的无功功率导致交流系统过电流,此时需要根据式(22)最小程度地减小有功功率的输出,从而降低交流电流幅值,避免系统产生过电流。

MMC4 换流站所连接的交流电网在 2 s 时 PCC 点电压跌落 15%,2.05 s 时 MMC4 换流站需要发出的无功功率 $Q_c = -553.152\text{ Mvar}$ 。若不增加其他的控制策略,故障端相关电气量的变化如图12所示,

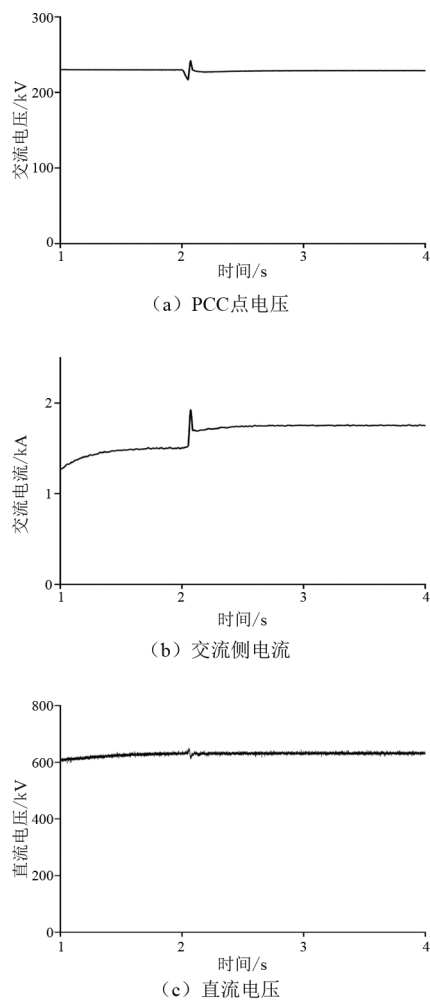


图 11 启动交流故障穿越策略后故障端电气量波形

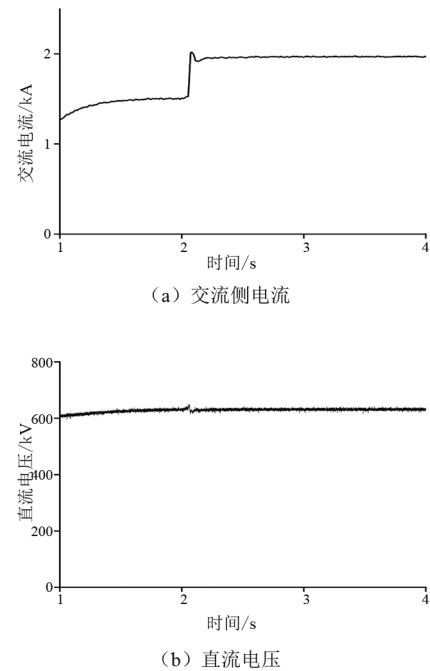


图 12 不增加其他控制时故障端电气量波形

此时交流系统电流上升幅度较大,由 1.5 kA 增加到

1.97 kA,超过了系统的额定电流,此时应通过增加相应的控制策略限制过电流从而达到维持交流系统稳定的目的。

此时根据式 (22) 计算得出不发生过电流的最大有功功率 $P_C = -460.10$ MW。根据上面的仿真在 2.05 s 时将 MMC4 侧有功功率的参考值由 -600 MW 变为 -460.1 MW。图 13 为降低有功功率后故障端相关电气量的波形图,交流电流由 1.97 kA 降低到了 1.796 kA,有效地避免了交流侧过电流的产生。

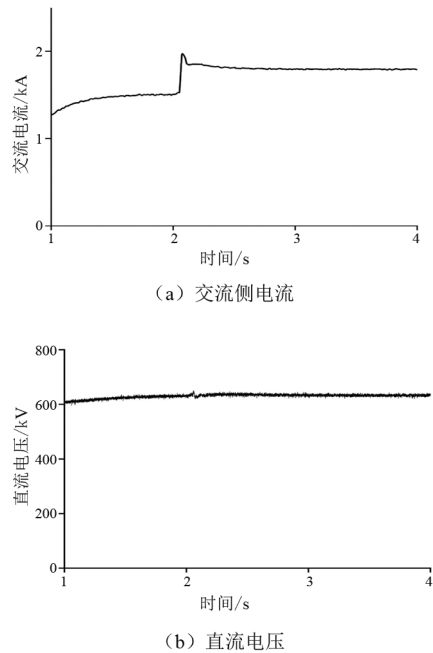


图 13 降低有功功率后故障端电气量的波形

有功功率的降低会进一步增大系统的不平衡功率,从而使直流电压发生更大的偏差。此时,作为定直流电压换流站的抽水蓄能电站,通过直流电压-有功功率下垂曲线增大有功功率的输出,在消纳不平衡功率维持直流电压稳定的同时实现新能源风电场最大有功功率输出。

5 结 论

在多端柔性直流输电系统交流侧发生故障时,针对因 PCC 点电压跌落导致一系列电网事故产生的问题,提出了一种交流故障穿越技术来维持 PCC 点电压的稳定。当 PCC 点电压发生跌落时,换流站通过增发无功功率来维持 PCC 点电压的稳定;当 PCC 点电压跌落程度较大时,增发的无功功率使交

(下转第 94 页)

变压器局部放电检测声阻抗匹配研究

涂彦明¹, 张 劲¹, 何宇航¹, 薛志航¹, 姚 晓¹, 丁登伟²

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;

2. 清华四川能源互联网研究院, 四川 成都 610213)

摘要:局部放电检测技术是变压器绝缘诊断的重要手段之一,而外置式超声法是目前使用较多的超声检测法。针对当前外置式超声检测法灵敏度较低的问题,文中研究了声阻抗匹配提高变压器局部放电超声信号透射强度的可行性。经理论分析发现,通过在变压器油和外壳之间加入匹配层,且满足匹配层声阻抗介于变压器油和外壳的声阻抗之间,能增大超声波信号的透射系数,获得了透射系数随频率变化的规律及中心频率和匹配层厚度的关系。模拟试验表明,在变压器油与变压器外壳之间加入声阻抗匹配层后,测得的超声波信号幅值约为未设置声阻抗匹配层侧的2倍,超声波信号的透射系数得到了显著增强,试验结果验证了声阻抗匹配提高实测超声波信号强度的可行性。

关键词:变压器; 局部放电; 超声波; 声阻抗匹配; 透射系数

中图分类号: TM 41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2023)01-0050-04

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230109

Research on Acoustic Impedance Matching of Partial Discharge Detection for Transformer

TU Yanming¹, ZHANG Jing¹, HE Yuhang¹, XUE Zhihang¹, YAO Xiao¹, DING Dengwei²

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

2. Sichuan Energy Internet Research Institute of Tsinghua University, Chengdu 610213, Sichuan, China)

Abstract: Partial discharge detection is one of the most important methods for transformer insulation diagnosis, and the sensor-externally-installed method is the most used ultrasonic detection method at present. In view of the low sensitivity of current external ultrasonic detection method, the feasibility of improving transmission intensity of ultrasonic signal of transformer partial discharge by acoustic impedance matching is studied. By theoretical analysis, it is found that the transmission coefficient of ultrasonic signal can be increased by adding matching layer between transformer oil and shell when the acoustic impedance of matching layer is between those of the transformer oil and shell. The variation rule of transmission coefficients with frequency and the relationship between center frequency and thickness of matching layer are obtained. The simulation test results show that when the acoustic impedance matching layer is added between transformer oil and shell, the amplitude of the measured ultrasonic signal is about double that of the ultrasonic signal measured in opposite side without the acoustic impedance matching layer, and the transmission coefficients of ultrasonic signal is significantly enhanced, which verifies the feasibility of improving the intensity of the measured ultrasonic signal by the acoustic impedance matching.

Key words: transformer; partial discharge; ultrasound; acoustic impedance matching; transmission coefficient

0 引言

变压器是电力系统中的关键设备,其健康、可靠运行对于系统安全有着重要的意义。变压器绝缘问题是导致其故障的主要因素,对设备绝缘状态进行检测并及时预警绝缘缺陷,是减少故障的主要手

段^[1-3]。局部放电检测技术是目前实现绝缘诊断的主要技术手段之一^[4],而主流检测方法是超声波法和特高频法。

超声波法主要分为内置式和外置式两类^[5-8]。其中,内置式传感器定位精度更高,但大多数已投运变压器无法将传感器内置安装,因此其使用场合受到极大限制;外置式超声法是目前使用较多的超声

检测法,主要通过将压电陶瓷式超声传感器贴于变压器外壳的方式以检测超声信号。该方法的优点是操作简单,且传感器位置可以自由布置,具有较高的灵活性,是目前主流的超声检测方法^[9-12]。然而,超声信号从油中传播至变压器外壳时,由于油和钢板的声阻抗相差较大,超声信号会在油和钢板处发生严重的反射,只有极少部分超声能量可以通过钢板传递出来,故而外置式超声传感器测得的信号通常较弱,信号信噪比较小^[13-14]。当放电强度不高时,实测到的超声信号常常会被背景噪声淹没^[15-17],无法直接用于分析,使其现场应用价值大打折扣。

为了解决变压器局部放电超声信号检测灵敏度较低的问题,可对超声波信号进行降噪处理,提高信噪比,从而提高实测超声信号的利用效率。目前已有大量相关研究成果,涉及小波变换软阈值处理、快速独立分量分析算法、匹配追踪算法等多种方法,取得了一定成效^[15,18-20]。尽管采用信号降噪算法可以有效提升微弱超声信号的检出能力,但该方法的前提是超声传感器能检测到信号。因而,要提高超声法的检测灵敏度,除了降噪外,还需要从测量层面提升信号的检测能力。例如,从减小信号传输过程中的衰减的角度入手,提高实测信号的强度,改善超声法灵敏度,但目前在该方面的研究较少。

下面将声阻抗匹配引入到变压器局部放电超声测量中,通过在油和钢板间设置匹配层,减小超声信号在界面处的反射,提高超声信号的透射系数,从而提高实测得到的超声信号强度,提升超声法检测局部放电的灵敏度。

1 声阻抗匹配的基本原理

对于两层介质 1 与介质 3,其声阻抗分别为 z_1 和 z_3 ,假设 $z_1 < z_3$,则超声波信号直射时的声强透射系数为 T_1 为^[21]

$$T_1 = \frac{4 \times z_1 \times z_3}{(z_1 + z_3)^2} \tag{1}$$

当 $z_1 \neq z_3$ 时, $T_1 < 1$,表明当两层介质声阻抗不相同时,超声波信号不能完全透射,两层介质声阻抗的差异越大,超声波信号的透射系数则越低。

若在介质 1 和介质 3 中间加入一层厚度为 d 、声阻抗为 z_2 的介质 2,可以推导出式(2)所示的超声波信号的声强透射系数 T_2 ^[21]。

$$T_2 = \frac{4 \times z_1 \times z_3}{(z_1 + z_3)^2 \cos^2 \frac{2\pi d}{c_2} f + \left(z_2 + \frac{z_1 \times z_3}{z_2} \right)^2 \sin^2 \frac{2\pi d}{c_2} f} \tag{2}$$

式中: c_2 为超声波信号在介质 z_2 中的传输速度; f 为超声波信号频率。

由此可见,当有三层介质时,透射系数是厚度 d 的函数。当 $z_1 < z_2 < z_3$ 时,即加入的介质声阻抗介于原来两种介质声阻抗之间时,式(2)在 $d = c_2 / (4f) = \lambda / 4$ 时取得极大值。同时,可以推导出,当 $z_1 < z_2 < z_3$ 时,有 $T_1 \leq T_2 \leq T_{2\max}$ 。这表明,当加入介质的声阻抗介于原来两种介质的声阻抗之间时,超声波信号的透射系数会增大,这便是声阻抗匹配的基本原理。特别地,当 $z_2 = \sqrt{z_1 \times z_3}$ 时, $T_{2\max} = 1$,此时为最佳匹配,即超声波信号的透射系数最大。

2 变压器局部放电检测声阻抗匹配分析

局部放电激发产生的超声信号在向外传播的过程中,其部分能量会在介质(油、钢板等)中被吸收而产生损耗,同时,在油和变压器外壳界面处会发生反射使得部分超声能量无法透过钢板。因此,实际传播至变压器外侧超声传感器处的超声信号能量较小,从而导致外置式超声法的检测灵敏度低。

在导致实测超声信号衰减的因素中,油和钢板界面处的反射是主要因素。通常,变压器油和钢的声阻抗分别为 1.3 和 46,由式(1)可计算得到超声波信号在变压器油 and 外壳交界处的透射系数约为 0.11。由此可见,大部分的超声波能量并不能传入钢制外壳,因此超声波传感器测得的信号强度也较低。基于声阻抗匹配原理,若能在变压器油和外壳间加入一种声阻抗介于变压器油和钢的声阻抗之间的材料,则可提高超声波信号的透射系数,进而提高实测超声波信号的强度。

分别选取环氧树脂和玻璃纤维作为声阻抗匹配层材料进行分析,其声学参数如表 1 所示,通过式(2)可以得到如图 1 所示的透射系数随频率变化的规律。

表 1 不同声阻抗匹配层声学参数

序号	材料	声速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	声阻抗/ ($\text{Pa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$)	厚度/ cm
1	环氧树脂	2400	2.70	1.0
2	环氧树脂	2400	2.70	0.5
3	玻璃纤维	3150	6.04	1.0

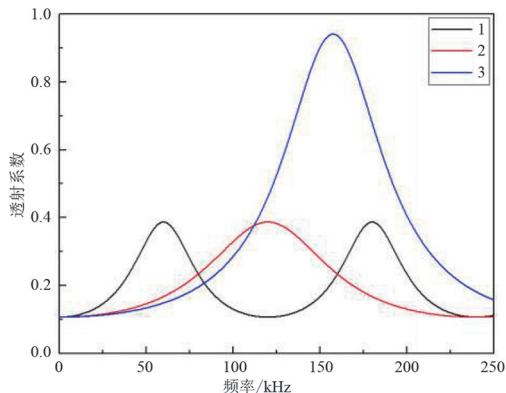


图 1 不同声阻抗匹配层透射系数随频率变化关系

由图 1 可知,经过声阻抗匹配,超声波信号在变压器油和外壳之间的透射系数均比未匹配时有所增大。同时,当声阻抗匹配层厚度确定后,匹配后的透射系数是随信号频率周期变化的,透射系数在一个周期内呈单峰状。

由图中曲线 1 和曲线 2 可知,对于同一种声阻抗匹配材料,当匹配层厚度不同时,透射系数频谱的中心频率是不同的,中心频率和匹配层厚度的关系为

$$d = c_2 / (4f) = \lambda / 4 \quad (3)$$

因此,匹配层厚度越小,透射系数频谱的中心频率越高,且频带越宽。在实际应用时,需要根据超声波信号的中心频率选择合适的匹配层厚度,从而将匹配效果调整至最佳。

由图中曲线 1 和曲线 3 可知,对于不同匹配层材料,当匹配层的声阻抗越接近最佳匹配阻抗 $z_2 = \sqrt{z_1 \times z_3} = \sqrt{1.3 \times 46} = 7.7$ 时,透射系数的峰值也越大。

总体而言,在忽略声阻抗匹配层对超声波信号吸收损耗的情况下,只要匹配层的声阻抗介于变压器油和外壳的声阻抗之间,均能增大超声波信号的透射系数,而透射系数的峰值则取决于匹配层的声阻抗,因此,选择声阻抗合适的匹配材料,可以在较大程度上增大超声波信号的透射系数。匹配层的厚度取决于检测所需的中心频率和匹配层中的超声波声速,在中心频率确定的前提下,出于节省空间的考虑,匹配层应当越薄越好,照此要求应选择声速相对较小的材料。此外,在实际应用中,超声波信号在匹配层中不可避免会发生吸收损耗,因此,要选择超声波损耗相对较小的材料。

3 变压器局部放电声阻抗匹配试验

3.1 变压器声阻抗匹配试验系统

为了验证基于声阻抗匹配提升实测超声波信号

强度的可行性,搭建了试验系统,如图 2 所示。在等比例缩小的充油模拟变压器器身(尺寸 $60 \text{ cm} \times 40 \text{ cm} \times 40 \text{ cm}$,外壳厚度 2 cm)中部设置油中尖端放电模型,在对模拟变压器施加相应电压后,可激发出尖端放电超声波信号。在布置声阻抗匹配层时,要求匹配层和模拟变压器金属外壳紧密接触,其间不能留有气隙或油隙,因此,选用环氧树脂浇注的方式在外壳的油箱一侧布置环氧树脂匹配层,匹配层厚度为 1 cm 。将两个型号为 PAC R15 α 的超声波传感器对称布置于油中尖端放电模型两侧的壳体外表面,一侧信号传输路径上变压器油和外壳之间有声阻抗匹配层,另一侧则没有。

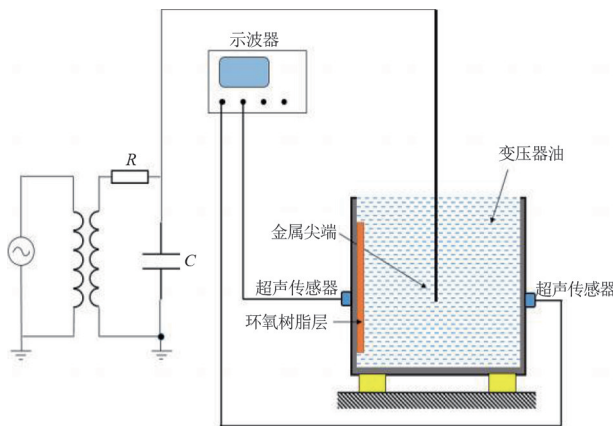


图 2 变压器声阻抗匹配试验系统

3.2 结果分析

如图 3 所示,从试验结果可知,设置了声阻抗匹配层一侧测得的超声波信号幅值约为未设置声阻抗匹配层一侧的 2 倍,表明经过声阻抗匹配,超声波信号的透射系数得到了显著增强。基于试验便捷性考虑,选择了环氧树脂材料作为声阻抗匹配层,由于其并非最佳声阻抗匹配材料,因此对超声波信号的增强幅度有限,但试验结果仍然可以表明,通过声阻抗匹配提高检测到的超声波信号强度具有可行性。在实际应用中,根据检测需求选择更为合适的声阻抗匹配材料,实现更为理想的变压器局部放电声阻抗匹配效果。

根据理论分析和试验验证,利用声阻抗匹配增大超声波传感器检测到的变压器局部放电信号强度是可行的,这为变压器局部放电超声波检测灵敏度的提升提供了一种新的方法。实际应用时,鉴于变压器本身是一个复杂系统,内部电磁环境复杂,且长期处于温度、振动、油浸工况下,在变压器油和外壳之间加入声阻抗匹配层的工程可行性研究还应进一

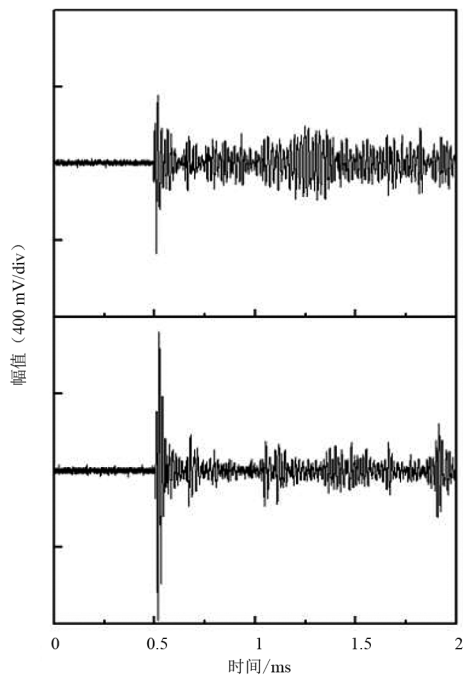


图3 两侧超声传感器测得的油中尖端放电时域波形

步研究。声阻抗匹配材料的选择需要综合考虑多种因素,如材料的耐油性、对变压器内电场分布是否有影响等,同时,在满足最佳匹配阻抗值的情况下,应选取声速较小的材料,可以使得匹配层更薄,节省变压器内部空间,减小对变压器内电场分布的影响。

4 结 论

为了解决变压器局部放电超声信号检测灵敏度较低的问题,研究加入声阻抗匹配层后超声波在介质中的传播情况,得到了透射系数随频率的变化关系以及中心频率和匹配层厚度的关系。根据前述规律,选用环氧树脂作为声阻抗匹配层材料,通过模拟试验验证了采用声阻抗匹配提升超声波信号透射系数、提高实测超声波信号强度的可行性。

参考文献

- [1] 侯恺宁,王强,陆信波,等.基于超宽频带法的油纸绝缘局部放电检测方法[J].高电压技术,2022,48(12):4770-4779.
- [2] 陆宇航,杜伯学.时频匹配滤波法用于变压器局部放电模式识别的实验研究[J].中国电力,2008,41(10):16-19.
- [3] 李红军,卢宁.浅析一起由于套管末屏绝缘状态不良引起的变压器放电事故[J].变压器,2020,57(12):79-82.
- [4] 高树国,赵军,乔辉,等.换流变压器局部放电检测与特

性研究综述[J].绝缘材料,2022,55(7):1-9.

- [5] 贾骏,陶风波,杨强,等.复杂多径传播条件下变压器局部放电定位方法研究[J].中国电机工程学报,2022,42(14):5338-5348.
- [6] 蔡鋈,袁文泽,张轩瑞,等.基于特高频自感知的变压器局部放电检测方法[J].高电压技术,2021,47(6):2041-2050.
- [7] 张林楠,杨俊杰,江晨.基于特高频传感器和TDOA数据库的电力变压器局部放电的定位[J].变压器,2021,58(5):67-72.
- [8] 刘化龙.变压器局放超声检测和定位技术现状及发展[J].重庆理工大学学报(自然科学),2014,28(7):71-79.
- [9] 律方成,程述一,李燕青,等.超声法在电力变压器局部放电检测中的应用与展望[J].变压器,2012,49(8):45-49.
- [10] 葛为民.变压器局部放电超声定位的现场应用[J].高压电器,2005,41(5):351-353.
- [11] 孙浩飞,高坤,花啸昌,等.基于路径时间差的变压器局部放电超声定位方法研究[J].智慧电力,2022,50(3):100-107.
- [12] 余昌佳,郑建勇,何嘉弘,等.时差筛选和ABC二次寻优的变压器局放超声定位方法[J].高电压技术,2021,47(8):2820-2827.
- [13] 董艳唯,张弛,满玉岩,等.基于阵列时延库的变压器局放超声阵列定位研究[J].电测与仪表,2015,52(10):109-113.
- [14] 高超飞,刘旭,王伟,等.变压器局放超声传播FEM仿真分析[J].电网与清洁能源,2017,33(10):14-22.
- [15] 程万胜,岳伦,付振贺,等.基于小波变换的变压器局放信号超声直达波提取[J].电测与仪表,2013,50(9):46-50.
- [16] 周晶,罗日成,黄军,等.基于NS-APSO算法的变压器局部放电超声定位方法[J].电测与仪表,2022,59(8):155-160.
- [17] 金广厚,王庆,李燕青,等.局部放电超声信号在变压器模型中的传播[J].高电压技术,2003,29(9):14-15.
- [18] 李燕青,郑伟烁,王川,等.匹配追踪算法在局放超声阵列信号去噪中的应用[J].高电压技术,2015,41(10):3302-3312.
- [19] 谢庆,程述一,律方成,等.采用改进型圆形超声阵列传感器的油中局放定位[J].高电压技术,2013,39(5):1054-1060.
- [20] 李燕青,王飞龙,赵亮.变压器局放源定位时差求取方法研究[J].电测与仪表,2013,50(12):69-72.
- [21] 张剑.超声换能器匹配层与背衬材料对性能影响的研究[D].长春:长春理工大学,2021.

作者简介:

涂彦明(1972),硕士,高级工程师,从事高电压技术和电力系统断电保护工作。(收稿日期:2022-10-25)

基于短时互相关的低压脉冲法电缆故障定位

周 涛, 万子逸, 段永生, 吴辰阳, 钱 琪

(云南电网有限责任公司昆明供电局, 云南 昆明 650200)

摘要:为了提升传统低压脉冲法的电缆故障定位能力,文中提出基于短时互相关的低压脉冲法电缆故障定位方法。首先,对电缆开展低压脉冲测试得到相应的测试波形;然后,根据输入波形设置短时参考信号,将短时参考信号进行时移后与测试波形计算互相关系数;最后,根据绝对互相关系数序列曲线的峰值位置来定位电缆故障。仿真和实测结果表明,所提方法可以有效提升低压脉冲法中反射信息的识别能力,提高低压脉冲法对电缆故障的定位能力。

关键词:电缆;故障定位;短时互相关;低压脉冲法

中图分类号:TM 935 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2023)01-0054-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230110

Cable Fault Location Using Low Voltage Impulse Method Based on Short-time Cross-correlation

ZHOU Tao, WAN Ziyi, DUAN Yongsheng, WU Chenyang, QIAN Qi

(Kunming Power Supply Bureau, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650200, Yunnan, China)

Abstract:In order to improve the cable fault location ability of the traditional low voltage impulse method, the low voltage impulse method based on short-time cross-correlation is proposed to locate the cable fault. Firstly, the low voltage impulse test is carried out on the cable to get the corresponding test waveform. Then, the short-time reference signal is obtained according to the input signal waveform, and the cross-correlation coefficients of time-shifted short-time reference signal between the test waveform are calculated. Finally, the cable fault is located according to the peak position of sequence curve of the absolute cross-correlation coefficients. The simulation and measurement results show that the proposed method can effectively improve the recognition ability of the reflected information and the location ability of cable fault.

Key words:cable; fault location; short-time cross-correlation; low voltage impulse method

0 引 言

由于城市发展的需要,越来越多的电力电缆开始替代架空线成为城市电网的主要输电载体^[1]。由于电力电缆的服役环境较差,同时容易受到施工破坏,所以在运电力电缆容易出现故障,进而造成供电区域的突发性停电事故,威胁人民的生命财产安全。由于电力电缆一般被埋于地下,盲目开挖找寻电缆故障点的时间和经济成本较大,所以研究电力电缆的故障定位技术具有重大意义^[2]。

低压脉冲法凭借着原理简单、操作方便的特点被广泛用于电力电缆的故障定位。该方法的基本原

理是向电缆首端发射一个低电压的脉冲波,由于该脉冲波会在电缆故障位置处发生行波反射现象,因此可以在电缆首端处读取反射波的时延实现电缆的故障定位^[3]。文献[4]研究了低压脉冲法对不同类型电缆故障的定位效果,并证实了低压脉冲法在电缆故障定位方面使用的可行性。文献[5]研究了低压脉冲法对电力电缆中间接头的定位效果,并说明了低压脉冲法可对中间接头的绝缘状态进行诊断。文献[6]研究了低压脉冲法对电力电缆外力破坏点的定位效果,证明了使用低压脉冲法可对电缆的较弱故障开展定位。文献[7]将电缆末端设置为开路,凭借低压脉冲法对开路故障的定位能力实现电缆长度测量。在实际使用低压脉冲法开展电缆故障定

位时,反射波的波形能量受故障的严重程度和电缆的衰减效应影响较大,因此使用低压脉冲法测试波形中较弱故障处的反射信息不明显,而现有技术并未对反射信息的识别技术开展研究,导致难以精确定位电缆故障。

综上所述,下面提出一种基于短时互相关^[8]的低压脉冲法电缆故障定位技术。首先,需要对电力电缆开展低压脉冲测试,得到低压脉冲测试波形;然后,根据输入波形选择合适的时窗,得到短时参考信号;接着,将短时参考信号进行时移后与低压脉冲测试波形求取互相关系数;最后,根据绝对互相关系数序列曲线对电缆故障进行定位。所提方法可有效地提升对低压脉冲法中反射波的辨别能力,从而提高低压脉冲法对电缆故障的定位能力。

1 技术原理

1.1 低压脉冲法

低压脉冲法是建立在传输线理论的基础上。根据传输线理论,当电缆中传输高频电磁波时,电力电缆可以视为多个单位长度元 Δd 的分布参数模型级联而成^[9]。该模型使用单位长度的电阻 R_0 、电感 L_0 、电容 C_0 和电导 G_0 来描述,如图1所示。

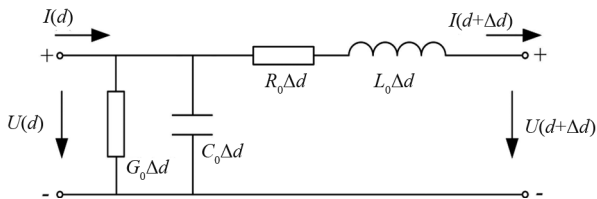


图1 电缆的单位长度模型

此时对于电缆而言,当距首端 d 处的电压和电流分别为 $U(d)$ 和 $I(d)$ 时,则距首端 $d+\Delta d$ 处的电压和电流应分别为 $U(d+\Delta d)$ 和 $I(d+\Delta d)$,根据基尔霍夫定律,得到^[9]

$$\begin{cases} -\frac{\partial U(d)}{\partial d} = R_0 I(d) + L_0 \frac{\partial I(d)}{\partial t} \\ -\frac{\partial I(d)}{\partial d} = G_0 U(d) + C_0 \frac{\partial U(d)}{\partial t} \end{cases} \quad (1)$$

反射系数 ρ 是电缆中任意一点反射波电压和入射波电压的比值,因此根据边界条件求解式(1)^[9]可得

$$\rho = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (2)$$

式中: Z_L 为电缆中距首端 d 处的等效阻抗; Z_0 为电缆的特征阻抗, Z_0 被定义为

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}} \quad (3)$$

式中, ω 为电磁波的角频率。

从式(2)中可以看出,当电缆距首端 d 处出现故障时,该位置的 Z_L 会发生变化,导致该位置的 ρ 不为0,进而产生低压脉冲波的反射现象。为了进一步说明 ρ 和 Z_L 的关系,给出 Z_0 为 50Ω 时 ρ 和 Z_L 的函数关系,如图2所示。从图2中可以看出:当故障程度较严重时,即 Z_L 趋于0(完全短路)或 ∞ (完全开路), ρ 的绝对值较大,此时产生的反射波能量较大,低压脉冲法测试波形中反射信息明显;当故障程度较弱时,即 Z_L 趋于 Z_0 , ρ 的绝对值较小,此时产生的反射波能量较小,低压脉冲法测试波形中反射信息不明显。

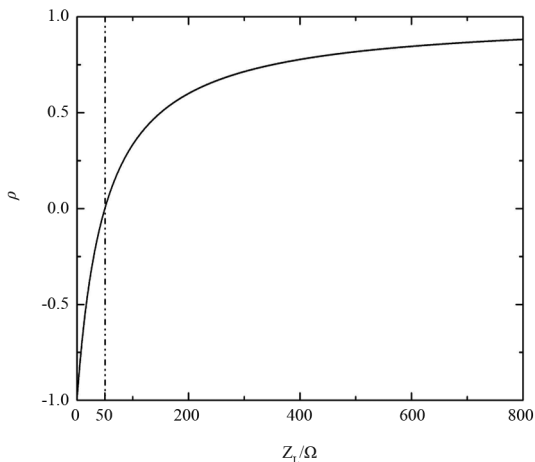


图2 ρ 和 Z_L 的关系

1.2 短时互相关算法

为了提升低压脉冲法测试波形中反射信息的读取能力,将短时互相关算法引入低压脉冲法中。该方法根据输入波形构建短时参考信号,然后将时移后的短时参考信号和低压脉冲测试波形求取互相关系数,最后根据绝对互相关系数序列曲线定位电缆故障。因为测试信号的波形是人为设定的,所以测试信号的波形是已知的,通过以尽可能短的时窗截取完整的测试信号波形便得到短时参考信号。计算的时窗长度会随着测试信号不同而不同,以能截取完整的测试信号波形的最短时窗长度为宜。具体方法如图3所示,图中: $s(i)$ 为离散的短时参考信号; $y(i)$ 为窗口截取之后的离散低压脉冲法测试波形; w 为时窗长度。

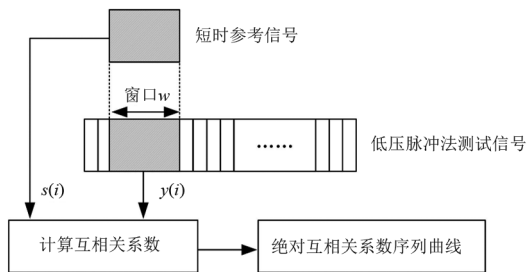


图3 短时互相关算法

图3中互相关系数 r 的计算公式^[10]定义为

$$r = \frac{\sum_{i=1}^w [s(i) - \tilde{s}] [y(i) - \tilde{y}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^w [s(i) - \tilde{s}]^2} \sqrt{\sum_{i=1}^w [y(i) - \tilde{y}]^2}} \quad (4)$$

式中, $\sim$ 表示对数组求平均值。

以此得到时移 n 个离散点的互相关系数序列为 $r(n)$,然后对 $r(n)$ 取绝对值得到绝对互相关系数序列曲线并用于电缆故障定位,此时电缆故障的反射信息被放大,易于开展电缆故障定位工作。

2 仿真测试

为了验证所提方法的可行性和有效性,下面开展了仿真测试分析,仿真模型采用10 kV交联聚乙烯电力电缆,其单位长度的各参数值^[11]如下:

$$R_0 \approx \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0 \omega}{2}} \left(\frac{1}{r_c} \sqrt{\rho_c} + \frac{1}{r_s} \sqrt{\rho_s} \right) \quad (5)$$

$$L_0 \approx \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{r_s}{r_c} + \frac{1}{4\pi} \sqrt{\frac{2\mu_0}{\omega}} \left(\frac{1}{r_c} \sqrt{\rho_c} + \frac{1}{r_s} \sqrt{\rho_s} \right) \quad (6)$$

$$G_0 = \frac{2\pi\sigma}{\ln(r_s/r_c)} \quad (7)$$

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(r_s/r_c)} \quad (8)$$

式中: r_c 为缆芯半径,取4 mm; r_s 为屏蔽层内半径,取9.5 mm; ρ_c 为缆芯电阻率,取 $17.5 \mu\Omega \cdot \text{mm}$; ρ_s 为屏蔽层电阻率,取 $17.5 \mu\Omega \cdot \text{mm}$; μ_0 为真空磁导率,取 $4\pi \times 10^{-7} \text{ H/m}$; σ 为电介质的电导率,取 10^{-16} S/m ; ϵ 为电介质的介电常数,取 $2.04 \times 10^{-11} \text{ F/m}$ 。

本仿真中电缆模型长度设置为300 m,故障位置设置在距首端200 m,故障类型设置为经过渡电阻接地故障^[4],过渡电阻值设置为300 Ω 。

所提低压脉冲法测试信号选用高斯脉冲波。高

斯脉冲波的时宽可以任意调节。当作为测试信号的高斯脉冲波设置为窄时宽时,测试信号和各反射信号的时宽都会较窄,因此测试信号和各反射信号不易形成混叠,测试盲区更小;但是此时测试信号中高频能量较大,在电缆对高频信号的强衰减效应影响下,测试信号的能量会衰减很快,导致反射信号的能量较弱,难以检测。当作为测试信号的高斯脉冲波设置为宽时宽时,虽然测试信号和各反射信号容易形成混叠,会造成较大的测试盲区,但是此时测试信号的低频能量更大,抗衰减能力更强。综上所述,应该根据被测电缆的长度选取对应的测试信号时宽。当电缆长度较短时,电缆整体的衰减效应较弱,此时应选取窄时宽的测试信号,以降低测试盲区的长度;电缆长度较长时,电缆整体的衰减效应较强,此时应选取宽时宽的测试信号,以增加测试盲区的代价提升反射信号的抗衰减能力,便于反射信号的检测。

以此得到仿真电缆模型的低压脉冲法测试波形如图4所示。为了便于分析,已经将低压脉冲法测试波形的时间横轴乘以电磁波速度得到距离横轴。从图4中可以看出,由于在经过渡电阻接地故障点和电缆末端位置处存在电缆的阻抗失配现象,所以在相应位置出现了行波反射现象,导致低压脉冲法测试波形在相应位置出现了反射波,通过分析反射波的时延信息可实现电缆故障定位。同时还可以看出,由于经过渡电阻接地故障点位置的阻抗失配程度较弱,因此该位置的反射波幅值较低,难以直接从低压脉冲法的测试波形中检测到该反射波;当故障的严重程度更弱时,该位置的反射波幅值更低,更加难以检测。

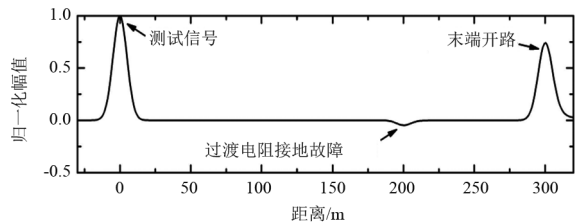


图4 仿真电缆模型的低压脉冲法测试波形

利用短时互相关对图4中低压脉冲法测试波形进行处理得到绝对互相关系数序列曲线如图5所示。对比图4和图5可以看出,相比于低压脉冲法测试波形曲线,绝对互相关系数序列曲线中经过渡电阻接地故障点和电缆开路末端两处位置均出现了明显的异常峰值,并且两处峰的幅值和陡度较大,反

射信息更加明显,说明了所提方法可以有效放大低压脉冲法测试波形中故障的反射信息,易于电缆故障定位。

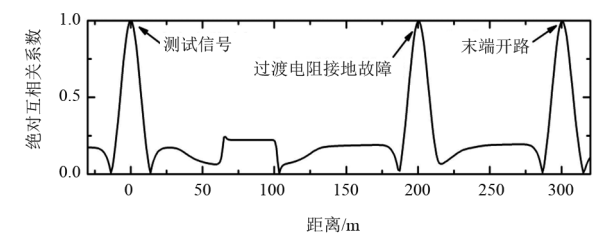


图 5 仿真电缆模型的绝对互相关系数序列曲线

3 实例分析

为了进一步验证所提方法的有效性,参考文献[12],采用和电力电缆结构类似的通信同轴电缆开展实际测试。具体的测试系统如图 6 所示:同轴电缆总长为 40 m,在距首端 20 m 处 A 点设置过渡电阻接地故障,过渡电阻的阻值为 81 Ω;距首端 40 m 的 B 点为电缆末端,设置为开路状态,可以视为开路故障。因此该同轴电缆可视为在 A 点存在经过渡电阻接地的软故障和 B 点存在完全开路的硬故障两处故障。

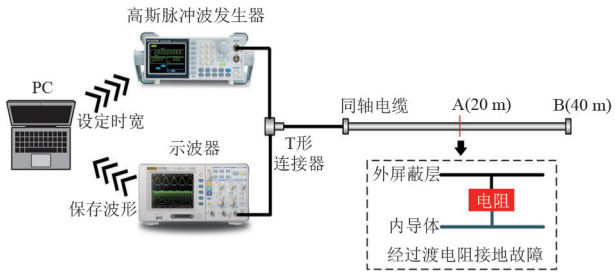


图 6 低压脉冲法的测试系统

在图 6 中,开始测试时,PC 会根据测试电缆的长度设定适宜的高斯脉冲波时宽;然后,由高斯脉冲发生器接受时宽设定值后输出作为测试信号的高斯脉冲波,测试信号经过 T 形连接器后进入电缆,在电缆的故障处产生反射波,反射波信号和测试信号都途经 T 形连接器后被示波器采集并保存;最后,示波器将保存的测试信号和反射波信号传输给 PC 进行分析。

由于所做实验中测试电缆长度较短,仅有 40 m,因此高斯脉冲波时宽设置为 16 ns。通过测试得到实测的低压脉冲波测试波形如图 7 所示,同样为了方便分析,已将低压脉冲波测试波形的时间横轴乘

以电磁波波速得到距离横轴。从图 7 中可以看出,由于 A、B 位置处均存在电缆故障,因此低压脉冲波测试波形曲线中 A、B 位置处均出现了反射信号,但是该反射信号的幅值受到故障严重程度和电缆中衰减效应的影响,因此反射信号的幅值较低,峰值位置不突出,难以准确定位电缆故障,当故障的严重程度减轻时,该现象会进一步加剧。

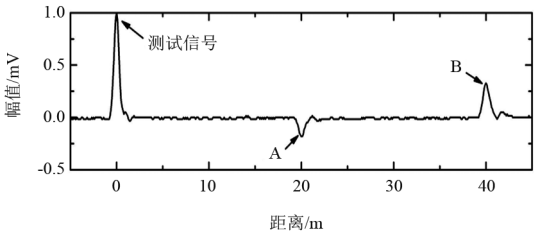


图 7 实际电缆的低压脉冲法测试波形

利用所提短时互相关算法对图 7 中低压脉冲法测试波形进行处理,得到绝对互相关系数序列曲线如图 8 所示。从图 8 中可以看出,由于电缆中 A、B 位置存在故障,因此绝对互相关系数序列曲线中 A、B 对应位置处出现了明显的异常峰值,相对于低压脉冲波测试波形曲线而言,两处峰的幅值和陡度明显增加,峰值位置更加突出,故障的反射信息被放大,使故障定位更加容易。综上所述,实测结果也说明了所提方法可以有效地放大低压脉冲法测试波形中故障的反射信息,便于电缆故障定位。

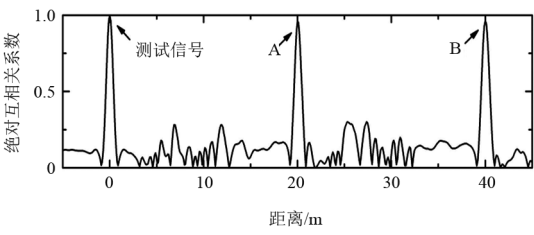


图 8 实际电缆的绝对互相关系数序列曲线

4 结 论

1)上面提出了将短时互相关算法应用于低压脉冲法的电缆故障定位技术中。该方法首先截取短时参考信号,然后将短时参考信号进行时移后与低压脉冲测试波形求取绝对互相关系数序列曲线,最后读取绝对互相关系数序列曲线的峰值位置来定位电缆故障。

2)传统的低压脉冲法测试波形中反射信号幅值较低,峰值位置不突出,难以准确定位电缆故障,

绝对互相关系数序列曲线可以有效提升故障处异常峰的幅值和陡度,便于电缆故障定位。

3) 仿真和实测结果表明,所提方法可以有效提升对低压脉冲法中反射信息的识别能力,提高对电缆故障的定位能力。

参考文献

[1] 饶显杰,周凯,汪先进,等. 基于改进 SVD 算法的局部放电窄带干扰抑制方法[J]. 高电压技术, 2021, 47(2): 705-713.

[2] 高树国,刘贺晨,范辉,等. 考虑波速特性的小波变换模极大值法的电力电缆局部放电定位研究[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 2244-2250.

[3] 王丹阳,唐健钧,陈讴,等. 基于时域反射法的航空电缆故障定位技术研究[J]. 航空制造技术, 2019, 62(S2): 84-88.

[4] 李露. 船用电力电缆故障诊断的仿真研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.

[5] 杨帆,曾莼,阮羚,等. 中压交联电缆接头复合界面受潮缺陷的诊断方法研究[J]. 高压电器, 2014, 50(5): 1-5.

[6] 余坤,赫志伟,王善民,等. 基于低压脉冲法的电力

.....

(上接第 5 页)

[6] 宋玉才,冯智慧. 架空电力线路导线断股原因分析及预防措施[J]. 电工技术, 2015(12): 11-12.

[7] SI Jiajun, ZHU Kuanjun. Aerodynamic analysis of bundle with six cables for UHVDC by numerical simulation based on LES[C]. Power Engineering and Automation Conference (PEAM), IEEE, 2012: 1-5.

[8] 万建成,周立宪,刘臻,等. 1000 mm² 大截面导线用防振锤设计[J]. 电力建设, 2011, 32(1): 94-98.

[9] LIU S, SUN N, YIN Q, et al. Study of new vibration suppression devices for application to EHV transmission line groundwires[J]. Energy Procedia, 2011(12): 313-319.

[10] 赵颖越. 我国南北气候分界线对全球变化的响应[D]. 成都: 四川师范大学, 2019.

[11] 全国架空线路标准化技术委员会. 防振锤技术条件和试验方法: DL/T 1099—2021[S]. 北京: 中国电力出版社, 2021.

[12] 程敏杰,王建文. 利用机器视觉的直齿轮在线测量方法研究[J]. 机械设计, 2020, 37(3): 19-22.

[13] 王刚,彭商贤,黄时聪,等. 一种非接触式机器人位姿精度测量系统[J]. 机械设计, 1992, 9(6): 37-38.

[14] 谢源,康双扬. 基于四目白光视觉的蜗杆压力角检测研究[J]. 机械设计, 2021, 38(6): 70-74.

电缆外力破坏检测技术研究[J]. 四川电力技术, 2017, 40(4): 48-52.

[7] 陈伟,王谦,吴高林,等. 基于时域脉冲反射的高压电力电缆测长技术研究[J]. 中国仪器仪表, 2020(8): 83-87.

[8] 李启飞,温玮,韩蕾蕾,等. 基于短时互相关算法对航空磁异常信号的检测[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(6): 178-183.

[9] 孟佳彬,李智华,吴春华,等. 基于 SSTDR 的光伏系统对地故障检测方法[J]. 太阳能学报, 2020, 41(10): 109-118.

[10] 白春乐,马娇. 一种基于互相关系数的白噪声不相关性检验方法[J]. 机械设计与制造工程, 2018, 47(10): 67-69.

[11] 谢敏,周凯,赵世林,等. 新型基于反射系数谱的电力电缆局部缺陷定位方法[J]. 电网技术, 2017, 41(9): 3083-3089.

[12] 尹振东,王莉,陈洪圳,等. 增广时频域反射法在电缆复合故障检测中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(23): 7760-7773.

作者简介:

周 涛(1984),男,工程师,主要从事电气设备试验和故障诊断方面的工作。 (收稿日期:2022-07-15)

.....

[15] 陈嘉麟,李金奎. 光纤复合架空地线的防振[J]. 电力系统通信, 2006, 27(9): 6-9.

[16] 王藏柱,杨晓红. 输电线路导线的振动和防振[J]. 电力情报, 2002(1): 69-70.

[17] 刘胜春,王景朝,吴建生,等. 500 kV 大跨越四分裂导线及地线防振试验研究[J]. 振动、测试与诊断, 2007(4): 332-336.

作者简介:

刘敬华(1977),男,教授级高级工程师,研究方向为电网设备运维管理;

赵 彬(1987),男,博士,高级工程师,研究方向为电网风振防治;

邹 赫(1985),女,博士,经济师,研究方向为对外直接投资、电力设备技术经济性评价;

李 鹏(1984),男,博士,高级工程师,研究方向为电网风振防治;

李孟轩(1991),男,博士,高级工程师,研究方向为电网智能感知与传感;

汉京善(1992),男,硕士,工程师,研究方向为人工智能技术;

杨 知(1992),男,博士,高级工程师,研究为输电线路防灾减灾。

(收稿日期:2022-07-20)

CQ6 型气动操动机构断路器合后即分故障分析

黄楷敏

(深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要:电网正常运行时,断路器为电网的安全提供了重要保障。气动操作机构是断路器的重要组成部分,操作机构的可靠性很大程度上影响了断路器的可靠性,保证气动操作机构的可靠性非常重要。文中对西安西电开关有限公司的 GIS 设备断路器配备 CQ6 型气动操动机构存在合闸即刻跳闸的现象,从电气回路、机构机械传动、零部件材料检测等多方面进行综合分析,剖析了机构缺陷的根本原因。最终得出机构分合操动异常情况与机构零部件材料及设计基本无关,主要原因在于分闸铁芯复位弹簧过短且弹力不足,并提出了处理防范措施,供同行参考。

关键词:气动机构; 合后即分; CQ 型气动机构

中图分类号:TM 561.1 文献标志码:B 文章编号:1003-6954(2023)01-0059-03

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230111

Fault Analysis on Instant Opening after Closing of CQ6 Pneumatic Operating Mechanism for Circuit Breaker

HUANG Kaimin

(Shenzhen Electric Power Supply Bureau Co., Ltd., Shenzhen 518000, Guangdong, China)

Abstract: During the normal operation of power grid, the circuit breaker provides an important guarantee for the safety of power grid. Pneumatic operating mechanism is an important part of circuit breaker, and the reliability of operating mechanism greatly affects the reliability of circuit breaker. So it is very important to ensure the reliability of pneumatic operating mechanism. Aiming at the phenomenon of instant opening after closing of CQ6 pneumatic operating mechanism for circuit breaker of GIS equipment manufactured by Xi'an Xidian Switchgear Co., Ltd., the root causes of mechanism defects are analyzed from the aspects of electrical circuit, mechanism mechanical transmission, parts and materials detection and so on. Finally, it is concluded that the abnormal opening and closing operation of the mechanism has nothing to do with the parts, materials and design. The main reason is that the return spring of opening iron core is too short and the elastic force is insufficient. The treatment and preventive measures are put forward for reference.

Key words: pneumatic mechanism; instant opening after closing; CQ type pneumatic mechanism

0 引言

断路器在电网安全运行中起着举足轻重的作用^[1-3]。气动操作机构是断路器的重要组成部分,操作机构的可靠性很大程度上影响了断路器的可靠性^[4-6]。操作机构可分为弹簧操动机构、液压操动机构结构、电磁操动机构结构、气动操动机构结构等^[7-10]。其中,气动操动机构有机构简单、动作可靠、磨损小、稳定性高和噪声大的特点。此外,设备还配有防跳跃功能的机构,也不存在慢分和慢合的

问题^[7-8]。但在实际运行中也会出现一些问题,例如气动操动机构的压缩空气中含有水分和杂质,压缩空气会使水分进入工作缸、控制阀和储气罐,使零部件锈蚀,进而使机构动作不灵活,严重时会降低气动操作机构的可靠性,容易发生拒动现象^[4]。由于密封要求高,最常见缺陷就是漏气致使频繁打压或无法减压,导致断路器闭锁操动^[11-13]。

为了解决这些问题,一些学者展开了相关研究。文献[4]提出给气动操作机构加装气水分离装置来减小空气水分对气动操作机构稳定性的影响。文献[14]从投资费用、经济效益及设备改造效果等方

面综合考虑,提出购买一组新操作机构,用新机构换下旧机构并送去检修,将检修好的机构更换另外的旧机构,再检修另外的旧机构,以此来解决 CQ6 型气动操动机构故障频繁的现象。

此次遇到的合后即分现象较为少见,针对此缺陷,从电气回路、机构机械传动、零部件材料检测等多方面进行了综合分析,一步一步剖析了机构缺陷的根本原因。

1 设备情况

某站 220 kV 某线路 2371 断路器在备自投投入时发现,该间隔断路器 C 相机合后即分,无法保持合闸状态。查询同型号断路器历史缺陷,近期也发生过该缺陷,当时紧急处理方式更换分闸控制阀。该断路器由西安西电开关有限公司生产,型号为 250-SFMT-40B,配套 CQ6 型气动机构,于 2002 年投运,设备主要铭牌参数如下:

型号	250-SFMT-40B
额定电压	220 kV
额定电流	2000 A
额定频率	50 Hz
额定短路开断电流	50 kA
额定操作压力	0.5 MPa(20 ℃)

2 缺陷处理及分析

2.1 电气回路检查

就地控制柜合闸,观察机构动作情况。C 相机可完成合闸动作后即刻分闸。在断开控制电源的状态下,确认线圈两端均无电压;解除分闸线圈两端接线,采用手动合闸线圈,机构仍出现合后即分现象。由此可排除在合闸过程中,分闸控制回路串电导致机构偷跳,即可排除二次电气回路导致机构合后即分。

2.2 机构机械传动检查

2.2.1 CQ6 型气动操动机构动作原理

CQ6 型气动操动机构是一种以压缩空气为动力进行分闸操动,以合闸弹簧为合闸力的高压断路器操动机构。分闸时,压缩空气推动活塞,活塞推动活塞连杆(动触头连杆)完成分闸动作,同时为合闸弹簧储能;合闸时,合闸弹簧推动活塞与活塞连杆(动

触头连杆)完成合闸动作。

在分闸位置时,合闸脱扣模块状态如图 1 所示。合闸线圈励磁后,合闸线圈的铁芯向下运动,带动铁芯连杆撞击脱扣掣子,脱扣掣子与分闸保持掣子的啮合被触脱,分闸保持掣子解脱后,活塞连杆和触头在合闸弹簧力的作用下向上运动,从而合闸。

在合闸位置时,分闸脱扣模块状态如图 2 所示。分闸线圈励磁后,分闸线圈的铁芯向下运动,撞击掣子 2,掣子 2 与掣子 1 间的啮合就被释放。当被解脱时,圆柱阀便不受约束而靠弹簧力打开。此时储气罐中的压缩空气流入气缸,使活塞向下运动,带动触头分闸。在分闸过程的末期,圆柱阀又被与活塞连在一起的凸轮拐臂压回最低端并被掣子 1 锁住,气缸内的压缩空气通过排气口排出,销钉“A”被分闸保持掣子锁住,断路器被保持在分闸状态。

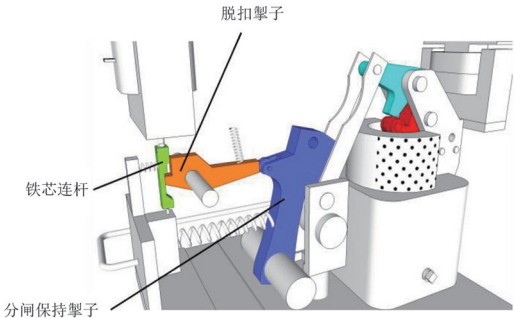


图 1 合闸脱扣模块(分闸位置)

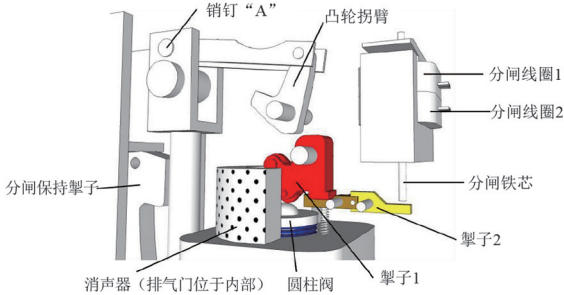


图 2 分闸脱扣模块(合闸位置)

2.2.2 缺陷部位排查

通过合闸动作原理可知,在机构完成合闸后,分闸控制阀中的圆柱阀在掣子 1 与掣子 2 啮合的作用下,保持关闭压缩空气通路,断路器在合闸弹簧的作用下保持合闸状态。初步怀疑掣子 2 未能啮合住掣子 1,导致圆柱阀未能关闭压缩空气通路,使压缩空气再次进入气缸实现分闸。

借用慢速拍摄机构拍摄合后即分的动作过程以及正常合闸的动作过程。通过慢放视频发现,在合闸脱扣后,C 相机机构实际已完成合闸动作,但掣子 2

未能啮合住掣子 1,从而掣子 1 未能压住圆柱阀,贮气缸内的压缩空气流入气缸将活塞向下推,使机构即刻分闸。

在视频内发现分闸铁芯存在动作触碰掣子 2,影响掣子 1 与掣子 2 的啮合。进一步怀疑原因为分闸间隙过小、掣子 2 复位弹簧力不足或分闸铁芯晃动使分闸脱扣器脱扣。

首先,检查分闸间隙,采用间隙尺分别测量三相机构分闸铁芯与掣子 2 的间隙,A、B、C 分别为 0.8 mm、0.7 mm、0.7 mm,满足厂家标准(0.5~0.9 mm),可排除分闸间隙过小导致分闸铁芯撞击掣子 2。

进步一确认原因,将分闸铁芯临时卡住防止晃动,手动按合闸线圈,机构能够顺利完成合闸。经多次试验,机构未再出现合后即分现象。通过慢速摄影检查,分闸铁芯卡住后,掣子 1 与掣子 2 可以完全啮合,圆柱阀正常关闭。从而可以排除掣子 2 复位弹簧力不足。

进一步排查故障原因是否为合闸过程中分闸铁芯晃动影响掣子 1 与掣子 2 的机械配合,检查分闸驱动模块,发现 C 相分闸线圈存在明显晃动,A、B 相分闸线圈相对稳固。在稳固分闸线圈后再试验检查,机构能正常合闸,但在多次试验后,仍出现多次合后即分的现象。在偶然合闸成功状态下,检查掣子 1 与掣子 2 的啮合情况,与正常机构(图 3)对比,发现啮合不完全,因此线圈晃动不是主要原因造成分闸铁芯晃动。

由此可确认故障原因为合闸冲击产生的振动,促使分闸铁芯在重力作用下推动掣子 2。

分闸铁芯晃动情况与分闸铁芯复位弹簧弹力有关,怀疑复位弹簧弹力不足导致铁芯晃动较大。对分闸线圈模块解体,检查复位弹簧,由于现场没有相关弹力测量仪器,与新弹簧以及 A、B 两相复位弹簧进行对比,发现 C 相复位弹簧但明显短于其他复位弹簧(见图 4)。咨询厂家标准,正常复位弹簧长度为 34~36 mm,而 C 相复位弹簧仅有 30 mm。更换新复位弹簧,调整为原有的分闸间隙,多次试验结果均正常合闸,掣子 1 与掣子 2 正常啮合,同时开展断路器特性试验,数据合格,故障消除。

2.3 厂内检测零部件

为进一步检查分闸控制模块零部件是否存在工艺问题,检修人员与厂家一起对原更换的相关零部件进行检查及尺寸检测,检测结果如下:

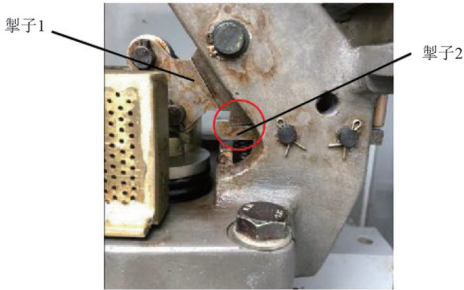


图 3 掣子 1 与掣子 2 正常啮合实物



图 4 分闸铁芯复位弹簧

1)分闸铁芯过重或过长,在合闸冲击下产生的振动造成误动。于是对分闸电磁铁的铁芯的重量和操动杆尺寸测量,结果均符合厂家标准要求。

2)分闸铁芯在多次励磁后,存在剩磁,在合闸冲击下产生的振动造成误动。对铁芯的材料进行化验及漏磁试验,结果均符合相应标准要求。

3)掣子 1 与掣子 2 在多次机构动作下,存在磨损或尺寸不满足要求,导致啮合不到位。于是解体掣子 1 与掣子 2(见图 5),并进行尺寸检测,检查结果符合装配要求。



图 5 掣子 1 和掣子 2 解体

4)分闸控制阀圆柱塞尺寸不满足要求,导致无法关闭压缩空气通路。对控制阀的关键部件进行解体检查,并对其尺寸进行检测,检查结果符合装配要求。

2.4 小 结

以上综合分析,机构分合操动异常情况与断路

(下转第 82 页)

一种高精度优化 Faster-RCNN 变电站安全帽检测方法

张彦凯¹, 余飞鸿^{2,3}, 夏 岩^{2,3}, 刘 勇^{2,3}, 张 蕊^{2,3}

(1. 兰州陇能电力科技有限公司, 甘肃 兰州 730000; 2. 四川轻化工大学自动化与信息工程学院, 四川 宜宾 644000; 3. 智能电网四川省重点实验室, 四川 成都 610095)

摘 要:针对传统变电站人工视频安全帽检测效率低和错误率高的问题,文中提出了一种优化的高精度 Faster-RCNN 安全帽检测方法。首先,以 RPN 为主干网络引入特征金字塔,增强检测算法浅层和深层信息表征能力;接着,引入 K-Means++ 聚类算法优化 Anchor 参数,提升网络对小目标的检测能力;然后,以 ROI Align 代替 RoI 池化,消除量化误差和原始图片与特征图的映射偏差,从而提高检测精度;最后,采用开源安全帽数据集对改进的网络进行训练与测试,并将该模型与 YOLOv3、RFBnet 和传统 Faster-RCNN 进行了对比。实验结果表明:优化的 Faster-RCNN 相比 RFBnet、YOLOv3 和传统 Faster-RCNN 模型,将 mAP 值分别提高了 6.81%、9.57% 和 5.09%,达到了 92.43%;检测速度为 18 frame/s,同时增强了变电站安全帽高精度识别能力。

关键词:变电站; 目标检测; Faster-RCNN; K-Means++ 聚类; ROI Align

中图分类号: TB 115 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2023)01-0062-07

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230112

A Detection Method for Safety Helmet in Substation Based on Improved High-precision Faster-RCNN

ZHANG Yankai¹, YU Feihong^{2,3}, XIA Yan^{2,3}, LIU Yong^{2,3}, ZHANG Rui^{2,3}

(1. Lanzhou Longneng Electric Power Science & Technology Ltd., Lanzhou 730000, Gansu, China; 2. School of Automation and Information Engineering, Sichuan University of Science & Engineering, Yibin 644000, Sichuan, China; 3. Intelligent Electric Power Grid Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610095, Sichuan, China)

Abstract: Aiming at low efficiency and a high error rate of safety helmet detection in substations by the traditional manual video detection method, a helmet detection method based on the improved high-precision Faster-RCNN is proposed. Firstly, the feature pyramid network module is introduced into the RPN backbone network, so that the representation ability of shallow semantic information and deep semantic information are enhanced. Secondly, the K-Means++ clustering algorithm is introduced to improve the anchor parameters, so that the ability to detect small targets is enhanced. And then, RoI pooling is replaced by ROI Align to eliminate the quantization error and the mapping deviation between original image and feature map, thereby improving the detection accuracy. Finally, the open source dataset of safety helmet is used to train and test the improved network, and the model is combined with YOLOv3, RFBnet and traditional Faster-RCNN. The results show that compared with RFBnet, YOLOv3 and traditional Faster-RCNN models, the improved Faster-RCNN increases the mAP value by 6.81%, 9.57% and 5.09%, which reaches 92.43%, and the detection speed is 18 frame/s, which can enhance the high-precision recognition ability of safety helmets in substations.

Key words: substation; edge detection; Faster-RCNN; K-Means++ clustering; ROI Align

0 引 言

变电站巡检、输电线路巡检有很多繁杂、重复的

工作,线路、设备运行维护检修工作量大^[1]。电力系统的稳定性和安全性直接受变电站的影响,随着电力行业的不断发展,电力现场作业人员面临着越来越复杂的安全隐患。操作人员在变电站事故中受伤常见原因之一是未佩戴安全帽,GB 26860—2011

《电力安全工作规范发电厂和变电站电气部分》^[2]中明确指出“采用绝缘手套作业法或绝缘操作杆作业法时,应当根据作业方法选用人体绝缘防护用具,使用绝缘安全带、绝缘安全帽”。检测安全帽佩戴安全,传统的人工视频检测不仅费时费力,而且极可能存在漏检的情况,在监控视频中对安全帽的佩戴情况进行实时检测是目前研究热点。

传统的基于目标图像特征提取的方法,泛化能力较差^[3],对于不同情况需要重新分析,鲁棒性较差,难以满足高性能目标检测的需求。

近年来,得益于人工智能的发展,产生了一大批优秀的目标检测方法。目前基于卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)的目标检测算法分为单阶段检测法和双阶段检测法^[4]。单阶段法基于回归策略的目标检测网络,省略了候选框生成阶段,将输入图像直接经过深度神经网络,提取特征进行预测目标的位置与类别。这种算法的特点是检测速度快,但是检测精度不高,其代表算法有 YOLO^[5]、SSD^[6]等;双阶段法是基于候选框区域(region proposal)的目标检测算法,其分为两个阶段,第一个阶段生成预选框,第二个阶段对生成预选框进行分类和回归,最后确定检测目标。这种算法的特点是检测精度高,但是检测速度较慢,其代表是有 RCNN^[7]、Fast-RCNN、Faster-RCNN 等。但是无论是单阶段检测方法还是双阶段检测方法,都对小目标检测存在困难。文献[8]提出一种基于改进 YOLOv3 的安全帽佩戴检测算法 YOLOv3-WH,在 YOLOv3 算法的基础上改进网络结构,该算法在提升了安全帽佩戴检测速率的同时提升了检测的准确率,对安全帽佩戴检测具有一定的实用性;文献[9]基于 Faster-RCNN 架构引入对手生成和多尺度训练策略对测试样本进行检测,但是数据集拍摄环境较为理想,缺少缺陷绝缘子图像。总的来说,基于深度学习的改进方法能够很好地增强传统方法在复杂环境下的鲁棒性,已经在目标检测中取得了一定的效果。

由于变电站中绝缘安全帽在电力作业环境中的重要性,但采用单阶段检测算法对绝缘安全帽进行目标检测可能会出现漏检的现象,所以检测精度比起检测速度更为重要。为了综合目标检测的检测精度与检测速度,提高对小目标的检测能力,提出一种优化的高精度 Faster-RCNN 变电站安全帽检测方法。首先,在 Faster-RCNN 算法架构上改进主干网

络添加特征金字塔,使主干网络结合底层特征与高层特征,增强底层特征语义信息;其次,使用 K-Means 聚类算法优化 Anchor 参数;最后,用 ROI Align 代替 RoI 池化,取消量化误差。通过实验对比,证明优化的 Faster-RCNN 网络对小目标安全帽能有效识别,且模型收敛速度较快,能满足智能变电站实时检测的要求。

1 Faster-RCNN 网络

Faster-RCNN 网络是在 Fast-RCNN^[10]的基础上对模型识别精度和速度的改进,如图 1 所示。该算法将传统选择性搜索算法替换为区域建议网络(regional proposal network, RPN),RPN 生成的特征图与神经网络结构的其余部分共享,这样加快了检测框的生成速度。

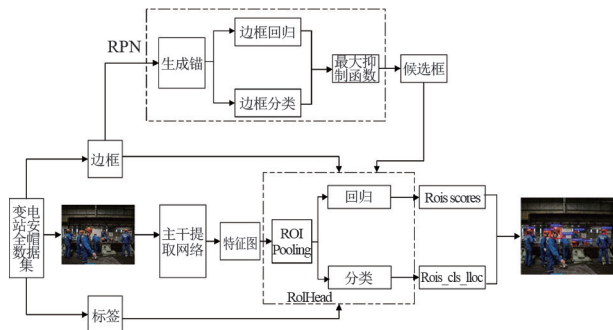


图 1 Faster-RCNN 的整体架构

1.1 主干提取网络

主干提取网络利用卷积层提取出整个图片的特征图,原始 Faster-RCNN 的主干提取网络可以是 VGG-16、ResNet-101 或定制网络。这里使用 VGG-16,网络结构包括 13 个卷积层、3 个全连接层、5 个池层。与其他网络相比,VGG-16 中包含的 13 个卷积层所使用的卷积核是一个中等大小的 3×3 矩阵。卷积核数由第一层的 64 个逐渐增加到 128~256 个,最后增加到 512 个。池化层的卷积核的大小为 2×2 ,步长为 2。与 5×5 的网络相比,该网络提取的特征图更优。

1.2 RPN

RPN 主要由 CNN、一组锚和一个 region proposal layer 组成,取代 Fast-RCNN 算法中的选择性搜索方法,生成候选框区域,它用于生成可能包含对象的感兴趣区域,RPN 结构如图 2 所示。利用 RPN 来获得区域建议可以更快更有效地利用 CNN 网络。主要可分为两个步骤:首先,RPN 在生成区域建议时生

成锚点,最大抑制函数确定锚点是否为前景,softmax 二分类与真实数据进行对比来确定时前景还是背景;然后,通过边界回归调整锚点,得到准确的区域。最大抑制函数不会损害最终检测的准确性,而且会大幅减少建议的数量。

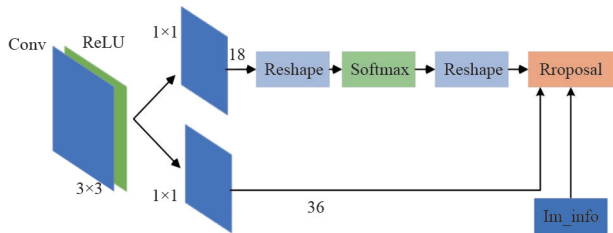


图 2 RPN 结构

1.3 Anchor 定义

锚是一个不同大小的盒子,帮助检测不同大小的物体。在 Faster-RCNN 的默认配置中,有 3 个不同的大小和 3 个不同的比率,共有 9 个锚,计算 p^* 的值来检查这些锚点与真实边界盒的重叠程度。如果 I_{ou} (测量真实和预测之间的相关度) 大于 0.7,则锚点被标记为正的;如果 I_{ou} 小于 0.3,则锚点被标记为负的。

1.4 损失函数

多任务损失函数将分类损失和回归损失结合起来,其损失函数^[11]为

$$L\{(p_i), (t_i)\} = \frac{1}{N_{cls}} \sum_i L_{cls}(p_i, p_i^*) + \lambda \frac{1}{N_{reg}} \sum_i p_i^* L_{reg}(t_i, t_i^*) \quad (1)$$

式中: p_i 为预测框是前景的概率; p_i^* 为预测框预测正确的概率; t_i 为预测框的边界参数; t_i^* 为前景目标的真实标注框边界参数; N_{cls} 和 N_{reg} 分别为分类的个数和回归区域的个数; i 为锚点的编号; λ 为平衡两个损失函数在训练的总损失函数中的比例; L_{cls} 为分类损失函数,其表达式如式(2)所示; L_{reg} 为回归损失函数,其表达式如式(3)所示。

$$L_{cls}(p_i, p_i^*) = -\lg[p_i^* p_i + (1 - p_i^*)(1 - p_i)] \quad (2)$$

$$L_{reg}(u_i, t_i^*) = \sum_{i \in \{x, y, w, h\}} S_{L_1}(t_i, t_i^*) \quad (3)$$

$$S_{L_1}(x) = \begin{cases} 0.5x^2 & \text{if } |x| < 1 \\ |x| - 0.5 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

式(4) $S_{L_1}(x)$ 为平滑方程。 $i \in \{x, y, w, h\}$ 分别表示安全帽候选框的中心坐标、高和宽。网络最后通过 RoI 池化层处理不同大小的特征映射输入到全连通层网络,分类层负责判断对象属于哪个类,而回归层

对感兴趣区域的位置进行精细调整,得到最终的目标检测结果。

2 优化的高精度 Faster-RCNN 变电站安全帽检测方法

2.1 特征金字塔

RPN 设计中,一个检测框在单尺度卷积特征映射的基础上,在密集的 3×3 滑动窗口上进行评估,执行目标/非目标二分类和回归,通过一个 3×3 的卷积层和两个 1×1 的分类与回归的卷积来实现的,其结构如图 3 所示的原 RPN 结构。RPN 生成包含背景的区域,而不是目标实例,多次下采样后得到的是拥有高层特征的语义信息,而前几次下采样中的低层高分辨率信息被忽略;采用 Anchor 锚机制时候选框设置的尺度不适用于所有目标,所以在处理非常大或者有形状的目标时效果不好,尤其对小目标检测效果不好。

为了使检测方法更精确,构建一个具有高级语义的特征金字塔,拟引入 FPN 来调整 RPN。在特征金字塔的每一层都附加了一个相同的 3×3 卷积和两个 1×1 卷积,如图 3 所示。因为顶部在所有金字塔级别的所有位置上密集滑动,所以不需要在特定级别上有多尺度锚,而是给每个级别分配一个单一级别的锚,将金字塔上的锚增加到 15 个,增强检测算法浅层和深层信息表征能力。

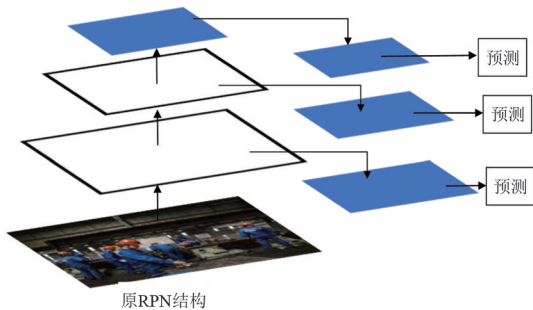


图 3 特征金字塔

2.2 K-Means++ 聚类优化

由于绝缘安全帽的大小不一,传统 Faster-RCNN 检测算法尤其对小目标安全帽检测不佳。故采用 K-Means++ 算法模型^[11],将获取图片的真实框的长度和宽度送入 K-Means++ 算法模型中,聚类中心数量设置为 4~7,并进行聚类运算,对聚类效果图进行比较后确定最后的修改预选候选框参数,从而提高

对小目标的检测能力,采用 CH 指标^[12]作为评估 K-Means++算法的最佳聚类数指标,其定义为

$$C_H(k) = \frac{B}{k-1} / \frac{W}{N-k}$$

(5)

式中: B 为类间离散度矩阵的迹; W 为类内离散度矩阵的迹; k 为当前的类; N 为聚类的数量,即总记录数。从式(5)可以看出, C_H 值越大,簇与簇之间就越分散,其聚类效果越好。不同 k 值聚类结果用于评估如表 1 所示。由表 1 可知,当 k 值等于 6 时, C_H 指标最大,簇与簇之间就越分散,聚类效果最好。因此 (23.37,29.39)、(42.81,53.65)、(69.21,86.92) 小尺寸特征图的感受野面积较大,故可以检测较大的安全帽目标;(104.52,129.69)、(160.38,197.53)、(258.92,309.23)大尺寸特征图的感受野面积较小,故可以检测较小的安全帽目标。

表 1 不同 k 值聚类结果

k 值	中心点坐标	C_H 指标
4	(61.53,77.15) (28.61,35.89)	6 376.2
	(212.62,258.23) (117.24,145.22)	
	(257.63,308.47) (90.64,113.21)	
5	(50.20,63.04) (155.07,190.57)	7 832.4
	(25.69,32.22)	
	(258.92,309.23) (42.81,53.65)	
6	(69.21,86.92) (23.37,29.39)	8 932.8
	(160.38,197.53) (104.52,129.69)	
	(173.67,213.49) (267.07,318.52)	
7	(36.56,45.62) (20.82,26.31)	8 632.7
	(84.43,105.16) (122.68,152.45)	
	(55.40,69.70)	

2.3 引入 ROI Align

传统的 Faster-RCNN 模型不限制任何图片输入大小,原因是候选框区域经过 RoI 池化层会被映射成固定大小的特征图。RoI 池化层采用近邻插值法对特征进行池化^[13],经过两次将浮点数量化取整,这些量化在 RoI 和提取的特征之间引入了差异,造成精度损失,最后造成回归定位不准确,对于小目标检测影响更大。ROI Align 理论^[14]利用双线性插值法进行插值,取消取整量化,而保留浮点数,避免取整带来的精度损失,以提高空间对称性带来的量化偏差,保证提取的特征与输入特征对齐。在图 4 中,图中实线表示 RoI(2×2 个 bins),点表示每个 bin 中的 4 个采样点,其中每个采样点的值都是通过双线性插值从特征图上的邻近网格点计算的,不对 RoI、bins 或采样点涉及的任何坐标进行量化,使得候选区域信息得到全部利用,从而提高检测精度。

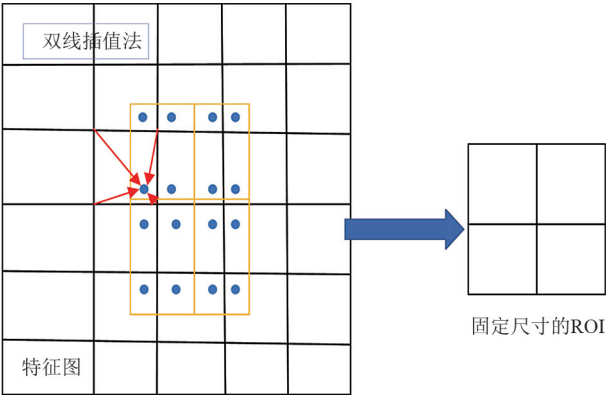


图 4 ROI Align

3 算例分析

3.1 实验环境与数据集处理

本实验编程语言为 Python3.6,使用 Anaconda3、CUDA 和 Pycharm 等软件在高性能服务器上搭建实验环境,服务器搭载的高性能 GPU 可以最大程度地缩短实验训练时间,深度学习开发框架选用 Tenors-Flow,操作系统为 64 位 Windows10 专业版,更多硬件配置如表 2 所示。

表 2 服务器硬件配置

类别	数量	型号
主板	1	超微 X0DRG-Q
内存	1	镁光 256GB
硬盘	1	2TB
CPU	1	Inter Xeon
GPU	4	Nvidia TITAN XP

实验数据是深度学习的基础,本实验数据集为 Github 开源安全帽图片^[15],选取 3174 张各种场景的图片,使用 Github 开源标记工具 Labelimg 对每张图片标注出安全帽区域及其标签,生成 XML 文件。标注数据信息如下:按安全帽的颜色分别进行标注为 red、yellow、white 和 blue;未佩戴安全帽标注为 none。将标注完成的数据集分为互斥的训练集、验证集和测试集,其比例为 7 : 1 : 2,如表 3 所示。其中 2219 张是训练集,317 张是验证集,638 张是测试集。在整个标记过程中,标记目标总数为 10 307 个,其中 red 目标有 3578 个,yellow 目标有 3274 个,white 目标有 2193 个,blue 目标有 2253 个,none 目标有 1262 个。

在实验之前,为了避免数据不足出现模型过拟合的情况,对实验数据进行图片镜像变换、旋转等处

表 3 数据集分配

标记名称	标记总数	训练集标记数	验证集标记数	测试集标记数
red	3578	2804	357	417
yellow	3274	2289	413	572
white	2193	1245	355	593
blue	2253	1475	402	376
none	1126	743	165	354

理。实验参数设置如下:初始学习率设置为 0.001,采用 $\gamma=0.1$ 的 Steps 学习率调整方法;权重衰减设置为 0.000 5;动量为 0.9;批训练数据量为 256;最大迭代次数为 40 000。模型训练时间大约 7 h,直到训练误差收敛。为验证所提算法模型的可靠性和有效性,在同样的实验环境训练 RFBnet^[16]、YOLOv3^[17]和传统 Faster-RCNN 网络,便于后面在测试集上与优化的 Faster-RCNN 进行对比。

3.2 模型评估方法

本实验采用平均精确度均值^[18](mean average precision, mAP)和检测速度^[19](frame per second, FPS)作为评价模型性能指标,mAP 和 FPS 越大分别表示模型的精度越高、实时性能越好。其中 mAP 为表 3 中 5 个类别的平均精度(average precision, AP),而 A_p 是精确率(P)-召回率(R)曲线($P(R)$)与坐标轴所围成区域的面积,其表达式为:

$$P = \frac{T}{T + F} \tag{6}$$

$$R = \frac{T}{T + M} \tag{7}$$

$$A_p = \int_0^1 P(R) dR \tag{8}$$

$$m_{AP} = \frac{\sum_{t=1}^N A_{p_t}}{N} \tag{9}$$

式中: $T+F$ 为检出安全帽总数; $T+M$ 为真实安全帽总数; T 为正确检测出安全帽的个数; N 为类别数。后续工作都是以此为基础进行的。

3.3 实验结果与对比

首先,选取 4 张具有代表性的测试图片分别输入到 RFBnet、YOLOv3、传统 Faster-RCNN 和所提优化的 Faster-RCNN 模型中进行检测,将检测结果进行对比,如图 5 所示。在图 5(a)中安全帽存在环境较为清晰,RFBnet 和优化的 Faster-RCNN 模型检测结果都比较理想,而 YOLOv3 的检测结果不佳,漏检 3 个对象(如图中黄色箭头指向处,下同),传统 Faster-RCNN 将一个红色物体错检为红色安全

帽。在图 5(b)场景复杂,存在遮挡、重叠的现象,RFBnet 和 YOLOv3 都出现了漏检 2 个对象的情况,传统 Faster-RCNN 在遮挡、重叠的场合漏检 2 个未佩戴安全的工人,而优化的 Faster-RCNN 检测结果比较理想,这表明在一定程度上优化的 Faster-RCNN 的模型提高了对遮挡、重叠的复杂场景的适应力。在图 5(c)中存在一些小目标安全帽目标,RFBnet、YOLOv3 和传统 Faster-RCNN 都出现了不同程度的漏检,而优化的 Faster-RCNN 检测出全部小目标,检测效果理想,这表明 K-Means++ 聚类算法的引入提高了对小目标的检测能力。在图 5(d)中场景有着一定的虚化,对检测带来一定的干扰,RFBnet 和优化的 Faster-RCNN 检测结果理想,YOLOv3 和传统 Faster-RCNN 存在漏检。

为了更进一步说明优化的 Faster-RCNN 模型的检测效果,最后使用上述安全帽数据集选出的 638 张测试集对以上 4 种方法分别进行测试,从 P 、 R 、mAP、FPS 和模型参数量等方面来论述改进效果,指标测试结果如表 4 所示。

表 4 指标测试结果

模型类型	测试集	$P/\%$	$R/\%$	mAP/ %	FPS/ (frame · s ⁻¹)	参数量/ MB
RFBnet		91.32	86.84	85.62	14	137
YOLOv3		90.78	83.63	82.86	21	246
传统 Faster-RCNN	638	91.56	88.74	87.34	15	131
所提算法		91.90	92.52	92.43	18	128

在 mAP 上,优化的 Faster-RCNN 优于 RFBnet、YOLOv3 和传统 Faster-RCNN 模型,分别将 mAP 值提高了 6.81%、9.57%和 5.09%;在检测速度方面,优化的 Faster-RCNN 比 RFBnet 和传统 Faster-RCNN 分别提高了 28%和 20%,且所提算法具有良好的 P 和 R 指标,但是相比于 YOLOv3 降低了 16%。另外,本模型的参数量最低,可以节省大量的内存空间,其原因一方面是 Faster-RCNN 的优化模型提高了对遮挡、重叠的复杂场景的适应力;另一方面是 K-Means++ 聚类算法改进锚的参数对小目标的检测起了一定的作用。最后,优化的 Faster-RCNN 相较于传统的 Faster-RCNN 提高了检测精度和检测的实时性。

4 结 论

为了提高智能变电站安全帽的检测能力,提出

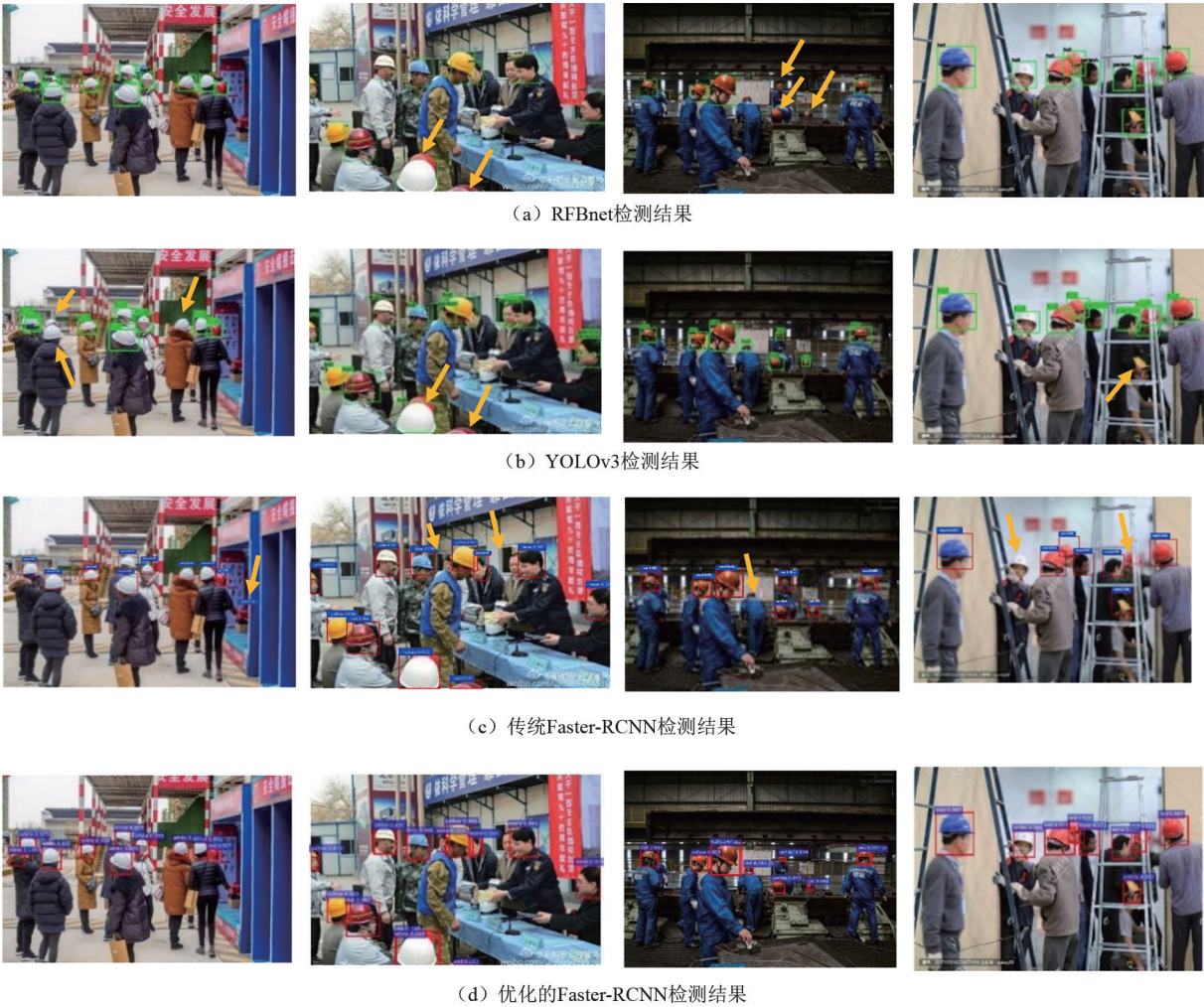


图 5 部分测试结果

了优化 Faster-RCNN 变电站安全帽的检测方法。通过构建特征金字塔模块、引入 K-Means++聚类算法和 ROI Align,提高了模型对作业环境中安全帽遮挡严重、重叠和图像背景虚化等的识别准确率。经过实验验证,优化后的检测算法 mAP 值达 92.43%,检测速度 18 frame/s,有效地提高了检测精度和对小目标的检测能力,并降低了参数量,增强了智能变电站的态势感知能力。此外,提高所提出的优化 Faster-RCNN 的检测速度,是后续的研究目标。

参考文献

[1] 张凌浩,潘文分,庞博,等.适用于电力场景的人工智能中台技术与探索[J].四川电力技术,2022,45(3): 16-22.

[2] 全国高压电气安全标准化技术委员会.电力安全工作规程 发电厂和变电站电气部分:GB 26860—2011[S].北京:水利水电出版社,2011.

[3] 储岳中,黄勇,张学锋,等.基于自注意力的 SSD 图像目标检测算法[J].华中科技大学学报(自然科学版), 2020,48(9):70-75.

[4] 许德刚,王露,李凡.深度学习的典型目标检测算法研究综述[J].计算机工程与应用,2021,57(8):10-25.

[5] REDMON J,DIVVALA S,GIRSHICK R B,et al.You only look once: unified, real-time object detection [C]// Proceedings of the 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), Las Vegas, USA,2016:779-788.

[6] LIU W,ANGUELOV D,ERHAN D,et al.Ssd:single shot multibox detector [C]//European conference on computer vision,Cham,Switzerland,2016:21-37.

[7] GIRSHICK R B,DONAHUE J,DARRELL T,et al.Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation [C]//Proceedings of the 2014 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition ,Columbus ,USA ,2014:580-587.

[8] 肖体刚,蔡乐才,高祥,等.改进 YOLOv3 的安全帽佩戴检测方法 [J].计算机工程与应用,2021,57(12): 216-223.

[9] 易继禹,陈慈发,龚国强.基于改进 Faster RCNN 的输电线路航拍绝缘子检测 [J].计算机工程,2021,47(6): 292-298.

[10] REN S, HE K, GIRSHICK R B, et al. Faster R-CNN: towards real-time object detection with region proposal networks[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2015, 39(6): 1137–1149.

[11] GIRSHICK R B. Fast R-CNN[C]//Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Computer Vision (ICCV), Santiago, Chile, 2015: 1440–1448.

[12] CALJDSKI T, HARABASZ J. A dendrite method for cluster analysis[J]. Communications in Statistics, 1974, 3(1): 1–27.

[13] HE K, ZHANG X, REN S, et al. Spatial pyramid pooling in deep convolutional networks for visual recognition[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2015, 37(9): 1904–1916.

[14] HE K, GKIOXARI G, DOLLAR P, et al. Mask R-CNN[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2020, 42(2): 386–397.

[15] njvisionpower. Safety Helmet Wearing-Dataset [EB/OL]. [2022-04-15]. <https://github.com/njvisionpower/Safety-Helmet-Wearing-Dataset>.

[16] LIU S, HUANG D, WANG Y. Receptive field block net for accurate and fast object detection[C]//Proceedings

of the European Conference on Computer Vision (ECCV), 2018: 385–400.

[17] REDMON J, FARHADI A. Yolov3: An incremental improvement [J]. arXiv preprint arXiv: 1804. 02767, 2018.

[18] SHELHAMER E, LONG J, DARRELL T. Fully convolutional networks for semantic segmentation [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2017, 39(4): 640–651.

[19] SONI P, SHAH F, VYAS N. Faster object tracking pipeline for real time tracking[J]. arXiv preprint arXiv: 2011.03910, 2020.

作者简介:

张彦凯(1984), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统安全稳定分析;
余飞鸿(1998), 男, 硕士研究生, 研究方向为图像处理;
夏 岩(1983), 男, 博士, 高级工程师, 从事智能电网工作;
刘 勇(1981), 男, 实验师, 研究方向为计算机应用与人工智能;
张 蕊(1998), 男, 硕士研究生, 研究方向为图像处理。

(收稿日期: 2022-11-28)

(上接第 21 页)

3 结 论

为提升快速复电弹性, 减少极端环境造成的供电损失, 上面根据抗灾三阶段策略, 结合浙江地区在抗台风、雷电的工程项目, 在灾前阶段提出迁移电杆加强基础设施、安装拒雷器增加保护范围措施; 在灾中阶段提出“量子+北斗”智能断路器实现故障定位和偏远山区通信能力不足情况下的遥控措施; 灾后根据“量子+北斗”智能断路器实现上级电源无电情况下的黑启动, 并通过移动储能快速接入增强保电能力。

参考文献

[1] 刘瑞环, 陈晨, 刘菲, 等. 极端自然灾害下考虑信息-物理耦合的电力系统弹性提升策略: 技术分析与研究展望[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(1): 9–23.

[2] 雷潇, 许安玖, 刘强, 等. 10 kV 配电线路避雷器优化布置研究[J]. 四川电力技术, 2022, 45(4): 21–25.

[3] 阮前途, 梅生伟, 黄兴德, 等. 低碳城市电网韧性提升挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2819–2830.

[4] 高艺文, 罗凡波, 苏学能, 等. 穿越森林草原配电线路的一二次融合成套柱上开关优化布置研究[J]. 四川电力技术, 2022, 45(4): 26–31.

[5] 黄玉雄, 李更丰, 张理寅, 等. 弹性配电系统动态负荷

恢复的深度强化学习方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(8): 68–78.

[6] 别朝红, 林超凡, 李更丰, 等. 能源转型下弹性电力系统的发展与展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(9): 2735–2745.

[7] 张瑞曦, 徐青山, 程煜, 等. 极端灾害下考虑动态重构的微网形成策略[J]. 电力工程技术, 2022, 41(1): 56–63.

[8] 张国庆. 含分布式电源的智能分段开关控制器研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2019.

[9] 蔡胜, 谢云云, 张玉坪, 等. 考虑移动应急电源配置的微电网顺序恢复方法[J/OL]. 中国电机工程学报: 1–12 [2022-03-24]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20220322.2030.022.html>.

[10] 何俊, 于华, 邓长虹, 等. 极端天气下基于态势感知的重点区域电网负荷供电保障策略[J]. 高电压技术, 2022, 48(4): 1277–1285.

[11] 李宁, 安卓尔, 张世乾, 等. 弹性电网关键技术研究的进展与展望[J/OL]. 电测与仪表: 1–9 [2022-04-13]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20220412.1014.002.html>.

[12] 别朝红, 林雁翔, 邱爱慈. 弹性电网及其恢复力的基本概念与研究展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(22): 1–9.

作者简介:

樊国旗(1993), 男, 硕士, 研究方向为电力系统调度及新能源消纳。

(收稿日期: 2022-07-18)

基于机器视觉的瓦斯继电器油位异常检测

蒙媛,莫钦森,陈坤

(国网四川省电力公司广安供电公司,四川 广安 638000)

摘要:针对传统的瓦斯继电器油位异常时机械故障引起的误报警情况,文中提出基于机器视觉的瓦斯继电器油位测量方法,为瓦斯继电器油位异常检测提供一种新的方法,有效提高其工作可靠性和安全性。由于瓦斯继电器窗口内部背景复杂干扰较大,使得传统的基于图像处理液位提取方法误差很大,无法得出满意的结果。为此提出颜色空间域转换和 Canny 检测边缘结构复杂度相结合的算法,提取出瓦斯继电器油位。实验结果显示,所提算法在瓦斯继电器油位提取方面优于传统方法,满足实际工程需求。

关键词:Rect 函数;直方图均衡化;颜色空间转换;Canny 边缘检测

中图分类号:TM 731 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2023)01-0069-04

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230113

Abnormal Oil Level Detection of Gas Relay Based on Machine Vision

MENG Yuan, MO Qinsen, CHEN Kun

(State Grid Guang'an Electric Power Supply Company, Guang'an 638000, Sichuan, China)

Abstract: Aiming at the false alarm caused by mechanical fault when the oil level of traditional gas relay is abnormal, a method for measuring the oil level of gas relay based on machine vision is proposed, which provides a new method for detecting the abnormal oil level of gas relay and effectively improves its working safety. Due to the complex background and large interference in gas relay window, the traditional liquid level extraction method based on image processing has a large error and can not obtain satisfactory results. Therefore, an algorithm combining color space domain conversion and structure complexity of Canny edge detection is proposed to extract the oil level of gas relay. The experimental results show that the proposed algorithm is better than the traditional method in the extraction of oil level of gas relay, and can meet the actual engineering needs.

Key words: Rect function; histogram equalization; color space conversion; Canny edge detection

0 引言

瓦斯继电器是变压器安全运行的重要保护组件,在变压器内部发生故障,如绕组断线、铁芯接地、套管引线故障、匝间和层间短路及绝缘劣化、导线焊接不良或分接开关接触不良、油面下降或漏油等,变压器内部会产生故障气体或造成油流涌动,从而触发继电器动作告警或跳闸,保护变压器设备安全^[1]。然而传统的瓦斯继电器报警方式经常因为其内部机械故障而失效,导致严重的电力事故^[2-3],

基金项目:国网四川省电力公司研究开发专项项目(521916220002)

因此研究一种非接触式监测瓦斯继电器油位方式作为传统瓦斯继电器报警方式的补充是十分必要的。

目前,瓦斯继电器状态的检测方法,国内外多是通过在瓦斯继电器内部加入传感器来实现,但这种方式造价高且可靠性低。传统的液位测量方式,多采用灰度阈值法或彩色阈值法^[4],都是阈值分割后求出液位区域面积比^[5],但瓦斯继电器的复杂背景会极大地影响图像处理的精度。

针对以上问题,下面提出颜色空间转换和边缘复杂度分割提取液位的方法,有效地解决了瓦斯继电器背景杂乱难分割的问题。

1 工作原理

所采用的瓦斯继电器油位测量方法流程如图 1 所示。首先从采集到的图像中利用 Rect 函数提取感兴趣区域(region of interest, ROI)区域,再通过直方图均衡化对图像进行增强;然后通过颜色空间转换得到更适合提取液位的 HSV (Hue, Saturation, Value)彩色图像,再通过 Canny 检测结合统计学规律得到最终的液位结果。

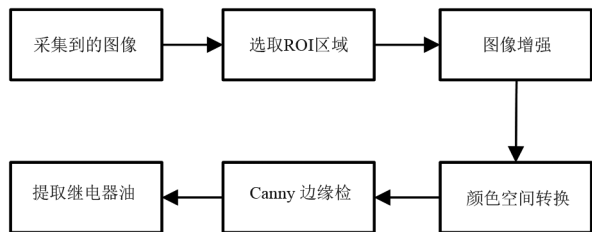


图 1 油位提取流程

2 图像处理

2.1 ROI 区域提取

在现场采集到的图像中含有大量的无关背景信息等,但只需要研究窗口部分的图像信息。由于相机和瓦斯继电器的位置相对固定,所以可以使用 Rect 函数提取出感兴趣的矩形区域。该过程可以有效去除大量干扰,减少程序处理时间,简化后续工作。

2.2 图像增强

在图像处理过程中,图像增强是其重要的组成部分^[6]。由于大多数采集到的图像不够理想,可能存在一些噪声干扰。还可能由于采集时的阳光强度较差,存在视觉效果不理想的问题。

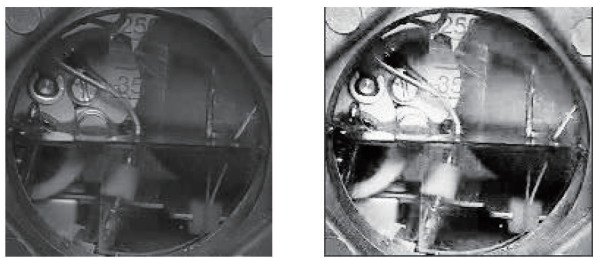
直方图均衡化是一种经典的图像增强算法^[7],通过将原始图像的灰度级均匀地拉伸到整个灰度范围内,从而实现视觉均衡的效果。首先计算图像的累计直方图,计算每个灰度级在图像中出现的概率,可通过式(1)表达。

$$p_i = n_i / N \quad (1)$$

式中: N 为像素总数; p_i 为第 i 级灰度的出现概率; N_i 为第 i 级灰度像素点总数。之后通过式(2)计算出各级灰度的累计统计直方图。

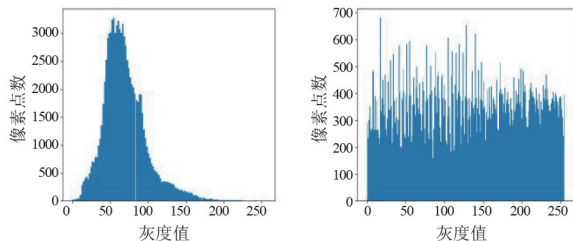
$$c_i = \sum_{n=0}^i p_n \quad (2)$$

在累计直方图的基础上,对原有图像在灰度空间进行拉伸映射,即可实现图像的直方图均衡化,其效果如图 2 所示。从图中可以明显看出,通过直方图均衡化后,图像的直方图变得均匀,图中液位部分对比度变得明显。



(a) 原图

(b) 增强后图像



(a) 原图直方图

(b) 增强后直方图

图 2 图像增强结果对比

2.3 图像颜色空间转换

通过工业相机采集到的图像为 RGB 彩色图像,但是在 RGB 图像中,瓦斯继电器内部的复杂背景在常用的阈值分割液位提取算法中干扰极大。阈值分割是液位分割中最为常用的方法,其通用公式为

$$s = \begin{cases} 1 & c > c_1 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中: s 为彩色图像阈值处理后的结果; c 为某一个颜色通道; c_1 为选择的阈值。但是瓦斯继电器油位变化区域,对于 RGB 3 色通道中任何一个通道上的数值变化都是不明显的,进行阈值分割后的结果很差。而通过大量实验发现,HSV 图像结合 Canny 算子检测的方式可以有效解决瓦斯继电器背景复杂的问题。

HSV 色彩空间不同于 RGB 色彩空间,体现人眼

视觉感知的三要素^[8], H 为色调, S 为饱和度, V 为亮度。其转换方法如式(4)一式(7)所示。颜色空间转换结果如图3所示。

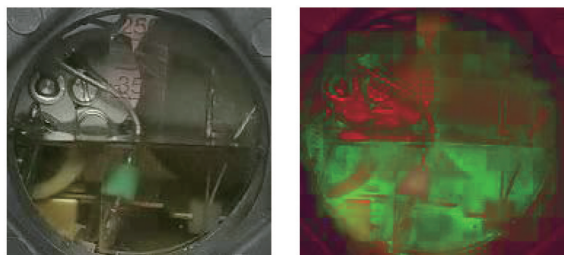
$$\begin{cases} C_{\max} = \max(R, G, B) \\ C_{\min} = \min(R, G, B) \\ X = C_{\max} - C_{\min} \end{cases} \quad (4)$$

$$H = \begin{cases} 60 \times \left(\frac{B - R}{X} + 2 \right), C_{\max} = G \\ 60 \times \left(\frac{G - B}{X} + 0 \right), C_{\max} = R \\ 60 \times \left(\frac{R - G}{X} + 4 \right), C_{\max} = B \end{cases} \quad (5)$$

$$S = \begin{cases} 0 & C_{\max} = 0 \\ \frac{X}{C_{\max}} & C_{\max} \neq 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$V = C_{\max} \quad (7)$$

式中, R 、 G 、 B 分别为红色、绿色、蓝色强度。



(a) RGB图像

(b) HSV图像

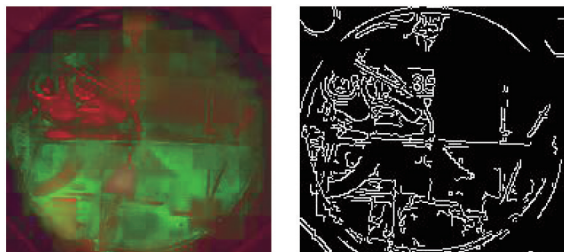
图3 颜色空间转换结果

2.4 Canny 边缘检测

Canny 边缘检测是基于多级边缘检测的算法, 首先对图像进行灰度化^[9], 如式(8)所示。

$$G_{\text{ray}} = (G + B + R) / 3 \quad (8)$$

再通过对图像进行高斯滤波去除高频噪声, 然后通过 sobel 算子得到图像的方向和梯度, 最后引入非极大值抑制和双阈值算法提取边缘信息^[10]。Canny 检测结果如图4所示。



(a) HSV图像

(b) Canny边缘图像

图4 Canny 检测结果

3 油位测量

下面提出一种基于边缘复杂度的分割方法应用于顶部和底部。该方法基于以下观测结果: 由瓦斯继电器的工作原理可知, 当油位发生变化时, 油杯会随之运动, 导致其透明窗口内的机械结构发生运动。观察发现随着油杯的向上运动, 透明窗口内的结构边缘复杂度降低。同时由于光的折射作用, 有油区域的背景, 经光的折射会导致边缘结构的模糊化。两种作用的相互叠加, 最终使得同一区域有油状态和无油状态的边缘复杂度存在明显的差异。经过 Canny 检测处理后可观察出结构复杂度的情况, 图5中可明显看出瓦斯继电器同一区域窗口内结构边缘复杂度在无油状态下和有油状态下存在明显差异, 区域状态由无油变为有油后, 结构复杂度有所下降。使用 Canny 边缘像素点的个数来表示区域结构复杂度, 通过阈值处理的方式来判断该区域是否有油区域。

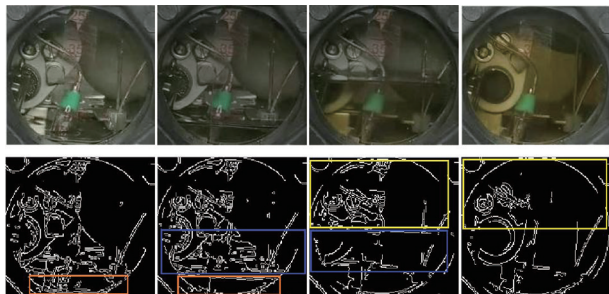


图5 瓦斯继电器在不同液位状态下的 Canny 检测结果

$$q_i = \sum_{10i}^{10(i+1)} x_k \quad (9)$$

$$l = \begin{cases} 1 & q_i > f_i \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

式中: x_k 代表第 k 个像素点的状态, 是边缘则为 1 否则为 0; q_i 为以 10 为步长的第 i 个区间, 步长过长会降低精度, 步长过短会造成误判; f_i 为第 i 个区域所采用的阈值, 值得注意的是, 每个区间由于物理结构的不同, 应该使用不同的阈值。这里采集了大量不同液位的素材, 并统计同一区间在不同液位状态下的边缘复杂度, 选出合适的阈值。

4 实验结果

本实验数据均在 PyCharm Community Edition

表 1 不同液位提取方法的结果及误差

方法	油位比												平均误差 /%
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
灰度阈值 液位提取 算法	0.27	0.28	0.28	0.31	0.30	0.36	0.41	0.46	0.55	0.41	0.79	0.88	28.03
彩色图像 液位提取 算法	0.29	0.39	0.29	0.38	0.42	0.50	0.53	0.54	0.57	0.65	0.85	1.00	20.06
本位液位 提取算法	0.23	0.35	0.35	0.41	0.47	0.53	0.59	0.65	0.76	0.82	0.88	0.88	4.64
实际液位	0.11	0.21	0.32	0.39	0.47	0.55	0.64	0.71	0.79	0.86	0.92	0.98	

2021.2.3 平台上进行处理,PC 处理器为 Intel(R) Core(TM) i5-4590 CPU 3.30 GHz,内存大小为 8 GB,操作系统为 Windows 10 企业版。得到的油位比如表 1 所示,其中实际值有油区域的高度 H_1 (mm) 和整个瓦斯继电器窗口高度 H_2 (mm) 由直尺实际测量得到,则实际油位比 $h=H_1/H_2\times100\%$ 。

从表 1 中可以看出,当油位从低到高变化时,所示的油位提取结果也符合变化规律,能够有效监控瓦斯继电器的油位变化。同时误差可以控制在 1/17 以内,所提算法在油位提取方面精度明显优于传统算法,更具有针对性,能够满足实际的现场需求。

5 结 论

上面针对瓦斯继电器油位状态提取问题,提出颜色空间域转换和 Canny 检测边缘结构复杂度相结合的方式,有效解决了瓦斯继电器的复杂背景在图像处理中的影响,成功提取出瓦斯继电器油位,且精度相对于传统算法有较大提升。

参考文献

[1] 李胜男,韩冬冬,周鑫,等.基于 CFD 的瓦斯继电器反向油流动作研究[J].能源研究与信息,2020,36(4): 222-227.

[2] 侯为林,李刚,李坤鹏,等.500 kV 变压器瓦斯继电器误动作原因分析与处理方案[J].水电与新能源,2022, 36(3):45-48.

[3] 吴嘉竣. 500 kV 变电站主变重瓦斯误动作情况分析及其

改进措施研究[D].广州:华南理工大学,2019.

[4] 黄玲,张叶林,胡波,等.基于机器视觉的透明瓶装液体液位自动检测[J].自动化与仪表,2012,27(2):57-60.

[5] 代素梅,张贵涛,钟旭,等.基于图像识别的液位在线读取[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2009, 28(2):284-287.

[6] 马龙,马腾宇,刘日升.低光照图像增强算法综述[J].中国图象图形学报,2022,27(5):1392-1409.

[7] 江巨浪,刘国明,朱柱,等.基于快速模糊聚类的动态多直方图均衡化算法[J].电子学报,2022,50(1): 167-176.

[8] 周志强,王昕,杨天,等.融合偏振距离与颜色空间的阴影下目标增强算法[J/OL].激光与光电子学进展: 1-14[2022-09-23].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.tn.20220722.2126.034.html>.

[9] 郝泽兴,郭改枝,代妍玮,等.一种改进 Canny 算子的边缘检测算法[J/OL].内蒙古大学学报(自然科学版): 1-9[2022-09-23].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/15.1052.n.20220725.1343.002.html>.

[10] 徐武,张强,王欣达,等.基于改进 Canny 算子的图像边缘检测方法[J].激光杂志,2022,43(4):103-108.

作者简介:

蒙 媛 (1978),女,硕士研究生,高级工程师,主要研究方向为软件工程与电能计量;

陈 坤 (1993),男,学士,助理工程师,主要研究方向为继电保护与变电二次检修;

莫钦森 (1977),男,硕士,高级工程师,主要研究方向为继电保护与输变电检修。

(收稿日期:2022-09-26)

一起变压器铁芯油道堵塞导致过热的缺陷分析与治理

李馨博

(国网四川省电力公司天府新区供电公司, 四川 成都 610041)

摘要:文中分析了一起 220 kV 变压器因铁芯油道堵塞造成的发热缺陷。通过油中溶解气体分析判断变压器内部存在中温过热问题,内部绝缘存在劣化隐患。返厂解体后,发现铁芯柱内部、铁芯柱与低压线圈内纸筒之间的油隙较小以及部分硅钢片毛刺较大,导致铁芯内部和外表面油流不畅、铁芯散热能力较低,造成铁芯、夹件绝缘材质老化。利用仿真建模方法,发现拉板温升异常。对铁芯柱内部油道绝缘、铁芯结构、散热器进行改进,提高了铁芯散热性能。

关键词:变压器;油道;发热;老化

中图分类号:TM 41 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2023)01-0073-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230114

Analysis and Treatment on Transformer Core Overheating Caused by Blockage of Oil Channel

LI Xinbo

(State Grid Tianfu New Area Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract:A heating defect caused by a blocked oil channel of 220 kV transformer core is analyzed. The dissolved gas-in-oil analysis determines that there is a medium-temperature overheating problem inside the transformer and a potential risk of deterioration of the internal insulation. After the disassembling in the factory, it is found that the oil gaps inside core limbs and between core limb and paper cylinder in low-voltage coil are small, and some of silicon steel pieces have large burrs, so it causes the poor oil flow on the inner and outer surfaces of core and the low heat dissipation capacity of core, which causes the aging of insulation materials of core and clamps. Using the simulation modeling method, abnormal temperature rise of pulling plate is found. The improvement for internal oil channel insulation, core structure and radiator of core limb are carried out, thus to improve the heat dissipation performance of the core.

Key words:transformer; oil channel; heating; aging

0 引言

变压器作为电网系统的核心,其健康状态直接影响整个电网运行的安全稳定^[1]。发热导致的绝缘受损是常见的多发性故障,会对变压器的使用寿命和安全稳定运行造成不利影响^[2]。变压器内部包括绝缘油、绝缘纸在内的绝缘材料在温度过高的状态下会产生劣化,影响绝缘性能,危及变压器的正常运行^[3]。

下面分析了一起某 220 kV 变压器内因铁芯油道

堵塞而造成过热,最终导致铁芯夹件绝缘老化的缺陷。通过长周期油化监督、现场吊罩检查和返厂维修,发现内部多处绝缘受损,并通过仿真模拟辅助分析故障原因,对主变压器内部结构进行针对性改进。

1 设备缺陷概况

变压器油中溶解气体可以反映设备内部的绝缘状态,采用基于色谱分析法的油化试验可以辅助判断设备运行状况^[4]。变压器因绝缘老化、劣化会产生包括 H_2 、 CH_4 、 C_2H_6 、 C_2H_4 、 C_2H_2 、 CO 及 CO_2 在内

的多组分气体。依靠各特征气体的组分及含量可以有效判断变压器内部的绝缘情况,是变压器故障诊断的重要手段^[5]。

某 220 kV 主变压器于 2007 年投运,型号为 SF-SZ-180 000/220。从 2017 年 4 月起,该主变压器油中溶解气体含量超过注意值。

从 2007 年投运至 2021 年 5 月,该主变压器总共开展 54 次油化监督试验(油化监督试验数据节选见表 1)。2017 年 4 月前的 19 次试验,结果均正常。2017 年 4 月后,总烃相对产气速率明显上升,超注意值(10%);2019 年 1 月后,总烃含量超注意值(150 $\mu\text{L/L}$),其主要增长气体为甲烷、乙烯,无乙炔,初步判定变压器内部无放电现象。按照行业标准^[6]中的故障判断方法,三比值编码 021, $\text{CO}_2/\text{CO}>7$,属于中温过热(300~700 $^{\circ}\text{C}$),怀疑主变压器内部存在局部过热造成固体绝缘劣化。

表 1 主变压器油化监督数据(节选) 单位: $\mu\text{L/L}$

组分	测试值			
	2017-04	2019-01	2020-05	2021-04
H ₂	6.40	29.60	35.12	28.05
CO	29.90	288.60	326.95	265.38
CO ₂	551.70	2041.90	2297.12	1342.03
CH ₄	0.60	116.20	172.55	208.95
C ₂ H ₄	6.20	51.40	90.69	123.18
C ₂ H ₆	1.40	45.80	68.76	86.74
C ₂ H ₂	0	0	0	0
总烃	98.20	213.50	332.00	418.87

利用红外热成像技术对电力设备进行检测的方法可以有效发现设备中的发热缺陷^[7]。如图 1 所示,红外测温结果表明,变压器整体温度无异常,但受其外观结构影响,无法精确检测低压侧套管温度,仅能从低压侧散热器缝隙测量极少部分低压侧箱体温度。同时,变压器油作为散热介质,具有流动性,无法直接反映出变压器内部某处发热点。因此,红外测温结果不能作为该变压器发热缺陷诊断的直接依据。

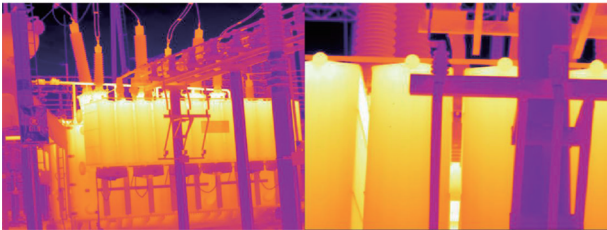


图 1 红外测温成像

2019 年 11 月,低压侧直流电阻测试结果为三相相互差为 1.9%,超过标准值(1%)。该主变压器的首检(2008 年 11 月)测试数据为三相直流电阻互差 1.1%,也超过标准值。铁芯、夹件间绝缘测试发现,夹件对铁芯的绝缘仅为 75 M Ω ,但无历史数据进行对比。其余试验数据正常。

该主变压器高频电流测试与铁芯电流测试结果无异常,铁芯、夹件泄漏电流均远小于标准值,排除环流引起发热可能。

结合例行试验数据,初步分析造成该主变压器试验数据不合格有以下两种可能:1) 低压侧绕组接头存在接触不良;2) 铁芯过热造成铁芯夹件绝缘老化。

2 解体及故障原因分析

现场吊罩后,开展铁芯对地、夹件对地和铁芯对夹件绝缘电阻测试。结果如表 2 所示,当铁芯(夹件)接地,铁芯(夹件)对地绝缘电阻低于 100 M Ω ,使用 5000 V 绝缘电阻表测试时,铁芯-夹件 B 相靠低压侧下部处有放电声。因该主变压器底部为船型结构,无法准确观测放电位置。综合诊断,该主变压器铁芯-夹件间绝缘已受损。

表 2 铁芯、夹件绝缘电阻测试数据

测试项目	测试状态	测试电压/ V	绝缘电阻/ M Ω	放电位置
铁芯对地 绝缘电阻	夹件未接地	2500	>10 000	无
		5000	>10 000	无
	夹件接地	2500	80	无
		5000	2	B 相下部
夹件对地 绝缘电阻	铁芯未接地	2500	>10 000	无
		5000	>10 000	无
	铁芯接地	2500	100	无
		5000	2	B 相下部
铁芯对夹件 绝缘电阻	未接地	2500	60	无
		5000	2	B 相下部

该主变压器返厂后解体检修。铁芯为三相五柱四框式结构,三相芯柱呈现中间断开,有 6 mm 油道,内嵌约 5 mm 油道绝缘纸板,分为 4 个口字型框,如图 2 所示。

拆除上铁轭后,分别拆除调、高、中、低压线圈,如图 3 所示。拔出低压线圈的过程中,阻力非常大,尤其是 B 相低压线圈内撑条无规则排列,内纸筒上



图 2 吊罩绕组、铁芯、夹件结构

端部有重压变形现象。检查低压线圈内侧匝绝缘的方向,发现上、下和侧面都有挤压和摩擦痕迹,说明在制造阶段,低压线圈套装时过紧,在反复转动和重压下套装,导致线圈内匝绝缘破损、纸筒上端部损伤、撑条排列不规则等问题。



图 3 B 相铁芯及低压绕组内侧

破开低压内纸筒后,铁芯柱绑扎的无纬玻璃丝粘带破损严重,铁芯拉板、拉板绝缘、无纬带、绝缘纸板多处存在发黑变色情况,如图 4 所示。经现场测量,铁芯柱直径为 880 mm,内纸筒内直径为 885 mm,无纬带厚度为 2 mm,铁芯柱与内纸筒纵向油流通道不到 1 mm。



图 4 多处拉板、无纬带、绝缘纸板发黑

进一步解体铁芯,发现部分硅钢片毛刺较大(达到 0.03~0.04 mm),B 相铁芯油道绝缘有破损并发黑,铁芯柱叠片端面有锈迹,铁芯柱油道两侧硅钢片有过热痕迹,B 相铁芯柱油道绝缘表面碳化发黑,B 相铁芯柱硅钢片及油道之间的绝缘板发黑,如图 5 所示。



图 5 铁芯解体后多处碳化发黑

检查低压绕组导体无异常,各接头无松动、无明显发热痕迹,如图 6 所示。低压侧直流电阻三相相互差超标原因为低压绕组 A 相至 C 相连接为单铜排且接线过长。因此,排除该主变压器内局部过热是由低压侧绕组接头接触不良引起。



图 6 低压绕组接头无松动、发热痕迹

初步分析结果为:铁芯柱内部油道有效宽度仅 3 mm,铁芯柱与低压线圈内纸筒之间的油隙不足 1 mm,部分硅钢片毛刺较大,这造成油流不畅、散热不良,使得铁芯柱和拉板产生的热量不能有效释放,出现局部过热现象。这是导致铁芯、夹件绝缘老化的原因。

3 温升仿真分析

该变压器铁芯为三相四框式结构,变压器器身

及油箱为沿长轴侧近似呈左右对称的结构。为了有效简化计算模型,采用半模型进行仿真计算。基于 ELMag-3D 软件,按照解体实测参数建立仿真模型,如图 7 所示。铁芯芯柱由内到外依次套装低压绕组、中压绕组、高压绕组及调压绕组。

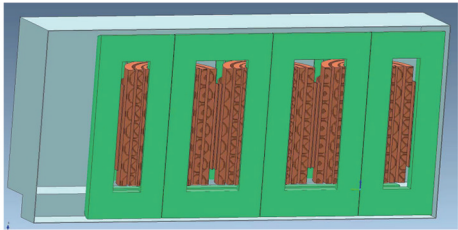


图 7 变压器模型

设环境温度为 40 ℃,选取变压器中压满载(中压 180 MVA 有功负载、低压不带负载)和该变压器近年最大负荷(中压 160 MVA 有功负载、低压 40 MVA 容性负载)两种情况进行仿真,得到各结构件温升结果如表 3 所示。

表 3 变压器结构件局部最热点温升

部位	温升/K	
	中压 180 MVA 负载, 低压不带负载	中压 160 MVA 负载, 低压 40 MVA 容性负载
油箱箱壁	37.2	35.5
油箱箱盖	32.1	32.5
上夹件腹板	33.5	32.1
下夹件腹板	34.1	32.5
拉板	96	105.5

在中压 160 MVA 负载、低压 40 MVA 容性负载的情况下,仿真模型的温度分布云图如图 8、图 9 所示。

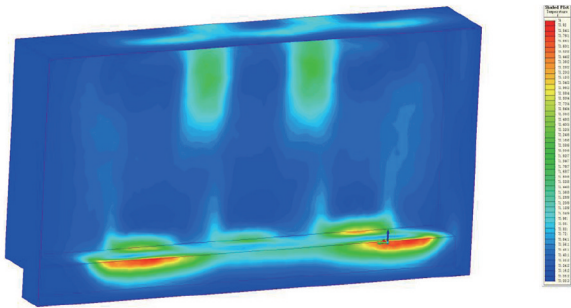


图 8 变压器油箱温度分布云图

根据仿真计算结果可知,该变压器油箱箱壁、油箱箱盖、上夹件腹板、下夹件腹板温升正常,但拉板存在温升较高的局部过热异常现象。仿真结果与解体表象基本一致。

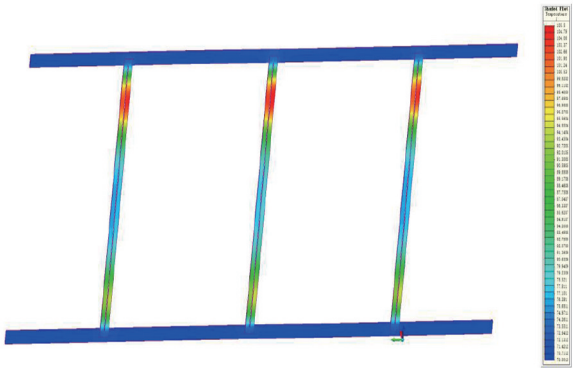


图 9 变压器夹件腹板温度分布云图

4 结构改进方案

国家标准^[8]中对于变压器结构件局部过热的要求是:对于铁芯、裸露的电气连接钱、电磁屏蔽及油箱上的结构件,均不规定温升限值,但仍要求其温升不能过高,以免使与其相邻的部件受到热损坏或使绝缘液体过度老化。

基于吊罩解体检查及仿真分析结果,设计了针对性的结构性改进方案。

4.1 受损材料处理

铁芯仍使用原件,放倒重新叠装。在叠片过程中清理端面锈迹、表面污物、毛刺等,更换表面有烧蚀和凹坑的硅钢。铁芯柱内部的油道绝缘、拉板绝缘、夹件绝缘等绝缘件全部更换。中压、高压、高调线圈检查清理后继续使用原件。除低压线圈内绝缘件外,其他绝缘件清理后继续使用,更换个别破损绝缘件。

4.2 芯柱内部油道绝缘改进

取消薄的绝缘隔板,改进绝缘垫板结构。与铁芯接触的两个侧面开槽增加油道,增加铁芯散热面。改进铁芯芯柱和旁柱的绑扎结构,采用聚酯带绑扎结构。取消拉带下纸板,在保证绑扎强度的条件下,减少铁芯表面覆盖。

4.3 铁芯结构改进

在不改变结构框架的前提下,改进铁芯绑扎结构、铁芯绝缘件结构和低压线圈内纸筒套装结构,是提高油流散热能力的有效措施。铁芯绝缘件全部采用耐热性能较高、绝缘性能良好的环氧酚醛玻璃布板。低压线圈内纸筒内径增大 4 mm,纸筒厚度由 5 mm 改为 3 mm,铁芯柱与内纸筒纵向油流通道由不足 1 mm 改进至 3 mm,增加进入铁芯

与低压线圈内纸筒之间油路的油流量。

4.4 散热器改进

该主变压器增加 2 组散热器,抬高散热器中心高度。在保障该变压器自身绝缘结构完好的基础上,进一步增强主变压器的散热能力。

结构改进后,在环境温度 40 ℃、中压 160 MVA 负载、低压 40 MVA 容性负载的运行工况下,拉板温升值约为 85 K,较改进前降低约 20 K。

5 结 论

上面某 220 kV 主变压器因设计和安装工艺不良,铁芯柱内部油道、铁芯柱与低压线圈内纸筒之间油隙过小,导致油流不畅、散热能力下降,造成主变压器内部中温过热使铁芯、夹件绝缘材质老化,绝缘性能降低甚至失效。通过改进铁芯柱内部油道绝缘结构、铁芯绑扎结构、绝缘件材质,增大进入铁芯内部油道和铁芯与低压线圈内纸筒之间油路的油流量,提高了铁芯散热能力,通过增加两组散热器,提高该主变压器整体散热能力,改进后拉板温升降低 20 K。

在长期的变压器油化监督中发现了这起重大缺陷并及时治理,成功消除了变压器事故隐患,这也为变压器相关缺陷诊断和检修提供了参考。

参考文献

[1] 罗杨,杨红权,刘彦琴,等.一起主变压器高压绕组损坏事故检测与分析[J].四川电力技术,2021,44(5):59-63.

[2] 温建,程汉湘.变压器绕组异常发热故障的检查及预防[J].广东输电与变电技术,2007(2):60-63.

[3] 李惠明.主变压器中性点套管端部发热分析[J].电力安全技术,2022,24(1):54-57.

[4] 李志军,周淦,邢来,等.一起主变 C 相套管连接结构发热故障的分析[J].变压器,2019,56(2):78-81.

[5] 王稼轩.变压器故障特征气体拉曼光谱检测反向传播人工神经网络定量方法研究[D].重庆:重庆大学,2021.

[6] 电力行业电力变压器标准化技术委员会.变压器油中溶解气体分析和判断导则:DL/T 7252—2014[S].北京:中国电力出版社,2015.

[7] 罗舜.电力变压器套管将军帽发热故障的红外诊断分析[J].变压器,2018,55(1):50-53.

[8] 全国变压器标准化技术委员会.电力变压器 第 2 部分:液浸式变压器的温升:GB/T 1094.2—2013[S].北京:中国标准出版社,2014.

作者简介:
李馨博(1984),女,硕士,高级工程师,主要研究方向为电网安全及资源管理。

(收稿日期:2022-08-08)

(上接第 17 页)

[8] 王巨丰,吴东,李国栋,等. 10 kV 多断点灭弧防雷间隙熄弧特性研究及应用[J]. 高电压技术,2017,43(5):1589-1595.

[9] 郭婷,周文俊,黄海鲲,等. 多间隙灭弧结构熄灭工频电弧的仿真与试验[J]. 中国电机工程学报,2016,36(10):2853-2861.

[10] 司马文霞,贾文彬,袁涛,等. 多段微孔结构中电弧的磁流体模型及气吹弧性能仿真[J]. 高电压技术,2016,42(11):3376-3382.

[11] PODPORKIN G V, ENKIN E Y, KALAKUTSKY E S, et al. Overhead lines lightning protection by multi-chamber arresters and insulator-arresters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(1): 214-221.

[12] 熊佳明,李黎,戴宏宇,等.基于爆炸波及能量平衡理论的大电流冲击电弧的冲击波超压作用分析[J].中国电机工程学报,2018,38(22):6746-6753.

[13] TAYLOR G. The formation of a blast wave by a very intense explosion. II. The atomic explosion of 1945 [J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 1950, 201(1065): 175-186.

[14] 张宝坪,张庆明,黄风雷.爆轰物理学[M].北京:兵器工业出版社,2001.

[15] 罗兴柏,张玉令,丁玉奎.爆炸力学理论[M].北京:国防工业出版社,2016.

[16] 电力行业过电压与绝缘配合标准化技术委员会.配电网架空绝缘线路雷击断线防护导则:DL/T 1292—2013[S].北京:中国电力出版社,2014.

作者简介:
唐佳雄(1997),男,硕士,主要研究方向为输配电网防雷接地。

(收稿日期:2022-09-25)

一起 220 kV 主变压器有载分接开关 触头烧损缺陷分析

梁弘毅¹, 吴 雄², 吴晓晖³, 骆欣瑜⁴, 刘 睿⁴

(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. 国网四川省电力公司眉山供电公司, 四川 眉山 620000; 3. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041; 4. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041)

摘要:文中分析了一起有载分接开关触头在 220 kV 主变压器有载分接开关深度检修中首次报告烧损的缺陷。该有载分接开关经过试验和现场吊芯检查后,发现奇数侧主动触头组的 A 相触头发黑变色,转轴烧结失去功能。经分析奇数侧触头组的转轴接触电阻异常增大导致的过热为开关触头烧损的直接原因。根据缺陷产生机理分析,文中对有载分接开关日常运维提出了针对性建议,为后续类似工作处置提供了宝贵经验。

关键词:电力变压器;有载分接开关;触头;烧损;过热

中图分类号:TM 41 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2023)01-0078-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230115

Analysis of Burning Damage Defects of Contacts of On-load Tap-changer in 220 kV Main Transformer

LIANG Hongyi¹, WU Xiong², WU Xiaohui³, LUO Xinyu⁴, LIU Rui⁴

(1. Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Chengdu 610021, Sichuan, China; 2. State Grid Meishan Electric Power Supply Company, Meishan 620000, Sichuan, China; 3. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China; 4. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: The defects of burning damage are analyzed, which are reported for the first time in an in-depth maintenance of on-load tap-changer in a 220 kV main transformer. After electrical test and hanging-core inspection, it is found that the contacts in phase A of odd-numbered active contact group turns black, and the rotating shaft is sintered and loses its function. The overheating caused by the abnormal increase of contact resistance of rotating shaft of contact group in odd-numbered side directly leads to burning damage of the contacts. The corresponding suggestions for daily operation and maintenance of on-load tap-changers are put forward, which provides precious experiences for the follow-up similar works.

Key words: power transformer; on-load tap-changer; contact; burning damage; overheating

0 引言

有载分接开关是电力变压器完成带负载调节电压的关键组部件。主要类型分为油浸灭弧式和真空熄弧式。随着电力设备新技术的推广和发展,真空熄弧式有载分接开关正在逐步替代油浸灭弧式有载分接开关,但是后者目前在 220 kV 及以下等级电力

变压器中保有量仍然巨大。众所周知,油浸灭弧式有载分接开关依靠铜钨触头和过渡电阻进行负载的不间断转换,转换过程一定伴随着油中电弧的产生和熄灭。因此,当这类分接开关频繁动作时,电弧触头烧损相应比较严重,油的碳化和污染速度较快,操作机构机械磨损也会加速,必须进行日常维护和定期检修。

因此,考虑到油浸灭弧式分接开关对变压器的

重要性和本身的工作特性,通常将油浸灭弧式有载分接开关的检修作为运检工作重点。近年来,存在不少油浸灭弧式有载分接开关的隐患处置和故障分析案例^[1-3]。

下面分析了一起某 220 kV 变电站主变压器油浸灭弧式有载分接开关,在深度检修工作中发现的切换开关芯子存在的严重故障隐患。基于分接开关结构和动作原理,结合实际电气试验测量结果,分析了故障隐患产生原因,提出了修复措施,为后续运检工作提供经验的同时,保证了在运主变压器的健康管理和按期投运。

1 设备结构和原理

发现存在故障隐患的有载分接开关为 ABB 公司生产的典型产品,型号为 UCGRN-650/500/I,设备的基本信息如表 1 所示。

表 1 隐患有载分接开关设备信息

型号	UCGRN 650/500/I	过渡电阻/ Ω	6.3
挡位数	17	级电压/V	1905
编号	1ZSC8677061	寿命(操作次数)/次	475 000
生产年代	2006	投运日期	2008-04-02
上次检修时间	2018-04-25	额定电流/A	447
现存问题及缺陷	无	动作次数/次	3804

发现的隐患处于切换开关芯子中。该产品切换开关芯子为典型的“钟摆式”,其结构如图 1 所示。切换开关芯子整体上由起吊装置、过渡电阻、快速机构以及触头系统组成。快速机构为左右摆动式的机械结构,整个结构主要包括动触头系统和中性点结构,A、B、C 三相的动触头以纸面为准从外向内依次放置。触头系统除了快速机构的动触头组以外,还有固定在绝缘板上的主静触头组、过渡静触头组和用于与油室壁连接的插入式触头,主静触头组又由灭弧触头和载流触头组成。

对于“钟摆式”有载分接开关而言,当开关正常工作时,一侧主动触头下部与载流触头之间以及静过渡触头和动过渡触头之间均良好接触,如图 2(a)所示。由于过渡电阻的存在,电流只从分接选择器经载流触头和主动触头下部流向中性点。当得到挡位切换指令时,主动触头上部和灭弧触头接触,静过

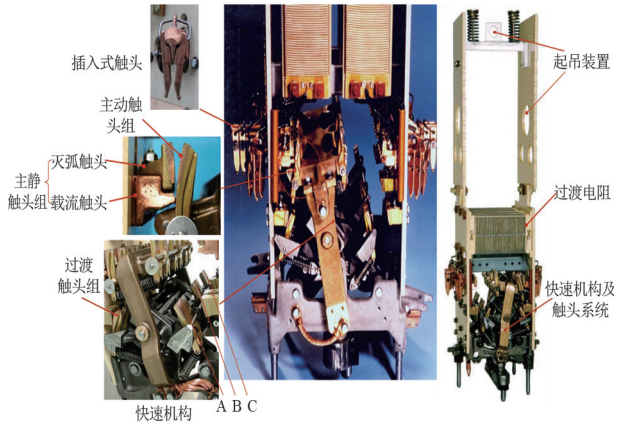


图 1 UCGRN 型有载分接开关切换芯子结构

渡触头和动过渡触头之间保持接触,如图 2(b)所示。当主动触头上部和灭弧触头分离时,产生电弧,电流转移至过渡触头,如图 2(c)、图 2(d)所示。直到另一侧动过渡触头与静过渡触头接触时,电流在两侧过渡电阻和快速机构形成环流,如图 2(e)所示。然后,一侧动、静过渡触头分离拉弧,快速机构摆动;另一侧动主触头上部与另一侧灭弧触头接触,如图 2(f)、图 2(g)和图 2(h)所示。最后,动主触头下部和载流触头接触,动过渡触头和静过渡触头完全接触,完成一次挡位切换,如图 2(i)所示。

2 隐患情况

吊芯前,采用 5 A 直流电阻测试仪进行摸底试验,发现该主变压器奇数挡位(1、3、5、7、11、13、15、17)的 A 相直流电阻均比 B、C 相高 6 m Ω 左右,不平衡率最高可达 2.049%,超过标准要求的 2%;偶数挡三相的直流电阻和不平衡率均测试合格,详细数据如表 2 所示。

吊芯时,利用 200 A 回路电阻测试仪对切换开关主动触头和载流触头的接触电阻进行测试,发现切换开关奇数挡侧 A 相接触电阻达 8850 $\mu\Omega$,远高于 DL/T 574—2021《电力变压器分接开关运行维修导则》要求的 500 $\mu\Omega$ ^[4],明显大于 B、C 相的 412 $\mu\Omega$,且测试结果与摸底试验结果吻合,测量结果如表 3 所示。此外,外观检查也发现三相主动触头有过热发黑现象,接触面有轻微烧损痕迹,三相主动触头安装轴烧结,如图 3 所示。对奇数挡侧主触头进行打磨处理后,接触电阻变化无明显效果,A 相接触电阻仍然有 8000 $\mu\Omega$ 左右。

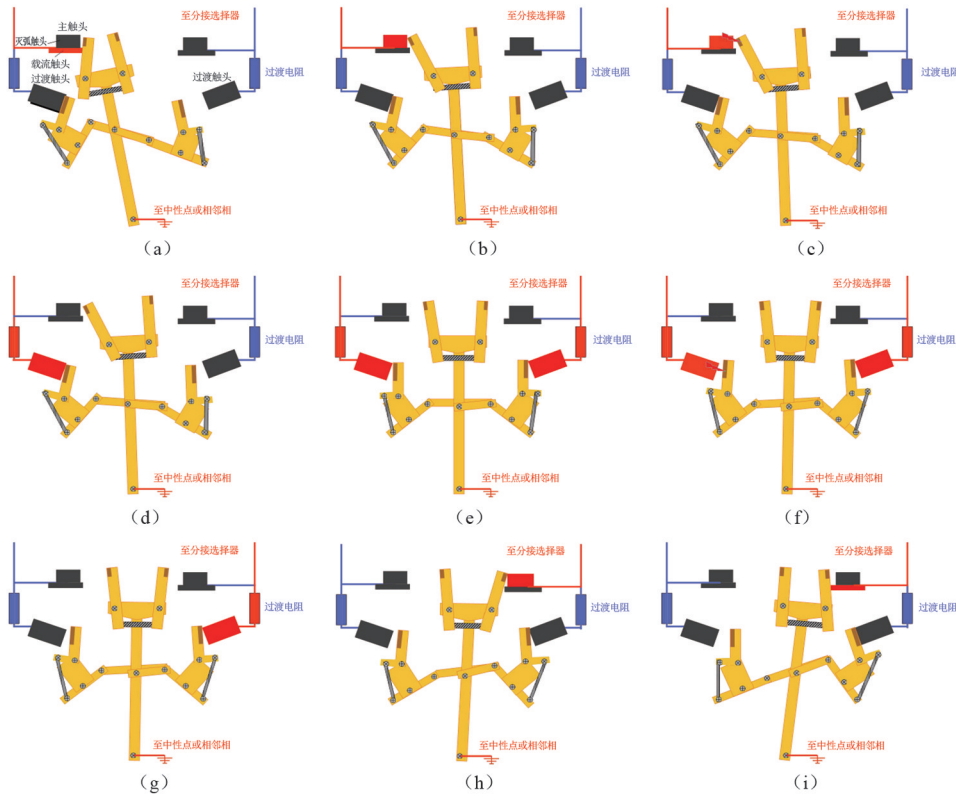


图 2 UCGRN 型有载分接开关切换芯子动作原理

表 2 三相高压侧绕组直流电阻试验

挡位	直流电阻/mΩ			误差/%
	A-O	B-O	C-O	
1	418.4	413.7	413.7	1.130
2	405.1	405.3	406.7	0.394
3	406.3	399.8	400.3	1.616
4	391.3	391.5	393.6	0.586
5	393.2	386.7	386.9	1.671
6	377.8	377.9	379.8	0.528
7	380.7	373.0	373.4	2.049
8	364.2	364.5	366.3	0.575
9	355.5	355.9	356.4	0.252
10	363.6	364.3	365.2	0.439
11	379.6	372.7	372.4	1.920
12	377.1	377.9	379.0	0.502
13	392.7	386.4	386.1	1.699
14	390.8	391.5	392.6	0.459
15	407.0	400.0	399.7	1.814
16	404.4	405.3	406.1	0.419
17	420.8	413.6	413.3	1.803

表 3 三相奇数偶数挡的接触电阻测量 单位:μΩ

挡位类别	A 相	B 相	C 相
奇数挡	8850	412	412
偶数挡	246	264	216

3 原因分析及措施

正常工作时,载流触头、主动触头、主触头组转轴和中性点会流过负载电流。根据触头发黑和转轴



图 3 主动触头过热发黑现象

烧结的现象可知,主触头组转轴部位必定经历了一个过热过程。由式(1)焦耳定律可知,过热有两种解释:1)奇数侧 A 相载流触头、主动触头、主触头组转轴至中性点的回路中各部件本身和部件之间的接触电阻无变化,而是检修前 A 相长时间承受大电流,且电流值远超最大允许通过电流 500 A,导致回路过热,A 相动触头烧黑同时将转轴烧结。2)检修前 A 相的电流正常,但是回路中存在着接触电阻异常增大的缺陷点,接触电阻增大的原因可能是由设

备老化、设计缺陷或者其他原因引起。

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

式中: Q 为接触点产生热量; I 为通过接触点的电流; R 为缺陷点的接触电阻; t 为发热时间。

基于上面的分析,查询了该主变压器 3 年内的负载情况,如图 4 所示。根据负载监测数据可知,尽管负载存在波动,但是其最大负载小于 400 A。这远小于该型有载分接开关的最大允许通过电流,可以基本排除第一种解释。再深入分析隐患部位可知,动触头组转轴出现了烧结,周围的发黑部位都是以转轴为中心,远离转轴的部位颜色变浅,这符合过热缺陷的特征。这说明转轴部位正是接触电阻增大的部位。通常转轴接触电阻增大的原因,普遍的解释为设备老化引起。但该型有载分接开关的检修经验表明,在切换次数不高的情况下,相比其他厂商的产品,其有载分接开关的油室油碳化严重,油中碳颗粒浓度较高。因此,当有载分接开关长时间不动作时,碳颗粒侵入动触头组转轴部位缝隙并集聚,增大接触电阻并在电流作用下发热,最终引起该部位烧结。

分接开关继续运行下去,可致缺陷扩大导致整个动触头组烧毁,或引发剧烈拉弧诱发严重事故。因此,及时将该分接开关的切换开关芯子进行了处置,将双侧主动触头组全部更换,并将主触头表面镀银。将修复后的切换开关芯子复装后,接触电阻和高压侧直流电阻测量数据正常,如表 4 和表 5 所示;修复后触头组如图 5 所示。

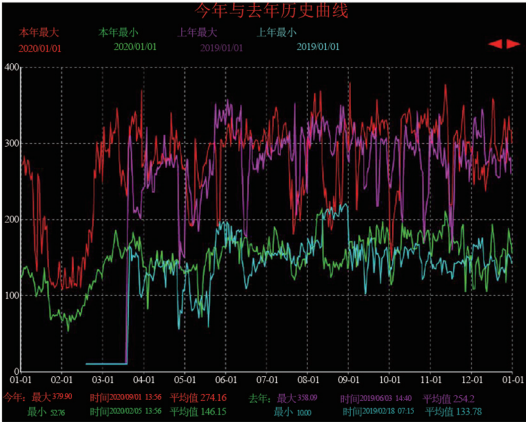
表 4 修复后的三相奇数偶数挡的接触电阻测量

单位: $\mu\Omega$

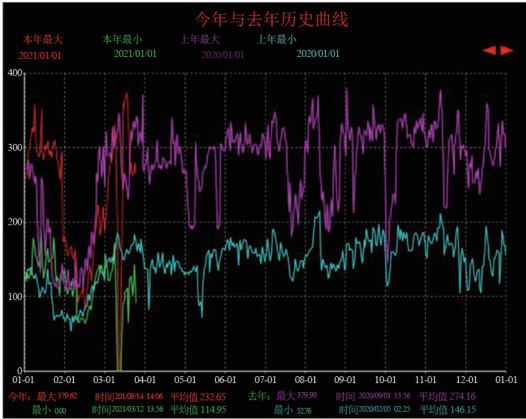
挡位类别	A 相	B 相	C 相
奇数挡	181	187	216
偶数挡	228	208	199

表 5 修复后的三相高压侧绕组直流电阻试验

挡位	直流电阻/ $m\Omega$			误差/%
	A-O	B-O	C-O	
1	410.5	410.9	412.5	0.486
2	404.2	404.3	405.9	0.420
3	396.6	397.2	398.4	0.453
4	390.3	390.5	392.1	0.460
5	383.3	383.6	385.1	0.469
6	376.8	376.8	378.6	0.477
7	369.7	370.0	371.5	0.486
8	363.2	363.3	364.9	0.467
9	355.3	355.1	355.8	0.197
10	363.0	363.2	364.4	0.385
11	369.6	370.0	371.2	0.432
12	376.7	376.9	378.3	0.424
13	383.2	383.7	385.0	0.469
14	390.3	390.5	391.9	0.409
15	396.8	397.4	398.7	0.478
16	403.9	404.2	405.3	0.346
17	410.3	410.9	412.2	0.462



(a) 2019—2020年



(b) 2020—2021年

图 4 3 年时间内的负载情况



图 5 修复后的触头组

4 结 论

上面针对一起 220 kV 主变压器有载分接开关触头烧损缺陷,基于其基本结构和动作原理,分析了

由于该有载分接开关所处主变压器经常重载,

缺陷产生原因,得出如下结论和建议:

- 1)主动触头组转轴接触电阻增大引起过热烧结,导致了触头组的烧损;
- 2)UCGRN 型有载分接开关在切换次数较少时,在运行维护时应进行适当切换,保证奇偶侧绕组的正常活动;
- 3)UCGRN 型有载分接开关的油室油碳化过快的问题应结合其开关结构进行深入研究。

参考文献

[1] 高若兰.一起 110 kV 变压器有载调压开关故障分
~~~~~  
(上接第 61 页)  
器机构零部件材料及设计基本无关,主要原因在于分闸铁芯复位弹簧疲劳或过短而弹力不足。在合闸冲击下产生的振动,使分闸线圈松动,同时分闸铁芯在重力作用下会撞击掣子 2,影响掣子 1 与掣子 2 的机械配合,使啮合不完全,从而导致机构存在合后即分或误动的隐患。

3 结 论

为了保证 CQ6 型气动操动机构断路器的可靠运行,日常工作中要做到以下几点:

- 1)机构在合闸状态下,检查分闸线圈是否存在松动,掣子 1 与掣子 2 的啮合情况。
- 2)检查每相机构的固定情况,包括机芯与箱体间的固定是否牢靠、整个机构与底架之间固定情况检查、整体支撑结构刚性检查等。通过使用不同规格的调节垫,垫实所有存在的间隙,减少合闸产生的震动力。
- 3)更换分闸铁芯复位弹簧时,应在满足分闸操动低电压脱扣试验(即 30%~65% $U_e$  脱扣电压试验要求)的基础上,通过选择合适线圈、调整动作间隙等措施保证断路器可靠分闸。
- 4)检查机构缓冲器。参考断路器动作行程曲线,检查机芯 4 根长螺杆与缓冲器的定位尺寸是否存在偏差、缓冲行程是否合格。

参考文献

[1] 王继伟,谢锦涛.ZF9-252 型 SF<sub>6</sub> 组合电器气动操作机构的空压机故障分析及处理[J].科技风,2011(23):66.  
[2] 陈昊,徐鹏,谭风雷,等.基于改进隐马尔可夫模型的高

析[J].电世界,2022,63(3):13-15.

[2] 张志恒.一起 220 kV 变压器有载分接开关故障的分析及处理[J].黑龙江电力,2021,43(6):522-525.  
[3] 李小双.有载调压变压器分接开关机械故障诊断研究[D].北京:华北电力大学,2021.  
[4] 电力行业电力变压器标准技术委员会,电力变压器分接开关运行维修导则:DL/T 574—2021[S].北京:中国电力出版社,2021.

作者简介:

梁弘毅(1991),男,工程师,从事电气一次设计咨询工作。

(收稿日期:2022-07-27)

压断路器健康度评估方法[J].湖南电力,2021,41(3):7-11.  
[3] 周帆.高压断路器在线监测及故障诊断系统设计探讨[J].电子元件与信息技术,2020,4(10):105-107.  
[4] 张军,陈琦,刘少昌,等.CQ6、CQ7 气动操动机构的技术改造和完善[J].陕西电力,2009,37(7):76-78.  
[5] 杨军.220 kV SF6 断路器弹簧机构故障处理[J].中国科技信息,2021(24):44-45.  
[6] 张茗.高压断路器的在线监测系统研究[J].舰船电子工程,2018,38(8):160-165.  
[7] 周栋,周震宇,葛颖强.220 kV 断路器操动机构性能及检修[J].科技资讯,2014,12(30):90.  
[8] 林雪倩,孙铁群,蔡金锭等.220kV 断路器的运行维护检修成本模型分析[J].电工电气,2012(10):5-7.  
[9] POLITANO D, FROHLICH K. Calculation of stress-dependent life cycle costs of a substation subsystem-demonstrated for controlled energization of unloaded power transformers[J].IEEE Transactions on Power Delivery, 2006,21(4):2032-2038.  
[10] 李德武,黄衍臻,张秋强.500 kV HGIS 液压操动机构频繁打压原因分析及对策[J].电工技术,2021(22):89-91.  
[11] 刘松成,何正旭.高压断路器常见故障原因的分析与处理[J].中国新技术新产品,2012(20):142.  
[12] 商赤民.高压断路器的故障类型与机理分析[J].科技视界,2012(22):301-302.  
[13] 林秋华.断路器常见故障的诊断及处理方法解析[J].企业技术开发,2016,35(2):101-102.  
[14] 吴小珍.一种解决 CQ6 型气动操动机构故障频繁的有效检修方法[J].广东输电与变电技术,2004(4):32-34.

作者简介:

黄楷敏(1988),男,工程师,主要从事变电一次设备检修工作。  
(收稿日期:2022-07-11)

# 一种基于图像的配电网单相接地故障选线方法

岑俊<sup>1</sup>, 覃苏玲<sup>2</sup>, 李琪林<sup>3</sup>

(1. 上海电力大学自动化工程学院, 上海 200090; 2. 上海电力大学计算机科学与技术学院, 上海 200090;  
3. 四川省电力公司计量中心, 四川 成都 610045)

**摘要:**文中针对中性点经消弧线圈接地引起故障电流微弱, 故障特征不明显, 导致谐振接地系统发生单相接地故障时选线速度慢、选线困难等问题, 提出了一种基于图像的配电网单相接地故障选线方法。该方法获取各馈线故障零序电流, 通过连续小波变换(CWT)得到CWT系数矩阵, 将系数矩阵生成RGB图像; 然后, 通过感知哈希算法计算正常馈线与故障馈线生成RGB图像之间的汉明距离, 以汉明距离判断各RGB图像之间的差异, 进而确定故障馈线; 最后, 对比了基于皮尔逊相关系数选线方法和基于EMD分解零序电流高频分量选线方法, 结果表明所提方法应用于谐振接地系统中选线速度快, 且不受故障电阻、故障位置、故障初始相角等因素的影响。

**关键词:**谐振接地系统; 故障选线; 零序电流; 连续小波变换; 感知哈希算法

**中图分类号:** TM 711 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2023)01-0083-07

**DOI:** 10.16527/j.issn.1003-6954.20230116

## An Image-based Single-phase Grounding Fault Line Selection Method in Distribution Network

CEN Jun<sup>1</sup>, QIN Suling<sup>2</sup>, LI Qilin<sup>3</sup>

(1. College of Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;  
2. College of Computer Science and Technology, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;  
3. Metering Center of State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610045, Sichuan, China)

**Abstract:** Aiming at the problems that the fault current is weak caused by the neutral point grounded through arc suppression coil, and the fault characteristics are not obvious, which leads to slow and difficult line selection when a single-phase ground fault occurs in resonant earthed system, an image-based single-phase grounding fault line selection method in distribution network is proposed. This method obtains the zero-sequence current of each feeder fault, through continuous wavelet transform (CWT), the zero-sequence current obtains the CWT coefficient matrix, and then the coefficient matrix is generated into RGB images. Finally, the Hamming distance between RGB images generated by the normal feeder and the faulty feeder is calculated by perceptual hash algorithm, which is used to judge the difference between RGB images, and then the faulty feeder is determined. The line selection methods based on Pearson correlation coefficient and based on EMD decomposition of high frequency components of zero-sequence current are compared. The results show that the proposed method has fast line selection speed and is not affected by factors such as fault resistance, fault location and initial phase angle of the fault when applied to the resonant earthed system.

**Key words:** resonant earthed system; fault line selection; zero-sequence current; continuous wavelet transform; perceptual hash algorithm

## 0 引言

随着新能源发电技术发展, 越来越多新能源和

分布式能源接入, 配电网日益复杂化、随机化, 导致故障频繁出现。中国配电网大多采用小电流接地方式, 发生单相接地故障时可带故障运行 1~2 h<sup>[1]</sup>, 提高了供电可靠性。但非故障相线路对地电压会升高



到原来的 $\sqrt{3}$ 倍<sup>[2]</sup>,造成绝缘威胁,长时间处于该状态可能会导致大规模停电。目前,配电网也渐渐采用大容量电缆线路,导致电容电流过大,可采用谐振接地系统有效克服故障电弧不容易熄灭问题。但提高供电可靠性同时也带来一定影响,发生单相接地故障时,消弧线圈对流过接地点的容性电流分量有抵消作用,使接地电流减小、故障特征变得微弱,增加故障选线难度。

针对谐振接地系统,故障发生瞬间含有丰富的暂态信息,因此用暂态法研究单相接地故障受到学者青睐。文献[3]用希尔伯特黄变换分析故障暂态零序电流,构建时频能量矩阵,分析矩阵相似性以确定故障线路,方法可行但是计算速度慢。文献[4]用变分模态分解(variation mode decomposition, VMD)获取暂态零序电流的非工频分量,然后用 K-Means 聚类实现故障线路分类;该方法能够抵抗一定外界噪声影响,但信号处理阶段复杂。文献[5]通过分析单相接地故障中性点和各相电压关系,根据电压大小实现故障选线;该方法需要严谨的电路理论公式计算,适合于仿真系统,现场情况下避免不了外界干扰带来数据偏差。

针对上述问题,下面提出两种基于相似度和差异度故障选线方法用于谐振接地系统:1)用皮尔逊相关系数分析各馈线间关系完成故障选线;2)基于图片差异度方法,利用感知哈希算法区分故障线路和正常线路图片完成故障选线。

## 1 谐振接地系统配电网单相接地故障特征

### 1.1 稳态特征

图 1 为配电网四出线模型,假设 1 号线路 C 相发生单相接地故障,正常线路 2~4 有:

$$\begin{cases} \dot{I}_{CA2} = j\ddot{U}_A \omega C_{02} \\ \dot{I}_{CB2} = j\ddot{U}_B \omega C_{02} \\ \dot{I}_{CC2} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\dot{I}_{CA2}$ 、 $\dot{I}_{CB2}$ 、 $\dot{I}_{CC2}$ 分别为线路 2 的三相对地电容电流; $\ddot{U}_A$ 、 $\ddot{U}_B$ 分别为 A、B 相的对地电压; $\omega$ 为角频率; $C_{02}$ 为线路 2 的对地电容(假设三相相等)。

由式(1)可得线路 2 的零序电流为

$$3\dot{I}_{02} = \dot{I}_{CA2} + \dot{I}_{CB2} + \dot{I}_{CC2} = j3\ddot{U}_0 \omega C_{02} \quad (2)$$

同理可得 3、4 号线路的零序电流为:

$$3\dot{I}_{03} = j3\ddot{U}_0 \omega C_{03} \quad (3)$$

$$3\dot{I}_{04} = j3\ddot{U}_0 \omega C_{04} \quad (4)$$

式中: $\dot{I}_{02}$ 、 $\dot{I}_{03}$ 、 $\dot{I}_{04}$ 分别为线路 2~4 的基波电流; $\ddot{U}_0$ 为零序电压。

对于故障线路 1(假设中性点不接地)有:

$$\begin{cases} \dot{I}_{CA1} = j\ddot{U}_A \omega C_{01} \\ \dot{I}_{CB1} = j\ddot{U}_B \omega C_{01} \\ \dot{I}_{CC1} = -j3\ddot{U}_0 \omega (C_{01} + C_{02} + C_{03}) \end{cases} \quad (5)$$

$$3\dot{I}_{01} = -3(\dot{I}_{02} + \dot{I}_{03}) \quad (6)$$

因谐振接地,此时消弧线圈有补偿作用,则 1 号线路的零序电流为

$$3\dot{I}_{01} = -3(\dot{I}_{02} + \dot{I}_{03}) - \dot{I}_L \quad (7)$$

式中, $\dot{I}_L$ 为消弧线圈的电感电流。

由式(2)一式(4)和式(7)可知,线路 2~4(正常线路)零序电流大小等于各线路三相对地电容电流的向量和,由母线流向馈线;线路 1(故障线路)因消弧线圈补偿不同,故障线路电流方向和幅值都会受到影响。过补偿状态下馈线零序电流方向一致,故不能以电流方向作为选线依据。

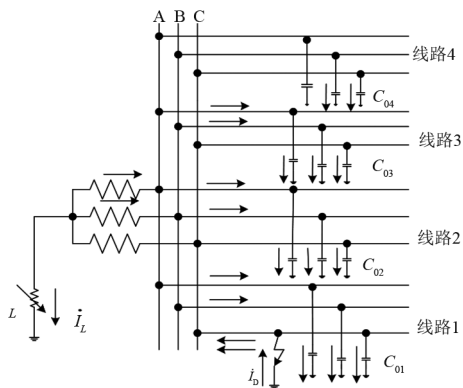


图 1 谐振接地系统单相接地时电流分布

### 1.2 暂态特征

谐振接地系统发生单相接地故障时稳态数值小,但暂态特征丰富,故提取暂态分量作为故障特征成为当前研究热点。发生故障瞬间,可用图 2 等效电路分析暂态电容电流和暂态电感电流。

#### 1.2.1 暂态电容电流

分析暂态电容电流时, $L \gg L_0$ ,  $r_L$ 、 $L$ 影响较小不

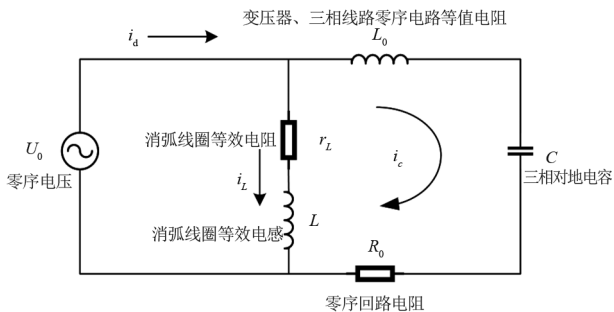


图 2 谐振接地系统

用考虑,即形成了  $L_0$ 、 $C$ 、 $R_0$ 、 $U_0$  串联回路,可确定电容电流。根据图 1 可得到电路方程为

$$R_0 i_c + L_0 \frac{di_c}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i_c dt = U_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (8)$$

式中:  $U_m$  为零序电压;  $i_c$  为电容电流。

$i_c$  主要由自由振荡分量  $i_{c,os}$  和稳态工频分量  $i_{c,st}$  组成,初始状态  $i_{c,st} + i_{c,os} = 0$ , 电容电流幅值  $I_{cm} = U_m \omega C$ , 可得

$$i_c = i_{c,os} + i_{c,st} = I_{cm} \left[ \left( \frac{\omega_f}{\omega} \sin \varphi \sin \omega_f t - \cos \varphi \cos \omega_f t \right) e^{-\delta} + \cos(\omega t + \varphi) \right] \quad (9)$$

式中:  $\omega_f$  为角频率;  $\delta$  为自由振荡衰减系数,  $\delta = 1/\tau_c = R/2L_0$ ,  $\tau_c$  为电容回路时间常数;  $\varphi$  为相角。

$i_{c,os}$  分量中含有  $\sin \varphi$ 、 $\cos \varphi$  变量,  $\delta$  为任意值均会产生振荡,  $\varphi = 0$  时最小,  $\varphi = \pi/2$  时最大。

### 1.2.2 暂态电感电流

谐振接地系统中,消弧线圈产生电感电流由式(10)组成。

$$i_L = I_{Lm} [\cos \varphi e^{\frac{t}{\tau_L}} - \cos(\omega t + \varphi)] \quad (10)$$

式中:  $I_{Lm}$  为电感电流幅值,  $I_{Lm} = U_m / \omega L$ ;  $\tau_L$  为电感回路时间常数。

从式(10)可知,电感电流幅值与  $\varphi$  有关,  $\varphi = 0$  时最大,  $\varphi = \pi/2$  时最小。电感电流产生暂态过程时间长短与接地瞬间电压相角有关<sup>[6]</sup>:  $\varphi = 0$  时,大约有一个工频的暂态时间;  $\varphi = \pi/2$  时,有  $0.5 \sim 1.0$  个工频周期。

### 1.2.3 暂态接地电流

图 2 所示流过故障点的暂态电流  $i_d$  由系统对地电容电流和消弧线圈暂态电感电流相加而成。

针对上述谐振接地系统单相接地故障分析可得到以下结论:

1) 谐振接地系统发生单相接地故障时,线路 1

(故障线路)零序电流方向与线路 2~4(正常线路)相反;

2) 母线故障时,所有馈线电流由母线流向馈线;

3) 暂态零序电流幅值大但时间短( $0.5 \sim 1.0$  个工频周期)。

## 2 相似度故障选线方法

### 2.1 皮尔逊相关系数选线方法

皮尔逊相关系数是一种分析两个变量之间相关程度的统计学方法<sup>[7]</sup>,基于故障馈线与非故障馈线之间存在的电流幅值与相位差异,计算馈线之间皮尔逊相关系数,以确定故障线路,如式(11)所示。

$$\rho_{a,b} = \frac{\sum_{i=1}^n [a(i) - \bar{a}] \times [b(i) - \bar{b}]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n [a(i) - \bar{a}]^2} \times \sqrt{\sum_{i=1}^n [b(i) - \bar{b}]^2}} \quad (11)$$

式中:  $a(i)$ 、 $b(i)$  为两馈线零序电流;  $\bar{a}$ 、 $\bar{b}$  为  $n$  个数数据平均值。  $\rho_{a,b}$  取值范围为  $[-1, 1]$ ,  $|\rho_{a,b}|$  越接近 1 说明两馈线  $a$ 、 $b$  线性相关程度越高<sup>[8]</sup>,  $|\rho_{a,b}|$  接近 -1 说明两馈线负相关程度高。选线过程如下:

1) 获取 4 条馈线故障后半周期的零序电流数据;

2) 通过式(11)计算两馈线之间皮尔逊相关系数  $\rho_{a,b}$ ;

3) 绘制馈线之间的皮尔逊热力图,分析得到故障线路。

### 2.2 皮尔逊相关系数选线方法实例

图 3 为配电网单相接地故障时各馈线零序电流波形,取故障后半周期数据计算两馈线间皮尔逊相关系数如图 4 所示。可看出线路 1(故障线路)与其他 3 条馈线(非故障线路)的皮尔逊相关系数相差大,呈负相关;其他非故障馈线之间的皮尔逊相关系数均接近 1,呈正相关;说明线路 1 与其他线路不相关程度低,结合第二章分析,可判定线路 1 为故障线路。

皮尔逊相关系数选线法属于分析原始零序电流数据之间的相关度(或差异度)的选线方法,该方法在实际工程需要计算大量复杂的数据,计算时间长,导致选线速度慢。下面提出基于图像差异度的选线方法,利用信号处理的方法可更好地抓取暂态零序电流数据,感知哈希算法辨识图像之间的差异,减少运算,选线速度快。

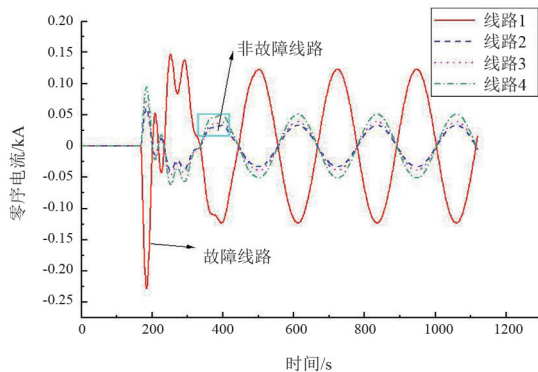


图 3 故障零序电流波形

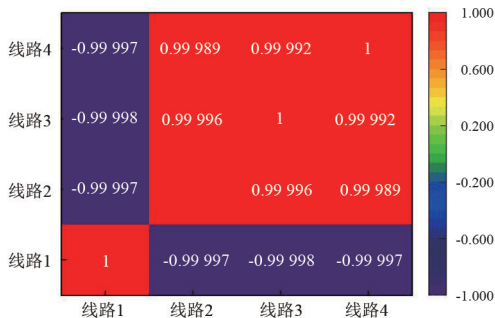


图 4 各线路皮尔逊相关系数热力

## 2.3 图像相似度选线方法

### 2.3.1 连续小波变换

由于暂态信息的时间十分短暂,大约有 0.5~1.0 个工频周期,且暂态电流属于非平稳信号。瞬时变换信号分析处理时,通常使用傅里叶变换;但傅里叶变换处理非平稳信号的能力较弱,而小波变换对于非平稳信号处理则显示了较好的能力,因此选择了小波变换方法。小波变换包括连续小波变换 (continuous wavelet transform, CWT) 和离散小波变换 (discrete wavelet transform, DWT)。连续小波变换主要对连续时间信号进行分解。而离散小波变换是对信息进行离散化处理,减少连续信号中所含信息冗余,减少计算成本。但对于需要精确信号处理,多选用连续信号,因此选择连续小波变换分析故障零序电流<sup>[9]</sup>。

小波变换的基本思想是对母小波函数进行平移伸缩变换,得到一组称为小波函数簇的二维基底,用该基底去表示或逼近某一信号<sup>[10]</sup>。假设选取的母小波函数为  $\psi(t)$ ,定义伸缩因子和平移因子分别为  $a$  和  $b$ ,生成小波函数簇  $\Psi_{a,b}(t)$  如式 (12)。

$$\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad (12)$$

式中,  $a, b \in R, a \neq 0$ 。

采取故障后半周期数据进行连续小波变换得到二维 CWT 系数矩阵。鉴于其他文献用矩阵计算时长,这里提出将二维矩阵变成 RGB 图像。因为每一张图像都是由矩阵得来,即图像中每一个像素点就是矩阵值对应的颜色,得到的连续小波系数矩阵按照 RGB 成像原理,其中值从 0~63 为蓝色,64~127 为紫色,128~191 为黄色,192~255 为黄色,即按照“红”“绿”“蓝”3 种颜色的强度对应。将系数矩阵所有值映射到 3 个颜色即得到 RGB 图像,转换过程如下:

1) CWT 对故障后半周期零序电流信号分析,分解尺度为 112 (分解尺度主要是为了设置接下来图片的大小 112×112),小波基函数选取“db5”,得到连续小波变换的系数矩阵;

2) 连续小波系数矩阵按照 RGB 成像原理映射得到 RGB 图像。

### 2.3.2 图像转换实例

将图 3 中故障数据转换成 RGB 图像如图 5 所示,画圈的地方为单相接地故障暂态信息,线路 1 为故障线路。

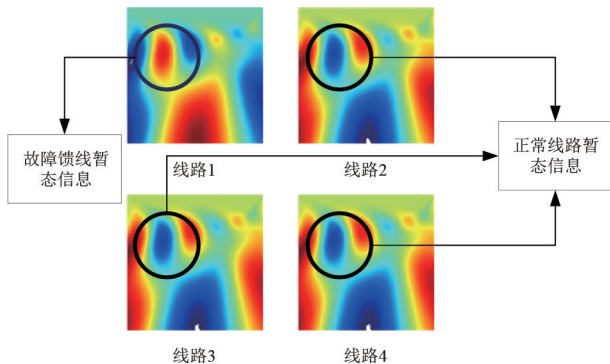


图 5 配电网各出线 RGB

### 2.3.3 感知哈希算法应用于配电网故障选线

感知哈希算法 (perceptual hashing, pHash) 应用于图像处理<sup>[11]</sup>,可提取其中的主要信息,将提取信息转化为二值化序列作为图像的指纹,用该指纹唯一确定该图像,即每张图像的二值化序列不同。图像进行相似度辨识时,感知哈希算法提取原始图像主要信息,这里包括高频和低频信息,如图 6 所示。图像缩小很大程度上减少了矩阵运算,减少算法执行时间<sup>[12]</sup>,运用于配电网单相接地故障可快速完成故障选线。

pHash 算法用于故障选线的步骤:

1) 将通过 CWT 获取的各馈线 RGB 图像缩小为



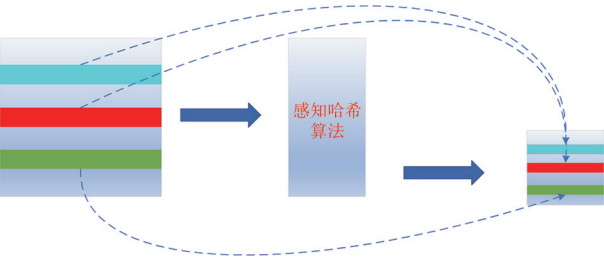


图 6 感知哈希算法图像映射

$m \times m$  图像。

2) 将各馈线 RGB 图像转换成灰度图, 计算公式为

$$G_{\text{ray}} = R \times 0.299 + G \times 0.587 + B \times 0.114 \tag{13}$$

式中:  $G_{\text{ray}}$  为二值化数值;  $R$ 、 $G$ 、 $B$  分别为 RGB 图像 3 个通道值, 在  $[0, 255]$  之间。

3) 灰度图二值化, 像素点取值为 0 或 1。

4) 得到的二值化小图像按顺序连接为等长度的比特序列值, 组成二值矩阵作为图像的哈希值。

5) 用哈希值计算两馈线图片汉明距离。

6) 以汉明距离计算故障线路之间差异, 判断故障线路图片差异度计算公式<sup>[13]</sup>为

$$S = \frac{D}{M} \tag{14}$$

式中:  $S$  为差异度;  $D$  为汉明距离;  $M$  为哈希值向量总长度。

上面步骤 3 是哈希算法的关键步骤, 可理解为对图像的特征提取。使用均值哈希计算图像的平均灰度, 计算公式如 (15) 所示。

$$\overline{G_{\text{ray}}} = \frac{\sum_{i,j=1}^m G_{\text{ray}}(i,j)}{N} \tag{15}$$

式中:  $\overline{G_{\text{ray}}}$  为平均灰度值;  $i, j$  为步骤 1 中  $m \times m$  矩阵的行和列;  $G_{\text{ray}}(i, j)$  为  $m \times m$  矩阵具体位置的灰度值;  $N$  为矩阵中元素个数。

步骤 4 的二值化处理公式为

$$h(i,j) = \begin{cases} 0 & G_{\text{ray}}(i,j) < \overline{G_{\text{ray}}} \\ 1 & G_{\text{ray}}(i,j) \geq \overline{G_{\text{ray}}} \end{cases} \tag{16}$$

式中,  $h(i, j)$  为  $m \times m$  二值矩阵具体位置。

步骤 5 中利用“异或”计算汉明距离, 将两馈线图片的二值矩阵进行“异或”计算, 累加结果为“1”的个数确定汉明距离。图片的大小为  $112 \times 112$  (12 544) 个像素点。图片中故障馈线与正常馈线之

间的汉明距离很大程度取决于哈希算法中对图片的缩放。这里对图片缩放成  $20 \times 20$  (400 个像素点), 由于实验所取得仿真数据为故障后半周期, 而故障的暂态信息是很短的, 以至于故障数据量也少。通过实验分析, 汉明距离大于 40、两张图片差异度大于 9% 则可定义为故障图片 (可确定故障馈线), 而正常馈线之间的汉明距离最大不会超过 10, 差异度不超过 5% (最大裕度)。表 1 为感知哈希算法计算的各馈线汉明距离和差异值, 可看出线路 1 图像与其他线路图像有较大的汉明距离且都大于 40, 差异度都大于 5%。其他各线路图像的汉明距离都小, 差异度也低。因此判断线路 1 为故障线路, 符合图 5 中的故障图像展示。

表 1 仿真馈线参数

|      | 线路 1       | 线路 2       | 线路 3     | 线路 4     |
|------|------------|------------|----------|----------|
| 线路 1 | 0, 0       | 57, 14.25% | 56, 14%  | 56, 14%  |
| 线路 2 | 57, 14.25% | 0, 0       | 3, 0.75% | 3, 0.75% |
| 线路 3 | 56, 14%    | 3, 0.75%   | 0, 0     | 1, 0.25% |
| 线路 4 | 56, 14%    | 3, 0.75%   | 1, 0.25% | 0, 0     |

3 算例分析

3.1 110 kV/10 kV 配电网模型

下面用 Matlab/Simulink 搭建 110 kV/10 kV 配电网谐振接地仿真模型, 如图 7 所示。模型共 4 条出线, 每条馈线包括电缆线、架空线、电缆/架空融合线。图中断路器 S 合上时系统为中性点经消弧线圈接地系统。由于消弧线圈大多数处于过补偿运行, 这里取补偿为 10%, 消弧线圈电感值为 1.550 4 H, 电阻值为 14.611 8  $\Omega$ 。共设置 12 个故障点, 模拟不同故障距离对选线影响。模型中变压器和馈线参数如表 2 和表 3 所示。

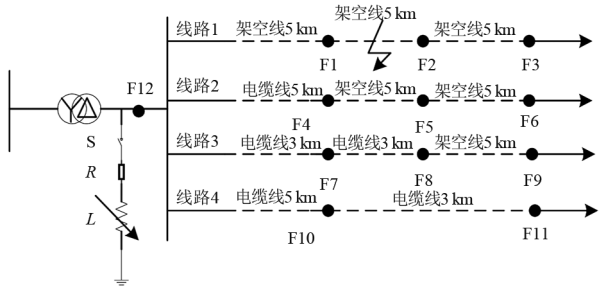


图 7 110 kV/10 kV 配电网单相接地仿真模型

| 表 2 变压器参数  |           |                                |                                |                          |                         |
|------------|-----------|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------|-------------------------|
| 容量/<br>MVA | 变比/<br>kV | 空载损耗<br>$\Delta P_0/\text{kW}$ | 短路损耗<br>$\Delta P_k/\text{kW}$ | 空载电<br>流百分<br>数 $I_0/\%$ | 短路电压<br>百分数<br>$U_k/\%$ |
| 31.5       | 110/10    | 25.6                           | 125.8                          | 0.2                      | 10.5                    |

| 表 3 仿真馈线参数 |     |                                         |                                            |                                              |
|------------|-----|-----------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------|
| 馈线类型       | 序分量 | $R/$<br>$(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$ | $L/$<br>$(\text{mH} \cdot \text{km}^{-1})$ | $C/$<br>$(\mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1})$ |
| 电缆线路       | 正序  | 0.27                                    | 0.255                                      | 0.339                                        |
|            | 零序  | 2.70                                    | 1.019                                      | 0.280                                        |
| 架空线        | 正序  | 0.125 0                                 | 1.300 0                                    | 0.009 6                                      |
|            | 零序  | 0.275 0                                 | 4.600 0                                    | 0.005 4                                      |

3.2 故障仿真

为了验证所提方法在中性点经消弧线圈接地系统中发生单相接地故障时选线的可行性,模拟了不同故障初始相角、馈线类型、故障发生距离、故障接地电阻。

3.2.1 谐振接地系统仿真结果

谐振接地系统的故障电流相较于中性点不接地

系统故障特征微弱。根据故障线路皮尔逊相关系数与非故障线路相关性差别以及故障线路图像与非故障线路差异度最大原则判断出故障线路,结果如表 4、表 5 所示。两种方法应用于谐振接地系统单相故障选线都能达到相应的可行性。基于图像的选线方法在速度上领先,因为:皮尔逊相关系数计算需大量向量计算各种工况下故障选线,平均时间为 1.316 s;基于图像的选线方法无需携带大量零序电流原始数据矩阵运算,只需要图像特征提取进行灰度二值化计算,且感知哈希算法应用于图像快速,各种工况下故障选线平均时间为 0.162 5 s。基于图像故障选线方法相较于基于数据计算皮尔逊相关系数选线方法在选线速度提高了 87.65%。

3.2.2 方法优越性比较

为验证所提算法的提高,仿真实验 F3 处(线路 1)发生单相接地故障,故障接地电阻为 200 Ω、1000 Ω、1500 Ω,分别采用所提方法和文献[14]的

表 4 皮尔逊相关系数选线方法结果

| 故障馈线 | 故障初始<br>相角/(°) | 故障位置 | 故障接地<br>电阻/Ω | 皮尔逊相关系数   |           |           |           |           |           | 选线<br>结果 | 时间/s |
|------|----------------|------|--------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------|------|
|      |                |      |              | (1,2)     | (1,3)     | (1,4)     | (2,3)     | (2,4)     | (3,4)     |          |      |
| 线路 1 | 90             | F2   | 5            | -0.999 87 | -0.999 88 | -0.999 84 | 0.999 82  | 0.999 82  | 0.999 51  | 正确       | 1.43 |
| 线路 1 | 45             | F3   | 200          | -0.999 90 | -0.999 91 | -0.999 90 | 0.999 85  | 0.999 67  | 0.999 68  | 正确       | 1.52 |
| 线路 2 | 0              | F4   | 400          | -0.712 35 | 0.678 47  | 0.704 91  | -0.990 60 | -0.994 80 | 0.972 33  | 正确       | 1.46 |
| 线路 2 | 90             | F5   | 600          | -0.714 92 | 0.687 49  | 0.705 06  | -0.993 14 | -0.996 18 | 0.979 94  | 正确       | 1.45 |
| 线路 3 | 45             | F7   | 200          | 0.822 57  | -0.835 10 | 0.819 76  | -0.988 39 | 0.968 39  | -0.994 87 | 正确       | 1.47 |
| 线路 3 | 0              | F8   | 400          | 0.632 01  | -0.659 49 | 0.636 03  | -0.985 45 | 0.961 06  | -0.993 52 | 正确       | 1.48 |
| 线路 4 | 45             | F10  | 1000         | 0.979 03  | 0.976 36  | -0.979 00 | 0.998 67  | -0.999 63 | -0.999 67 | 正确       | 1.50 |
| 线路 4 | 90             | F11  | 600          | 0.901 62  | 0.899 56  | -0.906 10 | 0.997 66  | -0.999 27 | -0.999 41 | 正确       | 1.45 |
| 线路 0 | 0              | F12  | 200          | 0.753 55  | 0.758 78  | 0.755 08  | 0.998 12  | 0.995 23  | 0.994 27  | 正确       | 1.41 |
| 线路 0 | 90             | F12  | 600          | 0.823 69  | 0.827 86  | 0.824 27  | 0.998 73  | 0.996 62  | 0.995 83  | 正确       | 1.42 |

表 5 基于图像差异度选线方法结果

| 故障馈线 | 故障初始<br>相角/(°) | 故障位置 | 故障接地<br>电阻/Ω | 图像差异度/% |       |       |       |       |       | 选线<br>结果 | 时间/s  |
|------|----------------|------|--------------|---------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|-------|
|      |                |      |              | (1,2)   | (1,3) | (1,4) | (2,3) | (2,4) | (3,4) |          |       |
| 线路 1 | 90             | F2   | 5            | 14.25   | 14.00 | 14.00 | 0.75  | 0.75  | 0.25  | 正确       | 0.152 |
| 线路 1 | 45             | F3   | 200          | 12.25   | 13.00 | 12.25 | 0.75  | 1.00  | 1.25  | 正确       | 0.154 |
| 线路 2 | 0              | F4   | 400          | 9.75    | 2.25  | 1.75  | 10.00 | 10.00 | 0.50  | 正确       | 0.149 |
| 线路 2 | 90             | F5   | 600          | 12.00   | 2.75  | 3.00  | 9.25  | 10.00 | 0.75  | 正确       | 0.150 |
| 线路 3 | 45             | F7   | 200          | 1.00    | 12.25 | 0.25  | 14.25 | 1.25  | 15.50 | 正确       | 0.140 |
| 线路 3 | 0              | F8   | 400          | 0.25    | 14.25 | 0.50  | 12.00 | 1.25  | 14.25 | 正确       | 0.132 |
| 线路 4 | 45             | F10  | 1000         | 0.15    | 2.75  | 14.25 | 0.75  | 1.00  | 14.25 | 正确       | 0.123 |
| 线路 4 | 90             | F11  | 500          | 0.25    | 0.25  | 12.50 | 0.75  | 10.00 | 15.50 | 正确       | 0.152 |
| 线路 0 | 0              | F12  | 200          | 0.25    | 0.25  | 0.25  | 1.00  | 1.25  | 0.75  | 正确       | 0.132 |
| 线路 0 | 90             | F12  | 600          | 1.00    | 1.00  | 1.75  | 1.00  | 1.25  | 1.25  | 正确       | 0.152 |

注:表 4、表 5 中(1,2)、(1,3)、(1,4)、(2,4)、(3,4)为两线路之间的皮尔逊相关系数和图像差异度;线路 0 代表母线。

基于高频分量相关度分析的故障选线方法进行选线。文献[14]的方法利用 EMD 分解,剔除了零序电流工频分量,基于高频分量来做各馈线的相关性分析,定义若馈线相关系数最大值与最小值差大于 0.3 则为故障馈线。但实验部分故障接地电阻只做到了 500 Ω,忽略了大电阻接地时零序电流幅值小高频分量不稳定。使用该方法验证大电阻接地的适用性,结果如表 6 所示,故障接地电阻为 500 Ω 时两种方法都能正确选线。接地电阻为 1000 Ω、1500 Ω 时,由于零序电流幅值变小,文献[14]的方法超过选线能力范围出现选线错误,误认为母线故障,而所提方法在大电阻的影响下下仍然能正确选线。

表 6 仿真馈线参数

| 选线方法      | 故障接地电阻/Ω | 选线判据    |         |         |                  | 选线结果 |
|-----------|----------|---------|---------|---------|------------------|------|
| 文献[14]的方法 | 500      | -0.392, | -0.084, | -0.226, | -0.381           | 线路 1 |
|           | 1000     | -0.355, | -0.152, | -0.223, | -0.245           | 线路 0 |
|           | 1500     | -0.301, | -0.231, | -0.165, | -0.224           | 线路 0 |
| 所提选线方法    | 500      | 12.2%,  | 12.3%,  | 11.3%,  | 2.1%, 1.5%, 2.4% | 线路 1 |
|           | 1000     | 11.5%,  | 12.6%,  | 10.6%,  | 2.5%, 1.7%, 2.3% | 线路 1 |
|           | 1500     | 10.3%,  | 11.2%,  | 10.7%,  | 3.2%, 2.4%, 3.1% | 线路 1 |

注:表中所提图像选线方法选线判据和表 5 一致,描述的是两馈线之间的差异度,且顺序一样。

4 结 论

上面针对谐振接地系统发生单相接地故障时选线速度慢、正确率低等问题,提出基于皮尔逊相关系数选线和基于图像差异度选线方法。通过实验验证了两种方法用于谐振接地系统故障位置、故障初始相角、故障接地电阻等不同工况的可行性和高效性。基于皮尔逊相关系数选线方法平均选线时长为 1.316 s,而基于图像选线方法可达到 0.162 5 s,速度提高了 87.65%。对比了基于 EMD 分解零序电流高频分量馈线之间的相关性,接地电阻过大时该方法出现误判,而所提基于图像的选线方法仍然能够正确选线。实现了从一维数据到二维 RGB 图像的跨越,减少了大量计算储存,有效地结合计算机智能算法应用于电网故障诊断,提出的图像解决方法为下一步电网故障诊断的深度学习算法搭建了思路,为以后配电网单相接地故障选线技术向人工智能化发展提供了一定的理论指导和可行性作用。

参考文献

[1] 王玲,邓志,马明,等.基于状态估计残差比较的配电网故障区段定位方法[J].电力系统保护与控制,2021,49(14):132-139.

[2] 周自强,张焰,郭强,等.基于概率潮流的 10 kV 配电网合环操作安全性评估[J].电网技术,2019,43(4):1421-1429.

[3] 田晶京,耿芳,赵峰,等.谐振接地系统的配电线路接地故障选线新方法[J].重庆大学学报,2022,45(1):59-67.

[4] 魏科文,张靖,何宇,等.基于 VMD 和相关性聚类的谐振接地系统单相接地故障选线[J].电力系统保护与控制,2021,49(22):105-113.

[5] 叶远波,蔡翔,谢民,等.配电网单相接地故障快速选线方法研究[J].电力系统保护与控制,2021,49(3):96-103.

[6] 庞清乐,孙同景,孙波,等.基于小波包分析的配电网故障选线新方法[J].电力自动化设备,2007(4):19-22.

[7] KUMAR G P,JENAP.Pearson's correlation coefficient for islanding detection using Micro-PMU measurements[J].IEEE Systems Journal,2021,15(4):5078-5089.

[8] 赵海龙,张丹丹,黄松,等.基于皮尔逊相关系数的海南省地闪密度与雷击故障关系分析[J].高压电器,2019,55(8):186-192.

[9] 嵇文路,赵晓龙,张明,等.基于小波包全频带分析和 OS-ELM 的小电流单相接地故障选线[J].哈尔滨理工大学学报,2021,26(2):110-117.

[10] 张伟刚,张保会,胡海松,等.应用小波包分析实现配电网单相接地故障选线[J].电力系统自动化,2009,33(23):60-64.

[11] 刘帆,王颖,闫国玉,等.基于差分的图像感知哈希算法[J].计算机工程与设计,2021,42(3):782-789.

[12] 沈麒,赵琰,周晓炜,等.结合结构与梯度的图像哈希算法[J].浙江大学学报(工学版),2020,54(8):1525-1533.

[13] 安坤.基于感知哈希算法的商标图像的检索[D].杭州:浙江理工大学,2014.

[14] 刘谋海,方涛,姜运,等.基于高频分量相关度分析的故障选线方法[J].电力系统及其自动化学报,2017,29(2):101-106.

作者简介:

岑俊(1999),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统配电网故障选线与定位;

覃苏玲(1997),女,硕士研究生,主要研究方向为电力系统负荷预测;

李琪林(1973),男,教授级高级工程师,从事营销电能计量和电力信息通讯技术服务与研究工作。

(收稿日期:2022-10-26)



# 一起 3/2 接线方式敞开式隔离开关发热故障分析

王来源,雷昌成

(国网宁夏电力有限公司超高压公司,宁夏 银川 750011)

**摘要:**文中主要针对一起 3/2 接线方式隔离开关接触不良引起保护装置异常事件,从 3/2 接线方式等值电路、电流分配、接触电阻增大和线路负载变化所引起接触点温升特性等方面进行分析,并与双母线接线方式中隔离开关接触不良引起温升特性进行对比,得出 3/2 接线方式中隔离开关接触不良所引起接触点温升特性与负荷变化、标准回路电阻变化的对应关系和差异。

**关键词:**隔离开关;3/2 接线;接触电阻;温升极限

**中图分类号:**TM 564.1 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2023)01-0090-05

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20230117

## Heating Fault Analysis of Open-type Isolation Switch under 3/2 Connection Mode

WANG Laiyuan, LEI Changcheng

(Ultra-high Voltage Company of State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd.,  
Yichuan 750011, Ningxia, China)

**Abstract:** Aiming at an abnormal event of protection device caused by poor contact of isolation switch under 3/2 connection mode, the characteristics of contact temperature rise caused by the equal circuit under 3/2 connection mode, current distribution, the increase of contact resistance and line load are analyzed. The characteristics are compared with that of temperature rise caused by poor contact of isolation switch under double bus connection mode. The relationship and differences between contact temperature rise caused by poor contact of isolation switch and the change of load and preferred circuit resistance under 3/2 connection mode are obtained.

**Key words:** isolation switch; 3/2 connection; contact resistance; temperature rise limit

## 0 引言

隔离开关是电力设备在无载流情况下进行运行方式切换和对被检修电气设备与带电设备实施电气隔离的电器,是电力系统输变电系统必不可少的设备。运行于户外的敞开式隔离开关由于运行条件不佳,容易在机械或电气方面产生故障<sup>[1]</sup>。常见电气故障为触头烧蚀、接触松动、接触表面污染等问题引起隔离开关接触区域发热或电网设备断流现象,严重时可能使电气设备发生损毁或保护装置异常等故障<sup>[2]</sup>。

下面,以某 330 kV 变电站 3/2 接线方式隔离开关接触不良引起保护装置异常为例,对 3/2 接线方式中隔离开关接触不良所导致电流异常变化和接触面发热特性进行分析,与双母线接线方式中隔离开

关接触不良所引起的电流变化和隔离开关发热进行对比,分析不同接线方式中隔离开关接触不良所导致的后果。

## 1 事件经过

### 1.1 异常前运行方式

某 330 kV 变电站采用 3/2 接线方式,共 6 个完整串。6 个完整串均成串运行,330 kV 第三串 3332 与 3330 断路器带 5 号主变压器运行,3330 与 3331 断路器带 31331 安枣Ⅱ线运行。如图 1 所示。

### 1.2 异常信号及处置过程

2020 年 11 月 30 日 23:05,某地调监控通知某变电站 330 kV 5 号联络变压器 A、B 柜装置异常,信号长时间未复归。

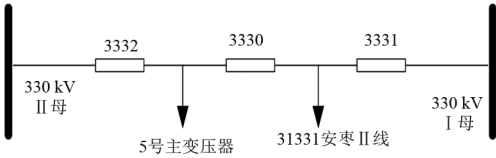


图 1 异常前运行方式

监控后台显示 3330 断路器 A 相电流为 0,B 相电流为 163 A,C 相电流为 153 A;3332 断路器 A 相电流 533 A,B 相电流为 380 A,C 相电流为 391 A。后台报文显示 5 号主变压器保护柜 I 侧 1 支路电流互感器异常,5 号主变压器保护柜 I 侧 2 支路电流互感器异常;5 号主变压器公用测控柜报 5 号主变压器公用测控 A、B 柜装置报警。

现场检查发现 33302 隔离开关 A 相触指未夹紧。将 33302 隔离开关处理使触指夹紧后,监控后台 3330 断路器 A 相电流恢复为 207 A,3332 断路器 A 相电流恢复至 387 A,5 号主变压器保护 A、B 柜装置报警信号复归;5 号主变压器保护柜 I 侧 1 支路、2 支路电流互感器异常信号复归。

上述 5 号主变压器保护柜 I 侧 1 支路和 2 支路电流互感器异常原因为 33302 隔离开关 A 相接触不良造成 3330 断路器和 3332 断路器三相电流不平衡。因此,33302 隔离开关 A 相接触不良是此次异常信号的直接原因。

2 隔离开关接触不良分析

2.1 3/2 接线方式电路模型

3/2 接线方式可以简化为两端电压幅值相等、相位相同的两端供电网络。取其中一串一相作单一环网的等值电路,如图 2<sup>[3]</sup>所示。

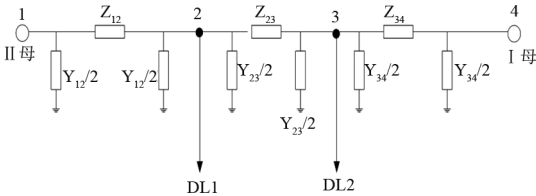


图 2 3/2 接线方式单相单串等值电路

将一完整串各断路器以及所属隔离开关整体合并为一个阻抗单元。由于站内设备长度相比与线路长度可忽略不计,因此等值电路中导纳值可忽略不计;由于断路器及隔离开关等设备可近似为短引线,因此设备的感抗和互感均可忽略不计。最终电路可简化为由各断路器及所属隔离开关回路电阻  $R$  所

组成的简单电路,如图 3 所示。

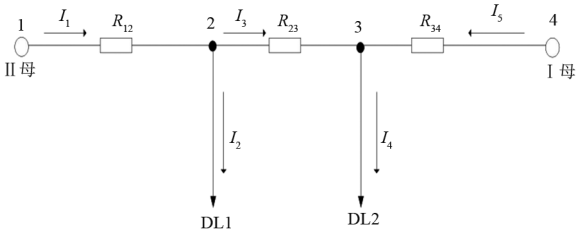


图 3 3/2 接线方式单相单串简化电路

假设从母线注入的电流为  $I_1$ 、 $I_5$ ,线路负荷为  $I_2$ 、 $I_4$ ,流经  $R_{23}$  的电流为  $I_3$ 。由于 330 kV I、II 母环网运行, $U_1$  与  $U_2$  电压相等,依据基尔霍夫电流和电压定律可得:

$$I_1 = \frac{I_2(R_{23} + R_{34}) + R_{34}I_4}{R_{12} + R_{23} + R_{34}} \tag{1}$$

$$I_3 = \frac{I_4R_{34} - R_{12}I_2}{R_{12} + R_{23} + R_{34}} \tag{2}$$

$$I_5 = \frac{I_4(R_{12} + R_{23}) + R_{12}I_2}{R_{12} + R_{23} + R_{34}} \tag{3}$$

计算结果表明,成串运行的 3 个断路器之间的电流与回路电阻之间存在分配关系。

2.2 接触电阻变化与电流分配

正常运行中断路器及所属隔离开关整体回路电阻为微欧级的电阻值,下面假定某个隔离开关接触不良,其接触电阻按照标准回路阻值的整数倍增长,分析相关电流变化趋势。

假定两条线路负荷均为 500 A。环境温度为 25 ℃,各断路器及所属隔离开关标准回路电阻为 20  $\mu\Omega$ ,330 kV I 母侧断路器的某一侧隔离开关发生接触不良,接触电阻按照标准回路电阻整倍数增长。根据式(1)一式(3)可得出如图 4 所示电流分配曲线。

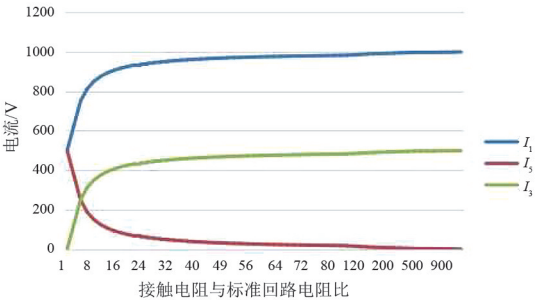


图 4 I 母隔离开关电阻增大时电流分配情况

由图 4 可知,当隔离开关接触电阻接近标准回路电阻 60 倍左右时,该隔离开关所在断路器载流量接近于 0。

2.3 接触电阻变化与温升

当隔离开关接触点电阻增大,通入电流后,接触点温度迅速增大。文献[4]给出了电流通过触头时,接触点温升计算公式。

τ<sub>k</sub> =  $\frac{I_k^2 R_k^2}{8LT}$  (4)

式中:τ<sub>k</sub> 为接触点温升,K;I<sub>k</sub> 为流经触点的电流,A;R<sub>k</sub> 为接触点接触电阻,Ω;L 为系数,2.4×10<sup>-8</sup> V<sup>2</sup>/K<sup>2</sup>;T 为触头平均温度,K。

在 3/2 接线方式中,随着某一隔离开关接触电阻增大,根据式(1)一式(3)可得出电阻增大时电流同步减少的趋势,按照第 2.1 节所述假定条件,根据式(4)可得出如图 5 所示温升曲线。

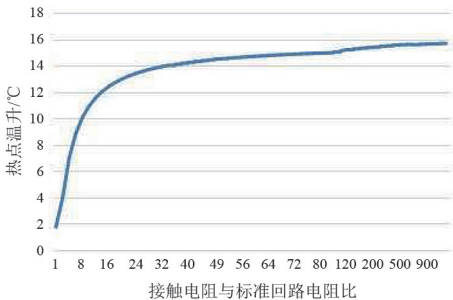


图 5 I 母隔离开关电阻增大时热点温升情况

根据图 5 所示,当隔离开关接触电阻接近标准回路电阻的 60 倍左右时,该隔离开关接触点温升接近于温升上限。

2.4 回路电阻变化与温升

根据式(1)一式(3)可知,在同一完整串中,流过各断路器的电流与各设备单元回路电阻之间存在分配关系。接触电阻增长与该设备单元负载电流减小存在线性关系,该线性关系与接触电阻绝对数值关联性不高,主要与接触电阻和标准回路电阻之间的比值有关。例如:对于 10 000 μΩ 的接触电阻,当正常标准回路电阻为 10 μΩ 时,由图 4 和图 5 可知,该接触电阻所对应的电流曲线和温升曲线已接近平稳极限值;但当标准回路电阻为 1000 μΩ 时,该接触电阻所对应的电流曲线和温升曲线正好处于曲线斜率最大范围内。因此对于相同负载电流情况下的不同标准回路电阻的电气回路,同一接触电阻值所引起的温升效果不同。考虑最不利的情况,假设线路负荷均为流出方向的 500 A,分别以标准回路电阻为 10 μΩ、20 μΩ、30 μΩ、40 μΩ、50 μΩ 所对

应接地电阻成倍增大时的温升情况进行分析,结果如图 6、图 7 所示。

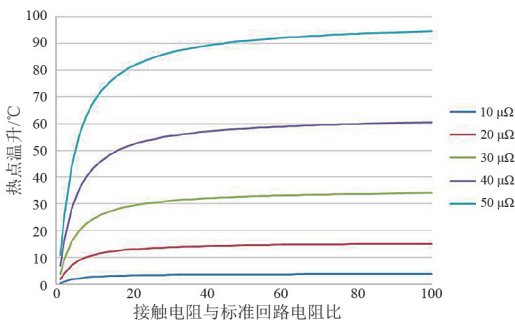


图 6 不同标准回路电阻电气设备热点温升情况

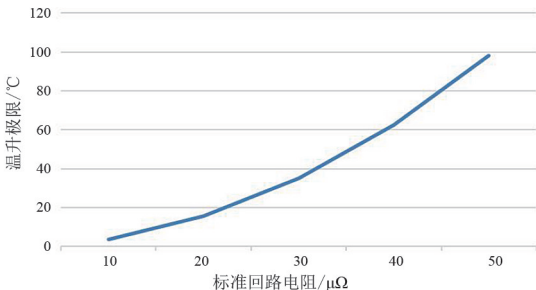


图 7 标准回路电阻成比例增大时的温升极限趋势

根据图 7 所示,当隔离开关标准回路电阻按照线性倍率增长时,因整体设备回路电阻增大所引起接触不良点温升极限呈正向指数增长趋势。

2.5 线路负载变化与温升

在实际应用中,电气设备安装调试结束后,忽略外部环境及运行影响,其回路电阻相对固定。电力设备负荷因运行方式或潮流变化不定期发生变化。

假设标准回路电阻为 20 μΩ,依据式(1)一式(4)计算线路负荷为 100 A、200 A、300 A、400 A、500 A、600 A、700 A 时的温升变化。根据计算结果得出温升趋势如图 8 所示。

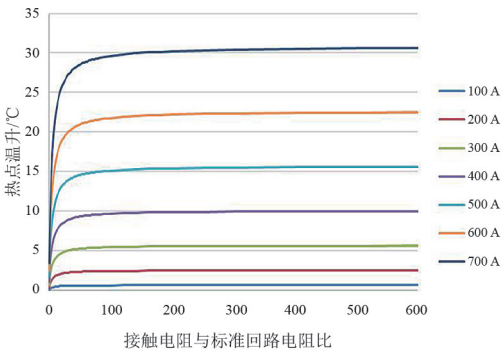


图 8 不同负载电气设备热点温升情况

根据图 9 所示,当线路负荷按照线性整数倍率



增长时,因线路负荷大所引起接触不良点温升极限呈正向指数增长趋势。

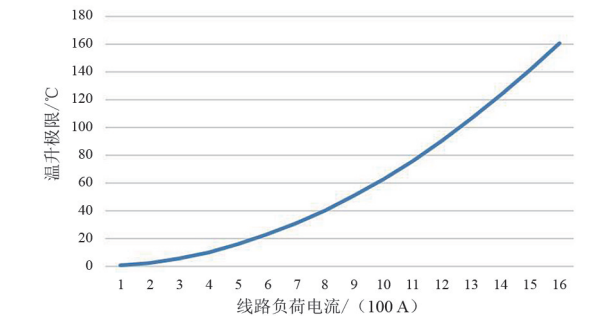


图 9 线路负荷成比例增大时的温升极限趋势

2.6 双母线接线方式中接触不良点温升

对于双母线接线方式,由于不存在环网供电,负荷电流在电气设备接触电阻增大时不会降低。现假设某双母线接线回路负荷电流为 100 A,正常回路电阻为 20  $\mu\Omega$ ,根据式(4)计算所得温升趋势如图 10 所示。

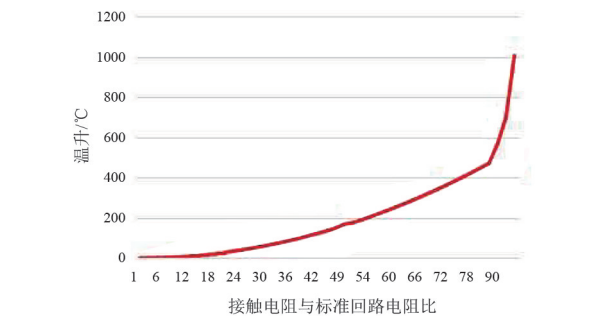


图 10 双母线接线接触不良点热点温升情况

由图 10 可知,当电气回路中隔离开关接触电阻增大至 90 倍标准回路电阻时,接触点温度开始呈直线上升趋势,并且已经接近 1000  $^{\circ}\text{C}$  高温。

在上述分析过程中,对于 3/2 接线方式中隔离开关接触点温升过程,忽略了风速和接触面热对流的散热、阳光照射的升温影响以及温升点向周围设备热传导效应,因此,实际中温升应在理论计算值附近振荡。对于双母线接线方式隔离开关接触点温升过程,忽略了随着温度升高,氧化反应加速,腐蚀物皮膜加厚,接触电阻快速增大,过热越加严重产生恶性循环<sup>[5]</sup>的影响,因而在实际中温升曲线斜率应比理论计算曲线斜率更大,温升速度更快。

3 结 论

经过上述分析,由于 3/2 接线方式具有环网供电的特点,处于某一串的隔离开关所流过的电流遵

循本串电气元件电阻的线性分配关系。基于线性分配关系,当某一元件电阻增大时,该元件所流过的电流呈线性减小。

对于 3/2 接线方式隔离开关接触不良时,所展现的特性主要表现在以下方面:

1) 当某一隔离开关接触增大时,其对本串负荷电流的分配取决于接触电阻与标准回路电阻比,与接触电阻绝对值本身相关性不大。由图 4 可知当接触电阻达到 60 倍的标准回路电阻时,该元件流过电流接近于 0,此时二次采样值为 0,保护装置会报异常。

2) 接触电阻热点温升极限与线路负荷和标准回路电阻的增长关系呈正向指数增长。当接触不良点电阻增大到某一值时,该热点极限温升由该点接触电阻阻值与流过的电流共同决定,流过的电流与标准回路电阻相关。当标准回路比较大或接触不良点接触电阻达到 60 倍标准回路电阻时,流过该点的电流会呈线性增大,接触不良点温升极限呈指数增大。

3) 相对于 3/2 接线方式而言,双母线接线由于不存在环网供电特性。当接触电阻增大时,流过接触不良点的负荷电流不会降低,因此热点温度极限值与标准回路电阻无关,仅取决于接触电阻绝对值本身。

根据上述结论,提出以下建议:

1) 加强 3/2 接线方式中低温发热设备关注,通过分析该发热设备所在元件及相邻元件三相电流,判断是否存在设备接触不良导致的低温发热及负荷电流不平衡。当出现电流不平衡时可利用式(1)一式(3)计算接触电阻的严重程度来制定状态检修策略。当负荷电流超过 1000 A 时需要预防因线路大负荷引起设备高温发热情况。

2) 当两条线路负荷同向时,根据负荷电流分配方式需要加强对边断路器及其所属隔离开关的关注;当线路负荷非同向时,要加强对中断路器及其所属隔离开关进行关注。

3) 设备检修时应注意同一串同一相回路电阻的测试,并确保回路电阻的一致性。防止因回路电阻不匹配在长期运行过程中的微发热,以及环境的影响造成高回路电阻的元件接触点电阻持续增加导致设备接触不良。

4) 在设备制造过程中,采取优化工艺降低各个元件的标准回路电阻,降低设备运行过程中发热极

限。应确保隔离开关更换或大修后的设备与未更换继续运行的设备回路电阻的一致性,降低设备发热缺陷机率。

参考文献

[1] 张丽娟.敞开式隔离开关发热故障分析及防范措施[J].山东电力技术,2019,46(2):46-49.  
[2] 滕松,刘新,李毅,等.电网中高压隔离开关触头接触温升实验测试分析[J].电子测量技术,2019,42(8):119-121.

(上接第 49 页)

流系统电流超过额定值,通过最小程度地减小有功功率的输出降低交流电流幅值,避免交流系统过电流。针对在受端有功功率输出减小、不平衡功率增大的现象,通过增大抽水蓄能电站有功功率的输出,保证新能源风电场最大功率输出,同时维持直流电压的稳定。最后,在 PSCAD/EMTDC 上搭建的四端柔性直流输电系统模型验证了所提控制策略的有效性。

参考文献

[1] 袁志昌,郭佩乾,刘国伟,等.新能源经柔性直流接入电网的控制与保护综述[J].高电压技术,2020,46(5):1460-1475.  
[2] 徐政.柔性直流输电系统[M].北京:机械工业出版社,2016:8-9.  
[3] 张文亮,汤涌,曾南超.多端高压直流输电技术及应用前景[J].电网技术,2010,34(9):1-6.  
[4] 吴俊宏,艾芊.多端柔性直流输电系统在风电场中的应用[J].电网技术,2009,33(4):22-27.  
[5] 陈鹏,刘继春,余熙,等.混合三端直流输电系统应用于风电场并网的研究[J].可再生能源,2015,33(3):357-362.  
[6] 全国电力电子系统和设备标准化技术委员会.柔性直流输电换流器技术规范:GB/T 34139—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.  
[7] 中国电力企业联合会.柔性直流输电术语:GB/T 40865—2021[S].北京:中国标准出版社,2021.  
[8] 周鑫.多端柔性直流输电系统故障穿越控制策略研究[D].北京:华北电力大学,2021.  
[9] 黄伟煌,李明,刘涛,等.柔性直流输电受端交流侧故障下的控制策略[J].南方电网技术,2015,9(5):27-31.  
[10] 刘天琪,陶艳,李保宏.风电场经 MMC-MTDC 系统并网的几个关键问题[J].电网技术,2017,41(10):3251-3260.  
[11] 邱子鉴,刘晋,周鑫,等.多端柔性直流输电系统交流

[3] 李振望.二分之三接线方式隔离开关烧毁原因分析[J].云南电力技术,2016,44(S2):103-104.  
[4] 黎斌.高压电气设计[M].北京:机械工业出版社,2010.  
[5] 钟振蛟.户外隔离开关导电回路过热的原因及对策[J].高压电器,2005,41(4):307-309.

作者简介:

王来源(1988),男,硕士,工程师,主要研究方向为电力系统稳定性分析;  
雷昌成(1990),男,学士,主要研究方向为电力系统稳定性分析。  
(收稿日期:2022-07-26)

故障穿越控制策略[J].华北电力大学学报(自然科学版),2021,48(6):32-40.  
[12] 邵冰冰,韩民晓,郭抒颖,等.多端柔性直流输电系统交流侧故障穿越功率协调控制[J].电力建设,2017,38(8):109-117.  
[13] 王岩,魏林君,高峰,等.光伏电站经柔性直流集电送出系统的低电压穿越协调控制策略[J].电力系统保护与控制,2017,45(14):70-78.  
[14] 蔡新雷.广东南澳多端柔性直流输电系统调度运行策略探讨[J].广东电力,2016,29(7):93-96.  
[15] 魏伟,许树楷,李岩,等.南澳多端柔性直流输电示范工程系统调试[J].南方电网技术,2015,9(1):73-77.  
[16] 董云龙,凌卫家,田杰,等.舟山多端柔性直流输电控制保护系统[J].电力自动化设备,2016,36(7):169-175.  
[17] 高强,林烨,黄立超,等.舟山多端柔性直流输电工程综述[J].电网与清洁能源,2015,31(2):33-38.  
[18] 韩亮,白小会,陈波,等.张北±500 kV 柔性直流电网换流站控制保护系统设计[J].电力建设,2017,38(3):42-47.  
[19] 杜晓磊,郭庆雷,吴延坤,等.张北柔性直流电网示范工程控制系统架构及协调控制策略研究[J].电力系统保护与控制,2020,48(9):164-173.  
[20] 高悦.基于 MMC-HVDC 的多端柔直电网继电保护新原理研究[D].西安:西安科技大学,2021.  
[21] 李向阳.多端柔性直流输电系统的控制方法研究[D].郑州:郑州大学,2017.  
[22] 任敬国,李可军,刘合金,等.基于改进定有功功率控制特性的 VSC-MTDC 系统仿真[J].电力系统自动化,2013,37(15):133-139.  
[23] 陈磊. MMC-HVDC 换流站控制与低电压穿越策略[D].合肥:合肥工业大学,2021.

作者简介:

张世豪(1998),男,硕士研究生,研究方向为柔性直流输电技术;  
石若林(1995),男,工程师,从事水力发电工作;  
丁义轩(1994),男,工程师,从事超高压输电工作。  
(收稿日期:2022-07-12)



# 四川蜀能电科 能源技术有限公司

面向未来的高新技术企业



战略新兴 科技先行

成果转化平台 / 新技术推广平台 / 技术支撑平台 / 专业化检测机构





# 面向新型电力系统的配电网故障检测与处置技术

配电网是新型电力系统建设的主战场。分布式电源、储能、多元负荷等新要素的发展将深刻改变配电网的结构、特性和运行方式,电力用户对高可靠性、高质量电力供应的需求不断提升,同时社会各界对山火、人身触电等安全风险的防范提出了更高的要求。

故障检测与处置技术是配电网安全、可靠运行的关键保障。为了支撑新型配电网的发展,满足高质量发展目标下的高安全性、高可靠性供电需求,国内外学者在新型配电网故障特性、检测方法、继电保护以及快速恢复等技术领域开展了广泛的研究,并取得了一定的突破。为此,《四川电力技术》特邀电子科技大学张真源教授、四川大学高红均副教授、国网四川电科院张华高级工程师作为特约主编,主持“面向新型电力系统的配电网故障检测与处置技术”专题,希望与作者和广大读者一起探讨新形势下配电网故障检测与处置技术领域面临的挑战、机遇和发展方向。诚邀从事相关研究的专家学者和科研人员积极投稿。

## 征稿方向(包括但不限于)

- (1) 含分布式电源的配电网故障特性
- (2) 适应分布式电源接入的配网继电保护技术
- (3) 满足高可靠性供电需求的配电网故障快速定位、处置与复电技术
- (4) 面向防灾减灾需求的配电网故障处置技术
- (5) 微电网、直流配电网故障特性及处置技术

## 投稿要求

- (1) 本次专栏接受研究论文(包括理论研究、数值模拟和实验研究)及高质量的综述。
- (2) 摘要250~300字为宜,须包含四要素,即目的、方法、结果、结论,同时应着重说明文章的创新点。
- (3) 论文引言中研究目的清晰明确,详细介绍国内外研究背景,对现有其他研究者的工作进行客观的评述;阐述自己的观点,并对自己的研究思路做一总体介绍。论文研究设计和方法叙述清楚,数据合理并被正确地分析和解释;比较所提出的方法和现有方法的优缺点。
- (4) 正文部分要求层次清晰、重点突出、论述严谨、文字简练,避免长篇公式推导,字数以不超过6000字(包括图表)为宜。
- (5) 结论部分应概括文章研究工作,给出创新性、指导性结论。

来稿请用Word排版,格式、摘要、作者信息请参考《四川电力技术》投稿网站首页论文模板。

## 投稿须知

- (1) 请登录《四川电力技术》投稿网站: <http://scdljs.ijournals.cn/scdljs/home> 注册作者用户名和密码进行投稿,投稿栏目请选择“配电网故障检测与处置技术”专题。
- (2) 投稿截止时间: 2023年5月30日。
- (3) 投稿联系人: 雷老师18602855676      程老师028-69995169      罗老师028-69995168