

四川电力技术

SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY

第45卷第**5**期

2022年10月

四川省电机工程学会

四川电力科学研究院

二零二二年 第四十五卷 第五期



建设中的白鹤滩—浙江特高压线路

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
秘 书 李世平
程文婷

目 次

· 新型电力系统 ·
考虑寿命衰减及电价机制的电池储能系统技术经济研究
..... 田玉婷,魏巍,孙昕炜,刘俊勇,梅生伟(1)
考虑实时需求的冷热电联供型微网优化调度..... 杜晓婷(6)
飞轮储能风力发电系统的功率快速平滑控制策略研究
..... 邵宜祥,过亮,蔡国洋,刘剑,郭春岭,胡丽萍,孙素娟(14)
· 电力设计优化 ·
基于时间序列迭代的输电线路覆冰厚度估计方法
..... 吴天宝,马小敏,唐军,彭旭,庄杰(20)
山区输电线路微型桩模块化钻机的研制
..... 董杰,范荣全,贺前,王杰,李何钰秋(26)
基于握手式交互策略智能复合开关研究..... 胡天祥,黎军华(31)
多逆变器并网系统谐振混合阻尼参数设计 郑嘉龙,陈静,赵丽华(35)
· 电力运检技术 ·
220 kV 变压器中性点接地方式改造后相关设备的安全校核分析
..... 孙鹏程,王贞强,梁伟,杨万波(42)
基于 YOLOv5 的电力巡检图像缺陷识别研究
..... 庞博,鲍志远,杨明坤,张凌浩,孙小毛,胡强(48)
变压器抗短路能力校核不合格原因分析及治理措施研究
..... 谢茜,张宗喜,丁理杰,冯运,刘睿(54)
基于宽频带声电检测的变压器现场局部放电诊断及定位方法
..... 何宇航,丁理杰,周波,李敬雄,姚晓,周电波(58)
生物降解油浸绝缘纸特征产物及微观结构研究
..... 王杰,吴晓晖,胡仕红,兰新生,张力(64)
基于 ER 算法的智能站保护二次回路故障定位方法
..... 汪勤,吴旻,姚辉昌,李江洋(70)
· 经验交流 ·
一起低频减载误动作事件分析及改进措施..... 张华杰,杨紫苓,刘明忠,张纯(75)
一起 220 kV 变压器匝间短路故障诊断与分析..... 梁弘毅,廖文龙,刘睿(79)
一起 110 kV 敞开式隔离开关合闸失败原因分析
..... 郭杨,高世宇,陈昊,余爽,李义峰(83)
利用油中溶解气体含量分析套管漏气的方法 鲁力铭(89)
封面图片由周凤丹提供

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

2022 年第 45 卷第 5 期(总 281 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:成都市锦晖西二街 16 号

邮政编码:610041

电话:(028) 69995169/5168/5165

邮箱:cdscdljs@163.com

印 刷:四川科锐得实业集团有限公司
文化传播分公司

封面设计:四川科锐得实业集团有限公司
文化传播分公司

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

* 2022-10

CONTENTS

· New Power System ·

- Techno-economic Analysis of Battery Energy Storage System Considering Degradation and Pricing Mechanism
 TIAN Yuting, WEI Wei, SUN Xinwei, LIU Junyong, MEI Shengwei(1)
- Optimal Scheduling of CCHP-based Microgrid Considering Real-time Demand DU Xiaoting(6)
- Research on Fast Power Smoothing Control Strategy for Wind Power Generation System with Flywheel Energy Storage
 SHAO Yixiang, GUO Liang, CAI Guoyang, LIU Jian, GUO Chunling, HU Liping, SUN Sujuan(14)

· Electric Power Design Optimization ·

- An Estimation Method for Icing Thickness of Transmission Line Based on Time Series Iteration
 WU Tianbao, MA Xiaomin, TANG Jun, PENG Xu, ZHUANG Jie(20)
- Design and Research on Modular Drilling Rig of Micro-pile for Transmission Lines in Mountainous Area
 DONG Jie, FAN Rongquan, HE Qian, WANG Jie, LI-HE Yuqiu(26)
- Research on Intelligent Compound Switch Based on Handshake Interaction Strategy HU Tianxiang, LI Junhua(31)
- Hybrid Damping Parameters Design of Resonance for Multi-inverter Grid-connected System ZHENG Jialong, CHEN Jing, ZHAO Lihua(35)

· Operation and Maintenance Technology ·

- Safety Check and Analysis of Relevant Equipment after Transformation of Neutral Point Grounding Mode of 220 kV Transformer
 SUN Pengcheng, WANG Zhenqiang, LIANG Wei, YANG Wanbo(42)
- Research on Defect Recognition of Electric Power Patrol Image Based on YOLOv5
 PANG Bo, BAO Zhiyuan, YANG Mingkun, ZHANG Linghao, SUN Xiaomao, HU Qiang(48)
- Analysis of Unqualified Check for Anti-short-circuit Ability of Transformers and Research on Treatment Measures
 XIE Qian, ZHANG Zongxi, DING Lijie, FENG Yun, LIU Rui(54)
- On-site Partial Discharge Diagnosis and Location Method for Transformer Based on Broadband Combined Acoustic-Electrical Detection
 HE Yuhang, DING Lijie, ZHOU Bo, LI Jingxiong, YAO Xiao, ZHOU Dianbo(58)
- Study on Characteristic Products and Microstructure of Biodegradable Oil-impregnated Insulation Paper
 WANG Jie, WU Xiaohui, HU Shihong, LAN Xinsheng, ZHANG Li(64)
- Fault Location Method for Secondary Circuit of Protection Systems in Smart Substation Based on ER Algorithm
 WANG Qin, WU Min, YAO Huichang, LI Jiangyang(70)

· Experience Sharing ·

- Analysis of A Low-frequency Load Shedding Misoperation Event and Its Improvement Measures
 ZHANG Huajie, YANG Ziling, LIU Mingzhong, ZHANG Chun(75)
- Diagnosis and Analysis of An Inter-turn Short-circuit Fault for 220 kV Transformer LIANH Hongyi, LIAO Wenlong, LIU Rui(79)
- Cause Analysis on Closing Failure of A 110 kV Open-type Isolating Switch and Its Improvement Measures
 GUO Yang, GAO Shiyu, CHEN Hao, YU Shuang, LI Yifeng(83)
- Gas Leakage Analysis Method for Bushing by Using Gas Content Dissolved in Oil LU Liming(89)

SICHUAN ELECTRIC POWER
 TECHNOLOGY

2022 Vol.45 No.5
 (Ser.No.281)

Bimonthly, Started in 1978

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

Postcode: 610041

Sponsor:

Sichuan Society of Electrical Engineering
 Sichuan Electric Power Research Institute
 Editor in chief: LI Fuxiang

Editor & Publisher:

Editorial Department of SICHUAN ELECTRIC POWER
 TECHNOLOGY

考虑寿命衰减及电价机制的电池储能系统 技术经济研究

田玉婷^{1,2}, 魏巍¹, 孙昕炜^{1,3}, 刘俊勇³, 梅生伟²

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;

2. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084;

3. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

摘要:文中提出了一个电池储能系统技术经济分析框架。在此框架中嵌入了一个详细的电池退化模型,该模型可对电池衰减过程中的放电深度、温度、充电/放电速率以及荷电状态等影响因素进行建模分析。在不同的运行条件下,评估了电池储能系统在整个寿命期内的能量吞吐量和平准化储能成本,分析了不同电价机制下电池储能系统的技术经济性。

关键词:储能系统; 电池寿命衰减; 技术经济; 电价机制

中图分类号: TM 731 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2022)05-0001-05

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20220501

Techno-economic Analysis of Battery Energy Storage System Considering Degradation and Pricing Mechanism

TIAN Yuting^{1,2}, WEI Wei¹, SUN Xinwei^{1,3}, LIU Junyong³, MEI Shengwei²

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

2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract: A comprehensive techno-economic analysis framework of battery energy storage system (BESS) is proposed. In this framework, a detailed battery degradation model is embedded, which models the influencing factors, such as depth-of-discharge, temperature, charging/discharging rate, and state of charge in the battery aging process. Total energy throughput and levelized cost of storage of BESS over the whole lifespan are evaluated under different operating conditions. Also, the techno-economic performance of BESS under different electricity price mechanisms is analyzed, including the time-of-use plan and the real-time pricing mechanism.

Key words: energy storage; battery degradation; techno-economics; electricity price mechanism

0 引言

随着可再生能源装机的日益增多,储能系统正受到世界各国的高度重视。由于光伏和风电等新能源的发电量具有不确定性和随机性,高比例新能源电力系统可能存在频率波动及电压波动等问题。储能系统作为发电供应和负荷需求之间的中转站,可

基金项目:国网四川省电力公司科技项目(B3199722000L)

以提高系统的可靠性和稳定性。

目前有多种类型的储能系统可用于支持电力系统。例如,抽水蓄能和压缩空气储能等大型储能设施以及锂离子电池、钠硫电池和全钒液流电池等电化学储能。随着锂离子电池性能的提高和成本的降低,锂离子电池,尤其是磷酸铁锂电池成为目前使用最多的电池。

储能系统的投资成本仍较高,因此在规划运行时准确评估其盈利能力并优化运行策略至关重要。

文献[1]开展了智能家庭中光伏和电池储能系统(battery energy storage system, BESS)容量配置的研究,建立了基于优化算法的家庭能源管理系统,可为不同电费机制下的用户提供配置参考。文献[2]提出了一个储能系统提供多种服务时的综合价值评价方法,包括能源套利、频率调节和可靠性提升等。文献[3]研究了分时电价下用户响应行为的模型与算法。文献[4]提出了考虑需量管理的用户侧储能优化配置方法。文献[5]研究了计及分时电价下用户需求响应的分布式储能多目标优化运行方法。

不同存储技术的寿命衰减过程不尽相同。例如,抽水蓄能和压缩空气储能等物理储能系统容量可能会随着机械磨损而缓慢衰减。锂离子电池的循环寿命与循环次数、放电深度等密切相关。全钒液流电池的寿命也与运行状态相关,但深度循环不会像影响锂离子电池那样显著恶化全钒液流电池的健康状态。容量衰减过程是电池相关研究的一个关键课题。文献[6]对锂离子电池衰减的基本因素进行了提炼,包括内部老化机制和影响因素。文献[7]提出了一种用于估计电池寿命损失的半经验模型。文献[8]提出了一种考虑电池循环寿命的 BESS 在电力市场中的最优竞价策略。文献[9]讨论了电池衰减对提供多场景应用的储能系统的经济性影响,并提出了一个经济性-衰减模型来综合量化运行策略带来的影响。文献[10]梳理了电网侧大规模电化学储能运行效率及寿命衰减建模方法。

储能系统的盈利能力与其应用场景和运行状态密切相关。峰谷套利是储能系统最常见的应用之一,在不同的定价机制下其盈利能力可能会有很大差异。因此,在评估储能项目经济性时需要一个完整的考虑具体运营策略和电价机制的综合技术经济评价框架。基于上述研究现状,首先,总结了不同电价机制运行模型以及电池衰减模型;然后,提出了不同电价机制下的电池储能系统经济分析指标和方法;最后,基于实际的电价数据,分析了电池储能系统的经济性。

1 储能系统模型

储能系统可实现的套利润与充放电价格之间的差异密切相关。储能系统运营商需要优化充放电策略,确定何时对电池进行充电和放电以最大化利

润。下面介绍不同电价机制下储能电站的运行方式,包括固定费率、分时电价和实时电价 3 种模式,以及储能系统的运行约束条件和寿命衰减模型。

1.1 固定费率

固定费率模式下的消费者在指定期限内以每千瓦时的固定费率支付电费。这种支付方式可以使用户免受能源价格上涨带来的影响。但是储能系统在该方式下无法为用户带来利润,并且由于功率转换过程中的能量损失,反而会增加用户的电费支出。在此方式下,用户安装储能系统的好处主要体现在提高用户用电可靠性或提升电能质量等。

1.2 分时电价

分时电价机制(time-of-use, TOU)的实行可以鼓励人们将部分用电负荷从高峰期转移到非高峰期。在此电价机制下,消费者在低谷时段、平段、高峰时段和尖峰时段按不同费率支付。通常消费者在低谷时段支付的费用低于标准固定费率,而在高峰时段和尖峰时段支付的费用更高。如果消费者在高峰和尖峰期间能够减少用电,或者他们可以在这些时间使用存储在储能系统中的电能,则可降低电费节省开支。

在分时电价机制下的储能运营策略简单明了,即在低谷时段或平段充电,在高峰时段或尖峰时段放电。储能系统一天产生的利润或节省的电费可以表示为

$$C_{\text{TOU}} = \sum_{t=1}^{T_1} \lambda_1 E_{d,t} + \sum_{t=1}^{T_2} \lambda_2 E_{d,t} - \sum_{t=1}^{T_3} \lambda_3 E_{c,t} - \sum_{t=1}^{T_4} \lambda_4 E_{c,t} \quad (1)$$

式中: λ_1 、 λ_2 、 λ_3 和 λ_4 分别为尖峰、高峰、平段、低谷时段的电价; T_1 、 T_2 、 T_3 和 T_4 分别为尖峰、高峰、平段、低谷时段的总小时数; $E_{d,t}$ 和 $E_{c,t}$ 为 t 时刻的放电和充电电量。

1.3 实时电价

实时电价(real-time pricing, RTP)可反映电能的供需关系,在采用实时电价的地区,电价会在很短的时间间隔内变化,例如 1 h。用户支付的电费根据售电公司或其他代理机构在批发市场上结算的实时电价而有所不同。当用电需求很高时电价也相对较高,因顶峰电厂必须发电以满足用电需求,此类电厂的运行成本往往高于提供基本负荷电厂的运行成本。

用户通常会提前 1 天或在更短时间内收到报

价。储能系统使用者可以通过电价预测来优化电池运行情况,从而以相对较低的价格为电池充电,在价格较高时放电。储能电池在实时电价机制下 1 天的利润为

$$C_{\text{RTP}} = \sum_{t=1}^{24} \lambda_t (E_{d,t} - E_{c,t}) \quad (2)$$

式中, λ_t 为实时电价机制下 t 时刻的用电价格。

1.4 运行约束

电池的荷电状态(state of charge, SOC)是监测电池运行的重要指标,它代表电池剩余容量与额定容量 E_r 之比,取决于电池先前状态的容量和当前的运行状态。 t 时刻的荷电状态 S_t 用式(3)~式(6)表示。

$$S_t = S_{t-1} + \Delta E_t / E_r, \quad \forall t \in T \quad (3)$$

$$\Delta E_t = E_{c,t} - E_{d,t} \quad (4)$$

$$E_{c,t} = P_{c,t} \tau \gamma_c \quad (5)$$

$$E_{d,t} = P_{d,t} \tau / \gamma_d \quad (6)$$

式中: γ_c 和 γ_d 分别为电池的充电和放电效率; $P_{c,t}$ 和 $P_{d,t}$ 分别为充电和放电功率; τ 为时间间隔。电池的运行受到其储能容量、充电功率和放电功率限制等约束,这些约束用式(7)~式(10)表示。

$$S_{\min} \leq S_t \leq S_{\max}, \quad \forall t \in T \quad (7)$$

$$0 \leq P_{d,t}, \quad \forall t \in T \quad (8)$$

$$0 \leq P_{c,t}, \quad \forall t \in T \quad (9)$$

$$P_{d,t} + P_{c,t} \leq P_{\max}, \quad \forall t \in T \quad (10)$$

式中: S_{\min} 和 S_{\max} 为 SOC 的最小值和最大值,可能因存储技术和运行策略而异; P_{\max} 为最大充放电功率,由功率转换系统的限制决定。

1.5 电池衰减模型

这里采用文献[7]中提出的电池衰减模型。该模型考虑了循环次数、放电深度(depth of discharge, DOD)、循环的平均 SOC 等对电池寿命的影响。该模型如式(11)~式(18)所示^[7,11-12]。

$$L = 1 - \alpha_1 e^{(-\alpha_2 f_d)} - (1 - \alpha_1) e^{(-f_d)} \quad (11)$$

$$f_d = f_{\text{cyc}} + f_{\text{cal}} \quad (12)$$

$$f_{\text{cyc}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{cyc}}} f_D(x_{D,i}) f_S(x_{S,i}) f_C(x_{C,i}) f_T(x_{T,i}) \quad (13)$$

$$f_{\text{cal}} = tk_T f_S(\bar{x}_S) f_T(\bar{x}_T) \quad (14)$$

$$f_D(x_D) = (k_{D1} x_D^{k_{D2}} + k_{D3})^{-1} \quad (15)$$

$$f_S(x_S) = e^{k_S(x_S - S_{\text{ref}})} \quad (16)$$

$$f_C(x_C) = e^{k_C(x_C - C_{\text{ref}})} \quad (17)$$

$$f_T(x_T) = e^{k_T(x_T - T_{\text{ref}}) \frac{T_{\text{ref}}}{x_T}} \quad (18)$$

式中: $f_D(x_D)$ 、 $f_S(x_S)$ 、 $f_C(x_C)$ 和 $f_T(x_T)$ 分别为电池衰减与 DOD、SOC、充放电倍率以及温度之间的关系; N_{cyc} 为循环次数; k_{D1} 、 k_{D2} 、 k_{D3} 、 k_S 、 k_C 和 k_T 为对应压力模型的系数; S_{ref} 、 C_{ref} 和 T_{ref} 为压力模型中的参考值。更多细节见文献[12]。

2 经济性分析

本章描述了储能系统的经济分析模型及相关指标,包括资金成本、运维成本、平准化储能成本、投资回收期、净现值等^[4,13-15]。

2.1 资金成本

资金成本包括储能系统在采购、安装和交付过程中产生的固定费用,主要包括电池、电源转换系统(power conversion system, PCS)和平衡系统(balance of system, BOS)的成本等,计算式为

$$C_0 = C_{\text{bat}} + C_{\text{pcs}} + C_{\text{bos}} \quad (19)$$

式中, C_{bat} 、 C_{pcs} 和 C_{bos} 分别为电池、电源转换系统、平衡系统的单位成本。 C_{bat} 由电池每千瓦时的单价决定; C_{pcs} 包括电池系统将电力从 DC/AC 转换为 AC/DC 的电力电子设备价格,与每千瓦的价格相关; C_{bos} 一般包括电气平衡系统、结构平衡系统等产生的费用。

2.2 运维成本

电池储能系统的运维成本包括设备状态监测、故障检测和清理、部件更换等。年度运维成本 C_{om} 可以按固定运维成本 C_{fom} 和可变运维成本 C_{vom} 之和来计算,或者用资金成本的百分比来表示。

$$C_{\text{om}} = C_{\text{fom}} + C_{\text{vom}} \quad (20)$$

2.3 平准化储能成本

平准化储能成本(levelized cost of storage, LCOS)可以定义为整个生命周期的总成本除以生命周期结束时提供的总能量或总功率,即

$$\left[C_0 + \sum_n \frac{C_{\text{om},n}}{(1+r_n)^n} + \sum_n \frac{C_{\text{ch},n}}{(1+r_n)^n} + \frac{C_{\text{eol}}}{(1+r_n)^{N+1}} \right] / E_{\text{total}} \quad (21)$$

式中: $C_{\text{om},n}$ 为第 n 年的运维成本; $C_{\text{ch},n}$ 为第 n 年的充电成本; C_{eol} 为报废成本; r_n 为第 n 年的贴现率; E_{total} 为整个生命周期的能量吞吐量。

这里在计算 LCOS 时没有考虑充电成本,因为充电成本在不同的价格机制下会有所不同。因此,

平准化储能成本 C_{LCOS} 为

$$C_{LCOS} = \left[C_0 + \sum_n^N \frac{C_{om,n}}{(1+r_n)^n} + \frac{C_{eol}}{(1+r_n)^{N+1}} \right] / E_{total} \quad (22)$$

所定义的 LCOS 可用于计算可获取利润的最小充放电差价,即用 LCOS 除以往返效率。

2.4 投资回收期

投资回收期代表收回投资成本所需的时间,表示为

$$T_{pp} = C_0 / C_{ap} \quad (23)$$

式中, C_{ap} 为年度投资回报。折现回收期是衡量投资的另一个指标,它可计及货币的时间价值。

2.5 净现值

净现值 (net present value, NPV) 是一个考虑货币时间价值,并将未来现金流量转化为今天货币价值的常用评价指标,它为项目的潜在盈利能力提供了有用的衡量标准。储能项目的净现值 V_{NPV} 为

$$V_{NPV} = -C_0 + \frac{C_1}{1+r_1} + \frac{C_2}{(1+r_2)^2} + \dots + \frac{C_n}{(1+r_n)^n} \quad (24)$$

式中, C_n 为净现金流,可用每年获得的收益减去运维成本来计算。

3 算例分析

3.1 电价

采用两组分时电价数据和一组实时电价数据进行案例研究。表 1 列出了与美国 conEdison 公司签订分时电价合同下的小型商业用户每个时间段需支付的电费费率^[16]。该合同下,高峰时段为周一至周五早上 8:00—10:00,其他所有时间都被视为非高峰时段。表 2 列出了 2020 年中国江苏省 100 kVA 及以上商业用户的分时电价费率。

对于参与电力市场现货交易的电池储能系统,可通过历史节点边际电价 (locational marginal price, LMP) 来估算最大收益。这里采用美国 PJM 区域的历史数据来评估储能系统在实时电价机制下的套利情况^[17]。

3.2 选址定容

在规划储能系统容量时,应同时分析容量需求和功率需求。储能系统的容量受变电站承载能力、客户需求、资金规模以及占地面积等条件限制。根据美国

国家可再生能源实验室最近的预测和电池厂商的报价^[18],资金成本约为 300 美元/kWh,运维成本约为资金成本的 2.5%。

表 1 conEdison 分时电价表

时段	电价/(美元·(kWh) ⁻¹)
高峰时段(夏季)	0.348 4
高峰时段(除夏季)	0.171 6
低谷时段(全年)	0.012 8

表 2 2020 年江苏省用户分时电价表

时段	电价/(美元·(kWh) ⁻¹)
高峰时段(8:00—12:00, 17:00—21:00)	0.161
平段(12:00—17:00, 21:00—24:00)	0.096
低谷时段(0:00—8:00)	0.044

注:按 1 美元=6.4 元折算。

算例中电池储能系统装设在商业用户侧,且安装的首要目的是为了节省电费。在算例 1—3 中,电池的 SOC 均被限制在 10%~90% 的范围内。算例系统的参数以及不同电价机制下每个案例的收益情况如表 3 所示。根据收益分析结果,投资者从现货市场获得的收益远低于分时电价合同下的收益。主要原因是在分时电价机制下,若峰谷电价差足够大,储能系统就能持续稳定地获得较大套利收益;而在实时电价机制下,根据市场供需平衡情况和出清机制,绝大部分时间的日内价差低于所对比的分时电价合约下的价差,从而导致现货市场日平均峰谷价差较低,盈利能力较差。但是不同的电力市场及地区可能有不同的电价波动情况,因此在一些地区储能系统从现货市场中取得的套利收益可能会高于分时电价机制下的套利收益。每日运行的循环次数也是影响收益的重要因素,并且不同电池类型也具有不同

表 3 不同电价机制下收益情况

参数	算例 1	算例 2	算例 3
系统功率/MW	1	1	1
系统容量/MWh	1	2	4
充放电倍率	1	0.5	0.25
资金成本/美元	300 000	570 000	1 110 000
运维成本/(美元·a ⁻¹)	7500	15 000	30 000
分时电价机制 (ConEdison) 收益/美元	547 796	1 108 887	2 230 769
分时电价机制 (江苏省) 收益/美元	310 506	628 548	1 264 462
实时电价收益/美元	58 954	171 508	258 659

的收益情况。此算例中采用锰酸锂电池衰减数据进行分析,其他类型的电池可能具有更长的循环寿命和更好的经济回报。

3.3 储能系统运行策略

与传统发电机不同,电池的寿命衰减与其运行状况密切相关。本算例通过调整最大和最小 SOC 约束来比较不同运营策略下的寿命和能量吞吐量,结果如表 4 所示。

表 4 不同运行策略下的衰减及能量吞吐量

策略	SOC 约束/%	分时电价机制			实时电价机制		
		寿命/a	能量吞吐量/MWh	1年后 SOH/%	寿命/a	能量吞吐量/MWh	1年后 SOH/%
策略 1	0~80	10	2 920.0	98.0	6	5 002.8	96.4
策略 2	5~85	10	2 902.1	98.0	5	4 794.9	96.0
策略 3	10~90	10	2 850.0	97.9	5	3 995.4	95.9
策略 4	15~95	10	2 709.5	97.8	5	3 789.2	95.7
策略 5	20~80	10	2 190.0	98.1	7	4 359.6	97.0

通过比较策略 1—4 的寿命和第 1 年后的健康状态 (state of health, SOH), 可知 SOC 运行值越小, 衰减越慢。但是值得注意的是, SOC 越低, 从电池中可释放的备用能量就越低, 可提供的可靠性价值越低。通过比较策略 1 和策略 5 的结果, 可知 SOC 运行区间越小, 即 DOD 越小, 则寿命越长。但总能量吞吐量可能会更小, 这将会导致利润降低。因此用户在制定电池运行策略时, 需要综合考虑相关约束条件及运行目标。

3.4 经济性分析

根据上述分析, 在美国 PJM 市场中的储能收益远小于初始投资, 即储能仅参与现货市场并不足以回收投资成本。因此对储能系统在 conEdison 和江苏省分时电价机制下的经济性进行进一步分析, 计算流程如图 1 所示。假设一个 1 MW/1 MWh 的电池储能系统每天充放电一次, SOC 限制在 10%~90% 的范围内, 经计算分析可得, 该项目的 LCOS 为 0.122 9 美元/kWh。conEdison 客户的投资回收期 and 折现回收期分别为 6.3 年和 9.1 年。而江苏省投资者的投资回收期将长于电池系统的寿命, 投资者应同时寻求其他应用场景来赚取收益。表 5 列出了分析结果。需注意的是各地的实时电价政策可能会发生变化, 投资者应按照最新政策估算利润。

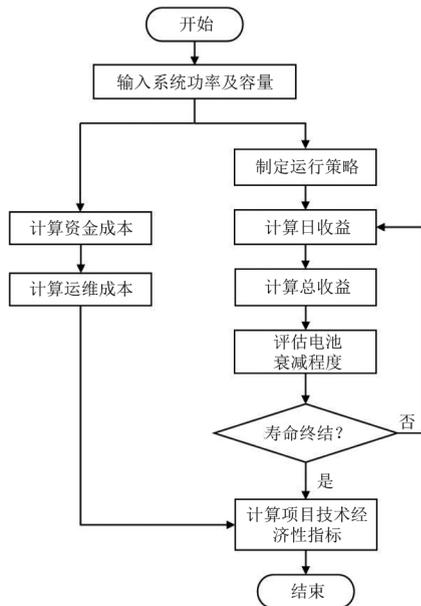


图 1 项目技术经济性评估流程

表 5 conEdison 合约下 BESS 技术经济分析

指标	数值
资金成本/美元	300 000
运维成本/(美元·a ⁻¹)	7500
贴现率/%	8
能量吞吐量/MWh	2850
平准化储能成本/(美元·(kWh) ⁻¹)	0.122 9
寿命/a	10
总收益/美元	547 796
投资回收期/a	6.3
折现回收期/a	9.1
项目净现值/美元	19 398

4 结论

上面提出了一个考虑电池寿命衰减的电池储能系统技术经济分析模型, 可以使用该模型研究不同电价机制及运行策略下电池储能系统的能量吞吐量、平准化储能成本和项目盈利能力等。基于实际电价和成本数据的算例分析表明: 1) 实时电价机制下的套利空间可能低于分时电价机制下的套利空间, 即使现货市场的单日最高峰谷电价差远高于分时电价机制下的电价差。但由于高电价差持续时间不够长, 将不足以产生足够的利润。2) 对于具有相同功率的系统, 容量越高, 衰减速度越慢。并且对于所研究的锂离子电池类型, 最大和最小荷电状态的限值越低, 寿命越长。本研究可为电池储能系统的规划和运行提供参考。 (下转第 13 页)

考虑实时需求的冷热电联供型微电网优化调度

杜晓婷

(安徽三联学院,安徽 合肥 230061)

摘要:冷热电联供型微电网通过对各分布式电源进行整合管理,既提高了可再生能源利用效率,减轻了环境污染,又保障了系统的稳定性。基于各微源自身不确定性及微网结构的复杂性,文中提出一种基于日前初始用电负荷需求并结合电价激励及用户侧用电舒适度的综合实时用电需求优化模型,实现负荷从高峰向非高峰转移,并采用遗传算法的多目标优化算法进行实验,验证了该模型能使负荷需求曲线明显平缓,各微源出力相对均衡,证明了该模型的科学性和有效性。

关键词:冷热电联供型微电网;实时用电需求;多目标优化算法

中图分类号:TM 715 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2022)05-0006-08

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220502

Optimal Scheduling of CCHP-based Microgrid Considering Real-time Demand

DU Xiaoting

(Anhui Sanlian University, Hefei 230061, Anhui, China)

Abstract:Through the integrated management of distributed power sources, the combined cooling, heating and power (CCHP)-based microgrid not only improves the efficiency of renewable energy utilization and reduces the environmental pollution, but also ensures the stability of the system. Based on the uncertainty of each micro-source and the complexity of microgrid structure, a comprehensive real-time power demand optimization model based on the pre-day initial load demand and combined with electricity price incentive and user-side electricity comfort is proposed, in which the shift of load from peak to non-peak is realized. And the multi-objective optimization algorithm based on genetic algorithm is adopted to prove that the proposed model can make the load demand curve obviously smooth and the output of each micro-source is relatively balanced, which proves the proposed model is scientific and effective.

Key words: CCHP-based microgrid; real-time power demand; multi-objective optimization algorithm

0 引言

化石能源短缺以及由化石能源带来的环境污染问题,依然困扰人类^[1]。冷热电三联供(combined cooling, heating and power, CCHP)系统作为分布式能源的一种,可实现能源的梯级利用,提高系统能源利用效率,具有节能、环保的特点。随着微电网技术的发展,CCHP型微电网通过对各分布式电源进行整合管理,在提高可再生能源利用效率、减轻环境污

染的基础上,又保障了系统的稳定性^[2-4]。而随着可再生能源的不断渗透以及负荷灵活性的提高,源荷不确定性使得CCHP型微电网调度难度增大。近年来,针对CCHP型微电网优化调度已有较多研究。例如基于调整微电源出力以及采用储能设备补偿误差方法,文献[5]提出了一种利用确定场景预测控制方法实时修正功率偏差模型。文献[6]提出了一种基于模型预测控制和反馈校正的CCHP型微电网优化调度方法,以补偿预测误差。文献[7-9]考虑需求侧管理建立了冷热电联供型微电网优化配置模型,其中:文献[7]通过削减负荷实现多能协同,并采用了一种基于模型预测控制的微电网能量管理算

法;文献[8]考虑包括可平移负荷和可中断负荷管理,并采用混沌粒子群算法对所建立的模型进行求解;文献[9]建立了一种包括基础负荷、可平移负荷、可转移负荷、可削减负荷的社区冷、热、电三联供系统,算例分析验证了该系统在调整冷、热、电负荷曲线的同时,也有效降低了综合运行成本。文献[10]提出了一种基于综合需求响应的源荷协调 CCHP 型微电网优化调度模型,采用典型场景集考虑新能源出力的不确定性,并利用免疫遗传算法求解,算例分析验证了该方法能有效降低综合运行成本,具有一定的经济及社会价值。文献[11]建立了一种含可再生能源预测的 RE-CCHP 系统经济模型,通过改进求解算法,分析各机组最优配置结果以及可再生能源渗透率对运行成本的影响。

考虑到负荷需求存在实时变化的特点,下面提出了一种基于日前初始用电负荷需求并结合电价激励及用户侧用电舒适度的综合实时用电需求优化模型,实现负荷从高峰向非高峰转移,并采用了遗传算法的多目标优化算法。通过典型日算例分析,证明了实时需求管理模型能使负荷需求曲线明显平缓,各微源出力相对均衡,证明了该模型的科学性和有效性。

1 系统模型

系统能源设备包括光伏电源、风力机组、燃料电池、微型燃气轮机、燃气锅炉;系统储能设备包括蓄电池、储热槽;系统能量转换设备包括余热回收及转换装置、电制冷机、吸收式制冷机^[12],如图1所示。

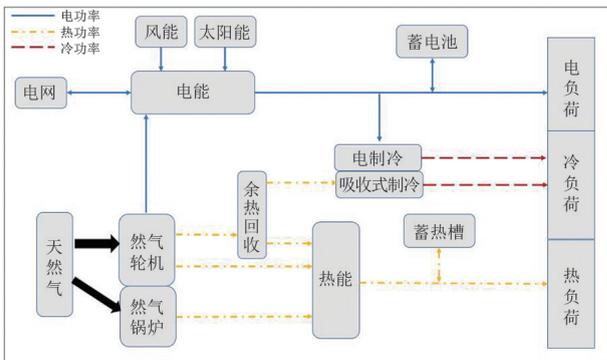


图1 冷热电联供型微电网结构

1.1 微型燃气轮机

微型燃气轮机是分布式电源中最典型的一种,微型燃气轮机排放污染气体量和运行功率成正比,

运行功率超出额定功率越多,排放的污染气体量越大。为了限定微型燃气轮机(以下简称燃气轮机)污染气体排放量,文中对燃气轮机的运行功率进行限制^[13-14];依据文献[15],给出了其较为精确的污染排放量数据,如表1所示。

表1 微型燃气轮机排放特性 单位:g/kWh

污染物	NO _x	CO ₂	CO	SO ₂
排放量	0.62	220.08	0.17	0.000 9

$$P_m(t) = G_m(t) \eta_m L_{ng} \quad (1)$$

$$T_m(t) = P_m(t) \frac{1 - \eta_m}{\eta_m} \quad (2)$$

式中: $P_m(t)$ 为燃气轮机发电功率; $T_m(t)$ 为燃气轮机热出力; $G_m(t)$ 为燃气轮机燃气消耗; η_m 为燃气轮机发电效率; L_{ng} 为燃气热值,一般取 9.7 kWh/m^3 。

1.2 余热回收装置和热交换装置

燃气轮机排出烟气余热通过余热回收装置收集起来,经热交换装置转换成热能供给 CCHP 型微电网系统的冷、热负荷需求,实现能量的梯级利用^[11]。

1) 余热功率

$$T_r(t) = T_m(t) \cdot \eta_r \quad (3)$$

式中, η_r 为余热回收装置效率。

2) 热交换装置热出力

$$T_{ex}(t) = T_{exin}(t) \cdot \eta_{ex} \quad (4)$$

式中: $T_{exin}(t)$ 为热交换装置输入热功率; η_{ex} 为热交换效率。

1.3 燃气锅炉

当余热回收及转换装置输出的热量不能够满足系统热负荷需求时,燃气锅炉作为热能补充设备提供能量给热负荷^[14]。

燃气锅炉热出力为

$$T_{bl}(t) = G_{bl}(t) \cdot \eta_{bl} L_{ng} \quad (5)$$

式中: $G_{bl}(t)$ 为燃气锅炉消耗燃气体积; η_{bl} 为燃气锅炉效率。

1.4 光伏电源

光伏发电系统是 CCHP 型微电网的重要组成部分之一,温度和太阳光照强度是影响分布式光伏发电系统的重要因素。

光伏发电功率为

$$P_p(t) = a_1 P_{pp}(t) \cdot A [1 + a_2(T_s - T_{sic})] \quad (6)$$

式中: a_1 为功率系数,指实际输出功率与额定条件下输出功率的比值,一般取 0.9 ; a_2 为功率温度系数; $P_{pp}(t)$ 为额定输出功率; A 为电池板实际辐照

度; T_{sic} 为标准测试条件下参考温度, 一般取 25 °C; T_s 为当前电池板表面温度, 可由式(7)求出。

$$T_s = T_a + 0.0138(1 + 0.031T_a)(1 - 0.042v_p) \cdot A \quad (7)$$

式中: T_a 为环境温度; v_p 为风速。

1.5 风力发电

风力发电与光伏发电在时间尺度上具有较为明显的互补性。夏季太阳能资源丰富, 而风能资源则较小; 冬春季则反之。合理利用这种互补特性, 不仅可以减小整体投资成本, 更能够减小储能系统的负担, 从而可以一定程度上缩小储能设备容量。

由贝兹理论可知, 通过风轮的最大能量可以表示为

$$P_w(t) = 0.5\rho\pi R^2 v_w^3 C_p \quad (8)$$

式中: ρ 为空气密度; R 为风轮叶片半径; v_w 为风速; C_p 为风能利用系数, 一般取 0.593。

1.6 吸收式制冷机

目前吸收式制冷机中, 溴化锂制冷机的应用最为广泛。

吸收式制冷机冷出力为

$$C_{\text{ac}}(t) = T_{\text{acin}}(t) \cdot a_{\text{ac}} \quad (9)$$

式中: $T_{\text{acin}}(t)$ 为吸收式制冷机输入热功率; a_{ac} 为制冷系数。

1.7 电制冷机

电制冷机的冷出力为

$$C_{\text{ec}}(t) = P_{\text{ec}}(t) \cdot a_{\text{ec}} \quad (10)$$

式中: $P_{\text{ec}}(t)$ 为电制冷机输入电功率; a_{ec} 为电制冷系数。

1.8 储能设备

1) 储热

余热回收和热转换装置提供的热能超过系统热负荷需求时, 采用蓄热槽储热; 当余热回收和热转换装置提供热能不足时, 首先由蓄热槽补充热能。

蓄热槽存储热量为

$$T_{\text{hs}}(t) = (1 - \sigma_{\text{hs}}) T_{\text{hs}}(t-1) + [\eta_{\text{hsc}} T_{\text{hsc}}(t) - T_{\text{hsd}}(t) / \eta_{\text{hsd}}] \cdot \Delta t \quad (11)$$

式中: σ_{hs} 为蓄热槽能量损耗系数; η_{hsc} 为蓄热槽蓄热效率; η_{hsd} 为蓄热槽放热效率; $T_{\text{hsc}}(t)$ 为 t 时刻蓄热槽蓄热功率; $T_{\text{hsd}}(t)$ 为 t 时刻蓄热槽放热功率; Δt 为时间间隔。

2) 储电

燃气轮机和分步式电源(distributed generation,

DG) 提供的电能超过系统电负荷及电制冷机需求时, 采用蓄电池储电; 当系统提供电能不足时, 首先由蓄电池补充电能。

蓄电池存储电量为

$$P_{\text{bt}}(t) = (1 - \sigma_{\text{bt}}) P_{\text{bt}}(t-1) + \left(\eta_{\text{btc}} P_{\text{btc}}(t) - \frac{P_{\text{btd}}(t)}{\eta_{\text{btd}}} \right) \cdot \Delta t \quad (12)$$

式中: σ_{bt} 为蓄电池能量损耗系数; η_{btc} 为蓄电池蓄电效率; η_{btd} 为蓄电池放电效率; $P_{\text{btc}}(t)$ 为 t 时刻蓄电池蓄电功率; $P_{\text{btd}}(t)$ 为 t 时刻蓄电池放电功率。

2 能量管理模型

2.1 目标函数

1) 总投资成本最小

$$\min E_1 = \sum_{t=1}^T E_{\text{grid}}(t) + E_{\text{ng}}(t) + E_{\text{bt}}(t) + E_{\text{rm}}(t) \quad (13)$$

式中, $E_{\text{grid}}(t)$ 、 $E_{\text{ng}}(t)$ 、 $E_{\text{bt}}(t)$ 、 $E_{\text{rm}}(t)$ 分别为电网交互成本、天然气消耗成本、电池老化成本、运维成本。

① 天然气成本

$$E_{\text{ng}}(t) = E_{\text{nm1}}(t) + E_{\text{nbl}}(t) \quad (14)$$

式中: $E_{\text{nm1}}(t)$ 为燃气轮机消耗天然气成本; $E_{\text{nbl}}(t)$ 为燃气锅炉消耗天然气成本。

② 电池老化成本

$$E_{\text{bt}}(t) = E_{\text{btc}}(t) + E_{\text{btd}}(t) \quad (15)$$

式中: $E_{\text{btc}}(t)$ 为蓄电池储电成本; $E_{\text{btd}}(t)$ 为蓄电池放电成本。

③ 电网交互成本

$$E_{\text{grid}}(t) = E_{\text{gridin}}(t) - E_{\text{gridout}}(t) \quad (16)$$

式中: $E_{\text{gridin}}(t)$ 为买电成本; $E_{\text{gridout}}(t)$ 为卖电收益。

④ 运维成本

$$E_{\text{rm}}(t) = \left\{ P_m(t) R_{\text{mtr}} + T_{\text{bl}}(t) R_{\text{blr}} + P_p(t) R_{\text{pr}} + P_w(t) R_{\text{wr}} + C_{\text{ac}}(t) R_{\text{acr}} + C_{\text{ec}}(t) R_{\text{ecr}} + [T_{\text{hsc}}(t) - T_{\text{hsd}}(t)] R_{\text{hsr}} + [P_{\text{btc}}(t) + P_{\text{btd}}(t)] R_{\text{btr}} + T_{\text{R}}(t) R_{\text{rr}} + T_{\text{ex}}(t) R_{\text{exr}} \right\} \cdot \Delta t \quad (17)$$

式中, R_{mtr} 、 R_{blr} 、 R_{pr} 、 R_{wr} 、 R_{acr} 、 R_{ecr} 、 R_{hsr} 、 R_{btr} 、 R_{rr} 、 R_{exr} 分别为燃气轮机、燃气锅炉、光伏电池、风

机、吸收式制冷机、电制冷机、蓄热槽储热放热、蓄电池充放电、余热回收装置和热交换装置 t 时刻出力费用。

2) 环境成本

污染物的排放与燃气轮机的出力、燃气锅炉出力以及电网购电有关,以 CO_2 为例,其排放量为

$$Q_{\text{cd}} = [N_{\text{mg}}(t)\beta_{\text{med}} + N_{\text{bg}}(t)\beta_{\text{bcd}} + N_{\text{g}}(t)\beta_{\text{gcd}}] \cdot T \quad (18)$$

式中: $N_{\text{mg}}(t)$ 、 $N_{\text{bg}}(t)$ 、 $N_{\text{g}}(t)$ 分别为燃气轮机、燃气锅炉燃气需求以及电网购电需求; β_{med} 、 β_{bcd} 、 β_{gcd} 分别为燃气轮机、燃气锅炉、电网购电 CO_2 排放转换因子; T 为整个规划周期。

有害气体处理成本^[16]为

$$\min E_2 = \sum_{k=1}^m (R_k \cdot Q_k) \quad (19)$$

式中: k 为污染物的种类; R_k 为第 k 项污染物的处理费用; Q_k 为第 k 项污染物的排放量。

2.2 约束条件

1) 电平衡

$$P_{\text{m}}(t) + P_{\text{p}}(t) + P_{\text{w}}(t) + P_{\text{gin}}(t) + P_{\text{btd}}(t) = P_{\text{ec}}(t) + P_1(t) + P_{\text{btc}}(t) + P_{\text{gout}}(t) \quad (20)$$

式中: $P_{\text{gin}}(t)$ 为电网购电功率; $P_{\text{gout}}(t)$ 为电网回购功率; $P_1(t)$ 为电负荷需求。

2) 热平衡

$$T_{\text{m}}(t) + T_{\text{ex}}(t) + T_{\text{bl}}(t) + T_{\text{hsd}}(t) = T_{\text{acin}}(t) + T_{\text{hsc}}(t) + T_1(t) \quad (21)$$

式中, $T_1(t)$ 为热负荷需求。

3) 冷平衡

$$C_{\text{ec}}(t) + C_{\text{ac}}(t) = C_1(t) \quad (22)$$

式中, $C_1(t)$ 为冷负荷需求。

4) 设备平衡约束

① 微型燃气轮机

$$P_{\text{m},\text{min}}(t) \leq P_{\text{m}}(t) \leq P_{\text{m},\text{max}} \quad (23)$$

② 光伏电源

$$0 \leq P_{\text{p}}(t) \leq P_{\text{m},\text{max}} \quad (24)$$

③ 风电机组

$$0 \leq P_{\text{w}}(t) \leq P_{\text{m},\text{max}} \quad (25)$$

④ 电网

$$0 \leq P_{\text{gin}}(t) \leq P_{\text{gin},\text{max}}, 0 \leq P_{\text{gout}}(t) \leq P_{\text{gout},\text{max}} \quad (26)$$

⑤ 蓄电池

$$\begin{cases} P_{\text{btd},\text{min}} X_{\text{btd}}(t) \leq P_{\text{btd}}(t) \leq P_{\text{btd},\text{min}} X_{\text{btd}}, X_{\text{btd}} \in \{0,1\} \\ P_{\text{btc},\text{min}} X_{\text{btd}}(t) \leq P_{\text{btc}}(t) \leq P_{\text{btc},\text{min}} X_{\text{btd}}, X_{\text{btc}} \in \{0,1\} \\ X_{\text{btd}} + X_{\text{btc}} \leq 1 \text{ (充放电状态约束)} \end{cases} \quad (27)$$

⑥ 蓄热槽

$$\begin{cases} T_{\text{hsd},\text{min}} X_{\text{hsd}}(t) \leq T_{\text{hsd}}(t) \leq T_{\text{hsd},\text{min}} X_{\text{hsd}}, X_{\text{hsd}} \in \{0,1\} \\ T_{\text{hsc},\text{min}} X_{\text{hsc}}(t) \leq T_{\text{hsc}}(t) \leq T_{\text{hsc},\text{min}} X_{\text{hsc}}, X_{\text{hsc}} \in \{0,1\} \\ X_{\text{hsd}} + X_{\text{hsc}} \leq 1 \text{ (蓄热槽储热放热状态约束)} \end{cases} \quad (28)$$

式(23)一式(28)中:下标 max、min 分别表示对应量的最大值、最小值; X_{btc} 、 X_{btd} 分别为蓄电池充、放电标志; X_{hsc} 、 X_{hsd} 分别为蓄热槽充、放热标志。

3 实时需求管理模型

基于日前负荷需求曲线,考虑用户侧用电成本和用电舒适度,建立一种综合信息价格激励机制的实时用电需求模型,鼓励用户在用电高峰期适量转移部分需求到用电低谷。总用电需求可表示为

$$P_{\text{tot}}(t) = \sum_{t=1}^T P_{\text{or}}(t) \quad (29)$$

式中: $P_{\text{or}}(t)$ 为 t 时刻初始用电需求; T 为一个管理周期的时间。

实时用电需求为

$$P_{\text{rt}}(t) = P_{\text{or}}(t) + P_{\text{mv}}(t) \quad (30)$$

式中, $P_{\text{mv}}(t)$ 为转移需求。

转移负荷受到电价影响,假设将一个管理周期分为 i 个时间段,用 N_i 表示,对应时间段电价为 r_i ,标准电价为 r_0 ,则由负荷转移引起的电价补偿费用为

$$R_{\text{tot}}(t) = P_{\text{mv}}(t) \cdot (r_0 - r_i) \quad (31)$$

其中:

$$r_i = \gamma \cdot r_0 \quad (32)$$

$$r_{\text{imin}} \leq r_i \leq r_{\text{imax}}$$

$$\gamma = P_{\text{or}}(t) / P_{\text{av}}(t) \quad (33)$$

$$P_{\text{av}}(t) = P_{\text{tot}}(t) / T \quad (34)$$

式中: $P_{\text{av}}(t)$ 为平均电负荷需求; γ 为用电需求浮动因子。

4 算例分析

参照文献[17]中的算例参数,并结合合肥地区

实际情况给出各微电源参数,如表 2 所示;系统其他参数如表 3 所示。

表 2 微电源参数

符号	名称	额定功率/W	运维成本/(元·kW ⁻¹)
MT	燃气轮机	1000	0.036 40
PV	光伏电源	180	—
WT	风机	200	—
FC	燃料电池	200	0.025 98
GB	燃气锅炉	800	0.027 64
BT	蓄电池	500	0.027 48
HT	储热罐	800	0.030 28
ET	电制冷机	500	0.014 37
AT	吸收式制冷机	1000	0.013 26
GRID	电网交互功率	1500	—

4.1 gamultiobj 函数

Kalyanmoy Deb 的带精英策略的快速非支配排序遗传算法是目前应用较为广泛的一种算法, Matlab 提供了基于此种算法的 gamultiobj 函数,算例分析基于 gamultiobj 函数,证明了此算法为解决多目标优化问题提供了良好的分析途径。

4.2 典型日风机、光伏出力以及负荷预测曲线

为验证所建模型及求解算法的有效性,参考文献[18-19]得到某典型日风机及光伏出力曲线如图 2 所示,某典型日的冷负荷、热负荷和电负荷曲线如图 3 所示。

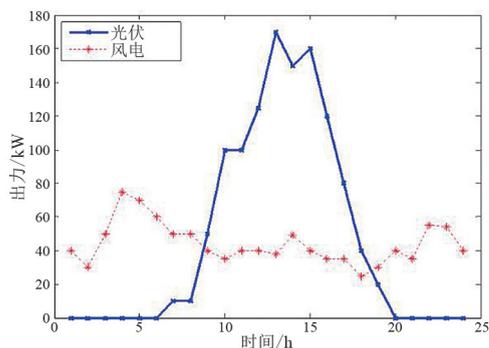


图 2 光伏和风力出力预测曲线

4.3 主要污染物处理成本

各污染物的处理成本如表 4 所示,各主要发电方式的污染物排放量如表 5 所示,某典型日分时段电价如表 6 所示。

4.4 优化分析

以某典型日 24 h 为一个调度周期,调度时段长 1 h。采用遗传算法的多目标优化算法进行优化调

表 3 系统其他参数

符号	含义	取值
η_{me}	燃气轮机发电效率	0.3
η_{mt}	燃气轮机发热效率	0.4
L_{ng}	燃气热值	9.7 kWh/m ³
η_r	余热回收装置效率	0.7
η_{ex}	热交换效率	0.98
η_{bl}	燃气锅炉效率	0.9
T_s	当前电池板表面温度	32 °C
a_1	功率系数	0.9
a_2	温度系数	0.9
A	电池板实际辐照度	1.2
T_{sic}	标准测试条件下参考温度	25 °C
T_a	环境温度	29 °C
v_p	风速	32 m/s
ρ	空气密度	1.293 kg/m ³
R	风轮叶片半径	50 m
v_w	风速	12 m/s
C_p	风能利用系数	0.593
a_{ac}	吸收式制冷机制冷系数	1.2
a_{ec}	电制冷机电制冷系数	4
σ_{hs}	蓄热槽能量损耗系数	0.02
η_{hsc}	蓄热槽蓄热效率	0.98
η_{hsd}	蓄热槽放热效率	0.98
$T_{hs,max}$	蓄热槽最大蓄热	1800
$T_{hs,min}$	蓄热槽最小蓄热	400
Δt	时间间隔	15 s
σ_{bt}	蓄电池能量损耗系数	0.01
η_{bte}	蓄电池蓄电效率	0.96
η_{btd}	蓄电池放电效率	0.96
$P_{ht,max}$	蓄电池最大蓄电量	1800 W
$P_{ht,min}$	蓄电池最小蓄电量	400 W
T	表示整个规划周期	24 h
k	表示污染物的种类	$k=1,2,3$
R_k	表示第 k 项污染物的处理费用	$k=1,2,3$
Q_k	表示第 k 项污染物的排放量	$k=1,2,3$
X_{bte}	蓄电池充电标志	0/1
X_{btd}	蓄电池放电标志	0/1
X_{hsc}	蓄热槽充热标志	0/1
X_{hsd}	蓄热槽放热标志	0/1
r_i	用户侧实时电价	0.3~0.8 元
r_0	用户侧标准电价	0.5 元
R_{gin}	购电价格(合肥工业用电)	0.52 元
R_{gout}	卖电价格	0.52×0.8 元
R_{ng}	天然气价格(合肥工业用气)	2.05 元
R_{bt}	蓄电池充放电费用	0.027 31 元

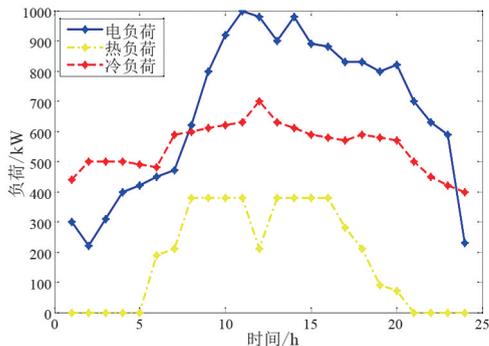


图 3 典型日冷、热、电负荷预测曲线

表 4 主要污染物处理成本 单位:元/kg

污染物	SO ₂ (R ₁)	NO _x (R ₂)	CO ₂ (R ₃)
处理成本	14.834	61.964	0.211

表 5 主要发电方式污染物排放量 单位:g/kWh

发电方式	SO ₂	NO _x	CO ₂
燃煤	0.108 2~3.954 6	0.155 7~3.094 83	86.472 5
天然气	0.464 1	0.007 7~1.546 9	49.037 2
微型燃气轮机	0.000 92	0.618 8	184.082 9

表 6 某典型日分时电价 单位:元/kWh

时间段	用电价格 r _i
1:00—4:00	0.3
4:00—7:00	0.4
7:00—10:00	0.5
10:00—14:00	0.8
14:00—19:00	0.6
19:00—22:00	0.7
22:00—24:00	0.3

注:标准电价 r₀ 为 0.5 元/kWh。

度分析,种群大小设置为 100,最优前端个体系数为 0.3,最大进化代数为 200,停止代数为 200,适应度函数值偏差为 1×10⁻¹⁰⁰。

以某典型日负荷需求为例,图 4 给出了考虑实时需求管理优化的第一个前端个体分布情况;图 5—图 10 给出了实时用电需求管理的各微源出力情况;图 11 给出了综合考虑实时需求及电价激励的实时用电需求曲线与初始需求曲线。

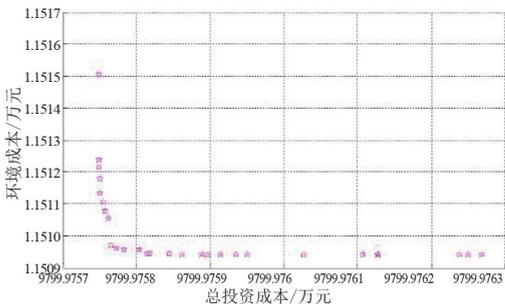


图 4 考虑实时需求管理的第一个前端个体分布

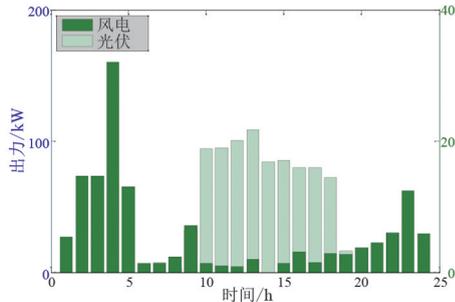


图 5 风电-光伏出力

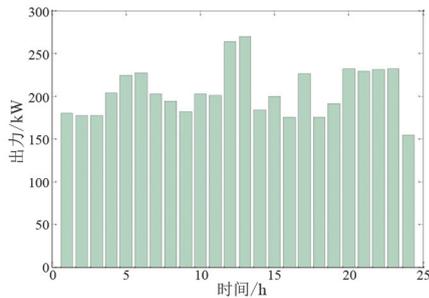


图 6 燃气轮机出力

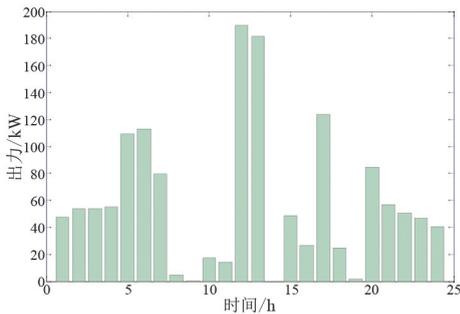


图 7 燃气锅炉出力

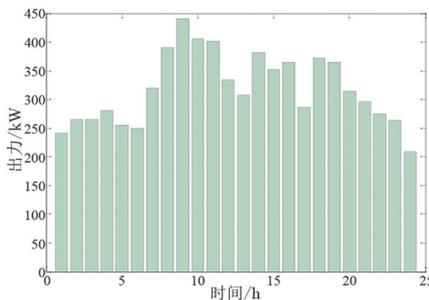


图 8 吸收式制冷机出力

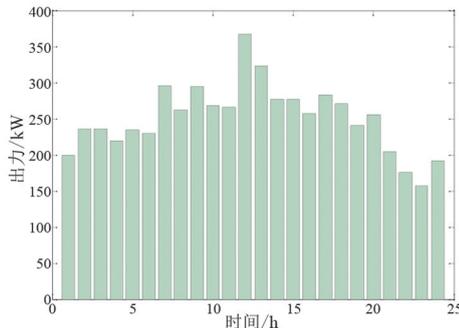


图 9 电制冷机出力

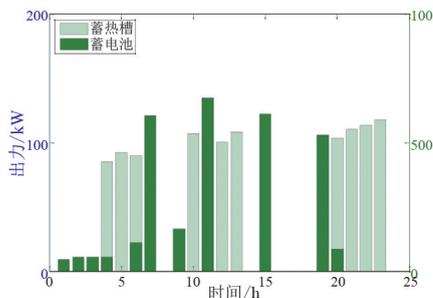


图 10 蓄电池、蓄热槽出力

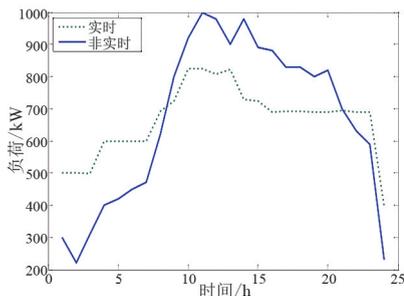


图 11 某典型日电负荷需求曲线对比

由图 11 可得,通过价格激励及用电舒适度优化,实时用电需求曲线明显平缓,初始用电高峰适度向非高峰区域转移。算例表明,考虑实施需求管理优化方法各微电源出力较为均衡,能源利用率相对较高。

5 结论

上面分析了冷热电联供型微电网优化现状,并建立了一个典型的冷热电微电网优化模型,分析了各微电源工作原理及出力特点;提出了一种基于日前初始用电负荷需求并结合电价激励及用户侧用电舒适度的综合实时用电需求优化模型;采用遗传算法的多目标优化算法进行优化,考虑实时需求管理模式进行仿真分析。实际算例证明,考虑实时需求管理优化方法使得用电需求曲线明显平缓,各微电源在各时段处理情况较不考虑实时需求管理时更为均衡,改善了各微电源出力不均衡带来的资源浪费、能源利用率低等问题。同时,由于在实时需求管理中兼顾用户侧用电舒适度问题,避免了由于电价激励带来的用户满意度低的问题。由于所用算例中价格激励参数设置相对简单,没有进行深入调研,致使价格激励带来的价格补偿费用增加,使得总成本相较不考虑实时用电需求管理模型稍有增加。

参考文献

[1] 杨玉峰.世界能源展望与能源形势报告系列评述之四

世界能源展望:科学与偏见[J].中国投资,2012(10):64-65.

- [2] 甘霖,陈瑜玮,刘育权,等.含可再生能源的微网冷-热-电多能流协同优化与案例分析[J].电力自动化设备,2017,37(6):275-281.
- [3] 戴瑞海,廖鸿图,施亦治,等.分时电价下考虑需求响应的微电网经济调度方法[J].重庆大学学报,2022,45(1):25-37.
- [4] 周晓倩,余志文,艾芊,等.含冷热电联供的微网优化调度策略综述[J].电力自动化设备,2017,37(6):26-33.
- [5] 肖浩,裴玮,孔力.基于模型预测控制的微电网多时间尺度协调优化调度[J].电力系统自动化,2016,40(18):7-14.
- [6] GU Wei, WANG Zhihe, WU Zhi, et al. An online optimal dispatch schedule for CCHP microgrids based on model predictive control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(5): 2332-2342.
- [7] LI Xianchao, DONG Yi, ZOU Yuanyuan. Energy management of CCHP microgrid considering demand-side management [C]//32nd Youth Academic Annual Conference of Chinese Association of Automation (YAC), IEEE, 2017:240-245.
- [8] 朱翰超,马蕊.考虑需求侧管理的冷热电联供微电网优化配置方法[J].电力系统保护与控制,2019,47(2):139-146.
- [9] 刘蓉晖,李阳,孙改平,等.考虑含多种可控负荷的社区冷热电联供系统协同优化调度[J].可再生能源,2019,37(9):1317-1324.
- [10] 袁桂丽,董金凤,魏更,等.基于需求响应和多能互补的冷热电联产微网优化调度[J].电力建设,2019,40(9):64-72.
- [11] 王帅飞,王维庆,王海云,等.基于可再生能源的冷热电联供系统优化[J].太阳能学报,2021,42(9):26-32.
- [12] SABERI Kasra, PASHAEI-DIDANI Hamed, NOUROLLAHI Ramin, et al. Optimal performance of CCHP based microgrid considering environmental issue in the presence of real time demand response [J]. Sustainable Cities and Society, 2019,45: 596-606.
- [13] 金红光,郑丹星,徐建中,等.分布式冷热电联产系统装置及应用[M].北京:中国电力出版社,2010.
- [14] 谭碧飞,陈皓勇,梁子鹏,等.基于 CoPSO-BAS 的冷热电联供型微网经济调度[J].广东电力,2019,32(9):85-93.
- [15] 钱科军,袁越,石晓丹,等.分布式发电的环境效益分析[J].中国电机工程学报,2008,28(29):11-15.

- [16] LI Guo, LIU Wenjia, CAI Jiejun, et al. A two-stage optimal planning and design method for combined cooling, heat and power microgrid system[J]. Energy Conversion and Management, 2013, 74: 433-445.
- [17] 林俐, 张玉, 王世谦. 计及微电源效率约束的多源微网优化调度[J]. 现代电力, 2019, 36(4): 17-23.
- [18] 王文静, 于立涛, 撒奥洋, 等. 基于 MOABC 算法的冷

热电联供系统优化调度研究[J]. 电力需求侧管理, 2019, 21(4): 48-53.

- [19] 戚建文, 任建文, 渠卫东, 等. 冷热电联供微网环保经济调度研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(16): 90-95.

作者简介:

杜晓婷(1982), 女, 硕士, 副教授, 从事智能控制研究。

(收稿日期: 2022-04-22)

(上接第 5 页)

参考文献

- [1] ZHOU Lai, ZHANG Youjun, LIN Xiaoming, et al. Optimal sizing of PV and BESS for a smart household considering different price mechanisms[J]. IEEE Access, 2018, 6: 41050-41059.
- [2] TIAN Yuting, BERA Atri, BENIDRIS Mohammed, et al. Stacked revenue and technical benefits of a grid-connected energy storage system[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2018, 54(4): 3034-3043.
- [3] 刘继东, 韩学山, 韩伟吉, 等. 分时电价下用户响应行为的模型与算法[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2973-2978.
- [4] 丁逸行, 徐青山, 吕亚娟, 等. 考虑需量管理的用户侧储能优化配置[J]. 电网技术, 2019, 43(4): 1179-1186.
- [5] 王守相, 张善涛, 王凯, 等. 计及分时电价下用户需求响应的分布式储能多目标优化运行[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(1): 125-132.
- [6] HAN Xuebing, LU Languang, ZHENG Yuejiu, et al. A review on the key issues of the lithium ion battery degradation among the whole life cycle [J]. eTransportation, 2019, 1: 100005.
- [7] XU Bolun, OUDALOY Alexandre, UIBIG Andreas, et al. Modeling of lithium-ion battery degradation for cell life assessment[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 9(2): 1131-1140.
- [8] HE Guannan, CHEN Qixin, KANG Chongqing, et al. Optimal bidding strategy of battery storage in power markets considering performance-based regulation and battery cycle life[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 7(5): 2359-2367.
- [9] PEREZ Aramis, MORENO Rodrigo, MOREIRA Roberto, et al. Effect of battery degradation on multi-service portfolios of energy storage[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(4): 1718-1729.

- [10] 贺鸿杰, 张宁, 杜尔顺, 等. 电网侧大规模电化学储能运行效率及寿命衰减建模方法综述[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(12): 193-207.

- [11] XU Bolun, ZHAO Jinye, ZHENG Tongxin, et al. Factoring the cycle aging cost of batteries participating in electricity markets [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 33(2): 2248-2259.

- [12] XU Bolun. Degradation-limiting optimization of battery energy storage systems operation [D]. Zürich: ETH Zürich, 2013.

- [13] ZAKERI Behnam, SYRI Sanna. Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 42: 569-596.

- [14] POONPUN Piyasak, JEWELL Ward T. Analysis of the cost per kilowatt hour to store electricity [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(2): 529-534.

- [15] LI Weilin, HE Kun, WANG Yaqiang. Cost comparison of AC and DC collector grid for integration of large-scale PV power plants [J]. The Journal of Engineering, 2017(13): 795-800.

- [16] C. E. Company. conEdison Time-of-Use Rates [EB/OL]. [2021-10-18]. <https://www.coned.com/en/accounts-billing/your-bill/time-of-use>.

- [17] PJM Interconnection LLC. PJM Data Miner2 [DB/OL]. [2021-10-18]. <http://www.pjm.com/markets-and-operations/etools/data-miner-2.aspx>.

- [18] COLE Wesley, FRAZIER A Will, AUGUSTINE Chad. Cost projections for utility-scale battery storage: 2021 update [R]. National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States), 2021.

作者简介:

田玉婷(1991), 女, 博士, 研究方向为电力系统规划与运行、储能系统、电力市场、电力系统可靠性等。

(收稿日期: 2022-05-31)

飞轮储能风力发电系统的功率快速平滑控制策略研究

邵宜祥, 过亮, 蔡国洋, 刘剑, 郭春岭, 胡丽萍, 孙素娟

(国电南瑞科技股份有限公司, 江苏南京 210061)

摘要: 飞轮储能风力发电系统可充分利用风能资源, 抑制风电系统功率波动。但是飞轮储能系统的并网逆变器输出功率的高频扰动将降低电网吸纳风能的能力。且增加飞轮储能系统后, 风力发电系统的软硬件成本较高。文中通过分析并网逆变器输出功率的高频扰动风量, 计算飞轮储能系统功率参考值, 实现快速功率平滑控制, 减少并网功率波动, 增加电网吸纳能力。通过采用定频滞环控制策略, 克服了开关频率不固定、输出电流谐波含量高的缺点, 其响应速度快, 软硬件资源要求低, 可减少PI控制器, 减少锁相环等环节, 降低软件开发成本。为验证采用定频滞环控制的快速功率平滑控制策略的性能, 设计了仿真模型, 并进行实验验证。仿真和实验结果表明: 该控制策略可快速降低网侧有功功率波动, 减小网侧电流谐波且软硬件成本低。

关键词: 飞轮储能系统; 风力发电系统; 定频滞环控制策略; 功率平滑控制

中图分类号: TM 614 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2022)05-0014-06

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20220503

Research on Fast Power Smoothing Control Strategy for Wind Power Generation System with Flywheel Energy Storage

SHAO Yixiang, GUO Liang, CAI Guoyang, LIU Jian, GUO Chunling, HU Liping, SUN Sujuan
(NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 210061, Jiangsu, China)

Abstract: The wind power generation system with flywheel energy storage can make full use of wind energy resources and restrain the power fluctuation of wind power system. By analyzing the high-frequency disturbance air volume of output power of grid-side inverter, the power reference value of flywheel energy storage system can be calculated to realize fast power smoothing control, reduce the fluctuation of grid-connected power, and increase the absorption capacity of power grid. The hysteresis control strategy has fast response speed and low requirements of software and hardware, and the fixed-frequency hysteresis control strategy overcomes the shortcomings of unstable switching frequency and high harmonic content of output current. The use of fixed-frequency hysteresis control in the grid-connected inverter side can reduce the number of PI controllers, phase-locked loops and other links, and also reduce the software development cost of the control system. In order to verify the performances of the fast power smoothing control strategy using fixed-frequency hysteresis control, a simulation model is designed and verified by the experiments. The simulation and experimental results show that the proposed control strategy can quickly reduce the fluctuation of active power and the current harmonics in the grid side, and the cost of software and hardware is low.

Key words: flywheel energy storage system (FESS); wind power generation system; fixed-frequency hysteresis control strategy; power smoothing control

0 引言

风能具有随机性、间歇性等特点, 风力发电系统

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(提高风机发电效率关键技术研究, 524608140152)

直接并网易导致网侧电压与频率的波动、畸变, 于电网的安全运行不利, 甚至可能造成电网崩溃^[1-2]。储能装置可平滑风力发电机组的输出功率, 有利于电网安全运行, 提高电网对风电的接纳能力^[3-4]。飞轮储能装置为机械储能装置, 具有对环境友好、效

率高、充放电深度可控、可深度充放电等优点,使得其在风力发电系统中具有一定的竞争力^[5-7]。

但是飞轮储能系统的并网逆变器输出功率的高频扰动将降低电网吸纳风能的能力。为此,提出了能够实现快速功率平滑控制、减少并网功率波动、增加电网吸纳能力的功率快速平滑控制策略。所提出的飞轮储能风力发电系统控制策略中包含了风力发电系统的控制策略、飞轮储能系统控制策略以及并网逆变器的控制策略。

1) 风力发电系统的控制策略采用文献[8]介绍的最大功率点跟踪控制(maximum power point tracking, MPPT)。该文献针对直驱式永磁同步风力发电系统存在的非线性、不确定性、强干扰的问题,提出一种很好的基于滑模自适应控制算法的最大功率点跟踪策略。

2) 飞轮储能系统与并网逆变器控制则采用滞环控制^[9-10]与三角载波相结合的定频滞环控制策略。

虽然滞环控制策略结构简单、调节速度快、易实现、响应速度快、鲁棒性好且不存在平均跟踪误差^[11-12],然而其开关频率不固定,致使其输出电流谐波大,输出滤波器设计尺寸较大。文献[13]提出了一种定时滞环比较器,但是该方法存在平均跟踪误差,导致系统的稳定精度变差。文献[14]则通过调节系统参数动态调整滞环阈值,但存在跟踪失步的可能。

针对以上不足,提出采用三角载波与滞环控制策略相结合的方法,即将电流误差叠加上三角载波,实现开关频率固定的定频滞环控制策略。而对于并网逆变器的控制则采用瞬时功率理论直接计算交直流电流的参考值,减少了PI控制器;而采用定频滞环控制策略,则不需要对电网电压进行锁相,进一步降低了控制系统的软件成本。

3) 飞轮储能控制系统的充放电功率参考值可通过并网功率的波动获得。

文献[15]通过测量风速的平均值,设置飞轮储能系统的充放电功率参考值;然而风速波动大,测量误差大,导致储能系统的平滑效果不理想。而文献[11]则将风力发电系统的最大输出功率与平均输出功率的平均值作为储能系统充放电功率的参考值,采用该方法容易导致储能系统长时间充电或放电;然而储能系统的存储容量有限,储能系统过渡放电或充满电后,将失去平滑功率的功

能,因此该方法适用于储能容量较大的场合。

由于飞轮储能系统的充放电功率是为了平滑风力发电系统的并网功率,因此提出通过检测并网逆变器的输出功率,将其作为飞轮储能系统的充放电功率参考值。而对于并网逆变器而言,其输出功率的高频波动即是风能的随机性、波动性导致的电网侧并网功率波动。因此,提出采用并网逆变器输出功率的高通滤波分量作为飞轮储能系统的输出功率参考值。

下面基于所提出的控制策略,搭建了飞轮储能风力发电系统模型,并进行仿真分析和实验验证。结果表明:所采用的并网逆变器输出功率滤波算法确定储能系统的充放电参考值具有不增加系统硬件成本、误差小、抑制网侧波动能力高等优点,同时采用定频滞环控制策略控制系统的软件成本得到了降低。

1 风力发电系统结构

图1为飞轮储能异步电机风力发电系统的结构框图,图中:电机为直驱鼠笼条式异步电机,具有成本低、结构可靠坚固、鲁棒性高等特点;飞轮储能系统中的电动/发电机也采用异步电机;并网逆变器、风力发电机侧变换器与飞轮储能系统侧变换器均采用三相脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)变换器。

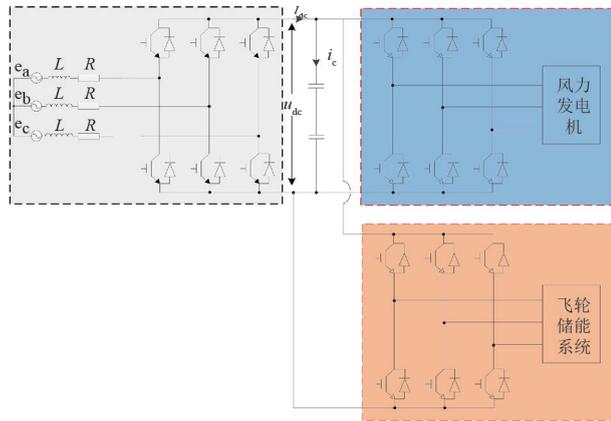


图1 风力发电系统结构

2 飞轮储能风力发电系统控制策略

2.1 风力发电机组的控制策略

风力发电机的风能利用系数 $C_p(\lambda)$ 是叶尖速度

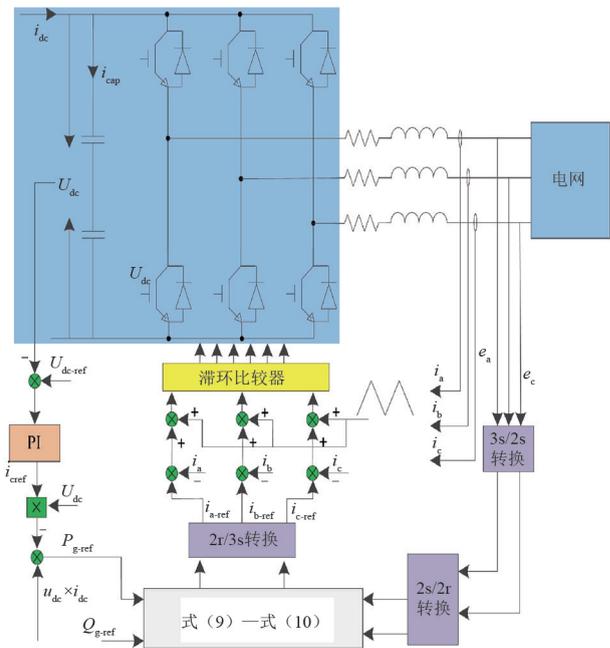


图 4 并网逆变器控制框图

飞轮储能装置的功率输入参考值,其中高通滤波器输出的有功功率参考值为风力发电系统输出功率的波动分量,通过该有功功率的扰动成分,可有效抑制风力风电发电系统对电网的影响。

即飞轮储能系统的功率参考值 P_{ref} 可由网侧输出功率经过高通滤波后获得,如图 5 所示。

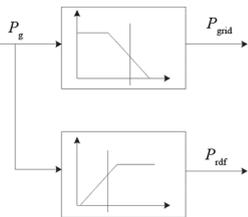


图 5 飞轮储能系统功率参考值

由动能公式可知,此时电动/发电机的机械转速参考值可表示为

$$\Omega_{f-ref} = \sqrt{\frac{2E_{f-ref}}{J}} \quad (9)$$

式中, J 为飞轮转子的转动惯量。

电动/发电机采用直接转矩控制策略时,飞轮储能系统的控制框图如图 6 所示,图中: Ψ_{f-s}^* 、 $\Psi_{f-s-esti}$ 为飞轮电机的定子磁链参考值、定子磁链估算值; T_{e-f}^* 、 $T_{e-f-esti}$ 为飞轮电机的转矩参考值、转矩估算值; ω_{r-f}^* 、 ω_{r-f} 为飞轮电机转子角速度参考值、转子角速度测量值。

图 6 中,磁链估算可通过式 (10) 实现,转矩估算可通过式 (11) 实现。

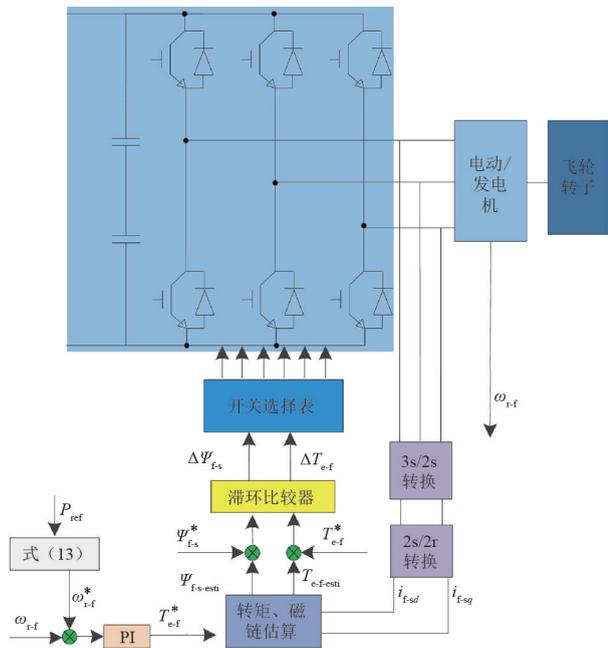


图 6 飞轮储能系统控制框图

$$\begin{cases} \Psi_{f-sd} = \int (u_{f-sd} - R_s i_{f-sd}) dt \\ \Psi_{f-sq} = \int (u_{f-sq} - R_s i_{f-sq}) dt \\ \Psi_{f-s} = \Psi_{f-sd} + j \Psi_{f-sq} \end{cases} \quad (10)$$

$$T_{e-f} = n_{p-f} (\Psi_{f-sd} i_{f-sq} - \Psi_{f-sq} i_{f-sd}) \quad (11)$$

式中: Ψ_{f-s} 、 Ψ_{f-sd} 、 Ψ_{f-sq} 分别为定子磁链、定子磁链 d 轴分量、定子磁链 q 轴分量; u_{f-sd} 、 u_{f-sq} 分别为飞轮电机的定子电压 d 轴分量与 q 轴分量; R_s 为飞轮电机的定子绕组电阻; i_{f-sd} 、 i_{f-sq} 分别为飞轮电机的定子电流 d 轴分量与 q 轴分量; T_{e-f} 为飞轮电机的电磁转矩; n_{p-f} 为飞轮电机的转子转速。

2.4 定频滞环控制

采用滞环控制策略时,开关管的开通关断时刻取决于逆变器输出电流达到上、下限的时间,导致其开关频率不固定,并网逆变器输出电流谐波含量大。图 7 为采用三角载波技术与滞环比较器相结合的示意图。

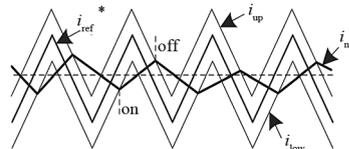


图 7 定频滞环控制策略

图 7 中的电流 i_{ref}^* 可表示为

$$i_{ref}^* = i_{n-ref} + i_{tr} \quad (12)$$

式中: i_{ref}^* 为定频滞环控制的电流参考值; i_{n-ref} 为三相电流的参考值, n 表示 a、b、c 三相; i_{tr} 为电流滞环阈值。

采用该方法,开关频率由三角载波决定,在不影响滞环控制策略的实时性、响应速度与鲁棒性的情况下,实现开关管频率固定。同时该方法无需增加额外的硬件电路,软件也易实现,进而可减小滤波器的尺寸,提高效率,降低成本。

3 仿真分析与实验验证

为验证所提出的控制方法,利用 Matlab/simulink 搭建了仿真平台,并通过实验进行验证。仿真过程中具有随机性、波动性的风速变化如图 8 所示,其系统参数如表 1 所示。

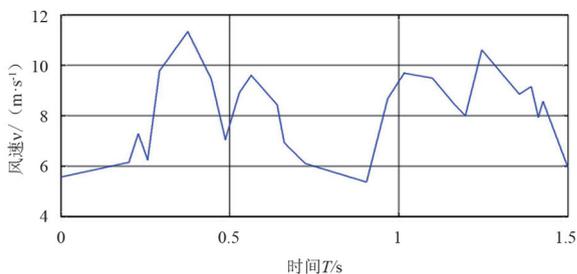


图 8 风速变化

表 1 仿真系统参数

变量	参数值
飞轮储能充放电容量/kWh	9
网侧电感/H	0.008
直流母线电容/ μF	2200
直流母线电压/V	930

图 9 与图 10 为采用滞环控制策略 (hysteresis current control, HCC)、定频滞环控制策略(modulated hysteresis current control, MHCC) 以及 PWM 调制方式获得的在波动的风速下的直流母线电压波形与网侧功率因数波形。由图可知,在定频滞环控制策略下,直流母线电压的波动较小,获得的网侧功率因数与 PWM 调制方式下获得的网侧功率因数波形相似。

图 11 为在恒定负载功率 3 kW 下,维持直流母线电压不变,飞轮储能系统输出功率的实验波形。

图 12 为采用不同的控制策略时网侧有功功率实验波形,图中红色曲线为采用测风速计算飞轮储能系统的充放电功率参考值的网侧功率波形,蓝色曲线为采用由网侧功率的经过高通滤波后获得的功率波动作为飞轮储能系统充放电功率参考值。由图可知,采用功率快速平滑控制策略时,电网侧的有功

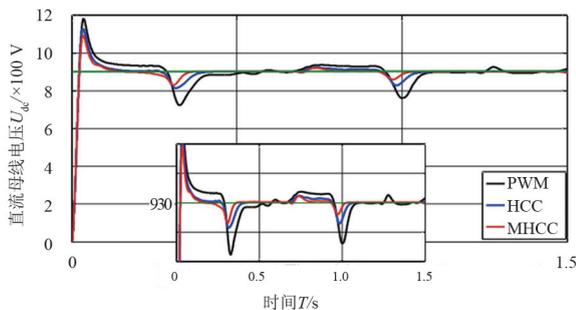


图 9 直流母线电压波形

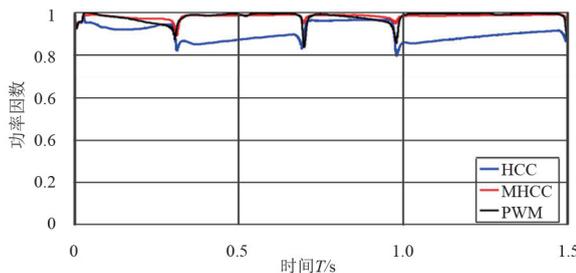


图 10 功率因数波形

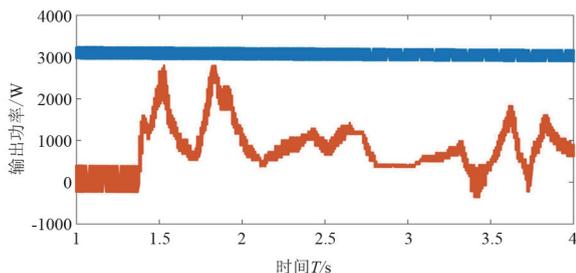


图 11 飞轮储能系统输出功率实验波形

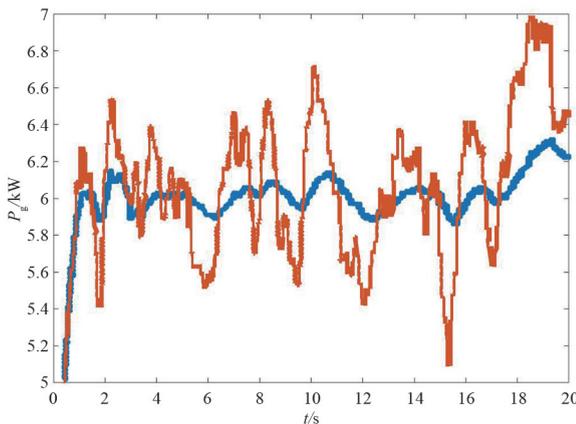


图 12 电网侧有功功率实验波形

功率波动较小,风力发电系统的输出电能质量较高。

并网功率为 10 kW 时,网侧电流波形如图 13 所示。图 13(a)中基波频率为 50 Hz 时,谐波含量为 19.04%,而图 13(b)中电流波形谐波含量为 4.71%。即定频滞环控制能够显著降低网侧电流谐波含量。

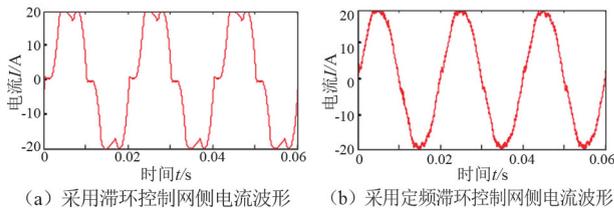


图13 网侧电流波形

4 结论

所研究的飞轮储能风力发电系统的功率快速平滑控制策略,采用网侧输入功率的高频分量作为飞轮储能系统的功率参考值,采用定频滞环控制策略避免了采用PI控制器带来的参数不稳定,以及无需锁相环。仿真与实验结果表明:该定频滞环快速功率平滑控制策略具有鲁棒性高、动态响应速度快、无静态误差等优点,还克服了开关管频率不固定、输出电流谐波含量高等问题。此外,该控制策略的算法的软硬件成本较低。

参考文献

[1] 杨立滨,曹阳,魏鞞,等. 计及风电不确定性和弃风率约束的风电场储能容量配置方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(16):45-52.

[2] ALVARO D, ARRANZ R, AGUADO J A. Sizing and operation of hybrid energy storage systems to perform ramp-rate control in PV power plants[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2019, 107:589-596.

[3] 刘科正,刘国荣,张真源,等. 一种新型风电混合储能系统模糊协调控制方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(12):124-133.

[4] 魏东辉,赵清华,于舜尧,等. 一种新型双电池风力发电储能系统及控制策略[J]. 太阳能学报, 2021, 42(3):259-267.

[5] ZHOU Weihua, TORRES-OLGUIN R E, WANG Yanbo, et al. DQ impedance-decoupled network model-based stability analysis of offshore wind power plant under weak grid conditions[J]. IET Power Electronics, 2020, 13(13):2715-2729.

[6] 于一潇,杨佳峻,杨明,等. 基于深度强化学习的风电场储能系统预测决策一体化调度[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(1):132-140.

[7] 张海燕,王杰. 不平衡电网电压下双馈风力发电机高阶滑模控制方法[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(4):37-48.

[8] 张开明,史宏俊,郭涛. 采用滑模自适应控制的永磁同步风力发电系统最大功率控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(7):143-150.

[9] 李昀昊,王建国,曹晓宇,等. 面向风电场-储能-输电网联合规划的机会约束 IGDT 模型[J]. 电网技术, 2019, 43(10):3715-3724.

[10] ABDELTAWAB H H, MOHAMED Y A I. Robust energy management of a hybrid wind and flywheel energy storage system considering flywheel power losses minimization and grid-code constraints[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(7):4242-4254.

[11] 夏兴国. 一种滞环电流控制 PWM 整流器的设计研究[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版), 2019, 36(3):77-81.

[12] 李勇,刘宏,刘乾易,等. 四桥臂 SVG 改进电流检测方法与控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(4):123-131.

[13] 毛惠丰,陈增禄,杨旭,等. 单相电压型逆变器新型滞环电流控制[J]. 电力电子技术, 2011, 45(11):15-17.

[14] 廖金国,花为,程明,等. 一种永磁同步电机变占空比电流滞环控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(18):4762-4770.

[15] BEARDSALL J C, GOULD C A, AI-TAI Moofik. Energy storage systems: A review of the technology and its application in power systems[J]. 2015 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC), Stoke on Trent, 2015:1-6.

[16] 阮毅,陈伯时. 电力拖动自动控制系统——运动控制系统[M]. 北京:机械工业出版社,2017.

[17] 何雄. 含储能的直驱风力发电 MPPT 及功率平滑控制[D]. 秦皇岛:燕山大学,2016.

作者简介:

邵宜祥(1962),男,硕士,教授级高级工程师,研究方向为新能源发电;

过亮(1982),男,硕士,高级工程师,研究方向为新能源并网技术及变流器控制技术;

蔡国洋(1984),男,硕士,高级工程师,研究方向为新能源发电控制技术;

刘剑(1983),男,硕士,高级工程师,研究方向为新能源发电控制技术;

郭春岭(1987),男,硕士,工程师,研究方向为新能源发电控制技术;

胡丽萍(1984),女,硕士,高级工程师,研究方向为新能源发电控制技术;

孙素娟(1983),女,硕士,高级工程师,研究方向为新能源并网技术及风电变流器控制技术。

(收稿日期:2022-04-24)

基于时间序列迭代的输电线路覆冰厚度估计方法

吴天宝¹, 马小敏¹, 唐军², 彭旭³, 庄杰⁴

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;

2. 国网四川省电力公司营销服务中心, 四川 成都 610041;

3. 电子科技大学航空航天学院, 四川 成都 611731;

4. 电子科技大学信息与通信工程学院, 四川 成都 611731)

摘要:冰灾严重影响输电线路的安全运行,会造成巨大的经济损失。当覆冰产生后,输电线路的弧垂最低点有可能产生位置变化,杆塔拉力传感器所承受的导线长度也会随之变化。文中提出一种基于时间序列迭代的输电线路覆冰厚度估计方法,通过多次迭代计算覆冰与线路等效厚度与密度,以减小弧垂最低点位置变化对覆冰厚度测量的影响。在承受导线长度持续增加、先增加后减少、持续减少、先减少后增加的4种仿真实验情景中,所提出的覆冰厚度估计方法的准确性及科学性均得到了验证。

关键词:覆冰厚度估计; 称重法; 时间序列迭代

中图分类号: TM 752 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2022)05-0020-06

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20220504

An Estimation Method for Icing Thickness of Transmission Line Based on Time Series Iteration

WU Tianbao¹, MA Xiaomin¹, TANG Jun², PENG Xu³, ZHUANG Jie⁴

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. State Grid Sichuan Electric Power Marketing Service Center, Chengdu 610041, Sichuan, China; 3. College of Aeronautics and Astronautics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, Sichuan, China; 4. School of Information and Communication Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, Sichuan, China)

Abstract: Ice disaster seriously affects the safe operation of transmission lines and causes huge economic losses. When the icing occurs, the position of the lowest sag of transmission line may change, and the length of the wire borne by tower tension sensor varies accordingly. An estimation method for icing thickness of transmission lines based on time series iteration method is proposed. The equivalent thickness and density of icing and line are calculated by several iterations to reduce the influence of the changes of the position of the lowest sag on the icing thickness measurement. The accuracy and scientificity of the proposed estimation method are verified in four simulation experiment scenarios, in which the length of the subjected wire continues to increase, firstly increases and then decreases, continuously decreases, and firstly decreases and then increases.

Key words: ice thickness estimation; weighing method; time series iteration

0 引言

在中国许多地区的输电线路都存在覆冰威胁^[1],特别是进入冬季之后,严重时最大覆冰厚度

超过了80 mm^[2]。输电线路覆冰问题如果没得到及时处理,会造成线路过荷载、输电线路断线、大面积闪络、电力设备损坏、杆塔倒塌等严重危害供电安全的问题^[3]。每年由于线路覆冰导致的停电事故约占停电事故的四分之一,造成了巨大的经济损失^[4-6]。

由于电网覆冰故障具有影响范围广、影响时间长、修复难度大等特点,其造成的损失已超过其他种类的自然灾害。有鉴于此,国内对电网冰灾做了大量的研究工作,在输电线路覆冰预测及防治领域取得很多重要成果。文献[7]基于架空输电线路轴向张力、二维倾角和风速风向、温度湿度等信息监测线路稳态覆冰状况,现场安装和运行情况证明了力学模型的有效性。文献[8]以绝缘子串悬挂点拉力和倾斜角为基本参量,考虑风偏因素,将导线力学参量归算到风偏平面,并通过风偏平面内竖直方向上的静力学受力平衡计算覆冰厚度的力学计算模型。文献[9]对直线杆塔两侧导线的覆冰厚度称重法力学模型进行了改进。文献[10]验证了直线塔覆冰厚度计算模型运用到线路地线上的有效性。文献[11]提出了一种等值覆冰厚度计算方法,且效果良好。

目前的大部分覆冰厚度计算模型复杂度高,参数量多,计算麻烦且普遍适用性有待提升。鉴于输电线路覆冰厚度获得方法仍有较大改进空间,下面提出一种基于时间序列迭代的输电线路覆冰厚度估计方法,并运用 Python 设计仿真实验以验证该方法的覆冰厚度计算准确性及其在拉力传感器承受导线长度变化情况下的科学性。

1 覆冰厚度计算方法

覆冰发生时拉力传感器会承受左右两侧部分电缆线及覆冰的重量,输电线路覆冰情况如图 1 所示。悬垂绝缘子串左右两侧承受的导线长度分别为 L_{Left} 和 L_{Right} ,总长度为 L 。

$$L=L_{Left}+L_{Right} \quad (1)$$

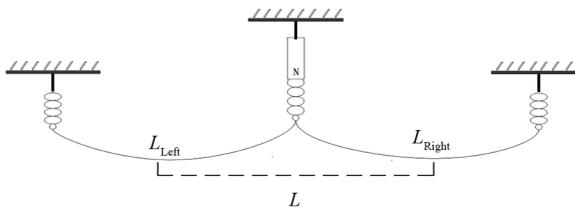


图 1 输电线路覆冰示意

悬垂绝缘子串的拉力分解情况如图 2 所示,拉力传感器垂直方向的分力为 $F \times \cos \theta$ 。

在下面的陈述中,对各参数进行如下定义: F 为拉力传感器的拉力值; θ 为绝缘子串的风偏角; L 为

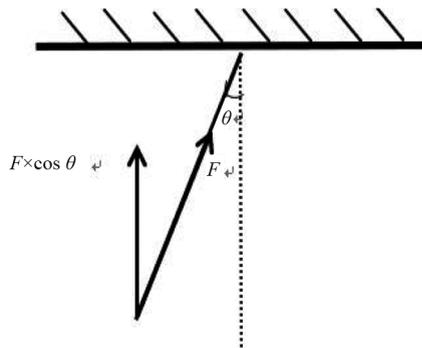


图 2 悬垂绝缘子串的拉力分解

拉力传感器承受的左右两侧导线的总长度; R 为导线及覆冰的总半径; σ 为导线及覆冰的等效线密度(即把覆冰和线路看为一个整体); ρ 为覆冰密度; g 为重力加速度;下标 0 表示没有覆冰的初始时刻,下标 $n, n-1$ 表示覆冰发生之后的第 n 个或 $n-1$ 个时刻,即该物理量为对应参数在该时刻的值。

在覆冰未发生的 t_0 时刻,通过拉力传感器获得输电线路覆冰之前对悬垂绝缘子串的拉力 F_0 以及悬垂绝缘子串的风偏角 θ ,通过台账可知导线初始的 R_0 和 σ 。

在覆冰发生后,依据 $t_1, t_2 \dots t_n$ 时间顺序,多次收集拉力传感器的拉力值,例如间隔 5 min 或 10 min,或根据覆冰增加趋势,动态调整测试间隔周期。随着拉力的增加,每次测量的覆冰厚度会增大。从 $n-1$ 时刻到 n 时刻,覆冰厚度的增大值为 D_n ,如图 3 所示。

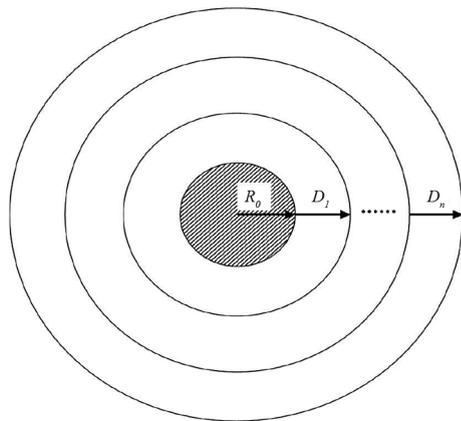


图 3 输电线路覆冰后的横截面时序变化

在覆冰发生的 n 时刻,一方面,覆冰及导线的重力等于拉力传感器在垂直方向的分力;另一方面,覆冰及导线的重力等于 n 时刻新增加的冰重加上 $n-1$ 时刻的导线及覆冰重量。考虑由于各种因素导致的相邻时刻 L 的变化,故覆冰线路的力学模型为

$$F_n \times \cos \theta_n = \pi \times \rho \times g \times [(R_{n-1} + D_n)^2 - R_{n-1}^2] \times (L_{n-1} + \Delta L_n) + \sigma_{n-1} \times (L_{n-1} + \Delta L_n) \times g \quad (2)$$

在 $n-1$ 时刻,覆冰及导线的重力等于拉力值的垂直分量,同时也等于“覆冰+线路”的等效密度与线路长度和 g 相乘,即

$$F_{n-1} \times \cos \theta_{n-1} = \sigma_{n-1} \times L_{n-1} \times g \quad (3)$$

由式(2)和式(3)作差可以得到 n 时刻的前后时刻拉力变化量 ΔF_n 。

$$\begin{aligned} \Delta F_n &= F_n \times \cos \theta_n - F_{n-1} \times \cos \theta_{n-1} = \\ &\pi \times \rho \times g \times [(R_{n-1} + D_n)^2 - R_{n-1}^2] \times \\ &(L_{n-1} + \Delta L_n) + \sigma_{n-1} \times (L_{n-1} + \Delta L_n) \times g - \\ &\sigma_{n-1} \times L_{n-1} \times g \end{aligned} \quad (4)$$

由于相邻时刻时间间隔短,拉力传感器承受的导线长度 L 变化不大,甚至可以忽略,故可假设 $\Delta L_n \approx 0$,前后时刻拉力变化量 ΔF_n 为

$$\Delta F_n \approx \pi \times \rho \times g \times [(R_{n-1} + D_n)^2 - R_{n-1}^2] \times L_{n-1} \quad (5)$$

在式(5)中只要确定了 L_{n-1} 即可求解出第 n 时刻覆冰厚度的增量 D_n ,但 L 在实际工程应用中很难准确测量。分析发现,可由式(5)和式(3)相比消去 L_{n-1} ,得到

$$\frac{\Delta F_n}{F_{n-1} \times \cos \theta_{n-1}} = \frac{\pi \times \rho \times [(R_{n-1} + D_n)^2 - R_{n-1}^2]}{\sigma_{n-1}} \quad (6)$$

通过等式基本运算,即可由式(6)求解出 D_n 的值。

$$D_n = \sqrt{\frac{\Delta F \times \sigma_{n-1}}{F_{n-1} \times \cos \theta_{n-1} \times \pi \times \rho} + R_{n-1}^2} - R_{n-1} \quad (7)$$

求解得到 D_n 的值后,更新导线的等效半径 $R_n = R_{n-1} + D_n$,以及导线的等效线密度 $\sigma_n = \sigma_{n-1} + \pi \times \rho \times (R_n^2 - R_{n-1}^2)$,为后面时刻的迭代做准备。

当 $n=1,2,3,\dots,N$ (N 为计算终止时刻)时,测量对应时刻的拉力值与风偏角,根据式(7)即可求解到所有时刻的 D_n 。再将所有时刻的 D_n 累加可得覆冰总厚度 D 为

$$D = D_1 + D_2 + \dots + D_n \quad (8)$$

基于时间序列迭代的输电线路覆冰厚度估计方法具有严谨的数学推导,利用较少且易获得的参数(各时刻悬垂绝缘子串的拉力、悬垂绝缘子串的风偏角以及导线的初始线密度和半径),即可建立一

个效果良好的覆冰厚度模型,具有较好的普遍适用性和准确性。所提出的基于时间序列迭代的输电线路覆冰厚度估计方法的算法步骤如图 4 所示。

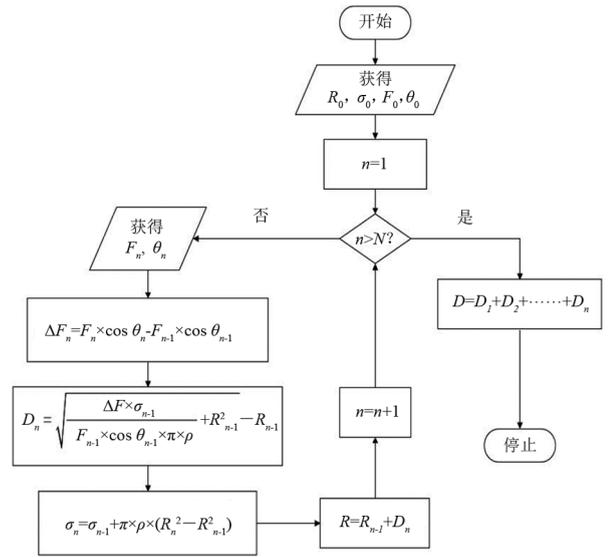


图 4 算法步骤流程

2 覆冰厚度的仿真模型设计

线路覆冰是一个受多因素影响的复杂问题,且很多因素很难去测定,各种因素的变化又对覆冰厚度计算模型的准确度有一定的影响。在现有的力学模型估计覆冰厚度的方法中,一般设定拉力传感器所承受的导线长度 L 不变;但在实际的情况中,受风雪及覆冰情况的影响, L 会有变化,这将导致线路覆冰厚度计算出现偏差。为了研究 L 变化对覆冰厚度计算模型准确度的影响,进行了如下仿真模型的设计。

2.1 输电线路导线参数

为了研究覆冰厚度计算方法的准确性,选择常见的导线型号 LGJX-400/50,参数如表 1 所示,根据此导线参数利用 Python 进行仿真。

表 1 导线 LGJX-400/50 参数

参数	数值
铝—计算截面/mm ²	399.73
钢—计算截面/mm ²	51.82
总—计算截面/mm ²	451.55
外径/mm	27.63
计算拉断力/N	123 400
计算重量/(kg · km ⁻¹)	1511
弹性系数/(N · mm ⁻²)	68 646.55

2.2 考虑 L 变化时的覆冰厚度真值计算模型

在未覆冰时,拉力传感器的值为 F_0 , L 为 L_0 。为控制变量假设悬垂绝缘子串的风偏角 θ 保持不变,根据文献[10]可知风偏角 θ 的变化几乎为 0,可以忽略。在覆冰发生的第 i 时刻,拉力传感器的值为 F_i , L 为 L_i ,覆冰厚度为 D 。因为增加的覆冰重力与拉力传感器的增大值相等,故可得

$$(F_i - F_0 \frac{L_i}{L_0}) \times \cos \theta = \pi \times \rho \times g \times L_i \times [(R_0 + D)^2 - R_{n-1}^2] \quad (9)$$

2.3 考虑 L 变化的基于时间序列迭代的覆冰厚度估计方法

在不忽略 L 变化的情况下,原方法中相邻时刻的覆冰厚度增加量 D_n 的计算公式变为

$$D_n = \sqrt{\frac{F_n \times \sigma_{n-1} \times L_{n-1} - F_{n-1} \times \sigma_{n-1} \times L_n}{F_{n-1} \times L_n \times \pi \times \rho} + R_{n-1}^2} - R_{n-1} \quad (10)$$

2.4 考虑 L 变化的等值覆冰厚度获得方法

在文献[11]中提出了一种输电线路等值覆冰厚度获得方法,通过测量输电线路覆冰前对悬垂绝缘子串的拉力、输电线路覆冰后对悬垂绝缘子串的拉力以及悬垂绝缘子串的风偏角,可以得到输电线路等值覆冰厚度 D_i 为

$$D_i = \sqrt{\frac{(F_i - F_0) \times \cos \theta \times \sigma_0}{F_0 \times \pi \times \rho} + R_0^2} - R_0 \quad (11)$$

考虑 L 变化后等值覆冰厚度 D_i 为

$$D_i = \sqrt{\frac{(F_i - F_0) \times \cos \theta \times \sigma_0 \times L_0}{F_0 \times \pi \times \rho \times L_i} + R_0^2} - R_0 \quad (12)$$

3 覆冰厚度计算方法的仿真分析

根据表 1 中的导线参数,为控制变量设定 θ 为 0,忽略风偏角影响,假定覆冰密度 ρ 为 900 kg/m^3 ,重力加速度 g 为 9.8 N/kg ,相邻杆塔间的输电导线长度为 100 m ,初始状态未覆冰时拉力传感器承受的左右两边导线长度之和 L 为 100 m 。输电线路的覆冰厚度取值一般为 10 mm 或 15 mm ^[12],为了数据更具有识别度,设定仿真覆冰厚度从 0 增加到 50 mm 。为验证基于时间序列迭代的输电线路覆冰厚度估计

方法的准确性和科学性,在覆冰的过程中设置了 4 种不同的 L 变化场景:1)持续增加;2)先增加后减少;3)持续减少;4)先减少后增加。

3.1 L 持续增加的场景

设定各时刻的覆冰厚度 D 分别为 $0, 10 \text{ mm}, 20 \text{ mm}, 30 \text{ mm}, 40 \text{ mm}, 50 \text{ mm}$;设定各时刻 L 的值依次为 $100 \text{ m}, 102 \text{ m}, 104 \text{ m}, 106 \text{ m}, 108 \text{ m}, 110 \text{ m}$ 。根据式(6)可获得各时刻的拉力值 F 如表 2 所示。

表 2 L 持续增加场景下的拉力真值仿真结果

D/mm	L/m	F/N
0	100	1481
10	102	2574
20	104	4285
30	106	6648
40	108	9695
50	110	13 460

由表 2 可知,随着覆冰厚度 D 和拉力传感器承受导线长度 L 的增加,拉力值 F 在不断增大。根据获取的 F 值,按照提出的基于时间序列迭代的输电线路覆冰厚度估计方法(以下简称“迭代法”)计算覆冰厚度值 D_x ,并得到相对误差 $e_x = (D_x - D)/D$,结果如表 3 所示。

表 3 L 持续增加场景下的迭代法估计值仿真结果

D/mm	D_x/mm	$e_x/\%$
0	0	0
10	10.377	3.77
20	20.864	4.32
30	31.521	5.07
40	42.353	5.88
50	53.367	6.73

考虑 L 的变化时,根据式(7)和式(9)可以得到该迭代法和文献[11]提出的输电线路等值覆冰厚度获得方法(以下简称“等值法”)的覆冰厚度计算结果 D_x 与 D_y 以及误差 e_x 与 e_y ,结果如表 4 所示。

表 4 L 持续增加场景下考虑 L 变化的仿真结果

D/mm	L/m	D_x/mm	D_y/mm	$e_x/\%$	$e_y/\%$
0	100	0	0	0	0
10	102	9.998	10.219	-0.02	2.19
20	104	19.996	20.302	-0.02	1.51
30	106	29.998	30.345	-0.01	1.15
40	108	39.996	40.367	-0.01	0.92
50	110	49.996	50.381	-0.01	0.76

从以上仿真结果可知,随着覆冰厚度的增加,在 L 持续增加的情况下,该迭代法的绝对误差和相对

误差均有所增加,这主要是因为未考虑 L 变化的情况下,由 L 的持续增加引起的误差变大。考虑 L 变化的情况下,迭代法和等值法的误差都明显减小,迭代法的相对误差接近于 0。计算过程中取整或保留小数是造成误差的原因,等值法的绝对误差在持续增大但变化不大,其相对误差在持续减小。

3.2 L 先增后减的场景

设定各时刻的覆冰厚度 D 分别为 0、10 mm、20 mm、30 mm、40 mm、50 mm;设定各时刻 L 的值依次为 100 m、102 m、104 m、102 m、100 m、98 m。覆冰开始后, L 先增后减场景下的拉力真值仿真结果如表 5 所示; L 先增后减场景下的迭代法估计值仿真结果如表 6 所示; L 先增后减场景下考虑 L 变化的仿真结果如表 7 所示。

表 5 L 先增后减场景下的拉力真值仿真结果

D/mm	L/m	F/N
0	100	1481
10	102	2574
20	104	4285
30	102	6397
40	100	8977
50	98	11 991

表 6 L 先增后减场景下的迭代法估计值仿真结果

D/mm	D_x/mm	$e_x/\%$
0	0	0
10	10.377	3.77
20	20.864	4.32
30	31.511	1.70
40	39.997	-0.01
50	49.298	-1.40

表 7 L 先增后减场景下考虑 L 变化的仿真结果

D/mm	L/m	D_x/mm	D_y/mm	$e_x/\%$	$e_y/\%$
0	100	0	0	0	0
10	102	9.998	10.219	-0.02	2.19
20	104	19.996	20.302	-0.02	1.51
30	102	29.997	30.120	-0.01	0.40
40	100	39.997	40.001	-0.01	0.00
50	98	49.994	49.914	-0.01	-0.17

从仿真结果可知,随着覆冰厚度的增加,在 L 先增后减的情况下,当 L 减少时, F 的增加量没有在 L 持续增加时大;该迭代法的绝对误差和相对误差均是先增大再变小;相对误差在 L 变化最大时达到最大为 4.32%,在 L 变化最小即 L 变回 L_0 时相对误差仅为 -0.01%。考虑 L 变化的情况下,迭代法和等值法的误差都较小,迭代法的绝对误差接近 0,等值法的绝对误差从 2.19%减少至 -0.17%。

3.3 L 持续减少的场景

设定各时刻的覆冰厚度 D 分别为 0、10 mm、20 mm、30 mm、40 mm、50 mm;设定各时刻 L 的值依次为 100 m、98 m、96 m、94 m、92 m、90 m。覆冰开始后, L 持续减少场景下的拉力真值仿真结果如表 8 所示; L 持续减少场景下的迭代法估计值仿真结果如表 9 所示; L 持续减少场景下考虑 L 变化的仿真结果如表 10 所示。

表 8 L 持续减少场景下的拉力真值仿真结果

D/mm	L/m	F/N
0	100	1481
10	98	2473
20	96	3956
30	94	5895
40	92	8258
50	90	11 012

表 9 L 持续减少场景下的迭代法估计值仿真结果

D/mm	D_x/mm	$e_x/\%$
0	0	0
10	9.612	-3.88
20	19.108	-4.46
30	28.418	-5.27
40	37.530	-6.18
50	46.435	-7.13

表 10 L 持续减少场景下考虑 L 变化的仿真结果

D/mm	L/m	D_x/mm	D_y/mm	$e_x/\%$	$e_y/\%$
0	100	0	0	0	0
10	98	9.997	9.770	-0.03	-2.30
20	96	19.999	19.672	-0.01	-1.64
30	94	29.996	29.609	-0.01	-1.30
40	92	39.994	39.565	-0.02	-1.09
50	90	49.994	49.532	-0.01	-0.94

从仿真结果可知,随着覆冰厚度的增加,在 L 持续减少的情况下,该迭代法的绝对误差和相对误差的绝对值均在增加,且其变化幅度比 L 持续增加时大。这主要是因为未考虑 L 变化的情况下, L 的持续减小引起该误差变大。考虑 L 变化的情况下,迭代法的绝对误差和相对误差仍接近于 0,等值法的绝对误差为负数且在持续减小,其相对误差的绝对值也在变小。

3.4 L 先减后增的场景

设定各时刻的覆冰厚度 D 分别为 0、10 mm、20 mm、30 mm、40 mm、50 mm;设定各时刻 L 的值依次为 100 m、98 m、96 m、98 m、100 m、102 m。覆冰开始后, L 先减后增场景下的拉力真值仿真结果如表 11 所示; L 先减后增场景下的迭代法估计值仿真结

果如表 12 所示; L 先减后增场景下考虑 L 变化的仿真结果如表 13 所示。

表 11 L 先减后增场景下的拉力真值仿真结果

D/mm	L/m	F/N
0	100	1481
10	98	2473
20	96	3956
30	98	6146
40	100	8977
50	102	12 481

表 12 L 先减后增场景下的迭代法估计值仿真结果

D/mm	D_x/mm	$e_x/\%$
0	0	0
10	9.612	-3.88
20	19.108	-4.46
30	29.477	-1.74
40	39.997	-0.01
50	50.684	1.37

表 13 L 先减后增场景下考虑 L 变化的仿真结果

D/mm	L/m	D_x/mm	D_y/mm	$e_x/\%$	$e_y/\%$
0	100	0	0	0	0
10	98	9.997	9.77	-0.03	-2.3
20	96	19.999	19.672	-0.01	-1.64
30	98	29.996	29.876	-0.01	-0.41
40	100	39.997	40.001	-0.01	0
50	102	49.996	50.083	-0.01	0.17

从以上仿真结果可知,随着覆冰厚度的增加,在 L 先减后增的情况下,与 L 先增后减的情况相反,该迭代法的绝对误差和相对误差先减小后增大, L 越接近 L_0 时相对误差的绝对值越小。考虑 L 变化的情况下,和前面场景类似,迭代法的效果优于等值法。

4 结 论

上面提出了一种基于时间序列迭代的输电线路覆冰厚度估计方法,并模拟在覆冰厚度逐渐增加的情况下,从拉力传感器承受的导线长度 L 持续增加、先增后减、持续减少和先减后增 4 种场景,验证了所提方法的有效性和科学性。结论如下:

1)在覆冰厚度小于 20 mm 时,在 4 种场景下该迭代法的相对误差的绝对值最大为 4.46%,最大的绝对误差为 0.892 mm;该误差在实际工程应用中影响不大,且能在 L 变化的影响下有效地估计覆冰厚度。在覆冰厚度超过 20 mm 时,该迭代法的最大相对误差绝对值为 7.13%,优于现有的大多数力学方法,且在实际情况中覆冰超过 20 mm 的情况罕见。

2)在考虑 L 变化的情况下,该迭代法的表现优于目前先进的等值厚度计算方法,其未来应用空间将会更大。

参考文献

[1] 王青峰. 输电线路覆冰的防治方法探究[J]. 通讯世界,2018(11):188-189.

[2] 田学农,杨永. 架空输电线路覆冰的危害及应对措施[J]. 电世界,2009(11):4-5.

[3] 曾华荣,毛先胤,黄欢,等. 均匀覆冰下在线监测耐张塔输电线路等值覆冰计算模型验证研究[J]. 电力大数据,2021,24(9):33-39.

[4] 夏辉军. 输电线路防冰减灾技术研究及覆冰在线监测系统设计与实现[D]. 成都:电子科技大学,2011.

[5] 张文亮,于永清,宿志一,等. 湖南电网 2008 年冰雪灾害调研分析[J]. 电网技术,2008,32(8):1-5.

[6] 童军心,陈智. 冰雪天气对江西电网造成的灾害分析及防治对策[J]. 江西电力,2008,32(S1):18-20.

[7] 邢毅,曾奕,盛戈皞,等. 基于力学测量的架空输电线路覆冰监测系统[J]. 电力系统自动化,2008,32(23):81-85.

[8] 张子翀,王健. 基于拉力和倾角的输电线路覆冰厚度预测模型[J]. 广东电力,2015,28(6):82-86.

[9] 董德杰. 直线杆塔两侧导线覆冰厚度的改进称重法[J]. 电气技术,2015(4):52-55,60.

[10] 牛唯,王斌,马晓红,等. 均匀覆冰下的直线塔架空地线覆冰厚度计算模型误差分析[J]. 广东电力,2021,34(10):76-82.

[11] 国网四川省电力公司电力科学研究院,国家电网公司. 输电线路等值覆冰厚度获得方法:CN201510765526. 3[P]. 2016-01-20.

[12] 林凤羽. 高压输电线路设计冰厚的取值[J]. 山东电力技术,1996(6):10-13.

作者简介:

吴天宝(1986),男,硕士,高级工程师,研究方向为输变电运检技术;

马小敏(1988),男,硕士,高级工程师,研究方向为电网智能运检技术;

唐 军(1964),男,硕士,高级工程师,研究方向为电能计量装置智能化技术;

彭 旭(2000),男,硕士研究生,研究方向为输电线路覆冰;

庄 杰(1976),男,博士,副教授,研究方向为嵌入式 AI 系统、通信与信号处理。

(收稿日期:2022-06-01)

山区输电线路微型桩模块化钻机的研制

董杰¹, 范荣全², 贺前³, 王杰¹, 李何钰秋¹

(1. 四川大学机械工程学院, 四川 成都 610065; 2. 国网四川省电力公司经济技术研究院, 四川 成都 610041;
3. 国网四川省电力公司达州供电公司, 四川 达州 635000)

摘要:山区输电线路杆塔基础, 因环境复杂、交通不便, 大型机械设备难以运输到作业现场, 因而广泛采用人工挖孔桩基础。为推动输电线路建设全过程机械化施工, 设计了一套轻型模块化钻机。文中对钻机的整体结构与各模块性能参数进行了介绍, 结合钻机的液压系统、电控系统、智能显示与遥控系统等关键技术, 采用结构设计和理论计算等方法, 实现了钻机快速组装拆卸、高功率钻进、钻进过程参数可视化与在线监测、远程遥控等功能, 有效提高了施工过程的安全性。根据微型桩成孔要求完成了现场成孔试验, 结果表明所研制钻机在山区输电线路微型桩成孔施工中具有明显优势。该钻机为复杂地形的山地输电线路施工提供了成孔装备的支撑, 并为以后同类型设备和技术研究提供了经验与方法。

关键词:输电线路; 微型桩; 模块化钻机; 机械化施工

中图分类号: TH 17 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2022)05-0026-05

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20220505

Design and Research on Modular Drilling Rig of Micro-pile for Transmission Lines in Mountainous Area

DONG Jie¹, FAN Rongquan², HE Qian³, WANG Jie¹, LI-HE YUQIU¹

(1. School of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China;
2. State Grid Sichuan Economic Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;
3. State Grid Dazhou Electric Power Supply Company, Dazhou 635000, Sichuan, China)

Abstract: Due to the complex environment and the inconvenient transportation, it is difficult to transport large-scale mechanical equipment to the operation site for the foundation of transmission line towers in mountainous areas. Therefore, manual pile foundation digging are widely used. In order to promote the mechanization of whole process of transmission line construction, a set of lightweight modular drilling rigs is designed. The overall structure of the proposed drilling rig and the performance parameters of each module are introduced. Combined with key technologies such as hydraulic system, electronic control system, intelligent display and remote control system of the proposed drilling rig, the structural design and theoretical calculation methods are used to realize the rapid assembly and disassembly of drilling rig, high-power drilling, drilling process parameter visualization, online monitoring, remote control and other functions, which effectively improves the safety of construction process. According to the requirements of micro-pile hole-forming, the on-site hole-forming test is completed. The results show that the proposed drilling rig has obvious advantages in the construction of micro-pile hole-forming for transmission lines in mountainous areas, which provides the support of hole-forming equipment for the construction of mountainous transmission lines with complex terrain, and provides experiences and methods for the future researches on the same type of equipment and technology.

Key words: transmission line; micro-pile; modular drilling rig; mechanized construction

0 引言

由于受地形限制,传统山区输电线路桩基成孔装备体积大、质量重,难以快速上山转运,无法实现机械化施工^[1]。为满足大型成孔设备通行条件,往往采用新建临时道路与搭建索道等手段,造价非常高。对于大型旋挖钻机无法进入现场的黏土及岩石地基塔位,一般推荐采用微型桩基础。微型桩基础是由多个微型单桩共同承力组成的群桩基础。在输电线路杆塔基础施工中,桩基成孔机械化率较低,不到50%。山地地区微型桩通常采用人工开挖桩进行基础施工,基坑施工过程中会发生基坑坍塌等事故威胁人员安全。即使有适用于微型桩的开挖设备,微型桩基础形式目前也仅有岩石锚杆基础,使用条件苛刻,使用率不高^[2]。

为了解决山区微型桩成孔设备运输的痛点与难点,提出将微型桩成孔钻机进行模块化设计拆分为快速组装模块,并配有远程操作手柄以便快速拆卸与快速组装,实现山区机械化作业,解决山区交通不便、运输困难的问题。下面对所提出的微型桩成孔钻机的液压进给系统、远程遥控系统、底部扩孔和清渣桶等关键技术进行了研究,并进行了现场成孔试验验证。所设计的钻机实现了输电线路基础施工的机械化过程。

1 模块化钻机设计方案

模块化钻机包括螺旋钻杆、动力头、桅杆组件(含推进梁、提升马达、提升链条、姿态油缸)、机架组件、动力系统组件、液压油箱组件、扩孔钻头、孔底清渣桶及电气控制系统等部分,如图1所示。这样将整套系统的质量进行了分解,减轻搬运的重量,保证成孔钻机能够快速在复杂山区快速搬运,在满足施工要求的同时提高施工效率。

1.1 结构与原理

桅杆组件推进梁采用箱型截面结构设计,顶部采用法兰连接方式与提升马达底座连接;推进梁两侧配有方形滑道作为动力头、钻杆上下运动的导向并增加抗扭强度;动力头安装底座与推进梁滑道之间采用耐磨聚氨酯板接触以减少滑道摩擦力及其磨损量。推进梁中部设有铰支点与支架旋转支撑座铰

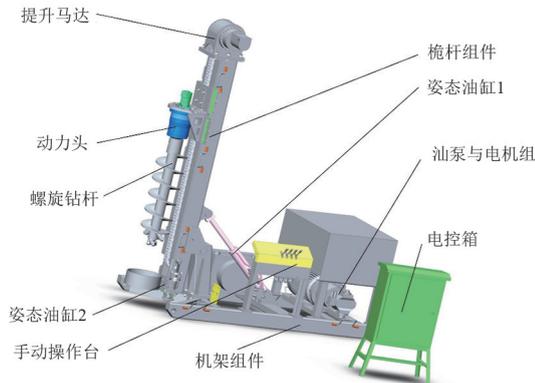


图1 模块化钻机整体结构

链,通过摆动油缸调节推进梁与机架的垂直度。推进梁底部设有姿态油缸2,钻机就位后,通过姿态油缸2支撑推进梁以达到固定推进梁的作用。电控系统包含无线遥控器、可编程控制器、触屏及控制柜等,工作时布置在机架组件中部右侧空位处,可拆卸,采用螺栓与机架固定。机架组件包括散热器、控制阀及阀块等;动力系统包括电机、油泵、联轴器等;液压油箱组件包括油箱、滤芯等。工作时,动力系统与液压油箱组件布置在机架尾部,兼顾配重作用,可拆卸,采用螺栓与机架固定。作业时,可通过遥控器远程控制,方便作业人员在任何方位观察钻机进给情况,同时可最大限度保证人身安全。

1.2 主要性能参数

山地钻机因交通不便的客观条件,在满足正常钻孔的前提下,对质量条件尤其关注。结合实际工程应用需求,主要技术参数设计如表1所示。

表1 模块化钻机主要性能参数

性能参数	设计值
成孔直径/mm	300
电机功率/kW	22
电机转速/(r·min ⁻¹)	1480
钻孔深度/m	8
液压系统压力/MPa	20
外形尺寸/mm	2990×1300×2100
整机质量/kg	2170

1.3 经济效益分析

对于微型桩基础,还考虑了传统旋挖钻机成孔和轻型模块化钻机成孔两种施工设备之间的价格差异。较轻型模块化钻机,传统旋挖钻机需要计列施工道路修筑费用和设备进场费用。费用计算中包括1基铁塔对应的4个基础的费用;采用大型旋挖机,需要计列施工道路(500 m)修筑费用;人工挖孔桩基础材料量保护护壁混凝土量。具体计算情况如表2所示。

表 2 经济效益预算

开挖设备	人员投入/人	工作时间比例/%	综合费用/万元
人工开挖	8	100	11.7
大型旋挖机	4	9	12.2
模块化钻机	4	15	11.3

相比人工挖孔桩,采用微型桩基础能节约基础混凝土量,基础综合造价能够节约 4% 左右。而微型桩基础施工采用轻型模块化钻机,相比传统旋挖钻机,节约了修筑施工道路费用和设备进场费用,基础综合造价能可节约 5%~8%。

2 钻机关键技术研究

2.1 液压系统

2.1.1 液压系统原理

液压系统工作稳定,具有低转速、大扭矩、稳定支撑的特点^[3]。在设计钻机进给系统中,姿态油缸须在承受工作载荷中保持液压断电不泄压;动力头、提升马达须在退钻、空载送杆与钻杆加接时实现快速进退。其中慢速增压进给是整体液压设计系统的难点,需要实现进给速度平稳及无级调速。进给系统原理如图 2 所示。

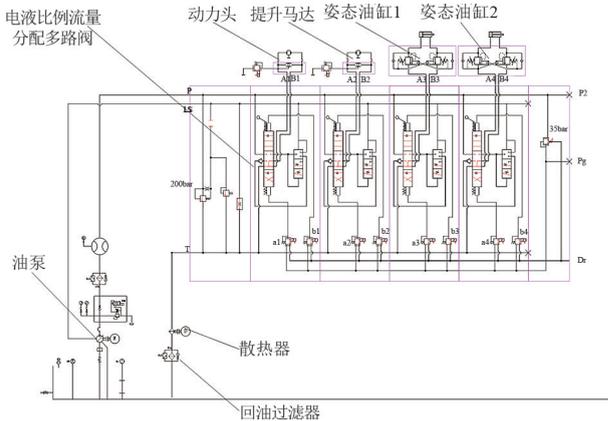


图 2 进给系统液压原理

模块化钻机采用单泵系统,利用电液比例流量分配来实现速度的无级调节。液压油从油泵输出,经过管路过滤器进入到电液比例分配阀,分为 4 路,分别控制动力头、提升马达、姿态油缸 1 和姿态油缸 2 等 4 个执行机构。动力头提供钻机钻杆破岩的扭矩。提升马达提供钻杆向下进给与向上提钻的动力。姿态油缸 1 作为支撑钻机桅杆竖直状态并将桅杆横向载荷传递到机架。姿态油缸 2 辅助支撑钻机及桅杆的稳定性,用来适用于山地不平整桩基地面

环境。同时,为了保护钻机液压系统 4 个执行机构的安全性,须对每个机构都设计回油节流回路与断电锁压功能。

2.1.2 液压马达的选型

根据微型桩桩基岩层^[4]与工程机械常用系统压力,选择液压系统的额定压力为 17 MPa,破岩最佳旋转速度为 15 r/min,查阅液压马达性能表可以得到执行马达载荷扭矩 T 。根据钻孔需要确定执行马达的转速,即可确定马达的工作流量,即:

$$V = \frac{2\pi T}{P} \quad (1)$$

$$q = \frac{nV}{1000} \quad (2)$$

式中: V 为液压马达排量, mL/r; T 为液压马达的载荷扭矩, N·m; P 为额定工作压力, MPa; q 为液压马达工作流量, L/min; n 为液压马达工作转速, r/min。

将钻机工作选定的参数代入式(1)计算,得到动力头马达的排量大致为 4 L/r;再代入式(2)得到动力头马达工作流量约为 60 L/min。根据 GB/T 2347—1980《液压泵及马达公称排量系列》,并综合上述指标参数,选择动力头马达型号为 YDS10000,主要技术参数如表 3 所示。

表 3 YDS10000 液压马达主要性能参数

性能参数	额定值
极限扭矩/(N·m)	10 900
额定压力/MPa	17
流量/(L·min ⁻¹)	75
转速/(r·min ⁻¹)	0~25
质量/kg	107

根据上述方法,依据提升马达实际工作状况,选取提升马达型号为 IY3-2450CZD120201,主要性能参数如表 4 所示。

表 4 IY3-2450CZD120201 液压马达主要性能参数

性能参数	额定值
最大提升力/T	4
额定压力/MPa	17
流量/(L·min ⁻¹)	30
提升速度/(cm·min ⁻¹)	0~11
质量/kg	70

2.1.3 液压泵的选型

在确定液压泵的工作压力时,根据安全性即工作效率考虑,一般选择液压泵压力高于液压马达压

力的20%^[5]。液压泵关系式为

$$q_{v\max} \geq K \cdot q \quad (3)$$

式中: $q_{v\max}$ 为液压泵的流量,L/min; K 为系统泄漏系数。

在此钻机液压系统中,取 K 为1.1,取 q 为动力头马达工作流量75 L/min,代入式(3),得到 $q_{v\max} \geq 82.5$ L/min。结合液压元件样本,综合液压马达与油泵参数及价格,选择型号为31R-PSC12N00的液压泵,主要参数如表5所示。

表5 31R-PSC12N00 液压泵主要性能参数

性能参数	额定值
额定压力/MPa	20
最大流量/(L·min ⁻¹)	87
质量/kg	53

注:恒功率泵,带负载敏感系统。

2.2 电控系统

模块化钻机电气控制系统原理如图3所示。电控系统是钻机的重要部分,由控制器、传感器、显示器和遥控装置等零部件组成^[6],这些电子元器件的组合能够极大地提升钻机设备的自动控制、自动检测与自我保护能力,进而提高钻孔效率与人员安全。

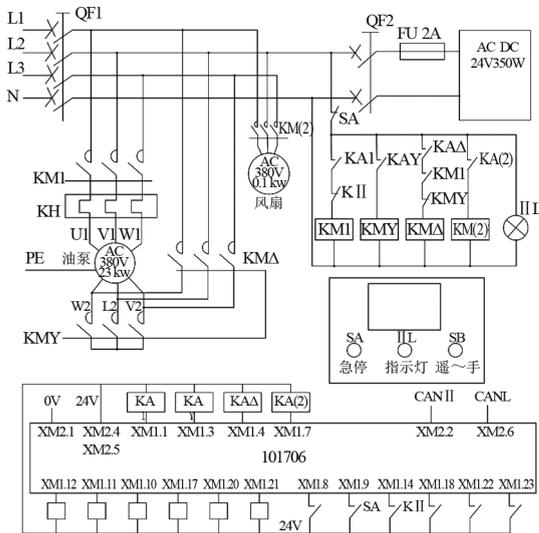


图3 钻机电气控制原理

控制器主要处理数据信息,处理钻机过程中传感器产生的信号结果并发送相应的控制指令,实现对钻机钻进或提钻的控制。该钻机采用芬兰MKS-ECU公司的I01706型号控制器,采用铝铸外壳,可有效防水防震,能够适用于山地运输中颠簸、潮湿等较为恶劣的环境。该控制器I/O接口具有高度扩展性,作为钻机中独立的控制单元,是钻机控制系统的

基础构成模块。处理器提供标准的CANOpen和CAN总线接口,可以将具有独立CAN接口的传感器、执行器、遥控手柄与其他设备连接到处理器的开放式I/O端口。

处理器作为电控设计核心,其32芯插座接线定义分别为钻机的以下部件:1为动力头正传1A+;2为正转1A-/0V;3为动力头反转;4为反转1B-/0V;5为动力头上升2A+;6为上升2A-/0V;7为动力头下降2B+;8为下降2B-/0V;9为回油报警XM1.9;10为动力头压力XM1.10;11为动力头转速XM1.11;12为链轮转速XM1.12;13为姿态油缸1下降;14为姿态油缸1上升;15为姿态油缸2上升;16为姿态油缸2下降;17为液压油温XM1.17;18为液位报警XM1.18;20为系统压力XM1.20;21为进给压力XM1.21;22为进油报警XM1.22;30为风扇U;31为风扇V;32为风扇W。

智能化的监测可视化平台能够有效地降低钻机操作过程的复杂性,并提高电控系统的整体智能化水平^[7]。系统采用芬兰MSK-ECU公司的SPD-7显示屏,可在线监测钻机关键参数的变化。钻机处理器对动力头转速、压力、下降速度、液压油温、液位高度、进给压力与下降深度等钻机各个运行参数进行读取,同时利用测量技术对各个参数进行在线监测,利用CAN通讯协议将结果显示给显示屏,如图4所示。现场操作人员可通过显示出的实时参数获取钻机运行状态,进而调节包括动力速度、下钻速度等在内的的工作参数,也可以精准定位钻机工作过程中的故障发生位置,依据参数数据实现设备的寿命管理与零件替换。



图4 电控系统显示屏

为增大钻机工作过程中的安全性,钻机可使用手动或遥控装置。使用手动操作过程时,共有4个操作手柄,每个操作手柄均有2个方向,可以通过扳

动的幅度调整相应部件的工作快慢,如图 5 所示。

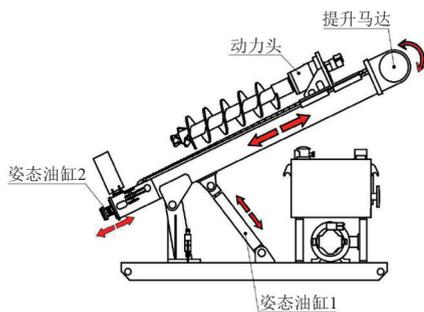


图 5 钻机姿态调整

遥控器操作和手柄操作原理一样,操作方式可参照手动操作^[8]。钻机遥控装置采用瑞典 SCANRECO 公司的 CN3741,可有效实现对钻机远距离操作。遥控器操作包括主泵启动/停止、姿态油缸 1 伸/缩、姿态油缸 2 伸/缩、提升马达正/反转、动力头正/反转、姿态调整是/否锁定、急停按钮、遥控器电源开关按钮,如图 6 所示。遥控器“姿态调整锁定”按钮的设置,是为了在钻机工作状态时保证姿态调整油缸处于锁死状态,操作人员如果误触碰到“姿态调整油缸操作阀”,姿态调整油缸也不会移动,确保钻机在钻孔作业时的稳定和安全。



图 6 钻机遥控界面

3 现场钻进试验

在成昆铁路甘洛南段测试微型桩模块化钻机的性能,并进行了现场钻进试验,如图 7 所示。现场微型桩试验场地地层上部为第四系,由含碎石粉质黏土和含粉质黏土碎块石组成;下部为基岩,为三叠系的粉砂岩、砂质板岩等。钻机各模块之间大多采用销轴与螺栓连接,组装便利快捷。在黏土地基的钻进下降速度约为岩石地基的 4~6 倍,钻机在钻进过程中的提升力与扭矩超过岩土地基所需的提升力和

扭矩。在整个试验期间,钻机在钻进过程中受到的随机冲击载荷与扭矩载荷不会导致钻机振动大,强度失效等问题。试验结果表明,该模块化钻机可有效提升输电线路基础机械化施工率,桩基成孔形成孔径为 300 mm、孔深为 8 m 的桩基孔,且孔底通过扩孔装备形成孔径为 500~600 mm 的扩孔桩基基底,能够保证微型桩桩基钻孔施工的质量和效率。同时,在保证施工人员安全与施工质量的前提下,节约了索道搭建与临时道路铺设等钻机运输费用,带来了客观的经济效益,具有显著的推广价值^[9]。



图 7 微型桩钻机实地钻进试验

4 结论

上面针对山区地形复杂、整体运输不便的客观因素,研制了一款山区输电线路微型桩模块化钻机。该钻机采用模块化设计,包含液压系统、电控系统与遥控系统,综合实现了模块化钻机的姿态调整、下钻与退钻等功能,可利用遥控装置远距离操作,保证了现场施工安全。相对于传统大型钻机,该钻机具有更高效和安全的就位与拆解特点,同时也降低了运输成本,具有可靠与广阔的市场前景。

该钻机对施工场地水平条件有一定要求,针对钻机后续发展,将进一步探究直径为 600 mm 的桩基与倾斜的微型桩基成孔方式和设备,并结合有限元分析软件在保证机械强度条件下进一步减重。

参考文献

- [1] LIU Ruijun, LIU Quan, LIU Fuhai, et al. Design and research of micro pile drilling rig for UHV transmission line in mountainous area[C]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 668: 12056.

基于握手式交互策略智能复合开关研究

胡天祥,黎军华

(乐山一拉得电网自动化有限公司,四川 乐山 614000)

摘要:近年来,随着低压配电系统智能化程度不断提高,复合开关在0.4 kV无功补偿系统中的应用逐渐广泛,其保护功能丰富、投切电容器冲击涌流小、稳态损耗低等优点被用户认可。据不完全统计,2015—2021年间全国新增复合开关厂家数十家,良莠不齐的技术水平导致产品在使用过程中问题频出。针对无功补偿系统中复合开关在运行过程中存在的问题,提出了基于握手式交互控制策略的概念,文中从复合开关的运行现状、故障案例、问题分析、提出解决方案、方案实施和实际工程应用效果方面进行阐述,设计了一种稳定可靠的硬件输出及反馈电路、软件控制策略和切实可行的解决方案,通过在工程中的实际应用,验证了控制策略的有效性和可靠性。

关键词:复合开关;磁保持继电器;可控硅;过零;交互;步进

中图分类号:TM 714.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2022)05-0031-04

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220506

Research on Intelligent Compound Switch Based on Handshake Interaction Strategy

HU Tianxiang, LI Junhua

(Leshan ELECT Electrified Wire Netting Automation Co., Ltd., Leshan 614000, Sichuan, China)

Abstract:In recent years, with the continuous improvement of the intelligence of low-voltage power distribution systems, the application of compound switches in 0.4 kV reactive power compensation systems has gradually been widely used. Its advantages such as rich protection functions, small inrush current of switching capacitor and low steady loss, are acknowledged by the users. According to incomplete statistics, dozens of new manufacturers have been added to develop the compound switches from 2015 to 2021, but the uneven technical level leads to frequent problems in the use of products. Aiming at the problems existing in the operation of compound switches in reactive power compensation system, the concept of interactive control strategy based on handshake is proposed. The application effect is described, and a stable and reliable hardware output and feedback circuit, software control strategy and practical solution are designed. And the effectiveness and reliability of the proposed control strategy are verified through the practical application in engineering.

Key words: compound switch; magnetic latching relay; thyristor; zero-crossing; interaction; stepping

0 引言

随着近年来智能电网的发展,低压配电新技术、新产品也伴随着智能电网的发展不断涌现。国内外低压无功补偿装置的投切开关通常选用接触器、晶闸管开关或复合开关,接触器在投入电容器时冲击涌流大。晶闸管在稳态导通过程中损耗大、温升高、谐波重。智能复合开关融合了二者的优点,具有投入涌流小、稳态损耗小、温升低且功

能丰富的优势。因此相关电力设备厂家开展了智能复合开关的研发。复合开关的一次回路由继电器和可控硅构成,采集和控制回路以中央处理单元(central processing unit,CPU)为核心。其最大的特点是投切电容器时无涌流且功能丰富,有着接触器和晶闸管开关无可比拟的优势。电力工业发展在保持适度增长的同时,须切实转变电力增长方式,实现从重视增加数量和规模到重视提高质量和效率的转变^[1]。因此,各供电公司、电力设备成套厂和广大的电力用户更愿意采用复合开替代

传统接触器,复合开关是传统的投切开关的升级换代产品。

1 复合开关的运行现状

复合开关在低压无功补偿系统中运用日益广泛,但复合开关的研制厂家水平参差有别,产品质量良莠不齐,低压复合开关运行时的安全、可靠性问题没有从根本上得到解决,严重地影响了电力系统的安全运行。

由于复合开关的硬件门槛并不高,从 2016 年初到 2020 年年底,中国的复合开关生产厂家由当初的几家迅猛增加到数十家,复合开关的应用从当初的尝试阶段逐渐转为大面积推开。很多复合开关虽然解决了传统接触器投切涌流大的弊端,也出现了一些新的问题:复合开关在运行 2~3 年后有 20%~40% 左右出现故障;更为严重的是,约 3%~10% 的复合开关在投运初期或使用过程中出现炸裂损坏,造成了主变压器 0.4 kV 进线断路器跳闸或线路损坏等诸多风险^[2]。

2 运行故障案例

某采矿厂采用容量为 800 kVA(10 kV/0.4 kV) 的 S11 配电变压器^[3],无功补偿装置配置容量为 12×30 kvar,补偿装置主开关采用 500 A 的塑壳断路器。无功补偿装置中的投切开关采用低压复合开关。配电系统运行 2 个月后,部分复合开关出现故障且有明显的灼烧痕迹,同时补偿装置进线塑壳断路器出现了多次跳闸。

电能质量在线监测装置的录波数据,清晰地反映了复合开关在出现故障瞬间补偿柜电流峰值为额定电流的数倍,已超出示波表所能显示的范围。由此可以看出,原厂家复合开关的设计由于出现异常导致故障,给用电单位甚至配电系统带来严重的安全隐患。

复合开关在电压过零偏移 50 μs 处导通时的冲击波形,如图 1 所示。

3 故障问题分析

低压智能复合开关出现运行故障,一般有以下原因:

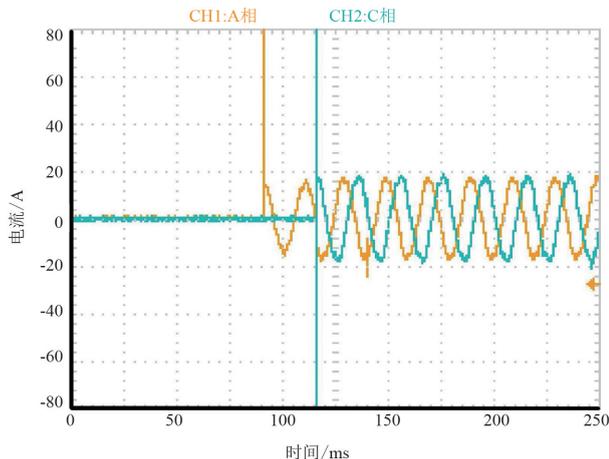


图 1 复合开关在电压过零偏移时间 50 μs 处导通时的冲击波形

- 1) 设备的运行环境恶劣,如运行环境温度、湿度、尘埃含量、海拔高度等外部环境的影响^[4];
- 2) 电能质量、电容器质量的影响^[5];
- 3) 复合开关自身质量缺陷的影响。

从现场采集的信息来看,产品自身质量的缺陷是复合开关运行故障最主要的原因。低压复合开关的主要实现原理是将可控硅与磁保持继电器并联,由 CPU 对可控硅和磁保持继电器进行时序控制^[6],动作步骤如下:

- 1) 初始时刻,可控硅和磁保持继电器均为断开,电容器为切除状态。
- 2) 投入电容时,CPU 控制可控硅在电压过零点瞬间导通并持续导通,此时电容电流流经可控硅。
- 3) 电流稳定后,CPU 控制磁保持继电器闭合,待其可靠接通后断开可控硅,继电器担任长时间的续流任务。
- 4) 切除电容器时,CPU 控制可控硅处于接通状态。待可控硅接通状态稳定后。随即断开磁保持继电器,此时可控硅担任续流任务。
- 5) 待磁保持继电器分开状态稳定后,CPU 撤消可控硅的触发信号,可控硅在电流过零自动断开,完成一次投、切过程的全部动作。

通过基本工作原理可以看出:复合开关在电压过零处投入电容器、在电流过零处退出电容器,具备电压过零投入、电流过零退出的特性。可控硅与磁保持继电器的动作时序均由 CPU 协调。无功补偿装置通常就近安装于低压配电变压器,电源内阻很小,又因补偿装置中复合开关所接负载为电容器,异常干扰可使 CPU 失效致一次元件动作时序失控,导

致复合开关在电压波形非过零处投入电容器,从而产生数倍甚至数十倍于额定电流的短时过流现象,引起复合开关炸裂甚至配电变压器进线断路器跳闸的严重后果^[7]。

4 实施方案和算法

4.1 方案设计要点

4.1.1 精准的电压过零点获取

复合开关中的可控硅只在接通与断开电容器的瞬间使用,损耗很小,无需散热片。但是可控硅对电压变化率(dv/dt)很敏感,对过电流的承受能力不强,可见可控硅部分是复合开关的薄弱环节。同时,在可控硅的终身寿命中,任何一次非过零点导通将会产生极大涌流,使可控硅瞬间过流损坏及复合开关整体炸裂^[8]。因此,如何确保可控硅始终在电压过零点导通是设计首要解决的问题。

4.1.2 可靠的部件失效闭锁

复合开关中可控硅与磁保持继电器的配合动作时序是:CPU通过对光耦反馈的方波进行扫描,以此找出电压过零点位置,并在此时发出控制信号;该信号通过脉冲回路触发可控硅使其在电压过零点导通;可控硅导通后接通磁保持继电器;最后,撤消可控硅脉冲信号使可控硅断开,磁保持继电器负责长时间稳态接通。复合开关的长时间运行,必定存在内部元件如CPU、可控硅等关键元件逐渐失效的情况。CPU或可控硅元件的失效同样可能会导致可控硅误导通,从而引起过流、过压现象的严重后果。因此,在关键元件失效的情况下要保证复合开关的安全性,设计中必须要考虑通过软硬件结合的方式实现复合开元件失效时的动作闭锁。

4.2 硬件实施方案

关键硬件控制及反馈回路的核心部分^[9],如图2所示。

为了克服目前低压复合开关普遍存在的性能不稳定、投入电容器涌流大、动作风险高等弱点,设计方案提供了一种电压过零点精准检测电路,配合专用的软件算法:在软件上采取反馈信号与CPU步进式脉冲互为推挽,实现可控硅触发全过程的实时跟踪保护,防止可控硅不可靠导通时磁保持继电器闭合造成的炸裂、损毁设备等严重后果。软件专用算法流程如图3所示。

4.3 软硬件交互策略

4.3.1 输入部分

在复合开关没有投入时,磁保持继电器与可控硅均断开,220 V的压降全部加在复合开关上下两端,通过互感器隔离变压器SPT204A(T2)将复合开关上下两端的电压转化为弱电信号,电压过零比较器LM311(U2)及相关电路将弱电信号转换为标准方波(方波的跳变处即是电压正弦波的过零处),标准方波经高速光耦6N137(U3)隔离输出,转变为0~5 V、跳变沿 $<0.2 \mu\text{s}$ 、占空比为50%的方波并传送到CPU的I/O口作为过零方波反馈输入。

4.3.2 输出部分

软件中首先设置好脉冲序列数和脉冲频率,并将输出口线设置为推挽结构。CPU在检测到方波上升沿的同时,推挽结构的I/O口采用程序步进的方式发送第一个脉冲,在发送下一个脉冲前对反馈波形进行分析,判断可控硅导通情况:如果输入口线为低电平,说明当前时刻可控硅为导通状态,则继续发送下一个脉冲并进行导通判断,依此循进,直至整个过程可控硅均导通方可闭合磁保持继电器。

在整个发送脉冲与通断判断过程中,若发送某一个脉冲后CPU判断口线为高电平,说明当前时刻

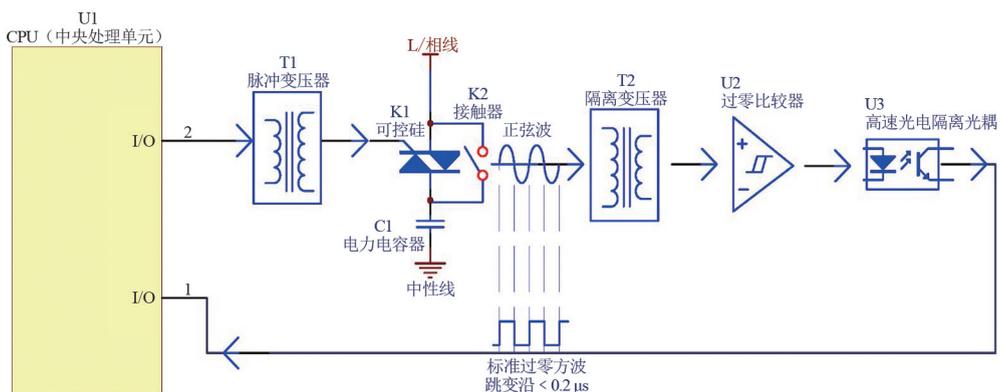


图2 复合开关关键硬件控制及反馈回路

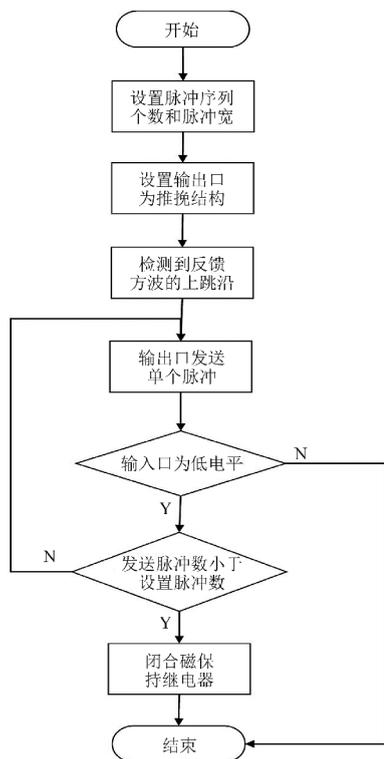


图3 软件专用算法流程

可控硅没有导通,则放弃后续的脉冲发送及闭合磁保持继电器的动作,有效地杜绝了可控硅不可靠导通时磁保持继电器盲目闭合造成的隐患。

4.4 误差引起的冲击涌流定量分析

按 S9 系列变压器考虑,其高压侧系统短路容量为 100 MVA^[10]、变压器容量为 630 kVA;变压器单相接地相保阻抗 $Z_{\Sigma} = \sqrt{R_{\Sigma}^2 + X_{\Sigma}^2} = 25.7599 \text{ m}\Omega$;隔离光耦初级 LED 的点亮电压 $U_0 = 1.2 \text{ V}$;短路冲击电流 $i_{ch} = \frac{U_0}{Z_{\Sigma}} = 46.58 \text{ A}$;可控硅正向重复峰值电流 $I_{T(RMS)}$ 为 75 A。 $i_{ch} < I_{T(RMS)}$,故即使考虑极端情况,投入时的冲击涌流仍不高于可控硅耐受值。

5 实际工程运行效果

四川某织布厂新建配电工程,电源变压器型号 S11-800 kVA-10/0.4,主要负荷是照明设备、变频器、纺丝机和通风机。计量装置设置在 10 kV 高压侧,规范要求配电变压器低压侧并联电容器装置容量按照变压器容量的 10%~30% 进行配置^[11]。考虑到电容器电压亏损,实际补偿容量按照变压器容量的 30% 进行配置,即低压无功补偿装置配置 8 组电容器单元,单组电容器容量为 30 kvar,每组电容器与

电抗率为 7% 的电抗器串联^[11],标称补偿总容量为 240 kvar。

在设备投入运行不到 2 周,用户反映补偿装置故障。经对配电现场进行检查,无功补偿监控装置显示功率因数在 0.6~0.7 之间,功率因数明显偏低,负荷电流的总谐波畸变率在 5%~8% 之间,电压的总谐波畸变率在 1.0%~1.5% 之间。每组补偿单元的熔断器均有 2~3 只已经断开,熔断器的断开率近 85%,整个补偿柜没有补偿电流,复合开关有烧灼的痕迹。

经分析,现场电流总谐波畸变率和电压总谐波畸变率均在正常范围内,故排除了电能质量问题对设备损坏的可能性,同时对复合开关硬件结构进行拆解分析,其内部结构存在严重的炸裂和灼烧痕迹,结合硬件电路、软件控制策略进行综合研判并经试验分析,得出的结论是软硬件协同配合不当应是造成复合开关损坏的根本原因。

采用所提出的基于握手式的交互控制策略,其硬件设计架构和软件控制算法按前述方案进行优化。按所提方案设计的智能复合开关在该织布厂重新挂网运行,历经 2 年多的运行,8 组智能复合开关均运行良好无一损坏,其可靠性和耐用性高于常规接触器,该厂每月平均功率因数均在 0.93~0.96 之间,保证了设备安全稳定运行^[12]。

6 结论

上面针对智能低压复合开关常规设计方案存在的缺陷,提出了一种全新的基于握手式交互控制策略。该策略结合智能低压复合开关的硬件结构,采取反馈信号与步进脉冲互为推挽,实现了可控硅触发全过程的实时跟踪保护,规避了常规实施方案的不足,防止了可控硅误导通时存在的炸裂风险,极大地提高智能低压复合开关运行的安全性和可靠性,强化了配电网设备运行的稳定和安全。

参考文献

- [1] 国务院. 国务院关于印发“十四五”节能减排综合工作方案的通知[EB/OL]. (2021-12-28) [2022-01-04]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2022-01/24/Content_5670202.htm.

多逆变器并网系统谐振混合阻尼参数设计

郑嘉龙,陈 静,赵丽华

(四川水利职业技术学院电力工程学院,四川 崇州 611231)

摘要:多逆变器并网系统谐振是高比例新能源新型电网必须解决的问题。文中分析了改进型有源阻尼、阻抗重塑和有源阻尼器的优缺点后,认为混合阻尼策略更符合工程经济需求。首先,介绍了单台LCL型逆变器混合阻尼参数设计过程;然后,在分析多逆变器系统谐振机理的基础上,根据混合阻尼的阻尼系数特点,提出先确定有源阻尼参数再确定无源阻尼参数,并采用总谐波率和谐波系数两个指标评价并网电能质量的参数设计方法;最后,在Matlab/Simulink仿真平台上进行验证。结果表明,所提方法设计的混合阻尼参数对系统谐振具有良好的抑制效果,并且能较好地适应系统阻抗的变化。

关键词:多逆变器并网;系统谐振;混合阻尼;参数设计

中图分类号:TM 464 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)05-0035-07

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220507

Hybrid Damping Parameters Design of Resonance for Multi-inverter Grid-connected System

ZHENG Jialong, CHEN Jing, ZHAO Lihua

(School of Electric Power Engineering, Sichuan Water Conservancy

College, Chongzhou 611231, Sichuan, China)

Abstract: Resonance of multi-inverter grid-connected system is a problem that must be solved in new power grid with high proportion of renewable energy. After analyzing the advantages and disadvantages of the improved active damping, impedance remodeling and active damper, it is considered that the hybrid damping strategy is more in line with the economic needs of the project. Firstly, the design process of hybrid damping parameters of single LCL inverter is introduced. Based on the analysis of resonance mechanism of multi-inverter system, according to the characteristics of hybrid damping coefficient, a parameter design method is proposed to determine the active damping parameters firstly and then the passive damping parameters, and the total harmonic rate and harmonic factor are used to evaluate the grid-connected power quality. Finally, it is verified on the Matlab/Simulink simulation platform. The results show that the hybrid damping parameters designed by the proposed method have a good suppression effect on the system resonance and can adapt well to the change of system impedance.

Key words: multi-inverter grid connection; system resonance; hybrid damping; parameter design

0 引言

为了实现“碳达峰、碳中和”目标,需要以风力发电、光伏发电为代表的可再生清洁能源替代传统化石能源^[1]。高比例新能源并网必然需要多逆变器并网。具有良好滤波效果的LCL型滤波器被广

基金项目:四川水利职业技术学院院级重点科研项目(KY2021-01)

泛用于新能源并网逆变器的输出滤波。该型滤波器自身存在谐振问题,同时多LCL型逆变器并网后还存在系统谐振问题。对于单台LCL型逆变器的谐振阻尼研究已经比较深入,取得了比较好的阻尼效果。然而,对于多LCL型逆变器并网系统谐振阻尼方法还在广泛研讨中。文献[2]通过对比仿真试验认为对于多逆变器谐振抑制而言,有源阻尼比无源阻尼更胜一筹。各种阻尼方法中被提及较多的方法

有改进型有源阻尼法^[3-6]、阻抗重塑法^[7-10]和有源阻尼器^[11-13]。改进型有源阻尼法不产生额外电能损耗,但是控制算法非常复杂。阻抗重塑法的实现需要陷波器与虚拟电阻配合,陷波器只能适应系统谐振频率非常小范围的波动;对于大型新能源电场中出现故障,需要调整电网结构因而改变系统阻抗的情况无法胜任。有源阻尼器将新增设备,增加投资,正在理论研究阶段,还未大规模投入使用。混合阻尼作为单台 LCL 型逆变器谐振抑制策略取得了良好效果^[14-15],并且电容支路串联无源阻尼电阻搭配电容支路电流反馈的混合阻尼策略研究的也比较成熟。因此,提出基于多台 LCL 型逆变器并网系统谐振抑制的混合阻尼参数设计,避免逆变器控制算法变得更加复杂,又不增加新的投资成本,符合工程经济需求。

1 单逆变器参数设计

1.1 电路拓扑

单逆变器电路拓扑如图 1 所示。图中: U_{dc} 为逆变器直流侧电压; S_1-S_4 为电力电子器件; L_1 、 C 和 L_2 组成 LCL 滤波器; R_d 为 LCL 滤波器电容支路上无源阻尼电阻; L_g 为电网等效电感; H_{i1} 为电容支路反馈系数,即有源阻尼参数; H_{i2} 为并网电流采集系数; U_g 为电网电压; $G_i(s)$ 为电流控制器,采用准比例谐振(quasi proportional resonant, QPR)控制器,其表达式为

$$G_i(s) = G_{QPR}(s) = K_p + \frac{2K_r \omega_i s}{s^2 + 2\omega_i s + \omega_0^2} \quad (1)$$

式中: K_p 为比例系数; K_r 为谐振系数; ω_i 为截止角频率; ω_0 为基波角频率。

1.2 参数设计

文献[16]对单台并网逆变器 LCL 滤波器参数、电容支路反馈系统和 QPR 控制器参数设计给出了具体的设计方法。其中, H_{i1} 的取值约束条件如式(2)所示。

$$\begin{cases} H_{i1} \leq \frac{2\pi L_1 (f_r^2 - f_c^2)}{K_{PWM} f_c} \frac{\pi f_c^2 - (10^{\frac{T_{fo}}{20} f_0} - f_c) \omega_i \tan P_M}{(10^{\frac{T_{fo}}{20} f_0} - f_c) \omega_i + \pi f_c^2 \tan P_M} \\ 10 \frac{G_M}{20} \frac{2\pi f_c L_1}{K_{PWM}} \leq H_{i1} \leq \frac{4f_{sw} L_1}{K_{PWM}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: f_r 为 LCL 滤波器谐振频率; f_c 为环路增益的截止频率; f_{sw} 为开关频率; P_M 为相位裕度; G_M 为环路增益的幅值裕度; T_{fo} 为基波频率处环路增益的幅值; K_{PWM} 为调制系数。

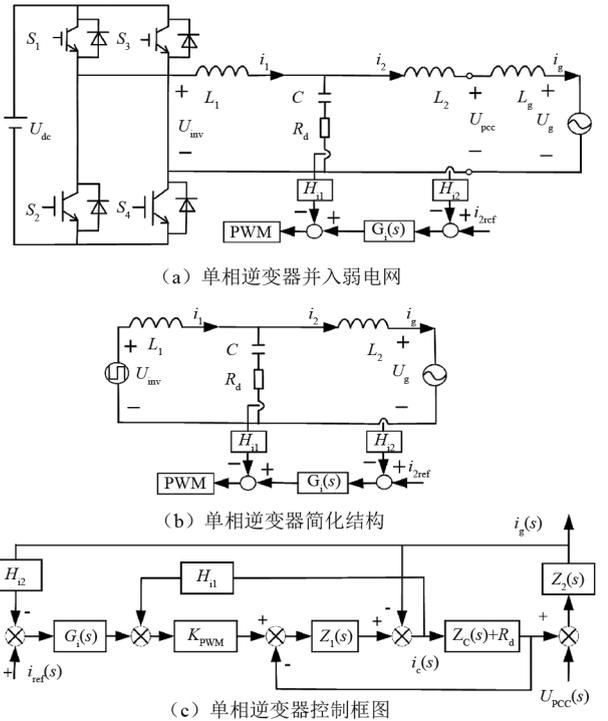


图 1 单台 LCL 型逆变器原理

对于阻尼电阻的取值,文献[17]以损耗为约束条件、滤波效果最好为目标,采用智能算法进行优化获取。文献[18]提出临界无源阻尼参数设计法,还给出了上述混合阻尼结构无源阻尼系数临界值为 0.28。无源电阻 R_d 的计算式为

$$R_d = \frac{2\zeta_{pd}}{C\omega_r} \quad (3)$$

式中: ζ_{pd} 为无源阻尼系数; ω_r 为 LCL 滤波器谐振角频率; C 为 LCL 滤波器电容。

上述参数的取值是按研究人员的经验获得的,不一定是最优值。同时,参数取值的目的是保证单台逆变器并网稳定性和并网电能质量要求得到满足,对于多逆变器并网稳定性和并网电能质量而言,这些参数或许还有优化的空间。

2 多逆变器系统谐振机理

多逆变器并网的诺顿等效电路如图 2 所示。根据图 1 可以得到混合阻尼策略下单台 LCL 型逆变器的等效阻抗表达式,如式(4)。根据图 2 可以得

到多逆变器并网时公共连接点 (point of common coupling, PCC) 的阻抗表达式, 如式 (5); 进而得到谐振时 PCC 点的阻抗表达式, 如式 (6)。由式 (6) 可得发生系统谐振时的谐振角频率表达式, 如式 (7)。

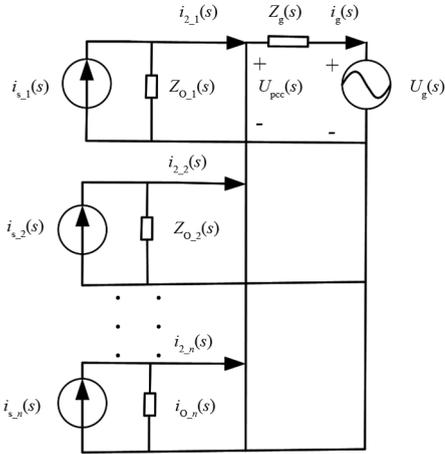


图 2 诺顿等效电路

$$\begin{cases} Z_o(s) = \frac{A_1 s^3 + A_2 s^2 + A_3 s + A_4}{L_1 C s^2 + C(R_d + H_{i1} K_{PWM})s + 1} \\ A_1 = L_1 L_2 C \\ A_2 = (L_1 + L_2) R_d C + L_2 C H_{i1} K_{PWM} \\ A_3 = L_1 + L_2 + C H_{i2} K_{PWM} G_i(s) R_d \\ A_4 = H_{i2} K_{PWM} G_i(s) \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} Z_{PCC} = \frac{n Z_g Z_o}{Z_o + n Z_g} \\ Z_{PCC}(s) = \frac{n L_g (A_1 s^4 + A_2 s^3 + A_3 s^2 + A_4 s)}{B_1 s^3 + B_2 s^2 + B_3 s + B_4} \\ B_1 = A_1 + n L_g L_1 C \\ B_2 = A_2 + n L_g C (R_d + H_{i1} K_{PWM}) \\ B_3 = A_3 + n L_g \\ B_4 = A_4 \end{cases} \quad (6)$$

$$\omega_{res} = \sqrt{\frac{L_1 + L_2 + n L_g}{L_1 L_2 C + n L_1 L_g C}} \quad (7)$$

由式 (7) 可以看出, 系统谐振只与 LCL 滤波器、电网等效电感有关, 与电容支路串联电阻、有源阻尼参数无关。说明在仿真实验时, 同一个系统谐振频率可以用于由不同串联电阻和有源阻尼参数组成的试验组进行试验。还有研究表明, 多逆变器并联系统中存在多个谐振频率^[19], 为了简化问题讨论难度, 下面并不涉及多个并网谐振频率问题。

3 混合阻尼设计

3.1 动态电网阻抗下阻尼系数分析

文献[14]给出了单机逆变器并网无源阻尼和有源阻尼的阻尼系数 ζ_{PD} 、 ζ_{AD} 的表达式, 如式 (8) 和式 (9) 所示。

$$\zeta_{PD} = \frac{R_d C \omega_{res}}{2} = \frac{R_d}{2} \sqrt{\frac{(L_1 + L_2 + L_g) C}{L_1 (L_2 + L_g)}} \quad (8)$$

$$\zeta_{AD} = \frac{H_{i1}}{2 L_1 \omega_{res}} = \frac{H_{i1}}{2 L_1} \sqrt{\frac{L_1 (L_2 + L_g) C}{L_1 + L_2 + L_g}} \quad (9)$$

由式 (8) 可知无源阻尼电阻 R_d 与无源阻尼系数 ζ_{PD} 成正比。无源阻尼系数 ζ_{PD} 与阻尼电阻 R_d 、电网等效电感 L_g 的关系如图 3 所示: 随着电网等效电感 L_g 增加, 无源阻尼系数 ζ_{PD} 将减小; 不同无源电阻参数 R_d 对应无源阻尼系数 ζ_{PD} 的变化率不同, 且随着电网等效电感增加而减小的变化率也不同。由式 (9) 可知有源阻尼参数 H_{i1} 与有源阻尼系数 ζ_{AD} 成正比。有源阻尼系数 ζ_{AD} 与有源阻尼参数 H_{i1} 、电网等效电感 L_g 的关系如图 4 所示: 随着电网等效电感 L_g 增加, 有源阻尼系数 ζ_{AD} 将减小; 不同有源阻尼参数 H_{i1} 对应有源阻尼系数 ζ_{AD} 的变化率不同, 且随着电网等效电感增加而减小的变化率也不同。

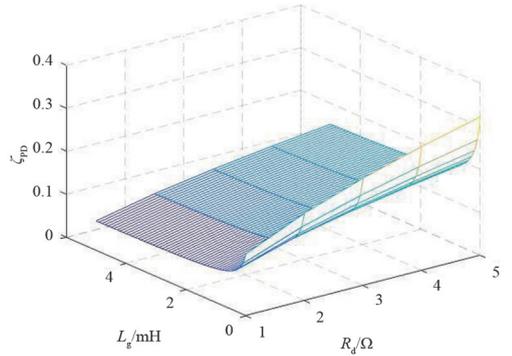


图 3 ζ_{PD} 、 R_d 、 L_g 的关系

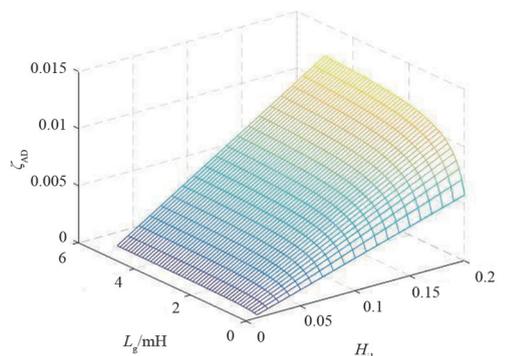


图 4 ζ_{AD} 、 H_{i1} 、 L_g 的关系

虽然,电网等效电感减小时阻尼系数将增大,但是电网等效电感增大时阻尼系数也将减小。在电网等效电感发生波动时,为了尽可能减小阻尼系数波动范围,阻尼系数变化率取值应尽可能小。将式(8)和式(9)对电网等效电感求微分得到电网等效电感发生变化时无源阻尼系数变化率 k_{PD} 和有源阻尼系数变化率 k_{AD} 。式(10)和式(11)说明无源阻尼系数变化率与无源阻尼电阻成正比,有源阻尼系数变化率与电容支路反馈系数成正比。因此,既要实现高阻尼系数,又要降低其对电网等效电感变化的波动,需要合理评估无源阻尼电阻参数和有源阻尼参数取值。

$$k_{PD} = \frac{d\zeta_{PD}}{dL_g} = \frac{R_d L_1 C}{4\sqrt{L_1 C} (L_2 + L_g)^3 (L_1 + L_2 + L_g)} \quad (10)$$

$$k_{AD} = \frac{d\zeta_{AD}}{dL_g} = \frac{H_{i1} L_1 C}{4\sqrt{L_1 C} (L_2 + L_g) (L_1 + L_2 + L_g)^3} \quad (11)$$

3.2 混合阻尼参数设计

混合阻尼的阻尼系数由无源阻尼系数和有源阻尼系数组成,如式(12)所示。

$$\zeta = \zeta_{PD} + \zeta_{AD} = \frac{R_d C \omega_{res}}{2} + \frac{H_{i1}}{2L_1 \omega_{res}} \quad (12)$$

式(12)也说明无源阻尼和有源阻尼可以单独考虑。由于有源阻尼方法采用虚拟电阻技术,不会产生额外的能量损耗,单从阻尼系数的角度,电容支路反馈系数取值越大越好;但是,无源阻尼的阻尼电阻要产生电能损耗,它的取值还

需进一步权衡,因此,先确定有源阻尼系数,再确定无源阻尼系数。混合阻尼参数的设计流程如图5所示。

针对图5中无源阻尼参数设计问题,文献[18]提出的临界无源电阻设计方法是针对单台逆变器并网的情况,无源电阻计算式中采用LCL滤波器谐振角频率无法体现多逆变器并网中并网逆变器数量带来的影响。多逆变器并网临界无源阻尼电阻的计算式可以采用式(8),用系统谐振角频率替代LCL滤波器谐振角频率。阻尼系数并不是只针对谐振频率,采用并网电流总谐波率(total harmonic distortion, THD)与谐波系数(harmonic factor, HF)两个指标组成的综合电能质量指标,再考虑无源阻尼电阻损耗更符合混合阻尼在实际工程应用中的评价。

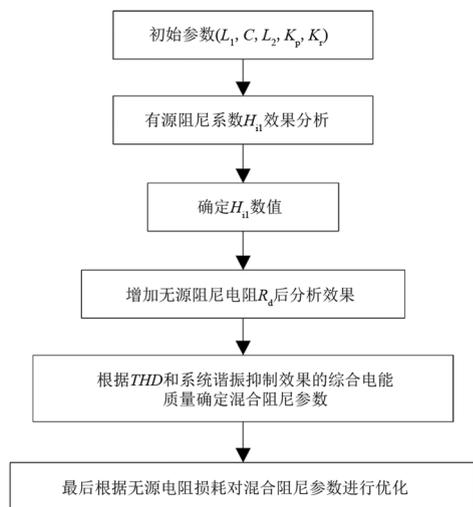


图5 混合阻尼参数设计流程

4 仿真实验研究

根据图1和图2在Matlab/Simulink上搭建3台LCL型逆变器并网仿真试验平台。逆变器参数如表1所示^[16]。

表1 逆变器参数

参数	数值	参数	数值
V_{dc}/V	360	f_o/Hz	50
U_g/V	220	f_{sw}/kHz	10
P_o/kW	6	H_{i2}	0.15
n	3	U_{tri}/V	3.052
L_1/mH	0.6	K_p	0.45
L_2/mH	0.15	K_r	350
$C/\mu F$	10		

根据式(3)和式(8)分别计算单台逆变器并入弱电网可得无源阻尼电阻值约为 2.0Ω 和 2.6Ω 。根据式(8)计算3台逆变器并网无源阻尼电阻值约为 3.2Ω 。在 $H_{i1} = 0.1$ 情况下电网等效电感 $L_g = 0.2 \text{ mH}$ 的弱电网,没有电网背景谐波注入的并网电流幅频特性如图6所示。由图6可以看出,优化后临界无源阻尼电阻对于逆变器并入无背景谐波弱电网的阻尼效果要略微好一些。

对第一章内容中有源阻尼参数 H_{i1} 理论计算范围为 $0.009 \sim 0.200$ 进行仿真验证后,确定其最小值为 0.057 才能保证逆变器稳定并网。进行8组仿真实验, H_{i1} 取值分别为 $0.06, 0.08, 0.10, 0.11, 0.12, 0.14, 0.16, 0.20$ 。电网等效电感 $L_g = 0.2 \text{ mH}$ 时,可计算系统谐振频率约为 2758 Hz 。仿真时,向系统注入 3% 基波幅值的 2758 Hz 谐波,得到如图7所示的仿真结果。从图7可以看出,各组有源阻尼参数

对系统谐振都有抑制效果。 H_{i1} 数值越大,抑制效果越好,符合前述理论预期。但是综合 THD 和 HF 两个指标来看, $H_{i1}=0.11$ 是比较好的选择。

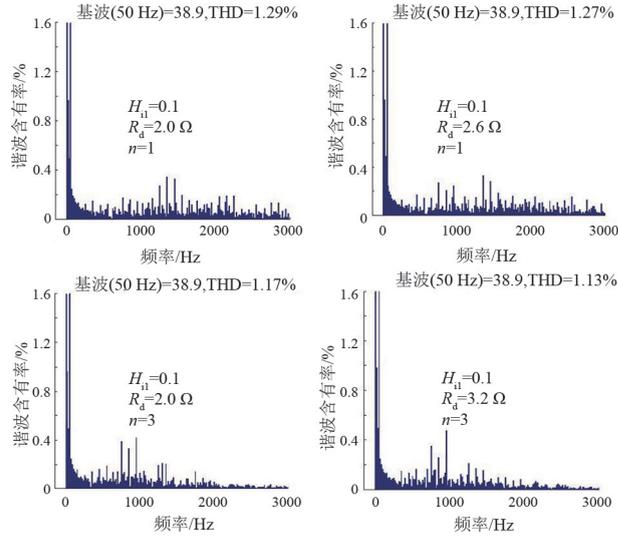


图 6 无背景谐波下并网电流幅频特性

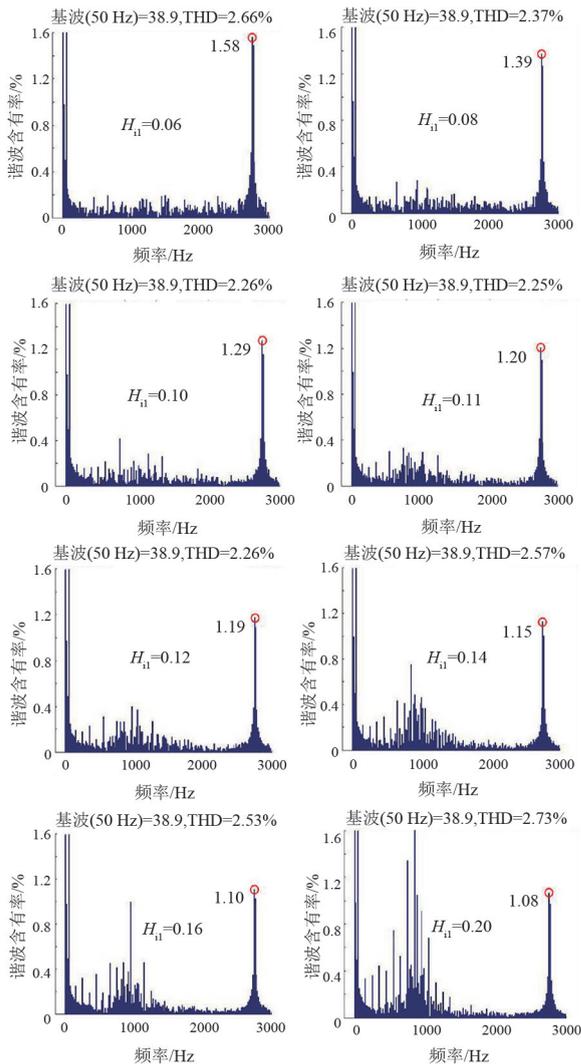


图 7 各组有源阻尼参数下并网电流幅频特性

3 台逆变器并网,注入 3% 基波幅值的 2758 Hz 谐波,串联无源阻尼电阻 R_d 分别取值 0.5 Ω 、1.0 Ω 、1.5 Ω 、2.0 Ω 、2.5 Ω 、3.0 Ω 、3.2 Ω 、3.5 Ω 。仿真结果如图 8 所示。由图 8 可知,无源阻尼电阻越大,系统谐振抑制效果越好。优化后的临界无源阻尼电阻比优化前取得了更好的抑制效果。根据 THD 和系统谐振抑制效果的综合电能质量确定混合阻尼参数为 $H_{i1}=0.11, R_d=3.2 \Omega$ 。但是无源阻尼电阻值越小,损耗越小。从图 9 可以看出 $R_d=1.5 \Omega$ 为最优参数。

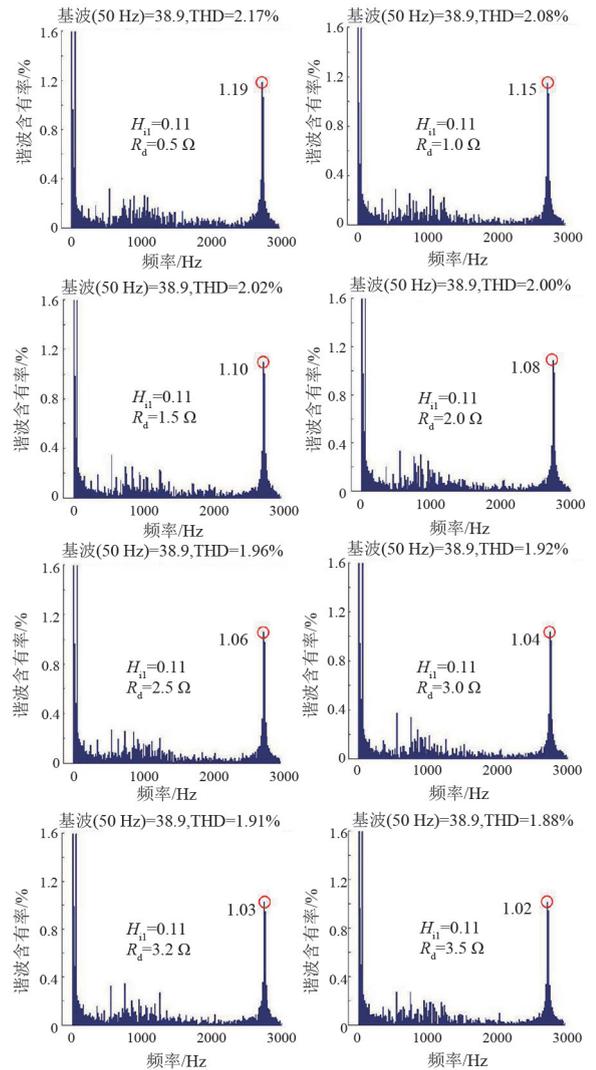


图 8 各组新增无源阻尼参数下并网电流幅频特性

为了验证所设计的混合阻尼参数对电网等效电感发生变化时的抑制效果,再进行 3 组对比试验,试验结果如图 10 所示。除了所提方法设计的参数外,另一组参数来源于文献[15]所述方法。该方法要求无源阻尼电阻尽可能数值取小一点,有源阻尼参数 H_{i1} 尽可能取大一点,因此 $R_d=1 \Omega, H_{i1}=0.2$ 。第一组参数 $L_g=0.2 \text{ mH}$,谐振频率约为 2758 Hz;第二

组参数 $L_g = 1 \text{ mH}$, 谐振频率约为 2242 Hz; 第三组参数 $L_g = 2 \text{ mH}$, 谐振频率约为 1950 Hz。图 10 显示, 对于第一组试验, 两种设计方法所得参数抑制效果相当, 而对于第二组和第三组试验, 所提方法设计的参数对系统高频谐振和低频谐波取得了更好的抑制效果。

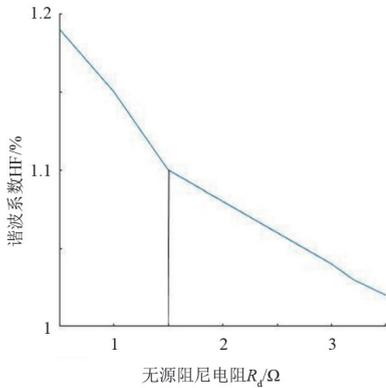


图 9 HF 与 R_d 的关系

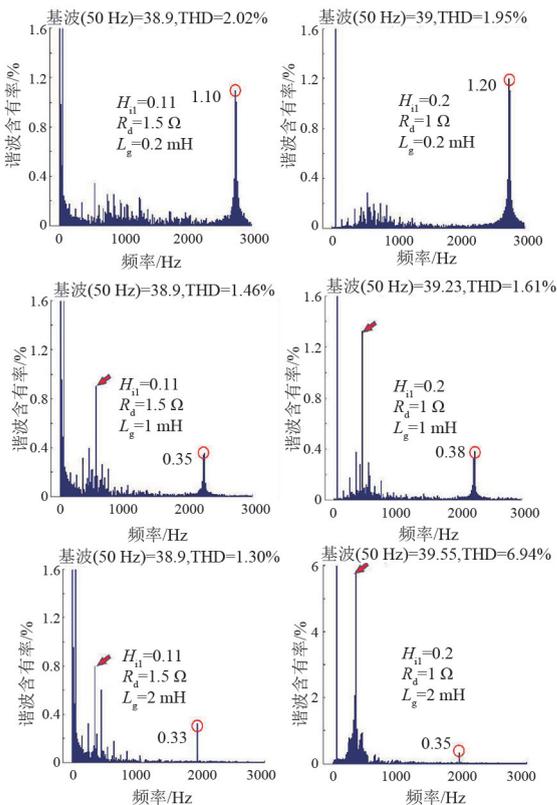


图 10 不同 L_g 混合阻尼效果

注入电网背景谐波(频率 2758 Hz, 3% 基波幅值), 在 0.08 s 时刻阻尼策略从无源阻尼 ($R_d = 1.5 \Omega$) 切换到所提混合阻尼 ($R_d = 1.5 \Omega, H_{il} = 1.1$), 得到的并网电流波形如图 11 所示。该图显示所提混合阻尼对系统谐振抑制效果明显。同时, 在阻尼策略切

换过程中, 逆变器并网稳定性和动态效果较好。

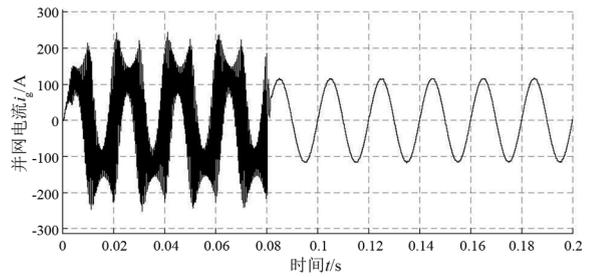


图 11 并网电流波形

5 结论

上面提出了一种基于多逆变器并网谐振抑制的混合阻尼设计方法, 该方法根据无源阻尼系数和有源阻尼系数的特性先后确立有源阻尼参数和无源阻尼参数。相对单台逆变器而言, 该方法可看作混合阻尼参数优化, 避免增加逆变器控制复杂度。无需新增设备也有利于降低新能源发电成本。仿真实验结果表明用所提方法设计混合阻尼参数可以较好地抑制多逆变器系统谐振, 并且对系统阻抗变化也具有较好的适应性。所提方法的特点总结如下:

- 1) 相同阻尼效果条件下, 所提方法降低了无源阻尼电阻的阻值, 减小了电能损耗, 为多逆变器并网无源阻尼电阻参数设计提供了理论依据;
- 2) 相比有源阻尼, 所提方法不仅优化了 THD, 还进一步降低了 HF, 取得了更好的综合抑制效果;
- 3) 所提方法设计的混合阻尼参数可以良好地适应多逆变器并网阻抗动态变化, 为解决系统局部故障、新建或改建系统谐振抑制方面提供了新思路。

参考文献

- [1] 李庆民, 于万水, 赵继尧. 支撑“双碳”目标的风光发电装备安全运行关键技术[J]. 高电压技术, 2021, 47(9): 3047-3060.
- [2] 郑嘉龙, 杨鸽, 刘一均, 等. LCL 滤波器无源阻尼和有源阻尼对多逆变器并网谐振影响对比分析[J]. 四川电力技术, 2020, 43(3): 68-72.
- [3] YANG Qiuxia, LI Kun, ZHAO Cuimei, et al. The Resonance suppression for parallel photovoltaic grid-connected inverters in weak grid[J]. International Journal of Automation and Computing, 2018, 15(6): 716-727.
- [4] HE Jinwei, LI Yunwei, BOSNJAK D, et al. Investigation and active damping of multiple resonances in a parallel-

- inverter-based microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013,28(1): 234-246.
- [5] XIE Chuan, LI Kai, ZOU Jianxiao, et al. Passivity-based design of grid-side current-controlled LCL-type grid-connected inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020,35(9):9813-9823.
- [6] 王磊,张凌博.多逆变器并网等值建模及谐振抑制优化[J].电力系统保护与控制,2021,49(6):19-29.
- [7] SONG Yipeng, WANG Xiongfei, BLAABJERG F. High-frequency resonance damping of DFIG-based wind power system under weak network [J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2017, 32(3): 1927-1940.
- [8] COBRECES S, WANG Xiongfei, PEREZ J, et al. Robust admittance shaping approach to grid current harmonic attenuation and resonance damping[J]. IEEE Transactions on industry applications, 2018, 54(5): 5039-5053.
- [9] ZHOU Leming, WU Wenhua, CHEN Yandong, et al. Harmonic voltage distortion damping method for parallel-connected LCL-type inverters in islanded operation [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(11): 9032-9044.
- [10] AZZOUC M A, EI-SAADANY E F. Multivariable DG impedance modeling and reshaping for impedance stabilization of active distribution networks [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(3): 2166-2179.
- [11] EBRAHIMZADEH E, BLAABJERG F, WANG Xiongfei, et al. Harmonic stability and resonance analysis in large PMSG-based wind power plants[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2018,9(1):12-23.
- [12] GUO Yan, LU Xiaonan, CHEN Laijun, et al. Functional-rotation-based active dampers in AC microgrids with multiple parallel interface inverters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2018,54(5):5206-5215.
- [13] JIA Lei, RUAN Xinbo, ZHAO Zhiheng, et al. An adaptive active damper for improving the stability of grid-connected inverters under weak grid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018,33(11): 9561-9574.
- [14] 雷一,赵争鸣,袁立强,等.LCL滤波的光伏并网逆变器阻尼影响因素分析[J].电力系统自动化,2012,36(21):36-40.
- [15] 杨秋霞,李坤,王虎,等.PDFI控制下单相光伏并网逆变器的混合阻尼控制策略[J].电力系统保护与控制,2016,44(16):22-27.
- [16] 阮新波,王学华,潘冬华,等.LCL型并网逆变器的控制技术[M].北京:科学出版社,2015.
- [17] 郭超,杨洪耕.考虑弱电网下逆变器稳定性的LCL滤波器参数优化方法[J].电网技术,2018,42(3):949-956.
- [18] 陈伟,张岩,屠一鸣,等.LCL型并网逆变器临界无源阻尼参数设计[J].电力建设,2022,43(1):70-77.
- [19] 陶海军,周犹松,张国澎,等.LCL型并网逆变器并联谐振机理分析及抑制方法[J].上海交通大学学报,2020,54(10):1065-1073.

作者简介:

郑嘉龙(1987),男,硕士,高级实验师,研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用。

(收稿日期:2022-04-07)

(上接第34页)

- [2] 黎伟烧.浅谈低压智能复合开关的发展现状[J].电工文摘,2017(2):38-40.
- [3] 杜毅威.新能效标准下变压器的选择[J].建筑电气,2021,40(6):3-11.
- [4] 韩晗.高海拔环境对电气试验设备电场及绝缘影响研究[J].电力设备管理,2021(6):150-152.
- [5] 岑旭.谐波对电力电容器寿命及保护影响的研究[D].北京:华北电力大学,2013.
- [6] 金晨.低压电网无功补偿中的复合开关设计[D].合肥:安徽大学,2020.
- [7] 中国电力企业联合会.并联电容器装置设计规范:GB 50227-2017[S].北京:中国计划出版社,2017.
- [8] 杨洁,王彪,王平平.ESD作用下晶闸管dV/dt触发导通规律研究[J].电波科学学报,2019,34(4):512-517.
- [9] 乐山一拉得电网自动化有限公司.复合开关步进式触发同步保护及其核心单元:201110081669.4[P].2012-11-21.
- [10] 张欢畅,王鑫,王莹玉,等.火力发电厂电气一次设计[M].北京:中国电力出版社,2017.
- [11] 电力行业电力电容器标准化技术委员会.电网无功补偿配置技术导则:DL/T 2114-2020[S].北京:中国计划出版社,2020.
- [12] 中国机械工业联合会.供电系统设计规范:GB 50052-2009[S].北京:中国计划出版社,2009.

作者简介:

胡天祥(1979),男,高级工程师,主要从事配电网无功补偿技术研究及其实际工程应用;

黎军华(1979),男,硕士,工程师,主要从事电力自动化产品的研发。

(收稿日期:2022-04-14)

220 kV 变压器中性点接地方式改造后 相关设备的安全校核分析

孙鹏程,王贞强,梁伟,杨万波

(四川泸州川南发电有限责任公司,四川泸州 646007)

摘要:为限制方山电厂近区发生非对称故障时 500 kV 泸州变电站 220 kV 系统短路电流,需对电厂主变压器中性点接地方式进行改造,将电厂 2 台主变压器中性点分别通过接地小电抗器和 1 套隔直装置接地。文中通过仿真模拟电厂近区不同接地故障,电厂 2 台主变压器采用不同接地方式,分别得出主变压器中性点、接地小电抗器、隔直装置等设备的暂态电压和短路电流,验证电厂 2 台主变压器接地中性点分别通过接地小电抗器和 1 套隔直装置接地时,相关设备不会出现电压、电流超限而威胁设备的安全。同时,对线路、发电机、主变压器相关保护的影响进行了分析,对是否引发谐振进行了评估。

关键词:主变压器;中性点;隔直装置;限流电抗器;校核;保护;谐振

中图分类号:TM 471 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2022)05-0042-06

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220508

Safety Checking and Analysis of Relevant Equipment after Transformation of Neutral Point Grounding Mode of 220 kV Transformer

SUN Pengcheng, WANG Zhenqiang, LIANG Wei, YANG Wanbo

(Sichuan Luzhou Chuannan Power Generation Co., Ltd., Luzhou 646007, Sichuan, China)

Abstract:In order to limit the short-circuit current of 220 kV system of 500 kV Luzhou substation when an asymmetric fault occurs in the near area of Fangshan power plant, the neutral point grounding mode of main transformer in the power plant needs to be modified. The neutral points of two main transformers in the power plant are grounded through small grounding reactors and a set of neutral DC current blocking device respectively. Through the simulation calculation and analysis, the different grounding faults in the near area of the power plant are simulated, and the transient voltage and short-circuit current of the neutral point of main transformer, small grounding reactor, neutral DC current blocking device and other equipment are obtained under different grounding modes of the two main transformers. It is verified that when the neutral points of the two main transformers are grounded through a small grounding reactor and a set of neutral DC current blocking device, the relevant equipment does not have excessive voltage and current that threaten the equipment security. Meanwhile, the impact on the related protections of line, generator and main transformer is also analyzed, and whether the resonance is triggered or not is evaluated.

Key words: main transformer; neutral point; neutral DC current blocking device; current-limiting reactor; checking; protection; resonance

0 引言

随着四川电网网架的变化,川内部分变电站出现单相短路电流高于三相短路电流的现象,已成为限制电网运行和发展的主导因素之一。经研究表

明,变压器中性点采用小电抗器接地的方式来限制短路电流是非常有效和必要的^[1-2]。

方山电厂 2×600 MW 机组于 2007—2008 年投运,布置有 2 台主变压器和 1 台启动备用变压器。由于曾发生过电厂出线单相接地短路故障导致主变压器损坏,为有效地限制电厂近区接地短路故障流

经主变压器的短路电流,方山电厂于 2014 年在 2 台主变压器中性点分别增加了限流小电抗器。同时由于电厂处于特高压直流输电线路接地极附近,在复龙、宾金直流输电线路不对称方式运行时,给方山电厂主变压器带来了直流偏磁问题。方山电厂通过多方调研和论证,于 2014 年在 2 台主变压器中性点增加了隔直装置。隔直装置采用一拖二的方式,通过隔离开关选择其中 1 台主变压器中性点经小电抗器和隔直装置接地。启动备用变压器中性点仍直接接地。

当前,随着电网网架的不断加强,方山电厂近区发生非对称故障时,不接地主变压器中性点放电击穿间隙将存在被击穿风险,同时 500 kV 泸州变电站 220 kV 系统单相短路电流将超过断路器遮断容量。为消除方山电厂中性点不接地主变压器中性点放电击穿间隙被击穿的风险,以及降低 500 kV 泸州变电站 220 kV 系统单相接地短路电流,需将电厂 2 台主变压器中性点接地方式进行改造。即由 1 台主变压器中性点经小电抗器和隔直装置接地,另 1 台主变压器中性点经间隙接地,调整成 2 台主变压器均经过小电抗器和隔直装置接地。

主变压器中性点接地方式改变后,电网零序阻抗特性发生变化,不对称故障时可能导致暂态电压过高引发设备损坏。为保证安全,需对相关设备进行仿真计算和安全校核。

下面通过仿真计算分析,模拟方山电厂近区不同接地故障,分别得出方山电厂 2 台主变压器采用不同接地方式下,主变压器中性点、接地小电抗器、隔直装置处的暂态电压和短路电流,以及通过对继电保护的影响分析、谐振风险评估,为主变压器中性点接地方式的改造提供依据。

1 相关设备主要参数

相关设备主要参数见表 1—表 3。主变压器中性点加装隔直装置后接线如图 1 所示。

表 1 主变压器及启动备用变压器参数

设备	容量/ MVA	短路 阻抗/ %	连接 组别	中性点 工频绝缘 水平 AC/kV	中性点雷电 冲击绝缘 水平 LI/kV
主变压器	720	14.0	YNd11	200	400
启动备用 变压器	63	12.3	YNyn0- yn0+d	200	400

表 2 主变压器中性点小电抗器参数

参数	数值	参数	数值
额定容量/kVA	723	额定电抗/ Ω	11.67
额定电流/A	250	额定频率/Hz	50
绝缘水平/kV	325	短时电流/s	10(有效值为 8 kA)

表 3 主变压器隔直装置参数

产品型号:TFMFO-1K20-1108-1050				
电容	额定电压: 1200 V AC	实测总容量: 66 715 μ F (6 台并联)	耐压:极间电压 $U_{11} = 1800$ V DC, 10 s; 极壳电压 $U_{tc} = 6000$ V AC, 60 s	
			旁路 断路器	额定电压: 12 kV 额定电流: 630 A
限流 电抗器	额定电压: 10 kV	实测电感: 0.015 6 mH	绝缘水平: LI/AC 75/35 kV	热稳定 电流: 22 kA(1 s)

注:电容两端电压达到 300 V 或流经中性点电流 300 A 时,晶闸管自动导通,旁路断路器合闸。

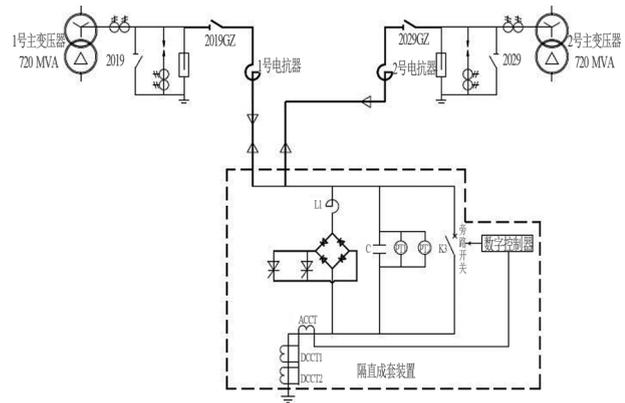


图 1 主变压器中性点加装小电抗器和隔直装置简化接线

2 不同接地方案下的电磁暂态分析

2.1 短路电流计算

2.1.1 方山电厂近区网架参数

方山电厂 2×600 MW 机组为单元机组接线方式,经 3 回 220 kV 线路接入 500 kV 泸州变电站,线路长约 5.8 km(方山电厂近区电网拓扑见图 2)。500 kV 泸州变电站主变压器采用自耦变压器。随着系统的扩大,接线间隔的不断接入,以及 500 kV 泸州东变电站的投运,500 kV 泸州变电站将面临 220 kV 系统单相接地短路电流高于三相短路电流,且超过断路器遮断容量的现象。

2.1.2 计算条件

本次仿真计算基于 2022 年四川电网夏季最大运行方式网架,全网全接线、全开机,退出四川 500 kV

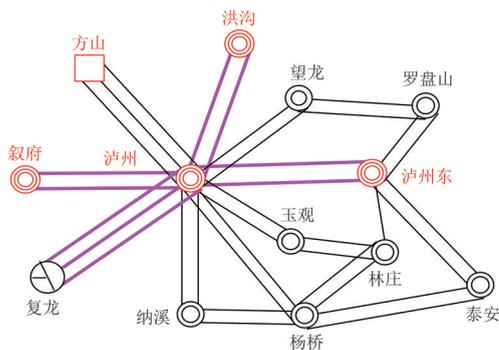


图2 2022年方山近区电网拓扑图

和 220 kV 变电站低电容低电抗,不退出超/特高压直流换流站高压滤波器,保留线路高压电抗器,退出母线高压电抗器,利用 PSASP7.60 基本计算方法计算短路电流^[3-4]。

2.1.3 计算结果

在方案 1(未加装小电抗器,2 台主变压器直接接地)、方案 2(1 号主变压器加装小电抗器和隔直装置,2 号主变压器直接接地)、方案 3(1 号主变压器加装小电抗器和隔直装置,2 号主变压器间隙接地)、方案 4(2 台主变压器均经小电抗器和隔直装置接地)的情况下,方山电厂主变压器高压侧、500 kV 泸州变电站主变压器中压侧三相短路电流及单相接地短路电流如表 4、表 5 所示。

表 4 方山电厂近区三相短路计算结果 单位:kA

短路点	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
方山电厂主变压器高压侧	45.1	45.1	45.1	45.1
500 kV 泸州变电站主变压器中压侧	49.1	49.1	49.1	49.1

表 5 方山电厂近区单相接地短路计算结果 单位:kA

短路点	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
方山电厂主变压器高压侧	48.7	45.4	38.6	40.5
500 kV 泸州变电站主变压器中压侧	52.2	50.0	45.1	46.5

表 4 表明主变压器中性点接地方式对三相短路电流无影响。

表 5 表明方案 4(2 台主变压器均经小电抗器和隔直装置接地)情况下,500 kV 泸州变电站主变压器中压侧发生单相接地短路故障,短路电流水平为 46.5 kA,满足断路器遮断能力要求(断路器遮断能力 50 kA)。

2.2 电厂近区线路非对称故障时主变压器电磁暂态分析

根据仿真计算,得知方山电厂主变压器中性点

最大电流 9.78 kA,隔直电容最高电压 6.43 kV 分别出现在方案 3、方案 4 情况下方山电厂 220 kV 母线单相接地时(中性点电流见图 3、图 4;隔直电容电压见图 5);主变压器中性点最高电压 135.06 kV 出现在方案 3 情况下 500 kV 泸州变电站 220 kV 母线两相接地短路故障时(见图 6、图 7)。考虑篇幅,电磁暂态分析只列举不同方案下方山—泸州 220 kV 线路两端发生不对称故障的计算数据。其中,暂态过电压的计算考虑故障时刻和相位影响,取过电压最大的方式为结果。

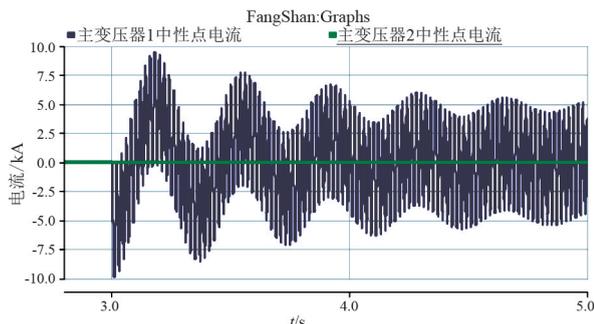


图3 方案 3 下方山电厂母线单相接地 1 号、2 号主变压器中性点电流

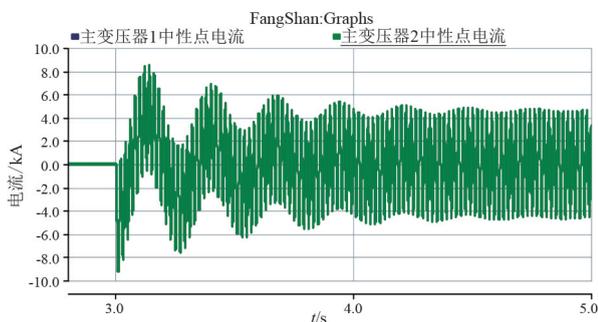


图4 方案 4 下方山电厂母线单相接地 1 号、2 号主变压器中性点电流

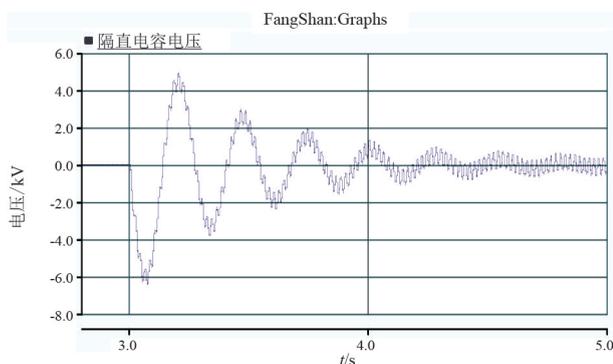


图5 方案 4 下方山电厂母线单相接地隔直电容电压

2.2.1 单相接地短路故障

1) 方山电厂 220 kV 母线单相接地短路故障

设定 $t=3.0$ s 时,方山电厂 220 kV 母线出现 A 相接地短路故障,不同方案下,分别得到方山电厂 1 号、

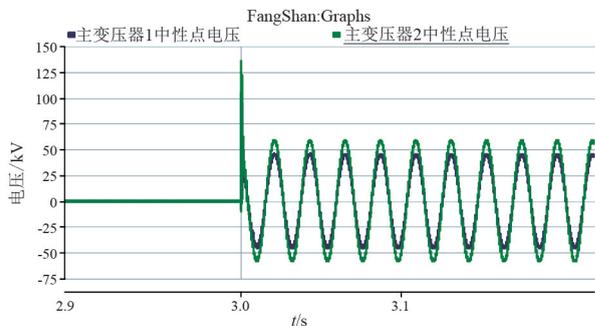


图6 方案3下泸州变电站220 kV 母线两相接地1号、2号主变压器中性点电压

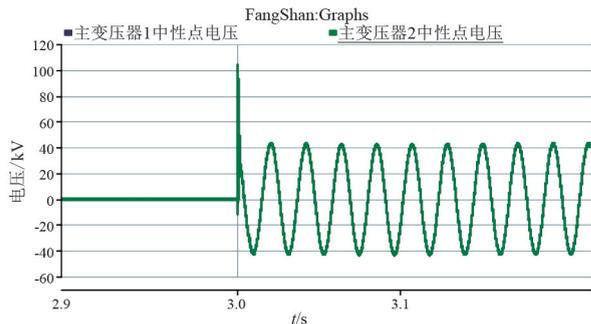


图7 方案4下泸州变电站220 kV 母线两相接地1号、2号主变压器中性点电压

2号主变压器中性点电压、电流及隔直电容电压幅值如表6所示。

表6 方山电厂220 kV 母线单相接地短路故障中性点最大电压和最大电流

方案	主变压器中性点电压/kV		主变压器中性点电流/kA		隔直电容电压/kV
	1号	2号	1号	2号	
1	0	0	28.11	28.11	—
2	50.23	0	7.58	33.03	3.08
3	57.32	76.74	9.78	0	4.85
4	55.07	55.07	9.14	9.14	6.43

2)500 kV 泸州变电站220 kV 母线单相接地短路故障

设定 $t=3.0$ s 时,500 kV 泸州变电站220 kV 母线出现 A 相接地短路故障,不同方案下,分别得到方山电厂1号、2号主变压器中性点电压、电流及隔直电容电压幅值如表7所示。

2.2.2 两相接地短路故障

1)方山电厂220 kV 母线两相接地故障

设定 $t=3.0$ s 时,方山电厂220 kV 母线出现 A 相和 B 相接地短路故障,不同方案下,分别得到方山电厂1号、2号主变压器中性点电压、电流及隔直电容电压幅值如表8所示。

2)500 kV 泸州变电站220 kV 母线两相接地短

表7 500 kV 泸州变电站220 kV 母线单相接地短路故障中性点最大电压和电流

方案	主变压器中性点电压/kV		主变压器中性点电流/kA		隔直电容电压/kV
	1号	2号	1号	2号	
1	0	0	19.29	19.29	—
2	37.69	0	5.39	23.51	1.74
3	48.20	62.44	7.53	0	2.95
4	44.20	44.20	6.88	6.88	4.03

路故障

设定 $t=3.0$ s 时,500 kV 泸州变电站220 kV 母线出现 A 相和 B 相接地短路故障,方案1、方案2、方案3、方案4情况下,分别得到方山电厂1号、2号主变压器中性点电压、电流及隔直电容电压幅值如表9所示。

表8 方山电厂220 kV 母线两相接地短路故障中性点最大电压和电流

方案	主变压器中性点电压/kV		主变压器中性点电流/kA		隔直电容电压/kV
	1号	2号	1号	2号	
1	0	0	22.75	22.75	—
2	59.44	0	5.65	24.67	1.54
3	61.83	80.03	6.34	0	1.92
4	61.27	61.27	6.19	6.19	2.74

表9 500 kV 泸州变电站220 kV 母线两相接地短路故障中性点最大电压和电流

方案	主变压器中性点电压/kV		主变压器中性点电流/kA		隔直电容电压/kV
	1号	2号	1号	2号	
1	0	0	16.27	16.27	—
2	101.21	0	4.34	18.93	0.89
3	104.36	135.06	5.49	0	1.40
4	103.64	103.64	5.19	5.19	1.97

方案4下,从表6可知故障时隔直装置电容出现的电压峰值为6.43 kV,该电压远超过了晶闸管导通电压,此时晶闸管会瞬间导通且电容旁路断路器会闭合;由表9可知主变压器中性点电压峰值为103.64 kV,由表6可知电流峰值为9.14 kA,均低于表1给出的主变压器中性点工频绝缘水平200 kV,表2给出的小电抗器可承受的短时电流8 kA(有效值,10 s)以及表3给出的隔直装置热稳定电流22 kA(1 s)。

由此可得出方案4下,隔直电容出现的暂态电压虽超过了电容额定电压,但该电压下晶闸管会瞬

间导通,旁路断路器会闭合,隔直装置被旁路后可保障电容设备安全;主变压器中性点出现的暂态电压、电流峰值,小电抗器、隔直装置出现电流峰值均在设备的额定参数范围内,满足设备的安全要求。

3 对继电保护的影响分析

由于主变压器中性点加装小电抗器和隔直电容主要影响系统的零序网络,针对方山电厂主变压器高压侧和 500 kV 泸州变电站主变压器中压侧单相短路电流和两相接地短路电流进行分析。

目前方山电厂采用的方案 3,1 号主变压器经小电抗器(11.67 Ω)和隔直装置(66 000 μF)接地,2 号主变压器不接地。若改为方案 4,2 台主变压器加电抗器(均为 11.67 Ω)和 1 套隔直装置(66 000 μF)接地,根据表 10 单相接地短路计算结果和表 11 两相短路接地计算结果显示,在方山电厂和 500 kV 泸州变电站 220 kV 母线发生不对称故障时,单相接地短路电流峰值会增加 0.6 kA,两相接地短路电流峰值会增加 0.9 kA。

表 10 单相接地短路计算结果

短路点	序分量	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
方山电厂 主变压器高压侧	正序	14.3	13.2	11.1	11.7
	零序	14.3	13.2	11.1	11.7
500 kV 泸州变电站 主变压器中压侧	正序	15.5	14.7	13.1	13.6
	零序	15.5	14.7	13.1	13.6

表 11 两相接地短路计算结果

短路点	序分量	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
方山电厂 主变压器高压侧	正序	28.6	27.4	25.6	26.4
	零序	15.4	13.1	9.5	10.4
500 kV 泸州变电站 主变压器中压侧	正序	31.3	30.6	29.1	29.5
	零序	16.2	14.4	11.9	12.6

3.1 对线路保护的影响分析

3.1.1 线路相间距离

由于主变压器中性点接地方式不影响三相短路和两相短路的序网图,因此主变压器中性点接地方式不会影响线路保护的相间距离保护。

3.1.2 线路接地距离保护

表 10—表 11 表明,方案 4 相对于方案 3 来说,不同故障点以方山电厂 220 kV 母线发生单相接地短路故障时短路电流变化最大。以 500 kV 泸州变电站侧保护来说,方案 3 下接地距离保护测

量阻抗为 3.108 7 Ω ,较方案 4 的接地距离保护阻抗 3.107 2 Ω ,减少了 0.048%,可视作增大了保护灵敏度;对方山电厂侧来说,方案 3 下接地距离保护测量阻抗为 3.023 6 Ω ,较方案 4 的接地距离保护测量阻抗 3.039 3 Ω ,增大了 0.52%。

3.1.3 线路零序电流保护

方山电厂主变压器中性点接地方式的改变会导致零序等值网络的改变,接地故障时的零序阻抗和零序电流也必然改变。从仿真计算结果得知,方山电厂 220 kV 母线发生两相短路接地故障时方案 4 相对于方案 3 的短路点零序电流变化最大,方案 3 短路点零序电流为 9.53 kA,方案 4 短路点零序电流为 10.45 kA,增加了 9.65%。则需对线路零序保护进行整定校核。

3.2 对主变压器保护的影响分析

3.2.1 主变压器主保护

中性点接地方式的变化不会影响差动保护中的差动电流和制动电流的数值关系,因此不会对差动保护产生影响。

3.2.2 主变压器零序过电流保护

主变压器零序过电流保护直接以主变压器中性点电流为判据,所以改变中性点接地方式会对零序过电流保护有直接的影响。从仿真计算结果得知:方山电厂主变压器中性点接地方式从方案 3 改为方案 4 后,500 kV 泸州变电站 500 kV 单相接地短路故障时,主变压器中性点电流从 7.55 kA 降低至 6.81 kA,变化 9.8%;变压器高压侧绕组零序电流从 1.39 kA 升至 1.47 kA,变化 5.8%。泸州变电站 220 kV 单相接地短路,主变压器中性点电流从 7.53 kA 降低至 6.88 kA,变化 8.6%;主变压器中压侧绕组零序电流从 0.84 kA 变化为 0.79 kA,变化 5.8%。因此主变压器各绕组零序电流变化较大,需对主变压器高压侧零序保护进行整定校核。

通过对方山电厂主变压器高压侧零序过流保护定值进行了灵敏度校核,当前定值下 I 段灵敏度大于 2,满足规程 DL/T 684—2012《大型发电机变压器继电保护整定计算导则》的要求^[5]。

3.3 对发电机保护的影响分析

由于主变压器中性点接地点位于其高压侧,发电机侧(变压器低压侧)绕组为 Δ 接线,无零序通路,故发电机的零序等值网络没有变化。另外,主变压器中性点的变化不会影响发电机侧的正序和负序

网络。故主变压器中性点接地方式的改变不会对发电机保护产生影响。

4 谐振风险评估

加装 2 台小电抗器和隔直装置后,可能产生串联谐振问题,现对该问题进行分析。

4.1 仅 1 台小电抗器投入运行

小电抗器工频电抗 X_L 为 11.67Ω ,隔直电容 C 为 $66\ 000 \mu\text{F}$,可以计算得到电容器和电抗器的谐振频率为

$$f_1 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \approx 3.21 \text{ Hz}$$

4.2 2 台小电抗器均投入运行

2 台小电抗器工频电抗 X_L 均为 11.67Ω ,并联后等效为 5.835Ω ,隔直电容 C 为 $66\ 000 \mu\text{F}$,可以计算得到电容器和电抗器的谐振频率为

$$f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \approx 4.55 \text{ Hz}$$

无论是仅使用 1 台小电抗器还是 2 台小电抗器均使用,其谐振频率远远小于基波频率,因此不会发生串联谐振。

5 结论

1)方山电厂 2 台主变压器中性点均经小电抗器和隔直装置接地,可有效降低 500 kV 泸州变电站 220 kV 母线单相接地短路电流水平,在当前电网网

(上接第 30 页)

- [2] 杨洋,鄢秀庆,刘翔云,等.山区输电线路全过程机械化施工设计方案研究[J].四川电力技术,2017,40(5):78-83.
- [3] 邵俊杰,李旺年.单泵双工作机构钻机液压系统设计及改进[J].煤矿机械,2020,41(9):123-125.
- [4] 张始斋.ZYWL 系列履带式自动钻机模块化设计[J].煤矿机械,2020,41(6):11-13.
- [5] 吴晋军.掘进机机载钻机液压控制系统的设计[J].煤炭技术,2021,40(10):164-165.
- [6] 刘铸,栗林波,杜建荣,等.矿用水平定向钻机智能化电控系统设计[J].工矿自动化,2021,47(6):91-95.
- [7] 黄志强,喻洪梅,马亚超,等.山地物探电动钻机模块化设计及安全性分析[J].工程设计学报,2022,29(2):153-160.

架结构下满足断路器遮断能力要求,可消除非对称故障下方山电厂非直接接地主变压器中性点放电间隙被击穿的风险。

2)方山电厂近区 220 kV 系统不同接地故障情况下,方山电厂主变压器中性点、接地电抗器、隔直装置的安全校核满足要求。

3)方山电厂主变压器中性点接地方式的变化,谐振频率远小于基波频率,不会导致串联谐振的发生。

4)对方山电厂 220 kV 线路接地距离保护、零序电流保护存在一定的影响,需单独校核。对线路相间距离保护、主变压器差动保护以及发电机保护不会产生影响。通过对方山电厂主变压器高压侧零序过流保护 I 段定值进行了校核,灵敏度满足规程要求。

参考文献

- [1] 王开科,魏伟,孙帆,等.电力系统短路电流限制技术与运用设备篇[M].北京:中国电力出版社,2021.
- [2] 阿布德哈伊·撒拉姆,欧姆·马利克.电力系统稳定性:建模、分析与控制[M].北京:机械工业出版社,2018.
- [3] 电力行业继电保护标准化技术委员会.大型发电机变压器继电保护整定计算导则:DL/T 684—2012[S].北京:中国电力出版社,2012.
- [4] 李鑫,曾琢琳,石鹏,等.基于图计算的电力系统故障建模方法[J].四川电力技术,2021,44(5):36-44.
- [5] 刘起钟,魏巍,孙鹏程,等.220 kV 变压器中性点经隔直装置和限流电抗器接地应用[J].四川电力技术,2015,38(5):67-70.

作者简介:

孙鹏程(1985),男,工程师,从事发电厂电气技术管理工作。(收稿日期:2022-04-24)

- [8] 闫保永.山地模块化地面钻机关键技术研究[J].石油机械,2020,48(7):37-41.
- [9] 米树刚,李立明,梁有诚,等. CMD 系列模块化钻机的研制及地热施工中的应用[C]//第二十一届全国探矿工程(岩土钻掘工程)学术交流年会论文集,2021:345-350.

作者简介:

董杰(1996),男,硕士研究生,研究方向为机械设计与计算机仿真;

范荣全(1966),男,硕士,教授级高级工程师,研究方向为智能电网与电网新基建;

贺前(1982),男,硕士,工程师,从事输电线路运行工作。

(收稿日期:2022-05-20)

基于 YOLOv5 的电力巡检图像缺陷识别研究

庞博¹, 鲍志远², 杨明坤³, 张凌浩¹, 孙小毛⁴, 胡强⁴

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041; 2. 清华大学, 北京 100084;
3. 国网四川省电力公司乐山供电公司, 四川 乐山 614099; 4. 清华四川能源互联网
研究院氢能系统与转化研究所, 四川 成都 610299)

摘要:针对输电线路巡检中可能出现的裂化、老化、腐蚀、破损等诸多缺陷的情况, 为保证输电线路运行的安全性和稳定, 文中开展了基于 YOLOv5 的电力巡检图像缺陷识别研究。在 YOLOv5 算法的基础上, 结合电力巡检图像特点, 采用 CIOU_Loss 作为 Bounding box 的损失函数, 使其具有更快、更好的收敛效果; 选用 DIOU_NMS 用于 NMS 处理, 提高对遮挡重叠目标的识别精度; 同时, 在对数据集进行分类处理后, 采用“分别训练、统一推断”的方法, 冻结部分网络层权重来训练网络模型。实验结果显示, 基于 YOLOv5 算法模型可以有效地识别电力巡检图像缺陷情况。

关键词:输电线路; 缺陷识别; 目标检测; YOLOv5

中图分类号: TM 726 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2022)05-0048-06

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20220509

Research on Defect Recognition of Power Patrol Images Based on YOLOv5

PANG Bo¹, BAO Zhiyuan², YANG Mingkun³, ZHANG Linghao¹, SUN Xiaomao⁴, HU Qiang⁴

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;
2. Tsinghua University, Beijing 100000, China; 3. State Grid Leshan Electric Power Supply
Company, Leshan 614000, Sichuan, China; 4. Sichuan Energy Internet Research
Institute, Tsinghua University, Chengdu 610213, Sichuan, China)

Abstract: In order to ensure the safety and stability of transmission line operation, image defect recognition research based on YOLOv5 is carried out in view of many defects such as cracking, aging, corrosion and breakage that may occur in line inspection. Based on YOLOv5 algorithm and combined with the characteristics of power patrol images, CIOU_Loss is used as the loss function of Bounding box to make it converge faster and better. DIOU_NMS is selected for NMS processing to improve the recognition accuracy of occluded overlapping targets. At the same time, after classifying the dataset, the network model is trained by freezing some of the network layer weights using the method of "training separately and inferring uniformly". The experimental results show that the YOLOv5 algorithm model can effectively identify the defects of power patrol images.

Key words: transmission lines; defect identification; object detection; YOLOv5

0 引言

随着人工智能技术的飞速发展,越来越多的行业引入人工智能技术,电力行业也不例外^[1]。国家

基金项目:四川省科技计划项目(2021YFG0113);国网四川省电力公司科技项目(52199722000Y)

电网积极响应国务院印发的《新一代人工智能发展规划》的号召,紧跟科技发展的步伐,逐步扩大人工智能在电网中的应用范围。

输电系统中有大量电力设备长期在户外运行,受外界自然环境影响较大,易出现裂化、老化、腐蚀、破损等诸多缺陷,传统的电力巡检采用直升机或无人机航拍的方式,将采集的电力图像数据传回处理

中心由相关工作人员进行人工识别处理。这些缺陷大部分为表面缺陷,通过采集可见光图像和对图像的处理和识别,能够有效地发现电力设备的表面缺陷。

传统的巡检图片处理方法是基于图像学的方法,可在一定程度上减轻人工压力,但是由于传统的图像学方法速度较慢、精度较低,在故障巡检领域难以实际应用。与传统方法不同,基于深度学习的目标检测方法利用卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)来感知感受视野范围内的图像。随着网络深度增加,不断扩大的感受视野范围在大型图像的识别上有出色表现。

基于深度学习的目标检测模型主要分为一阶段和两阶段模型,两阶段包括:1)选择检测框;2)对选框中的内容进行分类。而一阶段模型中,直接将检测框选择和内容分类都当作回归问题一起完成。

区域卷积神经网络(regions with CNN features, R-CNN)^[2]是最早的深度学习目标检测模型,其中选框阶段使用传统图形学方法,即 Selective Search^[3],特征提取使用 CNN 网络,分类使用支持向量机(support vector machine, SVM)分类。随着深度学习目标检测领域不断的创新, Fast R-CNN^[4]、Faster R-CNN^[5]等二阶段网络的出现,显著改善了目标检测效果;一阶段模型包括 SSD^[6]、YOLO^[7]等也纷纷出现,极大提升了检测速度;用于目标检测的神经网络特征金字塔(feature pyramid network, FPN^[8])结构等开始应用于最新网络。基于深度学习的目标检测在检测精度和检测速度上已经远超传统图形学方法。

在实际应用方面,国家电网公司于2018年开展了多旋翼无人机和直升机电力巡检航拍图像人工智能处理技术验证。对电网常见的8~9种缺陷进行识别,取得了30%~89%的识别准确率,但在航拍图像现场验证工作中,因为图像数据未经遴选,且大部分是正样本,导致识别准确率只有10%~30%。目前,实现电力缺陷目标检测与分割方法,都存在着以下问题:

1)单一的模型只能识别有限几种典型的缺陷,对于电网接近500种不同类型的缺陷来说还远远不够。目前公开的电力数据集规模都比较小,单个数据集包含的缺陷类型十分有限,从而导致检测种类较少。

2)模型的泛化能力差,难应用于工程实际。电力系统构建在野外地区,图像背景十分复杂是其泛化能力差的主要原因之一。

下面使用输电线路巡检的图像数据,以YOLOv5模型为主体,研究“分别训练、统一推断”方法的效果,进一步提高模型的识别精度。

1 YOLO 算法

YOLO 与 SSD 是两种最为典型的单阶段目标检测算法。YOLO^[7]是第一种公开发表的单阶段目标检测算法,相比当时主流的 R-CNN 等模型。虽然在准确度上有一定的差距,但极大地提升了目标检测的效率,推动了工业界对基于深度学习的目标检测算法的应用。与 YOLO 同时时间提出的单阶段目标检测模型 SSD^[6],则是利用卷积而不是全连接层来提取检测结果。接下来,研究者在 YOLO 网络的基础上做了更多的改进,提出了 YOLOv2、YOLOv3、YOLOv4、YOLOv5^[9-11]。这些模型的主要改进点分别为:YOLOv2 尝试了当时多种流行的技巧,如批标准化技术和锚框机制;YOLOv3 将特征提取网络替换为 darknet-53,并使用不同大小的锚框;YOLOv4 将激活函数替换为 Mish 激活函数;YOLOv5 在之前版本的基础上,利用新的 LOSS 函数和瓶颈结构进一步提升了算法的识别精度。目前,YOLOv5 作为一个应用较为广泛的算法模型,实现了识别精度和识别速度的平衡,相较于其他网络更为适合电网巡检场景下的缺陷图像目标检测。

2 数据清洗与整理

如图1输电分类别数量统计柱状、目标区域大小统计所示,通过观察原数据,发现原始的输电数据中类别数量、尺寸差距十分悬殊。

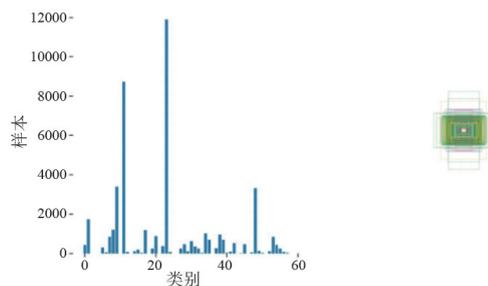


图1 输电分类别数量统计柱状、目标区域大小统计

如果直接用一个模型进行训练,可能会因为检测目标尺度差异、样本数量差异,使得检测结果不佳。如图2标注图所示,标注存在部分标注的情况,

也即是图像总是分类别标注的,标注总是“部分”的,这也给直接训练带来难度。



图 2 标注

解决方法是,将训练图片分成多个类别用多个模型分别进行训练,统一进行推断。对包含的输电线路数据进行整理和统计,可以得到如表 1 的输电线路数据,其中有颜色代表最终使用的类别,白色是因为数量、标注质量等问题而剔除的类别。

表 1 训练数据集统计信息

类别	数量	名字	状态	备注
dachicun-05	1	大尺寸_05	缺陷	防震锤滑移、偏移、位移
dachicun_fzc_hy	855	大尺寸_防震锤_滑移	缺陷	
dachicun_fzc_sh	910	大尺寸_防震锤_损坏	缺陷	
dachicun_fzc_xs	12114	大尺寸_防震锤_锈蚀	缺陷	
dachicun_fzc_yc	6	大尺寸_防震锤_异常	缺陷	
dachicun_fzc_zc	3409	大尺寸_防震锤_正常	正常	
dachicun_jgb	257	大尺寸_间隔棒	部件	
dachicun_jyh_qx	74	大尺寸_均压环_倾斜	缺陷	
dachicun_jyh_sh	56	大尺寸_均压环_损坏	缺陷	
dachicun_jyh_zc	1033	大尺寸_均压环_正常	正常	
dachicun_sjb	1	大尺寸_三角板	部件	
dachicun_sjb_xs	185	大尺寸_三角板_锈损	缺陷	
dachicun_xc_xs	115	大尺寸_悬锤_锈蚀	缺陷	
dachicun_xc_zc	44	大尺寸_悬锤_正常	正常	
dachicun_xj_qx	307	大尺寸_线夹_倾斜	缺陷	
dachicun_xj_xs	860	大尺寸_线夹_锈蚀	缺陷	

(续)

类别	数量	名字	状态	备注
dachicun_xj_zc	3457	大尺寸_线夹_正常	正常	
ddx	250	导地线	缺陷	断股、散股、松股等
dxqy	395	导线区域	部件	子导线、光缆线、引流线、引下线、接地线、预绞丝等
fushusheshi_01	480	附属设施_01	缺陷	标志牌图文不清、破损等
fushusheshi_03	989	附属设施_03	缺陷	防雷、防鸟设施松动损坏等
fushusheshi_05	1	附属设施_05	缺陷	防汛、防外破设施缺陷等
fushusheshi_zc	467	附属设施_正常	正常	
ganta	254	杆塔	缺陷	鸟窝
ganta_02	711	杆塔_02	缺陷	塔身异物
jichu_01	701	基础_01	缺陷	杂物堆积
jichu_02	1	基础_02	缺陷	破损
jichu_03	128	基础_03	缺陷	沉降、取土等
jichu_05	47	基础_05	缺陷	冲刷、坍塌、滑坡等
jichu_06	32	基础_06	缺陷	其他基础类缺陷,如浸泡等
jjedi_04	26	接地_04	缺陷	引下线缺陷
jueyuanzi	1	绝缘子	正常	
jueyuanzi_01	270	绝缘子_01	缺陷	破损、缺失、自爆
jueyuanzi_02	526	绝缘子_02	缺陷	污秽、灼伤
jueyuanzi_06	2	绝缘子_06	缺陷	其他绝缘子类缺陷
junyahuan	628	均压环	正常	
junyahuan_abnormal	362	均压环_不正常	缺陷	
jyz_ps	5	绝缘子_破损	缺陷	
jyz_tc	2	绝缘子_脱出	缺陷	
jyz_wh	437	绝缘子_污秽	缺陷	
jyzzb	1238	绝缘子自爆	缺陷	
lianjiechu	1207	连接处	部件	
tongdao_01	257	通道_01	缺陷	线路交跨距离不足
tongdao_02	99	通道_02	缺陷	施工机械等外破隐患
tongdao_03	107	通道_03	缺陷	线下构筑物

(续)

类别	数量	名字	状态	备注
tongdao_04	69	通道_04	缺陷	线下树竹
tongdao_05	2	通道_05	缺陷	烟雾、山火等
tongdao_06	70	通道_06	缺陷	其他通道类缺陷
xiaojinlv	8888	小金具	正常	
xiaojinlv_other	3	小金具_其他	缺陷	
xiaojinlv_other1	1	小金具_其他 1	缺陷	
xiaojinlv_qdp	45	小金具_缺垫片	缺陷	
xiaojinlv_qxd	437	小金具_缺销钉	缺陷	
xiaojinlv_xdaz	124	小金具_销钉安装	缺陷	小金具销钉安装不规范
xiaojinlv_xdte	51	小金具_销钉脱出	缺陷	
xiaojinlv_xdxs	47	小金具_销钉锈蚀	缺陷	
xiaojinlv_zc	1777	小金具_正常	正常	
yiwu	3	异物	缺陷	

通过剔除数量较低、标注质量较差的类别,融合数量较少、难以区分的多个类别,得到以下大类:

1) 大尺寸: 包含防震锤、悬锤、线夹, 3 类正常 6 类缺陷, 共 9 类。

2) 均压环: 正常与异常共 2 类。

3) 绝缘子: 自爆和污秽共 2 类。

4) 鸟窝: 存在鸟窝共 1 类。

5) 小金具: 正常与异常共 2 类。

具体的类别统计信息如表 2—表 6 所示。

表 2 整理后新类别——大尺寸

原类别名称	数量	名字	缺陷/正常	新类别名称
dachicun_fzc_hy	855	大尺寸_防震锤_滑移	缺陷	dachicun_fzc_hy
dachicun_fzc_sh	910	大尺寸_防震锤_损坏	缺陷	dachicun_fzc_sh
dachicun_fzc_xs	12114	大尺寸_防震锤_锈蚀	缺陷	dachicun_fzc_xs
dachicun_fzc_zc	3409	大尺寸_防震锤_正常	正常	dachicun_fzc_zc
dachicun_xc_xs	115	大尺寸_悬锤_锈蚀	缺陷	dachicun_xc_xs
dachicun_xc_zc	44	大尺寸_悬锤_正常	正常	dachicun_xc_zc
dachicun_xj_qx	307	大尺寸_线夹_倾斜	缺陷	dachicun_xj_qx
dachicun_xj_xs	860	大尺寸_线夹_锈蚀	缺陷	dachicun_xj_xs
dachicun_xj_zc	3457	大尺寸_线夹_正常	正常	dachicun_xj_zc

表 3 整理后新类别——均压环

原类别名称	数量	名字	缺陷/正常	新类别名称
dachicun_jyh_qx	74	大尺寸_均压环_倾斜	缺陷	junyahuan_abnormal
dachicun_jyh_sh	56	大尺寸_均压环_损坏	缺陷	
junyahuan_abnormal	362	均压环_不正常	缺陷	
dachicun_jyh_zc	1033	大尺寸_均压环_正常	缺陷	
junyahuan	628	均压环	正常	junyahuan_normal

表 4 整理后新类别——绝缘子

原类别名称	数量	名字	缺陷/正常	新类别名称
jueyuanzi_01	270	绝缘子_01	缺陷	jueyuanzi_damaged
jyzzb	1238	绝缘子自爆	缺陷	
jyz_ps	5	绝缘子_破损	缺陷	
jyz_tc	2	绝缘子_脱出	缺陷	
jueyuanzi_06	2	绝缘子_06	缺陷	
jueyuanzi_02	526	绝缘子_02	缺陷	jueyuanzi_dirty
jyz_wh	437	绝缘子_污秽	缺陷	

表 5 整理后新类别——鸟窝等杆塔异物

原类别名称	数量	名字	缺陷/正常	新类别名称
ganta	254	杆塔	缺陷	bird_nest
ganta_02	711	杆塔_02	缺陷	

表 6 整理后新类别——小金具

原类别名称	数量	名字	缺陷/正常	新类别名称
xiaojinlv_other	3	小金具_其他	缺陷	xiaojinlv_abnormal
xiaojinlv_other1	1	小金具_其他 1	缺陷	
xiaojinlv_qdp	45	小金具_缺垫片	缺陷	
xiaojinlv_qxd	437	小金具_缺销钉	缺陷	
xiaojinlv_xdaz	124	小金具_销钉安装	缺陷	
xiaojinlv_xdte	51	小金具_销钉脱出	缺陷	
xiaojinlv_xdxs	47	小金具_销钉锈蚀	缺陷	
xiaojinlv_zc	1777	小金具_正常	正常	xiaojinlv_normal
xiaojinlv	8888	小金具	正常	

3 评价指标

基于深度学习的目标检测常用的评价指标为精确

率 P (Precision) 和召回率 R (Recall), 如式(1)所示。

$$P = \frac{T_p}{T_p + F_p} \quad (1)$$

$$R = \frac{T_p}{T_p + F_N}$$

式中: T_p 为正样本被判定为正样本的个数; F_p 为负样本判定为正样本的个数; F_N 为正样本被判定为负样本的个数。不同的判定阈值可以得到不同的精确率和召回率, 进而绘制 $P-R$ 曲线。

4 模型训练与分析

4.1 数据增强

在训练模型时, 一般来说小目标的平均精度 (average precision, AP) 比中目标和大目标低很多。而数据集中也包含大量的小目标, 但比较麻烦的是小目标的分布并不均匀。

针对上述状况, 在 YOLOv5 中使用了 Mosaic 数据增强方法, Mosaic 数据增强的流程如图 3 所示。利用随机裁剪和缩放后的图像进行随机拼接, 生成新的数据, 在丰富了数据集的同时也变相地增加了小样本目标的数量。也因为会同时计算 4 张图片的数据, 对计算内存的需求也因此降低。Mosaic 数据增强后的样本如图 4 所示。

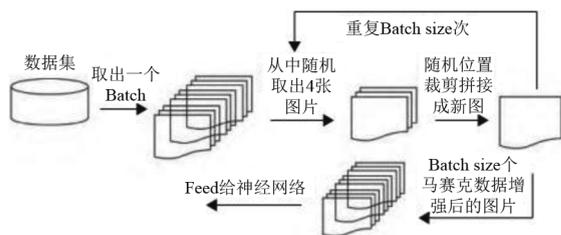


图 3 Mosaic 数据增强流程



图 4 Mosaic 数据增强后样本

4.2 图片处理

在网络训练中, 网络在预设的锚框上进行预测, 并将预测的结果与标签进行差值计算, 得到损失后反向更新网络的整体参数。所以自适应锚框计算也是重要的一部分, 需要在数据集上初始设定锚框。

在模型中设置锚框, 第一个 YOLO 层是最大的特征图尺寸为 40×40 , 对应最小的锚框。第二个 YOLO 层是中等的特征图尺寸为 20×20 , 对应中等的锚框。第三个 YOLO 层是最小的特征图尺寸为 10×10 , 对应最大的锚框。

同时, YOLOv5 采用了跨网格匹配规则, 增加正样本锚框数目的做法: 对于任何一个输出层, YOLOv5 采用形状 (shape) 匹配规则, 计算标签框和当前层的锚框的宽高比。如果宽高比大于设定的阈值说明该锚框没有合适的标签框, 在该预测层之间将这些锚框当背景过滤掉。对于剩下的锚框, 计算其落在哪个网格内, 同时利用四舍五入规则, 找出最近的 2 个网格, 将这 3 个网格都认为是负责预测该锚框的。

YOLOv5 增加正样本的方法, 最多可增大到原来的 3 倍, 大大增加了正样本的数量, 加速了模型的收敛。

4.3 损失函数

原始 YOLOv5 损失函数 L_{object} 如式(2)所示, 由 3 部分构成, 其中置信度损失 L_{conf} 和类别损失 L_{class} 采用二元交叉熵损失函数进行计算。

$$L_{\text{object}} = L_{\text{loc}} + L_{\text{conf}} + L_{\text{class}} \quad (2)$$

$$L_{\text{loc}} = 1 - C_{\text{IoU}}$$

式中: C_{IoU} 为目标框回归的损失函数。 C_{IoU} 综合考虑了真实框与预测框之间的重叠率、中心点距离、长宽比等各项参数的综合损失, 显著提高了网络学习的能力。其计算式如式(3)所示。

$$C_{\text{IoU}} = I_{\text{IoU}} - \frac{D_{o,2}}{D_{c,2}} - \frac{v^2}{(1 - I_{\text{IoU}}) + v} \quad (3)$$

式中: $D_{o,2}$ 为框 A 和框 B 的中心点距离; $D_{c,2}$ 为框 A 和框 B 的最小包围矩形的对角线长; v 为衡量长宽比一致性的参数, 可以定义为式(4)。

$$v = \frac{4}{\pi^2} (\arctan \frac{w_{gt}}{h_{gt}} - \arctan \frac{w_p}{h_p})^2 \quad (4)$$

式中: w_{gt} 、 w_p 、 h_{gt} 、 h_p 分别为真实框和预测框的宽度和高度。

4.4 NMS 处理

在目标检测的后处理过程中,针对很多目标框的筛选,通常需要非极大值抑制(non maximum suppression, NMS)操作。

选择 DIOU_NMS 作为目标框筛选。因为在测试过程中,并没有标签框的信息,不用考虑影响因子,因此直接用 DIOU_NMS 即可。图 5 和图 6 分别为网络输出的所有候选框和筛选后的候选框。

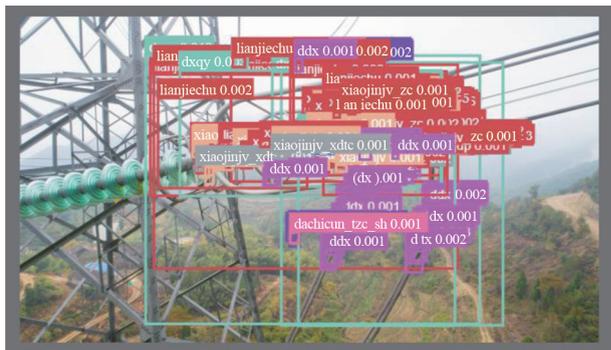


图 5 所有选框与置信度信息



图 6 NMS 后删除多余框输出

4.5 实验环境

实验环境使用 CentOS7 x64 操作系统,使用 Tesla T4 显卡进行运算,显存大小为 16 GB,采用 Pytorch 深度学习开发框架进行模型的开发和训练。

4.6 结果分析

在数据清洗与整理环节中,整理出输电数据集包含 20 000 张图片,用于 YOLOv5 模型的训练与测试。将数据集随机分为训练集和测试集,其中训练集 14 000 张图片,测试集 6000 张图片。使用 YOLOv5 模型分别对所有的类别同时进行训练和对 5 个类别分别进行训练,对两种训练方式进行对比。

由于存在“部分标注”“尺度区别过大”等问题,未处理数据前的训练结果并不好。同时,因为目标检测模型里,主干特征提取部分所提取到的特征是

通用的,把 backbone 冻结起来训练可以加快训练效率,也可以防止权值被破坏。因此,数据分类处理后,冻结 backbone 层,采用“分别训练、统一推断”的方法,可以提升准确度。AP 均值、准确率、召回率对比结果见表 7 所示。表 7 中,mAP_0.5 表示 IoU 为 0.5 时,所有类别的 AP 均值;mAP_0.5 : 0.95 表示 IoU 从 0.5 到 0.95,步长力 0.05 时所有类别的 AP 均值。

表 7 AP 均值、准确率、召回率对比

阶段	类别	mAP_0.5	mAP_0.5 : 0.95	准确率	召回率
处理前	所有类别	0.564 5	0.366 6	0.551 6	0.563 5
处理后	大尺寸	0.727 4	0.523 5	0.736 5	0.715 3
	鸟窝	0.900 2	0.472 5	0.928 0	0.846 7
	绝缘子	0.800 3	0.526 2	0.787 9	0.808 3
	均压环	0.700 1	0.396 7	0.727 7	0.693 1
	小金具	0.555 5	0.242 3	0.666 3	0.561 7

从表 7 中可以看出,对数据进行分类处理后,除小金具类别的 mAP_0.5:0.95 有所下降外,绝大部分目标检测效果提升明显,大尺寸、鸟窝、绝缘子、均压环 4 个类别的 mAP_0.5、mAP_0.5:0.95、准确率、召回率较数据处理前均较大提升。

5 结 论

上面使用输电线路现场采集到的图像数据,经数据分类处理后,冻结 backbone 层,采用“分别训练、统一推断”的方法训练网络模型。实验结果表明,利用“分别训练、统一推断”的方法在大尺寸、鸟窝、绝缘子的缺陷类别中,基于 YOLOv5 的目标检测算法对输电线路巡检图像的缺陷识别效果较好,可以解决实际应用中的问题,在一些小尺寸缺陷识别任务中,识别的精度有待提高。

参考文献

[1] 华志刚,李璟涛,汪勇,等. 发电行业人工智能应用[M]. 北京:中国电力出版社,2020.

[2] GIRSHICK R, DONAHUE J, DARRELL T, et al. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation [C]//Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 2014: 580-587.

变压器抗短路能力校核不合格原因分析及治理措施研究

谢茜,张宗喜,丁理杰,冯运,刘睿

(国网四川省电力公司电力科学研究院,四川成都 610041)

摘要:变压器抗短路能力校核是评估大型电力变压器抗短路能力的重要方法。文中对4台220 kV变压器进行抗短路能力校核,对校核结果不合格的原因进行了分析;针对抗短路能力不足的变压器提出通用治理策略,建议结合变压器诊断性电气试验及油色谱试验评估变压器状态,制定针对性的治理措施。

关键词:变压器;抗短路;校核;治理

中图分类号:TM 73 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)05-0054-04

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220510

Analysis of Unqualified Check for Anti-short-circuit Ability of Transformers and Research on Treatment Measures

XIE Qian, ZHANG Zongxi, DING Lijie, FENG Yun, LIU Rui

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

Abstract:Checking the anti-short-circuit ability of transformers is an important method to evaluate the anti-short-circuit ability of large power transformers. The anti-short-circuit ability of four 220 kV transformers are checked, and the reasons for their unqualified check are analyzed. A general treatment strategy is proposed for transformers with insufficient anti-short-circuit ability. It is recommended to evaluate the transformer status by diagnostic electrical test and oil chromatography test, and to formulate the targeted treatment measures.

Key words:transformer; anti-short-circuit; check; treatment

0 引言

大型电力变压器的抗短路能力对电网的安全稳定运行具有重要意义。对变压器进行抗短路能力校核是提高变压器抗短路能力,减少变压器因抗短路能力不足引起经济损失的有效方法。有限元仿真分析是变压器抗短路能力校核的通用方法^[1-3]。自2019年以来,基于有限元法对大型变压器进行抗短路能力校核是国家电网公司提升变压器抗短路能力的重要抓手。根据前期校核结果,抗短路能力校核不合格在220 kV在运变压器中普遍存在,据不完全统计,不合格率约为23.1%。

当前,在运220 kV变压器抗短路能力校核的判据为GB/T 1094.5—2008《电力变压器 第5部分:承

受短路的能力》^[4]。下面基于有限元分析对某厂家4台220 kV在运变压器进行抗短路能力校核,对变压器抗短路能力不足的原因进行分析,并提出治理策略以及治理方案的制定建议。

1 校核结果

采用变压器抗短路能力校核平台对变压器抗短路能力进行校核。校核时,根据GB 1094.5—2008的要求计算得到的短路电流,计算校核不同工况下每台变压器各线圈的各项指标^[4]。

校核结果表明,4台主变压器抗短路能力均不满足GB/T 1094.5—2008的要求。4台主变压器的抗短路能力不合格项明细见表1。表中,HV_{max}代表高压最大电压分接,HV_{rat}代表高压额定分接,

HV_{min} 代表高压最小电压分接, MV 代表中压, LV 代表低压。

表 1 主变压器抗短路能力不合格项明细

变压器	工况	不合格项	安全裕度
1 号	HV _{max} -MV	中压:导线倾斜极限力	0.78
		公共压环(或压板)上的压缩应力	0.94
	HV _{min} -MV	高压:导线倾斜极限力	0.69
		公共压环(或压板)上的压缩应力	0.87
	HV _{max} -LV	低压:导线倾斜极限力	0.74
		MV _{rat} -LV	低压:导线倾斜极限力
	MV-LV	低压:环形压缩应力	0.26
		低压:导线倾斜极限力	0.34
		低压:垫块轴向最大压缩应力	0.78
		MV _{max} -MV	中压:导线倾斜极限力
2 号	HV _{max} -LV	低压:导线倾斜极限力	0.86
		HV _{rat} -LV	低压:导线倾斜极限力
	MV-LV	低压:环形压缩应力	0.27
		低压:导线倾斜极限力	0.33
		低压:垫块轴向最大压缩应力	0.8
		HV _{max} -MV	中压:导线倾斜极限力
	HV _{min} -MV	高压:导线倾斜极限力	0.57
3 号	HV _{max} -LV	低压:导线倾斜极限力	0.78
		HV _{rat} -LV	低压:导线倾斜极限力
	MV-LV	低压:环形压缩应力	0.27
		低压:导线倾斜极限力	0.32
		低压:垫块轴向最大压缩应力	0.78
		HV _{max} -MV	中压:导线倾斜极限力
	HV _{min} -MV	高压:导线倾斜极限力	0.69
4 号	MV-LV	公共压环(或压板)上的压缩应力	0.98
		低压:环形压缩应力	0.3
		低压:导线倾斜极限力	0.67

2 原因分析

表 1 的结果表明,4 台变压器抗短路能力校核的不合格项集中在以下方面:

- 1) 变压器在高-中运行时,高压线圈及中压线圈导线倾斜极限力不满足要求;变压器在高-低运行时,低压线圈导线倾斜极限力不满足要求。
- 2) 变压器在高-中运行时,公共压环(或压板)上的压缩应力不满足要求。
- 3) 变压器在中-低运行时,低压线圈抗短路能力指标不满足要求。

下面对这三方面的不合格原因进行分析。

2.1 导线倾斜极限力

根据 GB/T 1094.5—2008,4 台变压器的抗短路能力校核需要计算不同的指标,每个指标的计算方法及要求不同,导线倾斜极限力为其中的一个指标。对于芯式变压器,当绕组收到过大的轴向压缩力时,会丧失其机械动稳定性,此时绕组发生“倾斜”,即在绕组幅向宽度内同一排各相邻导线出现了整体向同一方向倾斜,而沿轴向相邻的下面一排导线组则整体向相反的方向倾斜,由此便认为绕组导线呈“曲折形”变形^[5-8]。因此,GB/T 1094.5—2008 要求作用在绕组上的最大轴向压缩力要小于因导线发生倾斜时诱发塌陷的极限力 F_{tilt}^* ,即导线倾斜极限力^[4]。

F_{tilt}^* 的计算公式^[4]为

$$F_{\text{tilt}}^* = \left[K_1 E_0 \frac{nb_{\text{eq}} h^2}{D_{\text{mw}}} + K_2 \frac{nXb_{\text{eq}}^3 \pi D_{\text{mw}} \gamma}{h} \right] K_3 K_4 \times 10^{-3} \quad (1)$$

式中: E_0 为铜的弹性模数,110 kN/mm²; n 为绕组幅向宽度中导线数或组合导线数(用扁导线时); b_{eq} 为导线幅向宽度(用扁导线时),mm; D_{mw} 为绕组平均直径,mm; X 为连续式、螺旋式绕组的垫块覆盖系数, $X = \frac{cz}{\pi D_{\text{mw}}}$ (其中, c 为幅向垫块宽度,mm; z 为在圆周上的幅向垫块数); h 为导线的高度(用扁导线时,如果是两根轴向并排的且用纸包为一体的导线则为单根导线高度的 2 倍;如果是换位导线则为单根导线的高度),mm; γ 为导线形状常数,对于全圆角半径导线取 0.85,对于标准圆角半径取 1.0; K_1 为扭曲项系数,取 0.5; K_2 为分层叠置项系数,单根或双根导线取 45 N/mm²,非自粘性换位导线取 22 N/mm²; K_3 为计及铜工作硬度等级的系数(见 GB/T 1094.5—2008 表 A.3); K_4 为计及动态倾斜的系数(见 GB/T 1094.5—2008 表 A.4)。

按照 GB/T 1094.5—2008,对于由自粘性换位导线构成的绕组,因其良好的轴向稳定性,不需进行倾斜力的校核^[4]。此次校核的 4 台主变压器,其高压及中压线圈均使用纸包组合线,低压线圈使用纸包扁线。

1 号主变压器出厂日期为 2007 年 6 月,2 号主变压器出厂日期为 2008 年 7 月,3 号主变压器

出厂日期为 2007 年 4 月,4 号主变压器出厂日期为 2010 年 5 月。4 台主变压器生产时,均依据 GB 1094.5—2003《电力变压器 第 5 部分:承受短路的能力》对变压器的抗短路能力进行相关设计^[10]。

在 GB 1094.5—2003 中,没有明确导线倾斜极限力的计算方法,相关的计算方法及指标要求首次出现是在 GB/T 1094.5—2008 中。由于 2008 版国家标准对主变压器抗短路能力的要求高于 2003 版国家标准,而厂家在变压器设计时没有采用 2008 版国家标准规定的方法对导线倾斜极限力进行计算,导致其承制的变压器该指标不满足 2008 版国家标准的要求。

2.2 公共压环(或压板)上的压缩应力

当变压器绕组轴向压力不足,特别是采用单一压板压紧多个绕组时,个别绕组的轴向压力不足或上部压板强度不够时,绕组轴向推力会导致绕组顶部上翘严重变形^[4]。根据 GB/T 1094.5—2008,公共压环(或压板)上的压缩应力是变压器抗短路能力校核中的一个指标,需满足小于 80 MPa 的要求^[4]。

对于公共压环(或压板)上的压缩应力,计算方法在 GB/T 1094.5—2008 中没有要求,此次采用有限元仿真的方法进行计算。根据变压器设计参数搭建模型,计算得到公共压环(或压板)上的压缩应力,结果见表 2。

表 2 主变压器公共压环(或压板)上的压缩力不合格明细

变压器	工况	压缩应力 计算值/MPa	安全裕度
1 号	HVmax-MV	85.1	0.94
1 号	HVmin-MV	91.6	0.87
4 号	HVmin-MV	81.4	0.98
4 号	HVmin-MV	81.4	0.98

GB 1094.5—2003 中没有对公共压环(或压板)上的压缩应力这项指标进行明确要求。LY/T 1278—1998《电工层压木板》^[11]中,对压环(或压板)的机械强度要求为“垂直层向压缩强度 ≥ 100 MPa,垂直层向弯曲强度 ≥ 100 MPa”。而此 4 台变压器在设计时主要考虑在一定裕度下公共压环(或压板)上受到的应力小于其本身的机械强度。因此,标准差异性设计理念不一致是造成主变压器该指标校核不合格的主要原因。

2.3 中-低运行时低压线圈抗短路指标

根据表 1,当各主变压器中-低运行时,主变压器低压线圈环形压缩应力、导线倾斜极限力、垫块轴向最大压缩应力 3 个指标不合格。对这 3 项指标的国家标准要求,均首次出现在 GB/T 1094.5—2008 中。而对于主变压器低压线圈环形压缩应力、垫块轴向最大压缩应力,其计算方法在 GB/T 1094.5—2008 中也没有明确规定,此次采用有限元仿真的方法进行计算。

由于大部分 220 kV 主变压器低压侧,在实际运行时没有出线只带有少量无功设备,出于经济性考虑,对于 220 kV 主变压器的选型,常选用低压半容量的型号。当低压采用半容量设计时,变压器中-低短路阻抗设计值较小,抗短路能力较弱。此次校核的 4 台主变压器均采用低压半容量设计,如表 3 所示。

表 3 各主变压器参数明细

变压器	型号	额定容量/ kVA	额定电压/ kV	中-低短 路阻抗/%
1 号	SFSZ9-H- 180000/220GY	60 000/60 000 /30 000	220/121/10.5	7.45
2 号	SFSZ9-H- 150000/220GY	50 000/50 000 /25000	220/121/10.5	7.50
3 号	SFSZ9-H- 150000/220GY	50 000/50 000 /25 000	220/121/10.5	7.50
4 号	SFSZ10-H- 180000/220GY	60 000/60 000 /30 000	220/121/38.5	7.84

由于 220 kV 主变压器实际运行中极少存在中-低运行方式及选型,因此厂家没有对中-低运行方式下主变压器的抗短路能力进行考虑,导致在该运行方式下主变压器抗短路能力校核不合格。

3 治理措施

对于抗短路能力校核不合格的大型变压器,可以从 4 个方面采取措施进行治理^[12]:

1)在增强变压器自身抗短路能力方面,可采用整体更换、线圈改造的策略进行治理,必要时可进行站间调配或退役;

2)在减小变压器可能承受的短路电流方面,可采用加装限流电抗器、加装中性点电抗器等策略进行治理;

3)在减少可能发生的短路事件方面,可采用治理变压器运行环境的策略进行治理,例如低压侧绝

缘化、防止线路异物搭接等;

4)在缩短变压器短路故障电流持续时间方面,可采用优化保护配置及定值设置的策略进行治理。

治理时,为实现设备运行可靠性、使用效率和经济性的综合平衡,常采用多措并举、综合治理的方式确定治理策略。可结合资产全寿命周期管理的情况,根据校核不合格项、运行年限、重要程度、遭受短路冲击历史、短路故障历史等实际情况,确定治理方案。同时结合变压器实际状态,采取针对性的治理措施。

对于变压器的状态,可采用诊断性试验与油色谱数据相结合的方式进行评估^[13]。停电进行诊断性试验时,可结合电容量、频率响应曲线、短路阻抗三方面的结果综合评估变压器绕组情况。电容量试验可依据 DL/T 474.3—2018《现场绝缘试验实施导则 介质损耗因数 $\tan \delta$ 试验》^[14];频率响应曲线测试可依据 DL/T 911—2016《电力变压器绕组变形的频率响应分析法》^[15];短路阻抗试验可依据 DL/T 1093—2018《电力变压器绕组变形的电抗法检测判断导则》^[16]。绕组变形的分析与判断可参考标准进行^[14-16]。

4 结 论

变压器抗短路能力校核是评估变压器抗短路能力的重要手段。对抗短路能力校核不合格的原因进行深入分析可为制定针对性治理方案提供依据。所述4台220 kV在运变压器,其抗短路能力校核不合格的主要原因是 GB/T 1094.5 标准进行了更新,提出了更高的要求,导致设备本身抗短路能力不满足2008版更新后的国家标准要求。

抗短路能力校核不合格的在运变压器的治理,面临停电时间以及经济性等因素的制约。因此针对此类校核不合格的变压器,应先对其进行诊断性试验,结合状态检修试验结果评估变压器绕组变形情况,再根据实际情况采取针对性地治理措施。对于诊断性试验无异常的变压器,建议对变压器运行环境进行治理,减少短路事件的发生,同时加强监测,在遭受近区短路后,进行停电试验。

参考文献

[1] 姜山. 电力变压器绕组变形的受力分析[D]. 北京:华北电力大学,2012.

- [2] 赵志刚,李光范,李金忠,等. 基于有限元法的大型电力变压器抗短路能力分析[J]. 高电压技术,2014,40(10):3214-3220.
- [3] 刘凡,姚陈果,陈凌,等. 基于有限元法电力变压器绕组的短路电动力分析[J]. 电测与仪表,2016,53(4):113-117.
- [4] 全国变压器标准化技术委员会. 电力变压器 第5部分:承受短路的能力:GB/T 1094.5—2008[S]. 北京:中国标准出版社,2008.
- [5] 张明丽. 大型变压器抗短路能力校核研究[D]. 武汉:华中科技大学,2012.
- [6] 刘军,张安红. 电力变压器绕组短路动稳定能力的仿真和评估[J]. 变压器,2012,49(6):14-25.
- [7] 郭健,高昌平. 非晶合金变压器抗短路能力校核模型与短路承受能力评估技术研究[J]. 变压器,2017,54(8):24-30.
- [8] 李阳阳,刘文里,王录亮,等. 三绕组变压器中压绕组短路电动力的计算方法[J]. 黑龙江电力,2012,34(5):344-348.
- [9] 张丙旭. 提高变压器承受短路能力的实验研究[D]. 保定:华北电力大学,2010.
- [10] 全国变压器标准化技术委员会. 电力变压器 第5部分:承受短路的能力:GB 1094.5—2003[S]. 北京:中国标准出版社,2003.
- [11] 全国人造板标准化技术委员会. 电工层压木板:LY/T 1278—1998[S]. 北京:中国标准出版社,1998.
- [12] 刘宏亮,范辉,张书琦,等. 电力变压器抗短路能力校核及治理[M]. 北京:中国电力出版社,2018.
- [13] 富强. 突发短路故障造成变压器损坏的原因分析及预防措施[J]. 高压电器,2008,44(6):569-573.
- [14] 电力行业高压试验技术标准化技术委员会. 现场绝缘试验实施导则 介质损耗因数 $\tan \delta$ 试验:DL/T 474.3—2018[S]. 北京:中国电力出版社,2018.
- [15] 电力行业高压试验技术标准化技术委员会. 电力变压器绕组变形的频率响应分析法:DL/T 911—2016[S]. 北京:中国电力出版社,2016.
- [16] 电力行业电力变压器标准化技术委员会. 电力变压器绕组变形的电抗法检测判断导则:DL/T 1093—2018[S]. 北京:中国电力出版社,2018.

作者简介:

谢 茜(1990),博士,高级工程师,主要从事变压器类设备状态评价、故障分析及新技术研究。

(收稿日期:2022-06-01)

基于宽频带声电检测的变压器现场局部放电 诊断及定位方法

何宇航¹, 丁理杰¹, 周波², 李敬雄³, 姚晓¹, 周电波¹

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041; 2. 国网四川省电力公司成都供电公司, 四川 成都 610095; 3. 国网四川省电力公司四川超高压公司, 四川 成都 610042)

摘要:为提升变压器局部放电特高频信号检测灵敏度和抗干扰能力,研制了上限检测频率达480 MHz的特高频线圈传感器,其具备在变压器铁芯/夹件接地位置检测局部放电特高频电流信号的能力。在实验室设置局部放电模拟缺陷,研究了变压器悬浮电位放电和绝缘表面放电的信号特征,有助于对现场检测的信号进行类型识别。研究了变压器现场检测去干扰方法,在此基础上研究了基于宽频带声电检测的变压器现场局部放电诊断及定位方法,并进行了实测验证,检出110 kV变压器内部局部电位放电缺陷,有助于提升变压器局部放电现场检测水平和诊断准确性。

关键词:变压器;局部放电;传感器;特高频;超声波;定位

中图分类号:TM 835 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)05-0058-06

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220511

On-site Partial Discharge Diagnosis and Location Method for Transformer Based on Broadband Combined Acoustic-Electrical Detection

HE Yuhang¹, DING Lijie¹, ZHOU Bo², LI Jingxiong³, YAO Xiao¹, ZHOU Dianbo¹

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;
2. State Grid Chengdu Electric Power Supply Company, Chengdu 610095, Sichuan, China;
3. State Grid Sichuan Extra High Voltage Company, Chengdu 610042, Sichuan, China)

Abstract:For promoting the detection sensitivity of ultra high frequency (UHF) signals and anti-interference ability for transformer partial discharge, the UHF coil sensor with the upper limit detection frequency, that is 480 MHz, is researched, which can detect UHF current signal of partial discharge from the grounding positions of transformer core and clamps. The partial discharge simulated defect is set up in laboratory, and the signal characteristics of suspend potential discharge and insulating surface discharge of transformer are studied, which can help the type identification of signals detected on site. The anti-interference method for on-site transformer detection is also researched. On this basis, the on-site partial discharge diagnosis and location method of transformer based on broadband combined acoustic-electrical detection is proposed, and it is verified in a 110 kV transformer in which partial discharge defect is detected. So it can help to improve on-site detection level and diagnosis accuracy of transformer partial discharge.

Key words: transformer; partial discharge; sensor; ultra high frequency; ultrasonic; location

0 引言

变压器是基于电磁感应原理改变交流电压、交流电流数值的电力设备,是电力系统的“心脏”,其

健康状况对电力系统安全运行举足轻重。随着电力系统规模不断扩大以及用电负荷日益增加,变压器数量越来越多且运行环境和工况越来越严苛,因此,对变压器运维要求越来越高,这也是保障供电可靠性所必须的^[1-4]。

一直以来,绝缘缺陷在变压器缺陷中占有比例很大。对于结构复杂的变压器而言,绝缘体各区域所承受的电场一般是不均匀的,电介质也是不均匀的。一旦设备内部存在绝缘损伤、部件松动、部件变形或异物等缺陷引发局部场强畸变,很容易因为电场强度不均匀、击穿电压不均匀导致局部放电,威胁设备安全运行^[5-7]。因此,准确检测并定位变压器内部局部放电缺陷,对保障设备安全具有重要意义。

现阶段,绝缘油色谱检测、高频局部放电检测、特高频局部放电检测和超声波局部放电检测是变压器较为常用的局部放电带电检测手段。其中,特高频法和超声波法在条件具备的情况下可以实现局部放电源定位。尽管特高频法和超声波法具有相对较好的检测灵敏度,抗干扰性能也优于高频法,但由于外界干扰、局部放电信号畸变衰减和传感器位置受限等因素,现场检测中基于非内置传感器的局部放电声电检测方法对变压器局部放电缺陷的检测、诊断和定位效果并不理想^[8-10]。

下面通过研制的新型特高频线圈传感器,结合传统的特高频天线传感器和接触式超声波传感器,开展变压器局部放电现场检测技术研究。在典型局部放电信号特征分析、现场去干扰和基于多通道信号时延定位研究的基础上,研究基于宽频带声电检测的变压器现场局部放电诊断及定位方法,有助于提升变压器局部放电现场检测水平,更准确地诊断并定位变压器局部放电缺陷^[11-12]。

1 变压器局部放电信号特征

从大量变压器局部放电缺陷案例看,悬浮电位放电和绝缘表面放电是最常见的变压器内部局部放电缺陷。所研制的用于特高频局部放电信号检测的线圈传感器,与特高频天线传感器一起对模拟变压器悬浮电位放电缺陷和绝缘表面放电缺陷进行检测,研究变压器悬浮电位放电缺陷和绝缘表面放电缺陷信号特征。

1.1 特高频线圈传感器

由于变压器金属壳体的屏蔽作用,降低了非内置特高频天线传感器对变压器局部放电的检测灵敏度。通过大量现场检测结果分析,从铁芯接地位置和夹件接地位置检测变压器局部放电激发的电信号,可以最大程度规避金属壳体对信号的屏蔽,同时

不影响设备安全运行,是目前较为理想的检测方式。为此,研制特高频线圈传感器。相比特高频天线,特高频线圈传感器可以规避金属壳体对信号的屏蔽,具有更好的检测灵敏度;相比高频线圈传感器,特高频线圈传感器检测频带提升到了特高频频段,高于绝大部分外部干扰,具有更好的抗干扰性能,同时在变压器铁芯/夹件接地位置开展检测具有更好的检测灵敏度。

式(1)为线圈传感器等效阻抗计算公式,式(2)为线圈传感器工作频率计算公式。

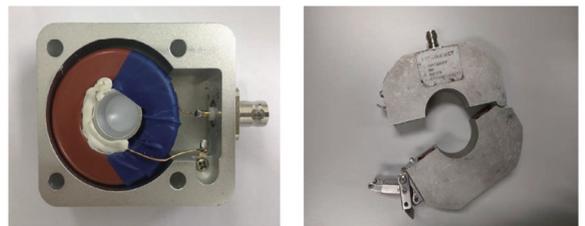
$$Z_{T(\max)} = \frac{MR_L}{N(L_s + R_L R_s C_s - M)} \quad (1)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{R_L + R_s}{R_L C_s (L_s - M)}} \quad (2)$$

式中: $M = N\mu_0\mu_r A/l_m$, N 为线圈匝数, μ_0 为真空磁导率, μ_r 为铁芯材料相对磁导率, A 为磁芯横截面积, l_m 为磁路长度; R_L 为负载电阻; L_s 为线圈漏电感; R_s 为磁芯损耗; C_s 为线圈寄生电容。

由式(1)和式(2)可见,要使所研制的线圈传感器同时具有良好的等效阻抗和较高的工作频率,应设法增加 M 并减小 L_s 和 C_s 。

为平衡选材限制和检测频率要求,设计线圈传感器频率上限为 500 MHz。选用铁基纳米晶材料作为传感器磁心材料,磁环的内径、外径分别为 2.4 cm、4.52 cm,线圈匝数为 6。所研制的特高频线圈传感器如图 1 所示。对所研制的传感器进行测试,结果如图 2 所示:传感器工作频率为 50~480 MHz,工作频率内等效传输阻抗约为 16 Ω ;工作频率内增益平坦度和工作频率外抑制特性优良,完全达到检测变压器局部放电特高频信号的需要。



(a) 试验预制

(b) 封装成型

图1 所研制的特高频线圈传感器

1.2 模拟变压器局部放电缺陷

所制作的模拟变压器模型如图 3 所示:箱体尺寸为 1200 mm×800 mm×1000 mm;套管末屏接地位置安装了用于检测局部放电特高频电流信号的特高

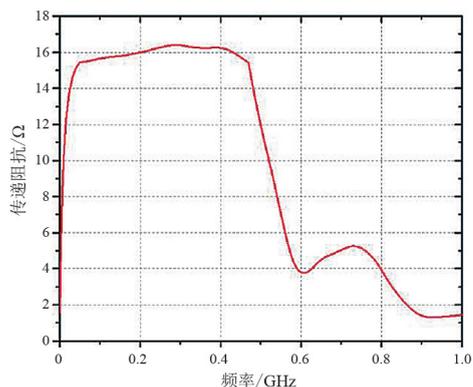


图2 特高频线圈传感器等效阻抗测试结果

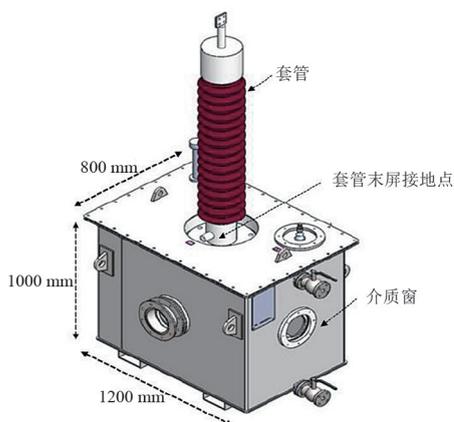


图3 模拟变压器模型

频线圈传感器;箱体的4个侧面开设了介质窗,用于观察局部放电现象,也可用于安装内置式特高频天线传感器,检测局部放电特高频电磁波。图4为变压器中最常见的悬浮电位放电和绝缘表面放电的缺陷模拟装置。悬浮电位放电模型的一根直径1 mm的金属丝通过绝缘体固定在高压电极和低压电极之间,金属丝距离高压电极0.5 mm,距离低压电极20 mm。绝缘表面放电模型则是将尺寸为100 mm×100 mm×1.5 mm的绝缘纸板夹持在尺寸为30 mm×80 mm×10 mm的球形电极和平板电极之间。将局部放电模拟缺陷放置于模拟变压器模型中,对模拟缺陷施加电压,则可使其激发出与局部放电特征相似的特高频电磁波。

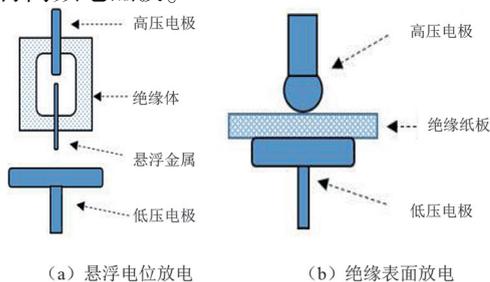


图4 局部放电模拟缺陷

1.3 变压器悬浮电位放电和绝缘表面放电信号特征

对模拟变压器加压后悬浮电位放电模型激发的特高频信号如图5所示。从时域波形可见,套管末屏检测的特高频电流,其幅值和持续时间与介质窗检测的特高频电磁波相近。对信号进行频谱分析,套管末屏检测的特高频电流的频率范围在220~360 MHz,信号能量最强频率为280 MHz;介质窗检测的特高频电磁波的频率范围在200~800 MHz,信号能量最强频率为400 MHz。总体而言,悬浮电位放电激发的特高频信号在频率范围内能量分布相对分散。从套管末屏检测的特高频电流的脉冲序列相位分布(phase resolved pulse sequence, PRPS)图谱和局部放电相位分布(phase resolved partial discharge, PRPD)图谱看,悬浮电位放电信号具有显著的100 Hz频率相关性,正负半周放电脉冲数相近,脉冲幅值分散性相对较小。

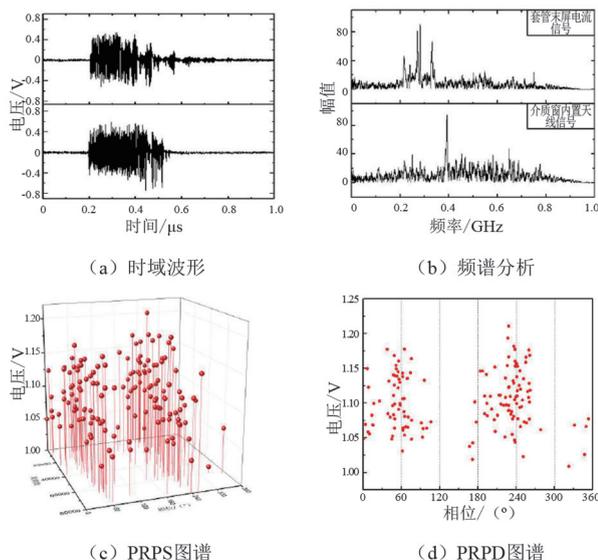


图5 悬浮电位放电模型激发的特高频信号特征
(套管末屏和介质窗检测)

对模拟变压器加压后绝缘表面放电模型激发的特高频信号如图6所示。从时域波形可见,套管末屏检测的特高频电流的幅值和持续时间均小于介质窗检测的特高频电磁波。对信号进行频谱分析,套管末屏检测的特高频电流的频率范围在220~340 MHz,信号能量最强频率为270 MHz;介质窗检测的特高频电磁波的频率范围在200~600 MHz,信号能量最强频率为400 MHz。从套管末屏检测的特高频电流PRPS图谱和PRPD图谱看,悬浮电位放电信号具有显著的100 Hz频率相关性,但正负半周放电脉冲数有所差别,呈现轻微极性效应,脉冲相位

分布很宽,脉冲幅值具有一定的分散性。

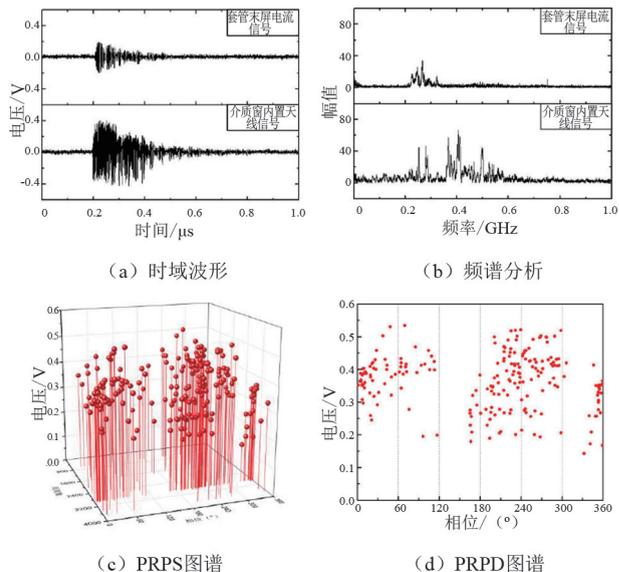


图6 绝缘表面放电模型激发的特高频信号特征
(套管末屏和介质窗检测)

上述研究显示,通过所研制的特高频线圈传感器,在模拟变压器套管末屏位置可以有效检测到模拟悬浮电位放电缺陷和绝缘表面放电缺陷产生的特高频电流。经频谱分析,特高频电流的频率范围主要在 200~400 MHz 内,表明特高频线圈传感器满足设计的检测频率,具有良好的检测灵敏度,并且,由于现场绝大多数干扰信号频率低于该频段,因此也具有优良的抗干扰性能。模拟检测显示变压器局部放电激发的电信号也包含能够在容性设备中传输的特高频电流,在变压器铁芯接地位置和夹件接地位置通过特高频线圈传感器可以实现有效的检测和诊断。

通过对变压器悬浮电位放电和绝缘表面放电信号特征的研究,有助于对现场检测的信号进行类型识别,诊断缺陷类型及严重程度。

2 变压器局部放电检测去干扰方法

在变压器局部放电现场检测中,特高频法和超声波法均可能面临非内部局部放电信号的干扰。总体而言,干扰信号可分为两类:一类是稳定的背景噪声干扰,主要是空间电磁波基础噪声干扰和变压器运行期间振动产生的超声波信号干扰;另一类是偶发的噪声干扰,例如线路电晕放电干扰。

图7为典型的变压器运行期间振动超声波信号时域波形,每个脉冲幅值都是振荡上升然后振荡减

小,其包络线近似为正弦波形,与局部放电振荡衰减或三角驼峰的时域信号特征有明显不同,可以对比判断背景噪声和放电信号。在稳定的背景噪声干扰下,还可以采用最小累积能量法识别局部放电信号并准确找到信号起始点。采样时间内时域信号平均能量可由式(3)计算得到,式(4)则是累积能量减去平均累积能量得到能量差值曲线的计算公式。



图7 某变压器运行期间振动产生的超声波信号

$$p = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m u_i^2 \quad (3)$$

$$X(n) = \sum_{i=1}^n u_i^2 - n \cdot p \quad (4)$$

式中: p 为各采样点电压平方和的平均值; m 为整个信号的采样点总数; u_i 为第*i*个采样点的电压值, $i=1,2,\dots,n,\dots,N$; $X(n)$ 为第*n*个采样点的能量差值。

如图8所示,在局部放电脉冲出现之前,信号的瞬时能量低于平均能量,能量差值曲线呈下降趋势,局部放电脉冲出现之后,信号瞬时能量超过平均能量,曲线呈上升趋势。最小累积能量法可以准确识别非背景噪声脉冲信号,同时准确找到信号起始点(信号能量差值曲线在局部放电脉冲出现后一段时间可见最小值,该最小值点即可作为信号起始点)。

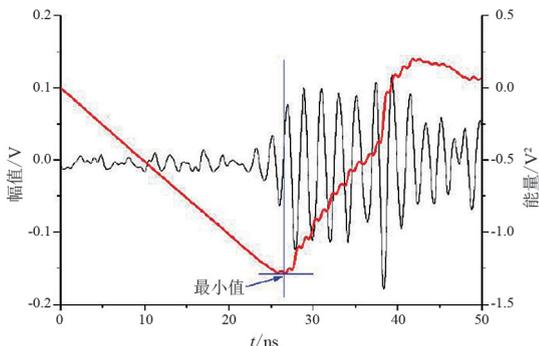


图8 最小累积能量法识别局部放电脉冲及其起始点

线路电晕放电等干扰,以目前的技术手段仅通过信号特征难以与变压器内部局部放电信号区分开来。因此,通过多通道特高频信号时延定位确定异常信号来源是有效的去干扰方法。为避免复杂的计算,可利用两个特高频天线传感器在各方向逐一开展信号源定位。具体而言,每个方向上一个传感器靠近变压器、另一个传感器远离变压器,通过两个传感器采集信号的到达时延,可以准确判断出来自外部的干扰信号。

3 变压器局部放电声电联合诊断及定位

经去干扰处理,检测到来自变压器内部的异常信号后,在类型识别的基础上,有必要精确定位缺陷所处位置,结合设备结构可以更准确评估缺陷严重程度,指导设备运维检修。

从基本原理而言,变压器局部放电缺陷定位基本方法是多通道信号时延定位法。要在三维空间实现设备多通道信号时延定位,测点的选取必须在金属壳体多个平面;但由于变压器特高频测点选取受限,三维空间定位很多情况下只能通过超声波局部放电检测实现。若特高频天线能够在变压器金属壳体法兰缝隙处测得设备内部局部放电激发的特高频信号,则可采用平分面法进行缺陷定位,虽然无法准确计算得到缺陷三维坐标,但可以计算缺陷所在直线,再综合信号特征、设备内部结构判断缺陷类型及缺陷位置。图 9 为变压器平分面法定位原理。在变压器金属壳体长边侧法兰缝隙处移动两个特高频天线,当特高频信号到达两个传感器的时间一样,则可以判定局部放电缺陷位于两传感器的垂直平分面上(确定平面);在变压器金属壳体短边侧法兰缝隙处移动两个特高频天线,当特高频信号到达两个传感器的时间一样,则可以判定局部放电缺陷位于两传感器的垂直平分面上(确定另一平面);在长边和短边确定的平面的交线即为局部放电缺陷所在直线。若在垂直方向能够有两个不同位置的测点检测到设备内部局部放电激发的特高频信号,则可以尝试用平分面法进一步精确定位,找到局部放电缺陷的准确位置。

在同时检测到设备内部局部放电激发的异常特高频信号和异常超声波信号的情况下,通过声电联

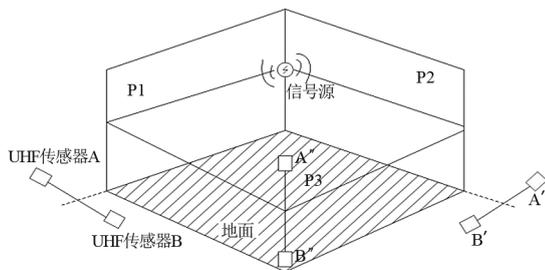


图 9 变压器平分面法定位原理

合定位方法可以获得更准确的信号时延来计算局部放电缺陷与超声波传感器的距离。通过多次移动超声波传感器进行定位计算,可以更好地规避因绕组、铁心造成的信号波形畸变对定位准确性的影响,获得比多通道信号时延定位更加准确的定位结果。

以某 110 kV 变压器为例,如图 10 所示,在铁芯/夹件接地位置使用特高频线圈传感器和在金属壳体法兰位置使用特高频天线传感器均测得异常特高频信号,经空间定位,信号来自变压器内部。图 11 为特高频线圈传感器测得异常信号的 PRPS 图谱,具有显著的 100 Hz 频率相关性,放电相位跨度较大,放电脉冲幅值、放电脉冲时间间隔分散性较大。图 12 为变压器壳体表面测得的异常超声波信号,与异常特高频信号相似,异常超声波信号每个工频周期正负半周都有放电脉冲,放电脉冲幅值、放电脉冲时间间隔分散性较大。由于超声波信号幅值相对特高频信号幅值太小,最小累积能量法读取特高频信号起始点更加精确,因此采用平分面法在变压器长边、短边进行定位。经双通道特高频信号时延定位,局部放电源在变压器长边和短边所在平面如图 13 所示,由此得到如图 14 所示的局部放电缺陷位置。如图 15 所示,根据定位结果,对变压器进行解体检修,发现铁芯硅钢片的某一叠片顶角与附近的夹件几乎接触,并且该处存在明显的放电痕迹,所在平面与定位结果完全一致。综合分析,该变压器铁芯硅钢片中最外侧靠近夹件的叠片顶角由于某种



(a) 铁芯接地位置

(b) 壳体法兰位置

图 10 110 kV 变压器特高频检测点

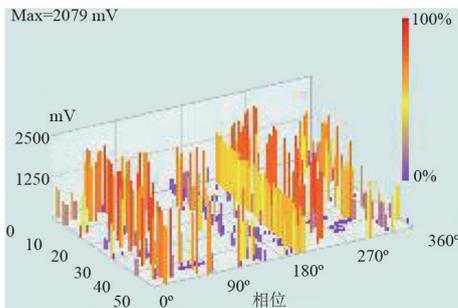


图 11 局部放电特高频 PRPS 图谱

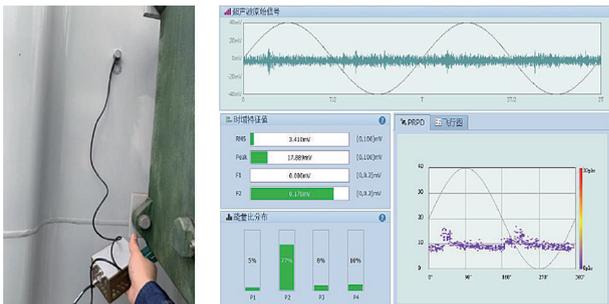


图 12 超声波局部放电信号



(a) 长边所在平面 (b) 短边所在平面

图 13 双通道特高频信号分平面定位



图 14 变压器局部放电缺陷定位结果

原因翘起(例如现场安装不当),使得该硅钢片叠片与附近的夹件距离过近,两者因为存在电位差导致了之间发生局部放电,在变压器运行过程中会因磁致伸缩等原因引起振动,导致铁芯硅钢片变形的叠

片顶角与夹件之间状态在接触与非接触(存在间隙)之间变化,因此放电也会呈现出间歇性,这也导致局部放电的放电脉冲幅值、放电脉冲时间间隔分散性较大。



图 15 变压器解体检查结果

4 结 论

1)所研制的特高频线圈传感器,在 50~480 MHz 频率范围内等效阻抗可达 16 Ω,具备在套管末屏、铁芯/夹件接地位置检测变压器局部放电特高频电流信号的能力。

2)通过在实验室建立缺陷模型得到的变压器悬浮电位放电和绝缘表面放电特高频信号特征,有助于对现场检测的信号进行类型识别。

3)所提出的变压器局部放电现场检测的去干扰处理方法以及基于宽频带声电联合检测的变压器局部放电诊断及定位方法,通过现场实测验证,有助于提升变压器局部放电现场检测水平和诊断准确性。

参考文献

[1] 宋永华,孙棉鑫. 电力系统设备状态监测的概念及现状[J]. 电网技术,2000,24(11):12-17.

[2] 李沐,冯新岩,蔺晓琨. 基于 TODA 和 TS-PSO 的变压器特高频局部放电空间定位方法[J]. 中国电机工程学报,2019,39(6):1834-1842.

[3] 罗艳,周秀,唐长应,等. 基于声电联合定位法在换流变局部放电检测中的应用[J]. 变压器,2020,57(1):73-78.

[4] 周电波,王红梅,程江荣,等. 变压器局部放电多频段联合检测技术试验研究[J]. 高压电器,2018,54(11):170-175.

[5] 王超,许本茂,冯藩,等. 基于声电联合及振动的变压器类设备局部放电现场综合诊断方法[J]. 四川电力技术,2020,43(4):33-37.

生物降解油浸绝缘纸特征产物及微观结构研究

王杰¹, 吴晓晖², 胡仕红¹, 兰新生¹, 张力¹

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;

2. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041)

摘要:为研究微生物对油浸绝缘纸降解,文中将试样油纸质量比按10:1制样,采取自然污染、人工接种、高温杀菌方法预处理对照试样,试样3~4中加入金属铝,试样5中加入金属铜,选择微生物最适宜生长环境温度为15~35℃下进行生物降解试验。通过高效液相色谱仪、气相色谱仪、扫描电子显微镜等仪器,检测分析微生物降解油浸绝缘纸产物及气体产物含量变化趋势并观察试验前后绝缘纸纤维素微观结构变化。试验结果表明,经微生物降解后,产生了糠醛、CO和CO₂特征产物,绝缘纸纤维素结构破坏。CO和CO₂含量随微生物降解先增后减,然后再增加,最后趋于稳定;绝缘纸纤维素微观形貌发生了改变,纤维素结晶区纤维表面变粗糙、部分松散或断裂,非结晶区出现小的孔隙,结晶区与非结晶区连接不够紧密。降解特征产物及其气体产物变化特征为辨识非运行电力设备绝缘纸是否发生微生物污染提供重要参考依据。

关键词:微生物;降解;油浸绝缘纸;特征产物;微观结构

中图分类号:TM 216 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2022)05-0064-06

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220512

Study on Characteristic Products and Microstructure of Biodegradable Oil-impregnated Insulation Paper

WANG Jie¹, WU Xiaohui², HU Shihong¹, LAN Xinsheng¹, ZHANG Li¹

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

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

Abstract:In order to study the degradation of oil-impregnated insulation paper by microorganisms, the mass ratio of oil-paper sample is about 10 : 1, and the comparative samples are pretreated by natural pollination, artificial inoculation and high temperature sterilization. Metal aluminum is added into samples 3 and 4, and metal copper is added into sample 5. The biodegradation test is carried out at 15~35℃ which is the most suitable ambient temperature. The products of biodegradable oil-impregnated insulation paper and the change trend of gas content are analyzed by high performance liquid chromatography, gas chromatography and other instruments, and the changes of microstructure of oil-impregnated insulation paper before and after the test are observed by scanning electron microscope (SEM). The test results show that after the biodegradation, characteristic products are generated such as furfural, CO and CO₂, but the structure of cellulose of insulation paper has been damaged. The contents of CO and CO₂ increases first then decreases, and then increases, and finally it tends towards stability with microbial degradation. The SEM shows that the crystals and amorphous structures of cellulose have changed, the crystalline region of cellulose surface becomes rough, loose and fractured, the amorphous region occurs small pores, and the crystalline region is not closely connected with the amorphous region. Characteristic products of degradation and the variation characteristics of their gas product are important reference basis for distinguishing whether microbial contamination occurs in insulation paper of non-operating power equipment.

Key words: microorganism; degradation; oil-impregnated insulation paper; characteristic product; microstructure

0 引言

绝缘纸的主要成分是纤维素,在热、电场、水及氧作用下,易老化降解生成水、酸、CO、CO₂等物质^[1-2],结构破坏、形貌改变等^[3-8]。在工程应用中时常发现一些电容式电力互感器(capacitor voltage transformer, CVT)、变压器中性点套管等少油设备绝缘油中CH₄、H₂、CO和CO₂含量异常增高现象,试验室用电、热及化学方法进行试验验证,均未查出原因。

纤维素降解除受物理、化学因素外,生物作用也是纤维素降解的一个重要因素。微生物生化过程比较复杂,研究表明,微生物降解纤维素的基本过程是微生物分泌的纤维素酶使纤维素分子中的氢键断裂,产生葡萄糖单体,进一步降解生成更小分子物质,如氢气、甲烷等^[9-11],这些物质的产生使得纤维素结构破坏^[12]。文献[13]对纤维素酶降解机制及纤维素酶分子结构和功能进行研究时,提出并证实了氢键断裂是微生物降解纤维素过程的初始阶段。自然界中微生物种类繁多、分布广泛,适宜的环境为微生物生长增殖提供了有利条件,生物降解作用有利于促进环境修复,创造美好生活,但微生物降解破坏作用巨大。近年来,电力科研工作者越来越重视微生物对绝缘油污染及其影响的研究,常温环境下,微生物能够在绝缘油中进行生长增殖^[14],研究发现枝动菌能利用绝缘油为唯一碳源进行生长增殖,代谢产生癸二酸,增大了绝缘油介质损耗因数^[15]。常温、密闭环境下,微生物对浸绝缘纸降解的有关研究未见报道,特别是对产物、变化趋势及微观结构状态改变的研究。下面结合CVT、变压器中性点套管等少油设备的生产、存放的环境条件,对存在微生物污染的可能性进行模拟生物降解油浸绝缘纸试验。从宏观特征产物及其变化趋势和微观结构状态改变研究微生物对油浸绝缘纸的降解,为在工程应用中遇到类似现象提供分析参考。

1 生物降解试验

1.1 试验仪器及材料

1) 试验仪器:试验装置(自制)

气相色谱仪型号为301B,生产厂家为河南中分仪器股份有限公司。

卡尔费休库伦法水分测试仪型号为CA-100,生产厂家为日本三菱公司。

Titoch自动电位滴定仪型号为916,生产厂家为Swissmade公司。

扫描电镜(scanning electron microscope, SEM)分析仪型号为JSM-5900LV,生产厂家为日本JEOL公司。

高效液相色谱仪型号为1120,生产厂家为Agilent公司。

2) 试验材料

绝缘油为25号环烷基绝缘油,产自克拉玛依。

绝缘纸为魏德曼绝缘纸。

铝导线直径为3.1 mm,铜导线直径为1.8 mm。

1.2 试验装置

试验装置如图1所示。

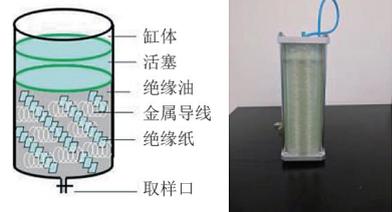


图1 试验装置

1.3 试验方法及检测

1.3.1 试样制备

将绝缘纸剪成面积为10 cm²正方形纸片(利于被绝缘油浸透),金属铝和铜用800目砂纸打磨成光亮备用。绝缘油和纸按CVT中油纸质量比10:1计,用电子天平分别称取25号环烷基绝缘油、绝缘纸片,总质量约为1.9 kg,置于试验装置内,用玻璃棒不断搅拌,使绝缘纸与绝缘油充分接触,密封好试验装置,排除气泡,密闭静置3 d,待绝缘纸完全浸透。将6段约10 cm长的金属铝绕成螺旋状,分别加入试样3~4中;将3段约10 cm长的金属铜绕成螺旋状,加入试样5中,制成5个对照试样如表1所示。

表1 试样组成

试样	试验样品组成
1	空白绝缘油
2	绝缘油+绝缘纸
3	绝缘油+绝缘纸+铝导线
4	绝缘油+绝缘纸+铝导线
5	绝缘油+绝缘纸+铜导线

1.3.2 试验方法

自然污染:按照CVT制造过程中存放的环境条

件,将试样置于阴暗、湿度 65% 处放置 1 d。

人工接种: 在无茵台上, 用接种针从培养好的培养皿中挑取微生物菌苔, 点接在试样中不同位置, 使菌种在绝缘油中均匀分布。

高温灭菌: 将试样在 160~170 °C 温度下保持 1 h, 利用热辐射杀灭微生物及其芽孢。

生物降解试验: 为增强对比试验效果, 试样 1 高温灭菌、试样 2 自然污染、试样 3 和试样 5 人工接种、试样 4 在 100 °C 下杀菌 30 min, 部分微生物及其芽孢被杀灭; 然后, 将 5 个对照试样置于微生物最宜生长环境温度 15~35 °C 下进行生物降解试验; 最后, 试验 15 d、30 d、84 d、160 d、282 d 后, 分别取样检测绝缘油中组分并观察试验前后的绝缘纸纤维素微观形貌。

1.3.3 产物分析

微量水分测定: 用 10 ml 注射器抽取待测试样, 然后用卡尔费休库伦法水分测试仪测定试样中微量水分。

酸值测定: 用天平称取 3.0 g 氢氧化钾加入到 1000 ml 的异丙醇中, 微沸 10 min, 冷却后塞住烧瓶口, 把溶液在暗处静置 2 天; 然后, 通过孔径为 5 μm 的薄膜过滤上层清液, 滤液储存在棕色瓶子中; 最后, 用 0.1 mol/L 的标准溶液滴定氢氧化钾异丙醇溶液, 用自动电位滴定仪测定试样中的酸值。

糠醛测定: 设置液相色谱仪参数, 检测器波长 277 nm, 流动相比比例纯水: 甲醇 = 1:1, 流速为 1 mL/min。保留时间定性识别糠醛色谱峰, 单点校正外标法定量计算糠醛含量。根据分配定律和物料平衡原理, 油中糠醛含量按式(1)计算。

$$C_o = 0.19 \times \frac{h_{ext}}{h_s} \times C_s \quad (1)$$

式中: C_o 为油中糠醛浓度, mg/L; h_{ext} 为甲醇萃取液中糠醛色谱峰高, mAU; C_s 为标样中糠醛浓度, mg/L; h_s 为甲醇标样中糠醛峰高, mAU。

气体组分测定: 用 100 ml 玻璃注射器在全密封状态下取用 40 ml 绝缘油, 注入 5 ml 氮气后置于机械振荡仪内, 设置温度为 50 °C、振荡时间为 20 min、静置时间为 10 min。将脱出的气体转移至 5 ml 注射器内, 用气相色谱仪检测溶于试样中气体组分。

1.3.4 微观形态结构分析

首先, 用石油醚清洗掉绝缘纸片上的大部分绝缘油; 然后, 用真空干燥箱除去残存绝缘油; 最后, 对

表面喷金处理, 用 JSM-5900LV 扫描电镜观察其微观形态结构。

2 绝缘纸纤维素结构

2.1 绝缘纸化学结构

绝缘纸主要成分为纤维素, 其分子式为 $(C_6H_{10}O_5)_n$, 结构式如图 2 所示。

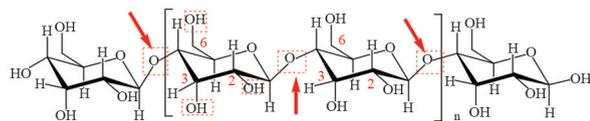


图 2 纤维素结构式

由图 2 可知: 纤维素为 D-吡喃葡萄糖基 1-4 糖甙键连接起来的链状高聚物, 每个葡萄糖单体上有 3 个自由存在的羟基, 3 个羟基所处位置不同, 活性也不同, 发生化学反应类型也不同。C₂、C₃ 位 2 个仲醇基是形成水的潜在根源; C₆ 位上的伯醇基具有一定的极性和亲水性, 易被极性分子吸附包围氧化成醛基, 醛基氧化成羧基; 大分子中甙键易受到破坏而断裂, 与水分子形成两个羟基, 一个羟基具有还原性; 另一羟基具有氧化性, 键接的氧原子和葡萄糖环上的氧原子能够形成分子内和分子间氢键, 同时还参与降解反应^[16-19]。

2.2 绝缘纸微观形态结构

图 3 为绝缘纸降解前 SEM 照片。

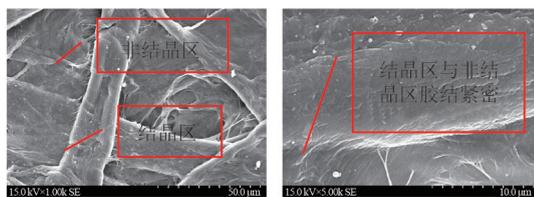


图 3 绝缘纸降解前 SEM 照片

由图 3 可知: 绝缘纸是由结晶和非结晶区纤维素形成的二相体系, 二者交替排列, 紧密连接, 结构完整。结晶区分子排列规则、紧密、表面光滑。非结晶区中大分子排列较紊乱、堆砌较疏松、密度较低、规则性较差, 但整体结构完整。

3 试验结果与分析

3.1 产物

3.1.1 水分和酸

试验 282 d 后, 试验前后各试样中水分和酸值

如表2所示。

表2 各样品中的水分和酸值

试样	试验前		试验后	
	微水质量浓度/ ($\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)	酸值 ^① / ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)	微水质量浓度/ ($\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$)	酸值 ^① / ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)
1	13.8	0.010	14.2	0.010
2	18.0	0.010	30.8	0.013
3	19.6	0.010	35.4	0.011
4	16.7	0.010	29.4	0.012
5	25.6	0.010	38.2	0.015

①是指中和1g油脂中游离脂肪酸所需氢氧化钾的质量(mg),以mg/g表示。

表2结果显示:试样1的水分含量和酸值未有明显增加,其他各试样的水分含量和酸值均增加。试样中微生物种类、含量、生长增殖情况等不同,降解产物量有所不同;试样3与试样5采用相同的人工接种方式,产生的酸值不同是由于产生的有机酸与金属铝反应,减少了试样3中酸含量。水分和有机酸是微生物降解纤维素的产物^[20-21],纤维素分子中2个自由的仲醇基在纤维素酶作用下断裂生产水,生成的水分促使纤维素进一步降解,产生更多的水分。水解物质进入微生物细胞,在胞内酶作用下,将纤维素中伯醇基氧化成醛基,进而氧化成羧基^[22]。

3.1.2 糠醛

糠醛是一种五元杂环化合物,又称呋喃甲醛,它是由纤维素大分子中的甙键断裂,生成葡萄糖单体,葡萄糖单体环化生成含氧杂环化合物^[23]。通常状态下绝缘纸不会产生糠醛,糠醛及含量的多少是判断绝缘纸纤维结构是否破坏及程度的重要指标^[24-27]。各试样糠醛色谱图如图4所示,含量如表3所示。

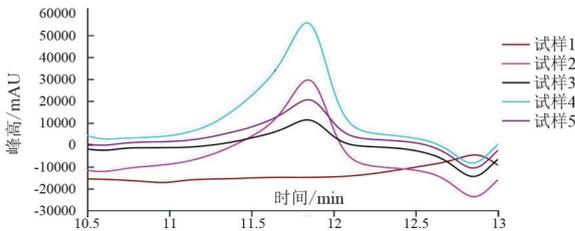


图4 糠醛含量液相色谱

表3 绝缘油中糠醛含量

试样	糠醛含量/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
1	0
2	0.025
3	0.005
4	0.034
5	0.010

由图4及表3可知:空白试样1的色谱图为一平滑线,未检出糠醛;其他试样均有明显的糠醛特征色谱峰,检出糠醛,表明绝缘纸在微生物作用下其纤维碳架结构已被破坏。

3.1.3 气体组分及含量变化趋势

1) 气体组分

试验86d后,用气相色谱仪检测溶于绝缘油中气体组分及含量,结果见表4。

表4 绝缘油中气体组分含量

试样	油中溶解气体组分含量/($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)						
	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	H ₂	CO	CO ₂
1	1.40	0.06	0.00	0.00	0.00	34	460
2	1.73	0.08	0.00	0.00	2.20	74	1593
3	1.87	0.13	0.13	0.00	14.51	97	3953
4	1.74	0.08	0.09	0.00	12.74	44	1041
5	1.80	0.14	0.00	0.00	1.78	57	3130

由表4可知:与试样1对比,对对照中产生了CH₄、C₂H₄、H₂、CO、CO₂及部分试样产生了C₂H₆气体,无C₂H₂气体产生。这与绝缘油及绝缘纸在电和热作用下产生气体特征产物不同^[28],是辨识微生物降解的重要特征^[29-31]。试样3~4中H₂含量高于试样2,试样5是由于降解产生的有机酸与金属铝反应所致,进一步验证了微生物降解油浸绝缘纸产生有机酸。

2) 组分含量变化趋势

由图5—图8可知:4个对对照产生的CH₄、H₂、CO和CO₂气体含量随微生物降解时间呈先增后减,然后再增加,最后趋于稳定。其变化趋势与绝缘纸理化降解的气体含量持续增加趋势不同^[32]。在试验初始阶段,试样中微生物种类繁多,降解产物的生成速率快,随着装置内氧气含量减少,好氧型微生物生长受到抑制,降解减缓,产物量减少,此时能够适应当前环境条件生长的微生物大量繁殖,产物含量随之增加。随着微生物在生长增殖过程中不断的消耗掉硫、磷和氮以及金属等赖以生长的微量元素,生长受到抑制,降解减缓,故气体含量趋于稳定。该变化特征是由微生物生长的特定环境决定,为辨识微生物降解油浸绝缘纸提供重要依据。

3.2 微观结构形态

由图9可知:对对照SEM照片中的纤维素结晶区和非结晶区微观形貌均发生较大变化,结晶区内纤维素分子间键断裂,结晶体之间变得松散、致密度降低、表面粗糙、部分纤维断裂、长度下降等;非结晶区有的地方出现较大孔隙。结晶区与非结晶区连接

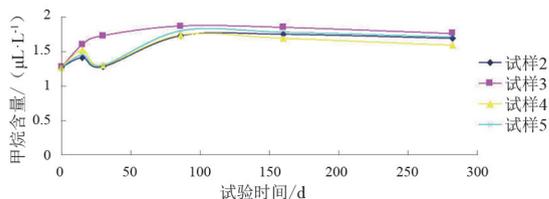
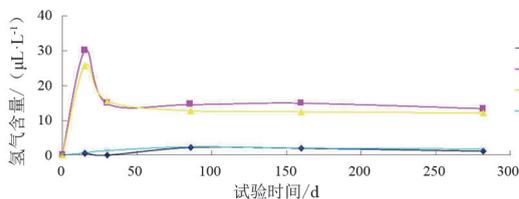
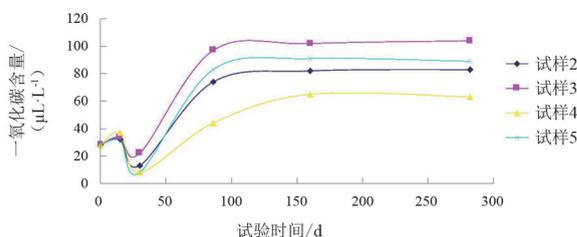
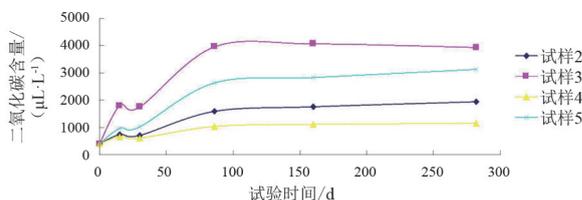
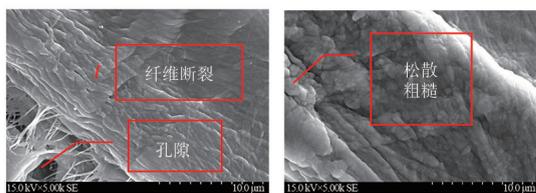
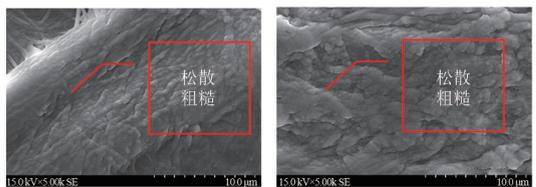
图 5 CH₄ 气体含量变化趋势图 6 H₂ 气体含量变化趋势

图 7 CO 气体含量变化趋势

图 8 CO₂ 气体含量变化趋势

(a) 试样 2

(b) 试样 3



(c) 试样 4

(d) 试样 5

图 9 绝缘纸降解后 SEM 照片

变得疏松,但绝缘纸微观结构仍保持原有两相共存的微细结构^[33-34]。绝缘纸纤维素微观结构形貌的变化直观反映出微生物对绝缘纸纤维碳架结构破坏的状态。

4 结 论

油浸绝缘纸在微生物作用下,生成了一些特征产物和微观形态结构发生了改变,结论如下:

1) 油浸绝缘纸在微生物作用下,纤维素降解产生了水、酸、糠醛及 CH₄、C₂H₄、H₂、CO 和 CO₂ 特征产物,无 C₂H₂ 气体产生,绝缘纸纤维素碳架结构遭到破坏。

2) CH₄、H₂、CO 和 CO₂ 含量随微生物降解时间呈先增后减,然后再增加,最后趋于稳定。该变化特征是由微生物生长的特定环境决定。

3) 绝缘纸纤维素结晶区与非结晶区微观面貌均发生了较大的变化,SEM 照片显示出了纤维素碳架结构破坏的状态。

4) 利用微生物降解油浸绝缘纸的特征产物及其变化趋势的特征可辨识非运行电力设备绝缘结构是否发生微生物污染。

参考文献

- [1] 廖瑞金,汪可,尹建国,等.初始水分含量对油纸绝缘热老化特性的影响[J].高电压技术,2012,38(5):1172-1178.
- [2] 陈伟根,蔚超,孙才新.变压器油纸绝缘气隙放电特性及其产气规律[J].高电压技术,2010,36(4):849-855.
- [3] 沙彦超,周远翔,孙清华,等.直流电压分量对复合电场下油纸绝缘沿面闪络的影响规律[J].高电压技术,2013,39(6):1337-1343.
- [4] 陈义龙,齐波,李成榕,等.油浸层压纸板在低场强下空间电荷的积聚特性[J].高电压技术,2013,39(4):987-992.
- [5] 周远翔,王明渊,张云霄,等.雷电冲击电压下典型油纸缺陷局部放电特征[J].高电压技术,2015,41(11):3783-3789.
- [6] 聂德鑫,王明渊,周远翔,等.操作冲击电压下油纸针板缺陷局部放电研究[J].高电压技术,2015,41(3):918-924.
- [7] 张建文.电气设备故障诊断技术[M].北京:中国水利水电出版社,2006.
- [8] 廖瑞金,严家明,杨丽君,等.局部放电对油浸绝缘纸表面损伤特性研究[J].中国机电工程学报,2011,31(10):129-135.
- [9] 黄忠水,纪威,李淑艳,等.国外生物柴油的应用[J].节能环保技术,2003(1):38-41.

- [10] 吴小武,刘荣厚. 农业废弃物厌氧发酵制取沼气技术的研究进展[J]. 中国农学通报, 2011, 27(26): 227-231.
- [11] LU L, REN N Q, ZHAO X, et al. Hydrogen production, methanogen inhibition and microbial community structures in psychrophilic single-chamber microbial electrolysis cells[J]. Energy & Environmental Science, 2011(4): 1329-1336.
- [12] 林燕,张伟,华鑫怡,等. 纤维素酶水解能力的影响因素及纤维素结构变化研究[J]. 食品与发酵工业, 2012, 38(4): 39-43.
- [13] 高培基. 纤维素酶降解机制及纤维素酶分子结构与功能研究进展[J]. 自然科学进展, 2003, 13(1): 21-28.
- [14] 王杰,刘虹,唐平,等. 变压器绝缘油中微生物生长研究[J]. 四川电力技术, 2014, 37(1): 92-94.
- [15] 梅子青,王海晶,王丰,等. 电器绝缘油中枝动菌代谢物脂肪酸的分离、纯化及结构鉴定[J]. 吉林大学学报, 2004, 42(1): 116-120.
- [16] 杨腾腾,周宏,王霞,等. 微生物降解纤维素的新机制[J]. 微生物学通报, 2015, 42(5): 928-935.
- [17] 文少白,李勤奋,侯宪文,等. 微生物降解纤维素的研究概况[J]. 中国农学通报, 2010, 26(1): 231-236.
- [18] 刘树立,王华,王春艳,等. 纤维素酶分子结构及作用机理的研究进展[J]. 食品科技, 2007(7): 12-15.
- [19] VARAPRASAD Kokkarachedu, RAGHAVENDRA Gownolla Malegowd, JAYARMUDU Tippabattini, et al. Nano zinc oxide-sodium alginate antibacterial cellulose fibres [J]. Carbohydrate Polymers: Scientific and Technological Aspects of Industrially Important Polysaccharides, 2017, 135: 349-355.
- [20] 黄海涛,刘畅,马超,等. 纤维素及其衍生物材料的应用研究进展[J]. 材料导报, 2016, 30(11): 75-80.
- [21] 余多慰,袁生. 绿色木霉纤维素酶分子内氢键特征的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2005, 25(4): 544-547.
- [22] 迟雪,李建政,艾斌凌. 一株发酵纤维素产丁酸菌及其代谢动力学特性[J]. 中国环境科学, 2016, 36(1): 232-237.
- [23] 梅雪婷,朱宝龙,张郁晨,等. 半纤维素制备糠醛的研究进展[J]. 化工时刊, 2015, 29(9): 34-37.
- [24] 徐志强,刘阳,赵敏乔,等. 油中糠醛浓度判定变压器固体绝缘劣化程度的研究[J]. 电子建设, 2010, 2(2): 36-38.
- [25] 张欲晓,李胜利,王梦君,等. 变压器绝缘纸的聚合度变化规律[J]. 高电压技术, 2011, 37(10): 2458-2463.
- [26] 向彬,廖瑞金,杨丽君,等. 变压器矿物油中糠醛的稳定性研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(8): 85-87.
- [27] 张欲晓,李胜利,李婷,等. 变压器油中糠醛浓缩萃取新技术[J]. 电网技术, 2014, 38(5): 1390-1395.
- [28] 齐波,魏振,李成榕,等. 交直流复合电压作用下油纸绝缘典型缺陷放电现象及特征[J]. 高电压技术, 2015, 41(2): 639-646.
- [29] 徐琰,张茂林,杏艳,等. 纤维素类生物质厌氧发酵产氢的研究[J]. 化学研究, 2005, 16(2): 6-8.
- [30] 田鑫,廖强,张攀,等. 光合细菌生物膜反应器葡萄糖降解及产氢特性实验[J]. 化工学报, 2008, 59(9): 2346-2350.
- [31] 杏艳,赵金安,樊耀亭,等. 含纤维素类生物质的生物制氢[J]. 太阳能学报, 2006, 27(7): 656-660.
- [32] 廖瑞金,冯运,杨丽君,等. 油纸绝缘老化特征产物生成速率研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 142-147.
- [33] 贾士儒,欧竑宇,马霞,等. 细菌纤维素结构与性质的初步研究[J]. 纤维素科学与技术, 2002, 10(3): 25-29.
- [34] 胡舰. 基于分子模拟的变压器绝缘纸无定型区老化微观机理研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2009.
- 作者简介:
王杰(1979),男,硕士,高级工程师,主要从事电网绝缘化学研究。(收稿日期:2022-07-04)
- 缘油纸复合体系沿面放电特性研究[J]. 绝缘材料, 2022, 55(1): 52-61.
- [10] 黄超,魏本刚,任晓明,等. 基于不同放电模型的变压器局部放电光学特性研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(20): 108-113.
- [11] 张显聪,徐洋,王勇,等. 电容式套管局部放电的末屏地线 UHF 传感[J]. 高压电器, 2016, 52(2): 62-67.
- [12] 胡长猛,程林,王辉,等. 含典型缺陷的变压器套管局部放电检测试验研究[J]. 电磁避雷器, 2021(2): 107-115.
- 作者简介:
何宇航(1990),男,硕士,工程师,从事电力设备状态检测及在线监测技术研究。(收稿日期:2022-04-25)

(上接第 63 页)

- [6] GILLES J, TRAN G, OSHER S. 2D empirical transformers wavelets, ridgelets and curvelets revisited[J]. SIAM Journal on Imaging Sciences, 2014, 7(1): 157-186.
- [7] BRUNT R J Van. Physics and chemistry of partial discharge and corona-recent advances and future challenges[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1994, 11(5): 761-783.
- [8] 司文荣,李军浩,黎大健,等. 基于宽带检测的局放脉冲波形快速特征提取技术[J]. 电工电能新技术, 2008, 27(2): 21-25.
- [9] 陈鑫,郝建,高晨煜,等. 针-板电极结构下三元混合绝

基于 ER 算法的智能变电站保护二次回路故障定位方法

汪勤¹, 吴旻¹, 姚辉昌², 李江洋²

(1. 国网四川电力送变电建设有限公司, 四川 成都 610051;

2. 成都市登禄电力科技有限公司, 四川 成都 611137)

摘要:由于智能变电站二次系统结构较于常规站发生变化,当发生二次回路通信故障时,难以确定具体故障原因及定位故障设备。文中提出一种基于证据推理(ER)算法的智能变电站保护二次回路故障定位方法,基于智能变电站配置文件,获取二次虚实回路图并完成虚实对应;然后,依据抓包技术收集站内告警信息,通过举证表的方法列出可疑元器件集合;最后,应用 ER 算法在可疑故障元器件集合中帮助确认故障设备,对智能变电站维护工作有着一定参考意义。

关键词:智能变电站;二次回路;故障定位;ER 算法

中图分类号:TM 77 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2022)05-0070-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220513

Fault Location Method for Secondary Circuit of Protection Systems in Smart Substation Based on ER Algorithm

WANG Qin¹, WU Min¹, YAO Huichang², LI Jiangyang²

(1. State Grid Sichuan Electric Power Transmission and Transformation Construction Co., Ltd.,

Chengdu 610051, Sichuan, China; 2. Chengdu Denglu Electric Power Technology

Co., Ltd., Chengdu 611137, Sichuan, China)

Abstract: Because the secondary system structure of smart substation is changed compared with that of conventional substation, it is difficult to determine the specific fault cause and locate the fault equipment in case of secondary circuit communication fault. A fault location method for secondary circuit of protection systems in smart substation based on evidential reasoning(ER) algorithm is proposed. Based on the configuration file of smart substation, the diagram of secondary logical circuit and physical circuit is obtained, and the mapping between logical circuit and physical circuit is completed. Then, the alarm information in the substation is collected according to packet capture technology, and the set of suspicious components is listed by the method of proof table. Finally, ER algorithm is applied to confirm the faulty equipment in the set of suspicious faulty components, which has a reference significance for substation maintenance.

Key words: smart substation; secondary circuit; fault location; ER algorithm

0 引言

目前,智能电网在中国飞速发展,其中,随着电网智能化建设的不断深入,作为核心部分的智能变电站建设也在飞速发展。智能变电站的发展以一次设备智能化以及二次系统网络化为主要特征,其中

二次系统网络化更为显著,与常规站相比,智能变电站二次系统结构和形态都发生了巨大变化^[1]。智能变电站二次回路采用基于 IEC 61850-9-2 组网的光纤网络通信,取代了常规站中以电缆组成的二次回路,简化了复杂的二次回路结构^[2]。这种共享网络通信的方式导致装置间的互联不再透明,使得现场运行、维护、检修人员查找故障时难度极大,甚

至无从下手。

近年来,国内外学者对于智能变电站二次系统故障定位提出了一些方法,可这些方法或多或少都存在一些不足。例如文献[1]采用专家系统方法,基于产生式规则,利用人类专家领域知识和经验,根据故障特征信息,对知识库进行规则推理和判断,从而得到故障诊断结果;但是知识库的建立工作量巨大,还需要进一步优化和改进。文献[2]建立了GOOSE回路的Petri网模型,实现故障诊断,此方法需人工判断是否触发变迁。文献[1,3]通过虚回路通信状态进行二次回路故障定位,但此方法无法具体定位到故障元件。

基于对现状的分析和二次系统故障定位更加准确的要求,下面提出基于证据推理(evidential reasoning, ER)算法的智能变电站保护二次回路故障定位方法。首先,通过QXmlStreamReader方式解析智能变电站全站系统配置(substation configuration description, SCD)文件,获取得到各智能电子设备(intelligent electronic device, IED)信息、IED关联信息,构建虚连接的数据结构并与物理连接相关联对应;再通过虚实回路对应信息形成故障元器件举证表;最后,根据多组IED关联对获得可疑故障元件集合。当发生故障告警时,根据采集到的数据信息及举证表,利用ER算法确定具体故障元件,实现故障诊断定位^[4-9]。

1 二次回路模型构建

1.1 SCD解析技术

Qt是一个应用程序开发框架,为用户提供了QtXml模块,能够实现对XML文件的解析。其中:DOM方式是将XML文件保存为树的形式,操作简单,便于访问,但需一次性解读并保存,对内存消耗大;SAX方式是通过虚拟函数直接向程序报告“解析时间”,速度较快,但不便访问。下面采取Qt提供的SAX解析器的替代——QXmlStreamReader,按顺序读取SCD文件。

根据QXmlStreamReader解析SCD的规则,节点依次为:“IED”“ExtRef”“LDevice”“DOI”,其中,“ExtRef”节点中包含虚回路的具体信息,具体字段信息如表1所示^[10-12]。

根据表1,通过解析SCD文件中的“ExtRef”字

表1 “ExtRef”字段信息

字段	代表信息
iedName	发送信号的设备名称
IdInst	发送信号的设备实例名称
Prefix	逻辑节点前缀
DaName	输出虚端子属性名称
DoName	输出虚端子对象名称
IdInset	发送信号的逻辑设备实例名称
InClass	发送信号的设备逻辑节点
IntAddr	内部虚端子引用路径

段,可以获取到一条虚连接的主要信息,包括发送设备、输出虚端子描述、输出虚端子引用路径、输入虚端子描述、输入虚端子引用路径、接收设备等。通过这些信息可以获取到完整的虚回路信息传输对,但无法跟物理接口相匹配。

IEC 61850-6定义了PhysConn元素描述IED访问点所对应的物理接口模型。通过QXmlStreamReader解析SCD的“IED”节点,可以获取到Type、Plug、Cable、Port这4个字段信息。其中:Type字段描述了物理接口的类型,如网口、光口;Port字段描述了本物理接口的具体信息;Cable字段描述了与该物理接口连接的光纤(电缆)信息。其中Port字段描述装置物理接口以“板卡号+端口号”的命名规则,如“4-A”表示4号板卡的1号接口;物理接口与虚拟接口之间以“:”隔开,如intAddr=<cbNamen:4-A;5-B:VLANID>,表示报文控制(cbNamen)从4板卡1接口发送到5板卡2接口,接收虚端子编号为VLANID。

1.2 虚实回路对应

根据上述,可通过解析SCD文件,建立虚连接与物理连接的对应关联模型,具体步骤如下:

1)以图1现场接线示意图为示例,图1表示某保护装置P₁的2-A接口通过光纤L₈与合并单元MU的2-B接口连接。通过解析SCD文件,获取IED物理接口模型,包括IED名称、接口号、接口所连接光纤标。最终,获取完整的物理端口信息连接表,如表2所示。

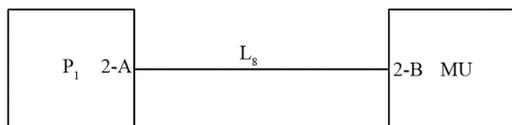


图1 现场接线

2)同时,通过解析SCD文件,解析Inputs元素

表 2 物理接口信息

二次智能设备	接口	光纤
P1	A	L8
MU	2-B	L8

获得虚端子连线,再通过 intAddr 找到与虚端子对应物理接口,通过物理接口表找到连接该接口的光纤及对侧设备名称、接口等信息;最终,完成虚实回路的对应关联。

2 二次回路可疑故障元器件集合

智能变电站中 IED 数量庞大,形成虚连接数也很多,且各虚回路存在交叉、重叠的可能性,如某一虚回路通信正常,则与该回路交叉、重叠的部分虚回路为正常的^[13-14]。反之,若某一元器件故障,则会引起多条虚回路通信故障^[15]。

当某一虚回路发生故障告警,可通过接收告警信息查看各虚回路的元器件,形成可疑故障元器件举证表。

以表 3 虚回路故障元器件举证为例说明此方法。表 3 中通信状态用 1、0 表示,1 表示通信状态异常,0 表示通信状态正常,空表示该通道无此元器件。

表 3 虚回路故障元器件举证

虚回路通道	通信状态	元器件		
		A	B	C
E1	1	1	1	1
E2	0	0		
E3	0			
E4	1	1	1	1
举证值		0	2	2

由表 3 可知举证值规则:当元器件对应该列的通信状态有 0 时,举证值取 0;当元器件对应该列的通信状态不含 0 时,其举证值为当列数值之和,如表 3 中 B 元器件与 C 元器件的举证为 2。通过表 3 可知,A 举证值为 0,即 A 可以排除在故障元器件以外,B、C 举证值均为 2,但无法确定具体故障元器件是 C 还是 B,则可得可疑故障元器件集合为{B,C}。

3 确定故障元器件

3.1 ER 算法的基本评价框架

如图 2 ER 算法评价框架所示,ER 算法评价框架分为 3 个层次,上层广义属性 Y 、基本属性 H 和与基本属性 H 相关的底层基本属性 e 。

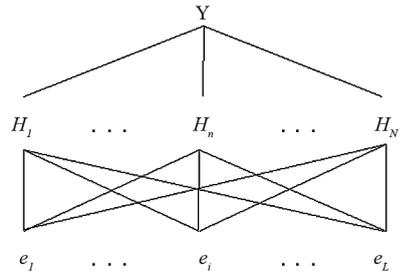


图 2 ER 算法评价框架

利用 ER 算法对一个对象 Y 进行评估时,首先找出与评估关联的基本属性 e (假设 L 个),即 $E = \{e_i, i=1, \dots, L\}$;再利用数学方法确定 L 个基本属性的对应权重 w ,即 $w = \{w_1, \dots, w_i, \dots, w_L\}$,其中 w_i 为第 i 个基本属性的权重,且满足关系式 $0 \leq w_i \leq 1$, $\sum_{i=1}^L w_i = 1$;然后对评估对象 Y 定义 n 个相排斥的评估等级 H ,即 $H = \{H_1, \dots, H_n, \dots, H_N\}$,对第 i 个指标 e_i 的评估如式(1)所示。

$$S(e_i) = \{(H_n, y_{n,i}), n=1 \dots N\} \quad i=1, \dots, L \quad (1)$$

式中: $y_{n,i}$ 为 e_i 被评价为 H_n 的信任度,且满足 $y_{n,i} \geq 0$ 和 $\sum_{n=1}^N y_{n,i} \leq 1$ 。上层属性 Y 被基本属性 e_i 支持评价为 H_n 的概率 $m_{n,i}$ 为

$$m_{n,i} = w_i y_{n,i}, m_{H,i} = 1 - \sum_{n=1}^N m_{n,i} = 1 - w_i \sum_{n=1}^N y_{n,i} \quad (2)$$

式中, $m_{H,i}$ 为第 i 个基本属性支持广义属性 Y 被评估为第 n 个等级 H_n 的程度,它为不确定量。 $m_{H,i}$ 包含 $m'_{H,i}$ 和 $m''_{H,i}$,其中 $m'_{H,i}$ 是由于 e_i 在整个评估中只起部分作用产生的, $m''_{H,i}$ 则是对基本属性评价不完备产生的。

ER 算法融合公式如下:

$$m_{n,J(i+1)} = K_{J(i+1)} [m_{n,J(i)} \times m_{n,i+1} + m_{H,J(i)} \times m_{n,i+1} + m_{n,J(i)} \times m_{H,i+1}]$$

$$m'_{H,J(i+1)} = K_{J(i+1)} [m'_{H,J(i)} \times m_{H,i+1}]$$

$$m''_{H,J(i+1)} = K_{J(i+1)} [m''_{H,J(i)} \times m''_{H,i+1} + m'_{H,J(i)} \times m''_{H,i+1} + m''_{H,J(i)} \times m'_{H,i+1}]$$

$$K_{J(i+1)} = [1 - \sum_{l=1}^N \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N m_{l,J(i)} m_{j,j+1}], \quad i = \{1, 2, \dots, L-1\}$$

$$y_n = \frac{m_{n,J(L)}}{1 - m_{H,J(L)}}, \quad n = 1, \dots, N$$

$$y_H = \frac{m''_{H,J(L)}}{1 - m'_{H,J(L)}} \quad (3)$$

式中, y_n 为通过融合各基本属性后 Y 被评估为第 n 个等级的信任度。根据式(3)可计算出 $m_{n,i}$ 和 $m_{H,i}$ 。

3.2 ER 算法在确定故障元器件中的应用

如上节所述,基本属性 H 代表可疑故障元器件,基本属性 e 代表收集到的告警信息,上层属性 Y 为最终确定的故障元器件。

根据 ER 算法的要求,需对评估体系的每一层互斥属性进行评估,在这里为具体故障元器件,即“故障元器件为 B,故障元器件为 C”,采用集合方式表示为 $H = \{H_N, N=1,2\} = \{\text{故障元器件为 } N, \text{故障元器件为 } C\}$ 。每个收集到的告警信息权重一样,且信息足够完整充分的情况下,则需计算以往元器件自检告警信息对其评价故障元器件的信任度。

当某智能变电站发生继电保护拒动时,调度中心收到告警信息后,根据告警信息列出通信异常的虚回路;根据通信异常的虚回路所包含的元器件列出举证表,计算出举证值;通过计算每条告警信息对其评估结果的信任度 $y_{n,i}$;最后通过融合公式计算出 $m_{n,i}$,即最终通过各告警信息确认对应故障元器件的概率以达到确认具体故障元器件的目的。

整体上,所提出的智能变电站二次回路故障诊断方法如图 3 所示。

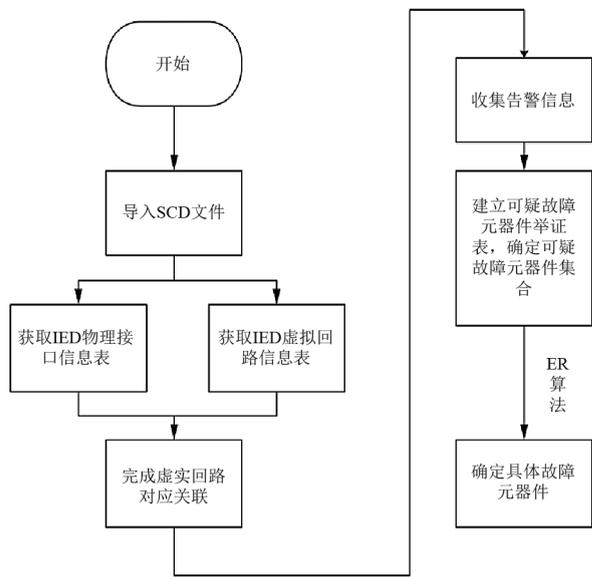


图 3 智能变电站二次回路故障诊断方法实现步骤

1) 通过解析 SCD 文件,获取二次回路设备物理接口信息表和虚回路接口信息,并完成物理接口与虚回路的对应关联。

2) 收集过程层告警信息,如发生故障告警,则通过虚实回路的对应,建立虚回路通道可疑元器件举证表,确定可疑元器件集合。

3) 通过 ER 算法具体确定故障元器件。

4 算法案例分析说明

图 4 为 A 站(220 kV 智能变电站)二次回路示意图,其中:MU 为合并单元;P2 为母差保护;P1、P3 为线路保护装置;IL 为智能终端;CL 为测控装置;SW 为交换机;L1—L12 为光纤。如图所示,此回路共有 12 条物理光纤回路、9 个元器件、12 块板卡、24 个物理接口。

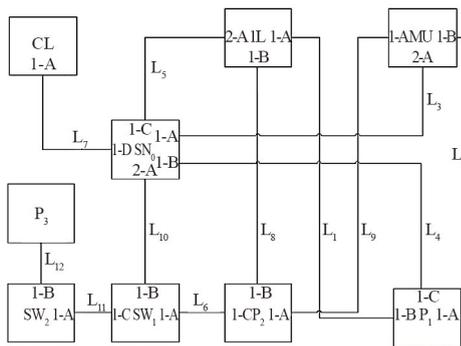


图 4 A 站(220 kV 智能变电站)继电保护二次回路

E1—E12 为 A 站二次回路的 12 条虚回路,根据 SCD 文件完成虚实回路对应,得到虚实回路对应表,如表 4 所示。

其中,比如虚回路 E1,为测控装置 CL 向 IL 发出的遥控命令,此虚回路对应的物理实回路中包含以下元器件:CL、CL_{1-A}、L₇、SW_{0.1-D}、SW₀、SW_{0.1-C}、L₅、IL_{2-A}、IL。

当 A 站保护发生保护拒动时,E5、E6 虚回路状态异常,调度收到告警信息保护装置 GOOSE 链路中断 e_1 、智能终端 GOOSE 链路中断 e_2 、线路 L1 通信中断 e_3 。

通过表 4 可得,此回路共有 12 条物理光纤回路、9 个元器件、12 块板卡、24 个物理接口,即 53 个可疑故障点。通过上述举证表建立规则和举证值计算方法,求得可疑点 L_1 、 $P_{1.1-B}$ 、 IL_{1-A} 的举证值为 2,其余举证值为 0,则可疑元器件集合为 $\{L_1, P_{1.1-B}, IL_{1-A}\}$ 。接下来利用 ER 算法公式协助确定具体故障元器件。

以 A 站、保护拒动、保护装置 GOOSE 链路中断 e_1 且实际故障元器件属于 $\{L_1, P_{1.1-B}, IL_{1-A}\}$ 为信息关键词,在调度告警信息库进行检索,搜到告警信息共 18 条,其中实际故障元器件 L_1 有 14 条、 $P_{1.1-B}$ 有 4 条、 IL_{1-A} 0 条;同样地,告警信息 e_2 、 e_3 分别搜到

表 4 虚实回路对应

编号	虚回路	物理回路
E1	遥控	CL、CL _{1-A} 、L ₇ 、SW _{0.1-D} 、SW ₀ 、SW _{0.1-C} 、L ₅ 、IL _{2-A} 、IL
E2	遥信	IL、IL _{2-A} 、L ₅ 、SW _{0.1-C} 、SW ₀ 、SW _{0.1-D} 、L ₇ 、CL _{1-A} 、CL
E3	遥测	MU、MU _{2-A} 、L ₃ 、SW _{0.1-A} 、SW ₀ 、SW _{0.1-D} 、L ₇ 、CL _{1-A} 、CL
E4	母线保护直跳	IL、IL _{1-B} 、L ₈ 、P _{2.1-B} 、P ₂
E5	线路保护直采直跳	MU、MU _{1-B} 、L ₂ 、P _{1.1-A} 、P ₁ 、P _{1.1-B} 、L ₁ 、IL _{1-A} 、IL
E6	线保护路断路器位置	IL、IL _{1-A} 、L ₁ 、P _{1.1-B} 、P ₁
E7	母差保护远跳线路 1	P ₂ 、P _{2.1-C} 、L ₆ 、SW _{1.1-A} 、SW ₁ 、SW _{1.1-B} 、L ₁₀ 、SW _{0.2-A} 、SW ₀ 、SW _{0.1-B} 、L ₄ 、P _{1.1-C} 、P ₁
E8	母差保护远跳线路 2	P ₂ 、P _{2.1-C} 、L ₆ 、SW _{1.1-A} 、SW ₁ 、SW _{1.1-C} 、L ₁₁ 、SW _{2.1-A} 、SW ₂ 、SW _{2.1-B} 、L ₁₂ 、P _{3.1-C} 、P ₃
E9	电压切换	MU、MU _{2-A} 、L ₃ 、SW _{0.1-A} 、SW ₀ 、SW _{0.1-C} 、L ₅ 、IL _{2-A} 、IL
E10	线路 1 启动失灵保护	P ₁ 、P _{1.1-C} 、L ₄ 、SW _{0.1-B} 、SW ₀ 、SW _{0.2-A} 、L ₁₀ 、SW _{1.1-B} 、SW ₁ 、SW _{1.1-A} 、L ₆ 、P _{2.1-C} 、P ₂
E11	母差保护刀闸	IL、IL _{1-A} 、L ₁ 、P _{1.1-B} 、P ₁
E12	母差保护直采	MU、MU _{1-B} 、L ₂ 、P _{1.1-A} 、P ₁

24 条、28 条,实际故障元器件 L₁ 分别有 15 条、18 条,实际故障元器件 P_{1.1-B} 分别有 0 条、10 条,实际故障元器件 IL_{1-A} 分别有 9 条、0 条。

将可疑故障元器件集合 {L₁, P_{1.1-B}, IL_{1-A}} 替换为 {1, 2, 3}, 同时将以上数据代入 ER 算法式(1)中可得:

$$S(e_1) = \{(H_1, 0.778), (H_2, 0.222)\}$$

$$S(e_2) = \{(H_1, 0.625), (H_3, 0.375)\}$$

$$S(e_3) = \{(H_1, 0.643), (H_2, 0.357)\}$$

同时,基于每个告警信息权重一样即各属性权重为 1/3,且评估规则完备的情况下,将各数据代入式(1)、式(2),分别得到:

$$m_{1,1} = 0.260, m_{2,1} = 0.074, m_{3,1} = 0$$

$$m_{1,1} = 0.209, m_{2,1} = 0, m_{3,1} = 0.125$$

$$m_{1,1} = 0.214, m_{2,1} = 0.119, m_{3,1} = 0$$

最终,通过计算可得 m_{1,1} 的合成结果最大时的故障元器件最有可能为光纤 L₁。因此应先检查光纤 L₁ 是否损坏。

5 结 论

ER 算法不仅可以解决确定性问题,而且在不确定

定性问题的处理中应用效果也尤为突出。针对智能变电站二次回路故障诊断难、无法具体确定故障部位的问题,上面提出基于 ER 算法的智能变电站二次回路故障定位方法,达到了快速准确诊断二次回路故障的效果。同时,所提方法克服了故障诊断定位过程中各告警信息间的冲突问题,减少了智能变电站排查故障的工作量和时间,提高了运行维护效率,对智能变电站二次系统运行维护管理的发展有着重要意义。

参考文献

- [1] 聂德桢.智能变电站二次系统故障诊断方法研究[D].济南:山东大学,2014.
- [2] 周红阳,黄佳胤,张弛,等.基于 Petri 网的智能变电站 GOOSE 回路故障诊断[J].南方电网技术,2017,11(6):49-56.
- [3] 高磊,杨毅,刘珂,等.基于举证表的智能变电站过程层通道故障定位方法[J].电力系统自动化,2015,39(4):147-151.
- [4] 左浩,马亮.基于 ER 算法的潜艇鱼雷武器系统损伤等级评估[J].鱼雷技术,2008,16(1):48-51.
- [5] YANG J B, XU D L. Nonlinear information aggregation via evidential reasoning in multiattribute decision analysis under uncertainty[J].IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, 2002, 32(3):376-393.
- [6] 田力智.智能变电站 SCD 虚连接辅助设计关键技术的研究与开发[D].成都:西南交通大学,2016.
- [7] 周林.基于 ER 算法的公路交通事件检测研究[D].合肥:合肥工业大学,2016.
- [8] YANG J B. Rule and utility based evidential reasoning approach for multiattribute decision analysis under uncertainties [J]. European Journal of Operational Research, 2001, 131(1):31-61.
- [9] 李瑞生,李燕斌,周逢权,等.智能变电站功能架构及设计原则[J].电力系统保护与控制,2010,38(21):24-27.
- [10] 田力智.智能变电站 SCD 虚连接辅助设计关键技术的研究与开发[D].成都:西南交通大学,2016.
- [11] 高兆丽.智能变电站过程层故障诊断与状态评估技术研究[D].济南:山东大学,2015.
- [12] 徐彪,尹项根,张哲,等.基于拓扑建模的电网故障诊断优化模型[J].电网技术,2018,42(10):3241-3248.
- [13] 戴志辉,谢军,葛红波,等.考虑报文影响的集中式保护系统可靠性分析[J].电力系统及其自动化学报,2018,30(11):75-82.

(下转第 78 页)

一起低频减载误动作事件分析及改进措施

张华杰¹, 杨紫苓², 刘明忠¹, 张纯¹

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;

2. 国网四川省电力公司南充供电公司, 四川 南充 637000)

摘要:集成于线路保护装置的低频减载功能作为电力系统最后一道防线具有重要意义且应用广泛,但低频减载功能误动作时有发生。为提高配电网供电可靠性,文中针对一起低频减载误动作事件起因进行分析,发现铁磁谐振为误动作诱因,同时从保护装置二次回路角度出发,分析认为装置存在小PT饱和、计算误差等问题导致相间电压频率计算出现偏差,进而引起低频减载功能误动作。通过电磁仿真手段对误动作原因进行验证,其仿真结果与误动作事件实际录波吻合。最后,依据误动作原因,从改善装置电压采样、优化频率计算等方面提出了4点改进措施。

关键词:低频减载;铁磁谐振;误动作;二次回路;频率算法

中图分类号:TM 77 文献标志码:B 文章编号:1003-6954(2022)05-0075-04

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220514

Analysis of A Low-frequency Load Shedding Misoperation Event and Its Improvement Measures

ZHANG Huajie¹, YANG Ziling², LIU Mingzhong¹, ZHANG Chun¹

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

2. State Grid Nanchong Electric Power Supply Company, Nanchong 637000, Sichuan, China)

Abstract: The low-frequency load shedding function integrated in line protection device is of great significance and widely used as the last line of defense in power system, but the misoperation of low-frequency load shedding function occasionally occurs. In order to improve the power supply reliability of distribution network, the causes of a low-frequency load shedding misoperation event are analyzed, in which ferromagnetic resonance is the cause of misoperation. From the perspective of secondary circuit of protection device, it is analyzed that the small PT saturation and calculation error lead to the deviation of phase-to-phase voltage and frequency calculation, which causes the misoperation of low-frequency load shedding function. The causes of misoperation are verified by electromagnetic simulation respectively, and the results are consistent with the actual recording of misoperation event. Finally, according to the causes of misoperation, four improvement measures are put forward from improving voltage sampling and optimizing frequency calculation.

Key words: low-frequency load shedding; ferromagnetic resonance; misoperation; secondary circuit; frequency algorithm

0 引言

当电网发生严重故障导致局部电网与主网解列后,低频减载装置可靠动作^[1-2],能够维持局部电网功率平衡,低频减载是防止系统频率崩溃最后一道防线^[3]。电力系统低频减载功能可集成于配电网线路保护^[4]中或者通过集中式减载装置进行配

置^[5],前者具有接线简单、运行维护方便、投资少等优点,应用广泛。但集成于配电网线路保护装置的低频减载功能误动作时有发生^[6],目前针对低频减载功能误动作原因缺乏深入研究,为提高配电网供电可靠性,有必要开展集成于配电网线路保护装置的低频减载功能误动作原因分析。

自设计规范^[7]实施后,配电网线路保护装置的频率通过相间电压进行计算,因不接地系统固有的

中性点偏移问题而导致的系统频率计算误差大大降低,但因铁磁谐振造成的线路保护装置低频减载误动作时有发生。下面针对一起因配电网铁磁谐振导致低频减载误动作的事件开展深入分析,通过仿真进行误动作原因验证,并提出相应解决措施。

1 低频减载误动作事件诱因分析

2022 年某日,某 110 kV 常规变电站某条馈线保护装置的低频减载功能动作,动作报文显示动作频率为 48.6 Hz,装置内部提取的动作录波如图 1 所示。此时保护装置低频减载频率定值为 49 Hz,低频减载电压定值为 70 V,低频减载延时定值为 0.15 s。

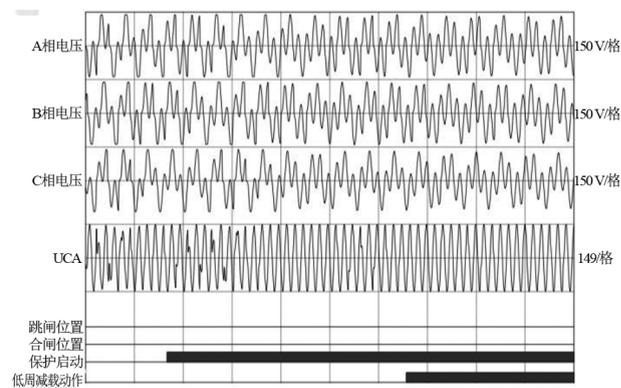


图 1 误动作事件装置录波

通过图 1 可以发现,系统相电压发生严重的畸变,含有大量的分频谐波,符合配电网铁磁谐振特性,低频减载动作时该变电站正常并网运行,没有出现脱网,变电站高压侧频率未出现异常,判定为铁磁谐振期间装置低频减载功能的误动作。

不接地系统中,当配电网系统中对地电容与传统电磁式电压互感器的额定激磁电感的比值在一定范围内,因外部激励作用(如系统发生单相瞬时接地故障)造成系统相电压升高,从而导致电压互感器铁芯饱和并使该相的激磁感抗迅速下降。此时激磁感抗和系统容抗相匹配,产生谐振过电压。当系统谐振条件未破坏时,配电网谐振可持续存在^[8]。

铁磁谐振持续过程中,系统中三相励磁电感交替变化,造成系统中性点电压持续偏移,将导致系统相电压含有较大的分频或倍频谐波,其中 1/2 分频、1/3 分频谐波是铁磁谐振的重要特征^[9]。

2 低频减载误动作分析及验证

经配电网铁磁谐振特性分析可知,铁磁谐振会导致中性点电压持续变化,系统相间电压并不会因谐振而产生变化。但该线路保护装置的内部计算合成的相间电压存在严重畸变(图 1 中第 4 通道),造成误动作的原因需针对保护装置及其二次回路特性进一步分析。

10 kV 线路保护装置二次接线回路如图 2 所示。由图可知,线路保护装置通过内部小 PT 将二次电压信号转换成 AD 芯片所能承受的小信号,并由装置内部计算合成的相间电压作为频率计算依据。

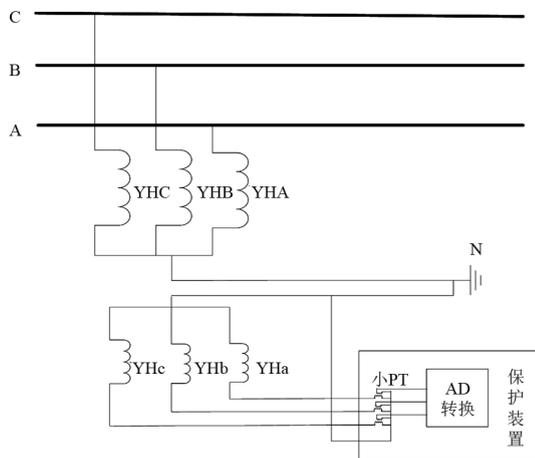


图 2 保护装置二次回路

在铁磁谐振情况下保护装置存在小 PT 饱和、采样计算误差等问题,将导致装置计算频率与实际系统相差较大,引发低频减载误动作,通过 PSCAD 软件进行电磁仿真模拟上述现象,验证装置误动作原因的正确性。

2.1 模拟小 PT 饱和

当发生铁磁谐振时,相电压幅值可达正常电压幅值的 2~3 倍,将造成装置内部小 PT 饱和。首先通过小 PT 等效电路原理分析其饱和时造成的电压采集影响,装置小 PT 等效电路如图 3 所示。

装置小 PT 的电路与双绕组变压器 T 形等效电路一致,其中: X_L 为二次电缆的等效电抗; V_1 为电压互感器二次绕组电压; V_2 为小 PT 副边绕组电压; R_m 和 X_m 分别为小 PT 的激磁电阻和激磁电抗,合在一起称为激磁阻抗 Z_m 。因小 PT 铁芯磁路的磁化曲线的非线性关系,其激磁阻抗 Z_m 不是一个常值,随着小 PT 饱和程度的增加而减小,因此小 PT 饱和时副

边电压 V_2 会发生非线性变化,导致装置采集的相电压出现畸变。

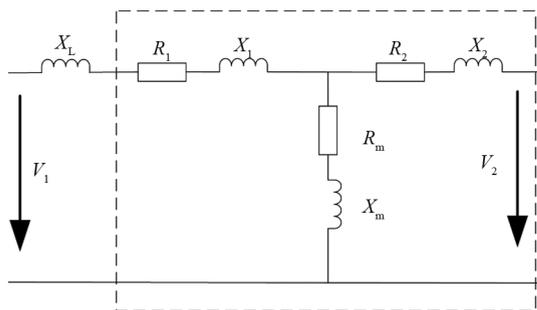


图 3 装置小 PT 等效电路

通过电磁仿真手段进行验证,模拟配电网系统发生铁磁谐振,造成小 PT 饱和,并采用常规的频率算法得到相间电压频率计算结果,仿真波形如图 4 所示。其中通道 1—5 分别为 10 kV 线路电压(A 相)、小 PT 原边电压(A 相)、小 PT 副边电压(A 相)、装置内部计算相间电压(AB)、AB 相间电压计算频率(离散傅里叶变换算法)。

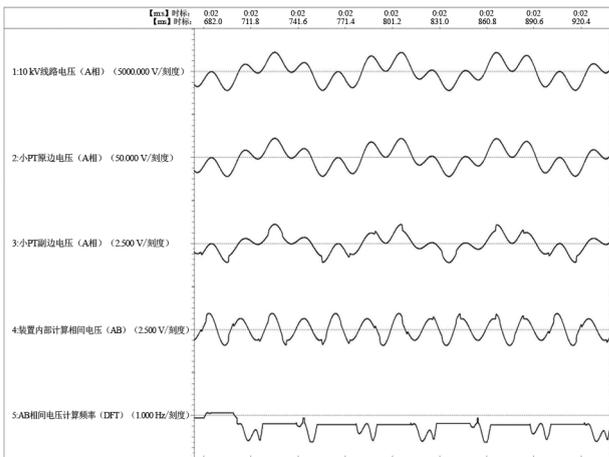


图 4 铁磁谐振导致装置小 PT 饱和和仿真波形

通过波形可以看出因小 PT 饱和导致装置内部计算相间电压(AB)出现畸变,与图 1 畸变情况相符。采用基于离散傅里叶变换(discrete fourier transform, DFT)变化插值的频率算法^[10]的频率计算结果出现波动,从图 1 可以看出,频率计算结果小于 49 Hz(小于 50 Hz 为负)持续时间超过 0.15 s,这将会导致保护装置的低频减载功能误动作。

2.2 模拟计算误差

因装置计算频率所使用的相间电压是通过所采集的各相电压进行合成的,装置固有的硬件特性将会导致所采样的各通道相电压存在延时。

通过模拟系统 A 相故障后 0.1 s 后恢复,单相故障引发配电网铁磁谐振,同时装置 A 相电压因采

样及计算存在 0.5 ms 延时,仿真结果如图 5 所示,其中通道 1—6 分别为 10 kV 线路电压(A 相)、二次电压(A 相)、装置内部采样电压(A 相)、装置内部计算相间电压(AB)、AB 相间电压计算频率(零交越法^[11])、AB 相间电压计算频率(DFT 算法)。

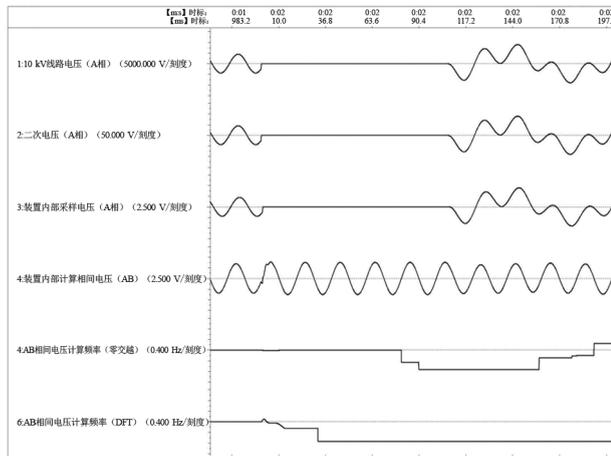


图 5 装置采样延时仿真波形

通过图 5 可以看出,系统未发生铁磁谐振时,频率计算结果将维持在 50 Hz,通道计算延时并未对正常情况下装置的合成相间电压频率计算造成影响,而谐振期间零交越法和基于 DFT 算法的频率计算结果均出现变化(以 50 Hz 为基准),可能导致保护装置的低频减载功能误动作。

3 改进措施

下面分别从装置硬件改造和软件升级角度出发,提出 4 种改进的措施。

3.1 提升装置电压通道线性采样范围

目前,相关标准还未有效规范 10(35) kV 不接地系统保护装置电压通道的线性采样范围,导致因小 PT 饱和造成配电网谐振期间装置电压采样出现非线性变化。建议不接地系统的保护装置提升电压通道线性采样范围,配置高饱和特性的小 PT,使装置所采集的相电压更真实地反应系统一次电压,避免装置低频减载功能误动作。

3.2 配置相间电压采集通道

为避免因装置小 PT 饱和、计算误差导致保护装置所合成的系统相间电压结果不正确,装置可配置相间电压采集通道,直接通过物理方式外接相间电压,可解决谐振期间相间电压计算不准的问题,有效避免装置低频减载功能误动作。

3.3 改进频率计算方法

因为常规 DFT 的频率计算方法的栅栏效应,仅能准确计算出含有倍频谐波的系统频率,无法准确计算出含有分频谐波的系统频率。因此需要在 DFT 算法的基础上加入合适的窗口函数^[12],识别因小 PT 饱和或计算误差所产生的非特征谐波,提升频率计算结果的准确度。或采用多种频率计算方法相结合的方式判别系统频率,进而避免因单一频率算法缺陷导致装置低频减载功能误动作。

3.4 升级装置逻辑

目前,依据文献[7],装置均可通过频率变化率(滑差)来闭锁装置低频减载功能。该功能可防止短时间窗内因计算频率大幅变化导致装置误动作的情况发生,但仍没办法完全防止低频减载功能误动作发生。低频减载功能可针对配电网铁磁谐振的分频谐波特性或零序电压异常等特点增加相关闭锁逻辑。

4 结 论

通过低频减载功能误动作实例,深入分析了引发保护装置在配电网铁磁谐振下误动作原因,提出了装置小 PT 饱和、计算误差会引起装置频率计算出现误差的观点,并从仿真波形上证明所提观点的正确性。根据低频减载误动作原因,提出了 4 点可改进措施建议,其中:措施 1 和措施 2 均为从装置硬件上进行升级,改善装置采集误差问题;措施 3 和措施 4 通过软件方式升级,分别提高频率计算准确度、增加铁磁谐振识别逻辑防止低频减载功能误动作。

参考文献

[1] 唐倩,沈旭,李圆智,等.电网低频减载技术及标准研究[J].电工技术,2021(23):46-48.

(上接第 74 页)

[14] HE Jinghan, LIU Lin, LI Wenli, et al. Development and research on integrated protection system based on redundant information analysis [J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(2): 108-120. DOI:10.1186/s41601-016-0024-y.

[15] YANG Ting, ZHAO Rui, ZHANG Weixin, et al. On the modeling and analysis of communication traffic in intelligent electric power substations [J]. IEEE

[2] 高剑,朱童,罗异,等.考虑配网负荷曲线特性的低频减载执行方案调整方法[J].电力系统保护与控制,2021, 49(24):159-167.

[3] 袁季修.试论防止电力系统大面积停电的紧急控制——电力系统安全稳定运行的第三道防线[J].电网技术,1999,23(4):3-6.

[4] 杨博,解大,陈陈,等.电力系统低频减载的现状和应用[J].华东电力,2002,30(9):14-18.

[5] 王怀远,何培灿,温步瀛.基于响应信息的分散式低频减载方案[J].电网技术,2019,43(8):2976-2982.

[6] 王彩丽,王俊辉,白海松,等.10 kV 线路低频减载误动作问题分析及改进[J].电工电气,2017(10):48-50.

[7] 国家电网公司科技部.10 kV~110 kV 线路保护及辅助装置标准化设计规范:Q/GDW 1766—2015[S].北京:中国电力出版社,2015.

[8] 何龙,马金财,杜龙基,等.小电流接地系统铁磁谐振过电压关键影响因素辨识[J].电气工程学报,2020, 15(2):61-69.

[9] 曾祥君,杨先贵,王文,等.基于零序电压柔性控制的配电网铁磁谐振抑制方法[J].中国电机工程学报,2015, 35(7):1666-1673.

[10] HART D, NOVOSEL D, HU Yi, et al. A new frequency tracking and phasor estimation algorithm for generator protection.[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(3):1064-1073.

[11] EHRMAN Leonard. Analysis of a zero-crossing frequency discriminator with random inputs[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Navigational Electronics, 1965, 12(2): 113-119.

[12] VISHWAKARMA Amit Kr, SUKUMAR N, SUMATHI P. Two-dimensional DFT with sliding and hopping windows for edge map generation of road images[J]. IET Image Processing, 2022, 16(4):972-984.

作者简介:

张华杰(1990),男,硕士,工程师,从事电力系统保护与控制工作;

杨紫苓(1988),女,硕士,高级工程师,从事电力调度运行、自动化、通信、保护等工作。

(收稿日期:2022-07-19)

Transactions on Power Delivery, 2016, 32(3): 1329-1338.

作者简介:

汪勤(1983),男,硕士,高级工程师,研究方向为继电保护;

吴旻(1986),男,工程师,研究方向为继电保护;

姚辉昌(1978),男,高级工程师,研究方向为继电保护;

李江洋(1997),男,研究方向为继电保护。

(收稿日期:2022-08-23)

一起 220 kV 变压器匝间短路故障诊断与分析

梁弘毅¹, 廖文龙², 刘睿²

(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电力科学研究院, 四川 成都 610041)

摘要:文中对一起 220 kV 变压器匝间短路故障进行分析,从保护动作、诊断试验以及解体检查 3 个维度,对变压器典型匝间短路的故障特征及诊断过程进行介绍。纵联差动和增量差动保护提示 A 相绕组存在匝间或高阻接地故障;低电压空载和绕组变形试验表明 A 相存在匝间短路或磁路故障;变比测试提示高压绕组存在匝间短路。解体检查发现 A 相高压绕组确实存在匝间短路故障,验证了所诊断分析的结论。

关键词:变压器;匝间短路;故障诊断

中图分类号:TM 863 文献标志码:B 文章编号:1003-6954(2022)05-0079-04

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220515

Diagnosis and Analysis of An Inter-turn Short-circuit Fault for 220 kV Transformer

LIANG Hongyi¹, LIAO Wenlong², LIU Rui²

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

Group, Chengdu 610021, Sichuan, China; 2. State Grid Sichuan Electric Power

Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract:An inter-turn short-circuit fault of 220 kV transformer is analyzed, and the fault characteristics and diagnosis process of typical inter-turn short-circuit of transformer are introduced in detail from protection action, diagnostic test and disassembly inspection. The longitudinal differential protection and incremental differential protection point out that winding in phase A has inter-turn or high resistance grounding fault. The low-voltage no-load and winding deformation tests show that phase A has inter-turn short-circuit fault or magnetic circuit fault, and the transformation ratio test indicates that the high-voltage winding has inter-turn short-circuit. During the disassembly inspection, it is found that high-voltage winding in phase A has inter-turn short-circuit fault, which verifies the diagnosis and analysis conclusion.

Key words: transformer; inter-turn short-circuit; fault diagnosis

0 引言

随着社会经济水平的不断发展,电力用户对供电可靠性的要求越来越高。大型电力变压器作为电网的核心设备,一旦故障,将可能引起大面积停电,严重影响企业的正常生产,造成重大损失。因此,开展变压器故障诊断与分析,及时发现并防范各类变压器典型故障,对于提高变压器管理水平和供电可靠性具有重要意义。

据文献[1],变压器匝间故障占电网大型变压器故障的 70%~80%,是变压器内部故障的主要形式。针对此故障已有较多研究,如:文献[2]对一起 110 kV 变压器调压线圈的匝间短路故障进行了诊断分析;文献[3—4]对两起穿缆式套管顶部进水引起变压器匝间短路故障进行了诊断分析;文献[5]对一起 220 kV 主变压器高压绕组匝间短路故障进行分析,通过电路仿真,发现高压绕组单相匝间短路匝数较多时电气特征与低压绕组相间短路相似,即两相电流相位接近、另一相电流反相,并对此现象进

行了仿真验证;文献[6—7]对变压器绕组匝间短路故障进行有限元仿真,提出了匝间短路故障的电、热、力特征,为匝间短路故障保护提供支撑;文献[8—10]从差动电流、中性点电流、阻抗、电热特性融合等角度出发,提出了变压器匝间短路的识别和保护方法。

变压器绕组匝间短路的特征及危害与发生短路的匝数相关;短路匝数较多时,故障电气特征及物理特征明显,易于诊断;当短路匝数较少时,其故障特征和诊断难度也相对更大。下面对一起 220 kV 变压器匝间短路故障进行分析,从保护动作、诊断试验以及解体检查 3 个维度,对变压器典型匝间短路的故障特征及诊断过程进行了详细介绍。

1 故障概述

220 kV 某变电站 2 号主变压器双套保护差动动作,主变压器三侧断路器三相跳闸。现场检查发现:2 号主变压器本体瓦斯观察窗有大量气体;现场二次回路检查及保护定值检查无异常;报告动作相别为 A 相,差流折算至高压侧一次电流约 130 A。

故障主变压器型号为 SFPSZ9-120000/220,额定容量为 120 000/120 000/60 000 kVA,额定电压为 230/121/10.5 kV,联接组标号为 YN,yn0,d11,该变压器故障跳闸时已运行 18 年。

2 保护动作分析

2.1 2 号主变压器 1 号保护 (PCS-978)

28 ms 时纵差工频变化量差动保护动作,动作相别为 A 相;纵差电流 ΔI_d 最大值为 $0.39I_e$ (I_e 为主变压器高压侧额定电流 1.2 A) 即 0.468 A,大于 $0.2I_e$ (即工频变化量启动值 I_{dh}) 且大于 $0.6\Delta I_r$ (ΔI_r 为制动电流) 即 0.383 A,故 2 号主变压器 1 号保护装置正确动作。动作方程如式(1)所示,动作特性如图 1 所示。

$$\begin{cases} \Delta I_d > 1.25\Delta I_{dt} + I_{dth} \\ \Delta I_d > 0.6\Delta I_r & \Delta I_r < 2I_e \\ \Delta I_d > 0.75\Delta I_r - 0.3I_e & \Delta I_r > 2I_e \end{cases} \quad (1)$$

$$\Delta I_r = \max\{|\Delta I_{1\varphi}| + |\Delta I_{2\varphi}| + \dots + |\Delta I_{m\varphi}|\}$$

$$\Delta I_d = |\Delta \dot{I}_1 + \Delta \dot{I}_2 + \dots + \Delta \dot{I}_m|$$

式中: ΔI_{dt} 为浮动门槛电流; I_{dth} 为固定门槛电流; ΔI_r

为各侧总差动电流; $\Delta I_{m\varphi}$ 为第 m 侧 φ 相差动电流; ΔI_m 为第 m 侧差动电流。

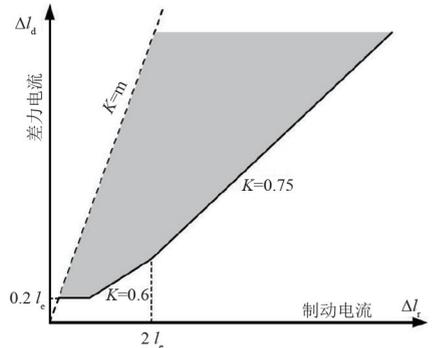


图 1 主变压器纵差工频变化量差动保护动作特性

2.2 2 号主变压器 2 号保护 (WBH-801)

23 ms 时增量差动保护动作,动作相别为 A 相。差动电流 $I_{op} = 0.435$ A,制动电流 $I_{res} = 0.468$ A, I_{op} 大于 $0.2I_e$ (即增量差动启动值) 且大于 $0.65\Delta I_{res}$ 即 0.304 A。A 相满足动作条件,2 号保护动作正确。动作方程如式(2)所示,动作特性如图 2 所示,图中 K 为比率制动系数。

$$\begin{cases} I_{op} > 0.2I_e \\ I_{op} > 0.65I_{res} \end{cases} \quad (2)$$

其中: $I_{op} = |\Delta \dot{I}_1 + \Delta \dot{I}_2 + \dots + \Delta \dot{I}_n|$

$$I_{res} = |\Delta \dot{I}_{max}|$$

式中: I_{res} 为制动电流; ΔI_n 为第 n 侧差动电流; $\Delta \dot{I}_{max}$ 为 $\Delta \dot{I}_1, \Delta \dot{I}_2, \dots, \Delta \dot{I}_n$ 中幅值最大者。

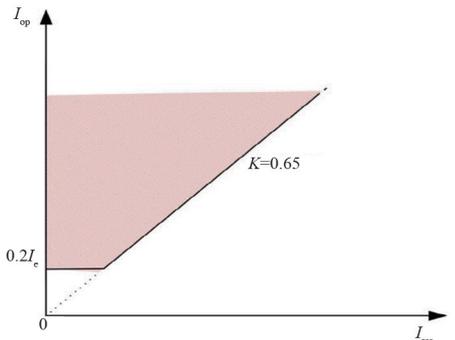


图 2 主变压器增量变化量差动动作特性

2.3 2 号主变压器非电量保护 (WBH-802)

2 号主变压器非电量保护发出本体轻瓦斯动作信号,该信号只作用于发告警信号,不涉及跳闸。从保护原理可知,2 号主变压器工频变化量差动及增量差动保护主要解决主变压器内部轻微匝间故障或高阻接地故障,具有很高的灵敏度。结合现场保护动作信号及波形图,2 号主变压器的 1 号、2 号保护装置正确动作,故障为 A 相,差流折算至高压侧一

次电流约为 130 A,结合主变压器 1 号保护工频变化量差动原理及主变压器 2 号增量差动保护原理,初步判断为主变压器绕组内部 A 相有轻微匝间故障或高阻接地故障。

3 诊断试验

3.1 油色谱检测

主变压器跳闸后,对主变压器中部油样、下部油样、瓦斯内气体、瓦斯内油样进行了色谱分析。检测结果如表 1 所示。

表 1 跳闸后主变压器油色谱检测结果 单位:uL/L

部位	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	H ₂	CO	CO ₂	总烃
中部	19.90	10.2	4.74	11.27	15.4	1 131.6	5 285.7	46.17
下部	20.37	10.6	4.91	11.72	15.9	1 124.4	5 291.9	47.61
瓦斯	186.60	106.0	7.34	278.20	520.0	1 567.8	4 794.1	578.20

故障前,油色谱检测正常。故障后,本体油色谱中乙炔检测值超过注意值,三比值编码为 111,故障类型为电弧放电。分析可能的原因有线圈匝间或层间短路、相间闪络、线圈熔断、引线对其他接地体放电等。

3.2 频率响应测试

进一步开展电气诊断试验。绕组频率响应测试显示,中压、低压各相绕组横向一致性较好,未发现异常,如图 3 所示。但 A 相高压绕组在低频段与 B、C 相关性较差,相关系数 0.5,如表 2 所示。根据 DL/T 911—2016《电力变压器绕组变形的频率响应分析法》判断 A 相高压绕组存在异常。与交接试验的频率响应曲线相比(如图 4 所示),发现 A 相高压绕组在低频段与交接试验时的曲线相关性较差,其余各相绕组频率响应曲线与交接试验时相比均无异常。由于 A 相高压绕组频率响应异常区段为低频段,对应于绕组电感异常,推断 A 相存在匝间短路故障。

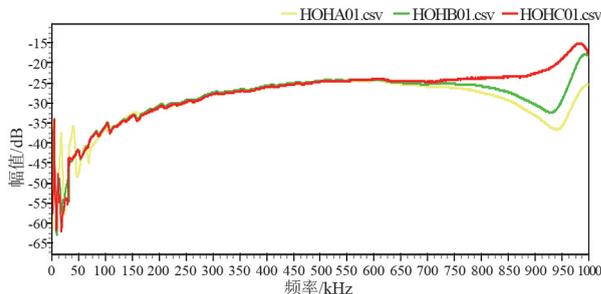


图 3 主变压器高压侧绕组频率响应曲线

表 2 高压三相绕组间频率响应相关系数

频段	频率/kHz	相关系数 R ₁₂	相关系数 R ₁₃	相关系数 R ₂₃
低频 LF	(0,100]	0.53	0.50	1.55
中频 MF	(100,600]	2.44	2.40	3.31
高频 HF	(600,1000]	0.63	0.20	0.20
全频 AF	(0,1000]	1.13	0.62	1.10

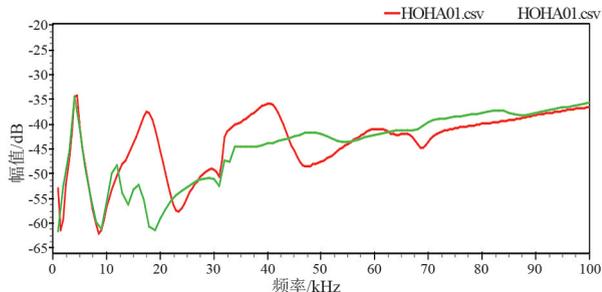


图 4 A 相高压绕组频率响应曲线与交接曲线

3.3 低电压空载试验

对于匝间短路缺陷,低电压空载电流测试比绕组直流电阻、变压比、短路阻抗等诊断方法具有更高的灵敏度。低电压空载电流测试结果如表 3 所示。试验发现,a-bc 与 c-ab 相绕组空载电流严重异常,而 b-ca 相绕组空载电流正常,故判断 A 相磁路及磁路相关绕组存在故障。

表 3 低电压空载电流试验结果

加压端子	短接端子	故障后试验		交接试验	
		U/V	I/A	U/V	I/A
a-b	bc	19.45	2.798	200	0.243 5
b-c	ca	220.90	0.302	200	0.319 4
c-a	ab	19.64	2.840	200	0.365 1

3.4 绕组直流电阻测量

对主变压器各绕组进行直流电阻测量,依据 Q/GDW 1168—2013《输变电设备状态检修试验规程》:“1.6 MVA 以上变压器,各项绕组电阻相间的差别不应大于三相平均值的 2%,无中性点引出的绕组,线间差别不应大于三相平均值的 1%;同相初值差不超过±2%”,未发现明显异常。

3.5 变压比测量

变压比测量发现 A 相高压绕组对低压绕组的部分挡位的测量结果不合格:额定挡误差超过 0.5%;有 2 个挡位与初值差超过 1%,最大为 1.45%。B、C 相变压比误差测量结果均符合规程 Q/GDW 1168—2013《输变电设备状态检修试验规程》的要求。

测量中压绕组对低压绕组变压比时,试验仪器

报“接线错误”,无法进行测试。反复排查后确认试验接线无问题。经分析认为,在变压器一个绕组存在匝间短路时,由于匝间短路产生短路电流的去磁效应会引起铁芯磁通减少;当使用故障绕组作为原边、正常绕组作为副边进行试验时,电压比变化不明显,特别是短路匝数较少时,甚至会导致电压比测量值接近正常值;而使用正常绕组作为原边测试时,故障绕组匝间短路产生的短路电流需由原边提供,导致试验设备因过流报“接线错误”。因此该主变压器的变压比测量,虽然能够完成高压绕组对中压绕组的测量,但测量数据已失去参考意义;测量中压绕组对低压绕组变压比时报“接线错误”,说明匝间短路位于高压绕组。

3.6 绝缘电阻及电容介损测试

绝缘电阻、电容及介质损耗测试数据均无明显异常。

综合以上诊断性试验结果,初步判断 2 号主变压器高压侧 A 相差动保护跳闸,是由 A 相高压绕组匝间短路故障引起,且短路的匝数较少。

4 解体检查

将该变压器返厂后,对其进行了拔圈检查,如图 5 所示,发现 A 相高压线圈确实存在绕组匝间短路故障,其余绕组无异常。短路放电烧蚀部位位于高压线圈上端部,涉及短路匝数较少,放电烧蚀程度整体较轻。解体检查结果与诊断分析结论一致。



图 5 A 相高压绕组匝间短路

5 结论

上面对一起 220 kV 变压器匝间短路故障进行

了分析,从保护动作、诊断试验以及解体检查 3 个维度,对变压器典型匝间短路的故障特征及诊断过程进行了介绍,形成以下结论:

1) 纵联差动及增量差动保护方法,对于变压器匝间短路故障保护,具有较好的灵敏度,所述故障案例中 2 套差动保护均正确动作;

2) 电气诊断试验方法中,低电压空载电流测试相比其余试验项目,在轻微匝间短路诊断上,具有更好的灵敏度;

3) 电压比测量时,匝间短路绕组作为电流短路绕组时,会导致试验设备过流并提示“接线错误”,诊断试验中应引起重视。

参考文献

- [1] 国家能源局,中国电力企业联合会.2017 年全国电力可靠性指标[EB/OL].[2018-06-07].<https://cec.org.cn/detail/index.html?3-258004>.
- [2] 张卫义,薛赛,张端文,等.一起 110 kV 变压器短路故障分析与诊断[J].电工技术,2019(16):40-42.
- [3] 张卫东,李卫东.110 kV 变压器进水受潮跳闸故障分析[J].河北电力技术,2015,34(1):32-35.
- [4] 王贵山,李应宏,房博一.某主变压器故障跳闸原因分析及改进措施[J].广西电力,2021,44(1):82-86.
- [5] 韩金华.一起 220 kV 变压器匝间短路故障分析及仿真计算[J].变压器,2018,55(9):70-74.
- [6] 张冰倩,咸日常,于洋,等.匝间短路故障下电力变压器绕组的物理特征分析[J].高电压技术,2021,47(6):2177-2185.
- [7] 郭太圣.基于电气特征量的变压器故障诊断新研究[D].南京:河海大学,2007.
- [8] 鞠平,丁晓群,马宏忠,等.基于油气量与电气量相结合的变压器绕组匝间短路故障在线诊断系统[Z].南京:河海大学,2011.
- [9] 张立静,盛戈峰,侯慧娟,等.基于电热特性融合分析的油浸式变压器匝间短路故障辨识方法[J].电网技术,2021,45(7):2473-2482.
- [10] 杨理才,孙结中,刘蔚,等.变压器匝间短路建模及其实际应用[J].电力系统保护与控制,2014,42(8):140-145.

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:2022-06-17)

一起 110 kV 敞开式隔离开关合闸失败原因分析

郭 杨¹,高世宇¹,陈 昊²,余 爽¹,李义峰¹

(1. 国网江苏省电力有限公司超高压分公司,江苏 南京 211102;

2. 国网江苏省电力有限公司南京供电分公司,江苏 南京 210019)

摘要:文中分析了隔离开关遥控操作规定及防误闭锁关系,统计了隔离开关操作异常情况,并提出实用性的操作异常处置流程。针对一起特高压变电站主变压器低压侧 110 kV 电抗器间隔倒闸操作过程中 GW55-126D II 型隔离开关合闸失败的异常案例,运用异常处置流程,通过分析操作控制回路图及工作原理并梳理现场设备电缆接线以及隔离开关电气闭锁关系,确定了隔离开关拒合的原因并及时排除了故障。所提出的针对性改进措施,对变电运检工作的后续开展具有指导意义。

关键词:处置流程;特高压变电站;隔离开关;合闸失败;电气闭锁

中图分类号:TM 564.1 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2022)05-0083-06

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220516

Cause Analysis on Closing Failure of A 110 kV Open-type Isolating Switch

GUO Yang¹, GAO Shiyu¹, CHEN Hao², YU Shuang¹, LI Yifeng¹

(1. State Grid Jianysu Extra High Voltage Company, Nanjing 211102, Jiangsu, China;

2. State Grid Nanjing Electric Power Supply Company, Nanjing 210019, Jiangsu, China)

Abstract:The remote control operation regulations of isolating switch and the relationship of anti-misoperation locking are analyzed, the abnormal operation situation is counted, and a practical abnormal operation process is proposed. Aiming at an abnormal closing failure of GW55-126D II isolating switch during the switching operation of 110 kV reactor interval at the low voltage side of main transformer in extra high voltage(UHV) substation, through the analysis on the operation control circuit diagram and working principle, and combined with the arrangement of cable wiring of field devices and the analysis on the relationship of electric locking of isolating switch, the reasons for the isolating switch to refuse to close is determined and the fault is eliminated. Finally, the targeted improvement measures are provided, which will benefit the following maintenance in substations.

Key words:disposal process; UHV substation; isolating switch; closing failure; electric locking

0 引言

隔离开关作为电网重要的一次电气设备,广泛应用于各电压等级变电站及换流站。隔离开关在电网中的重要作用主要有:1)倒闸操作,改变电气设备的运行方式;2)隔离带电设备,形成明显断开点,并与其具有闭锁关系的接地开关配合使电气设备可靠接地,便于安全可靠地开展各类检修、试验、消缺工作^[1]。

隔离开关数量众多,操作频繁,易出现设备缺

陷,如随着运行年限的增加、设备性能的老化,隔离开关经常会出现触头发热、绝缘子瓷瓶损坏、传动机构卡涩异响等缺陷。严重情况下,隔离开关可能发生操作拒动,因隔离开关拒动,将造成设备不能及时停役进行检修工作,或不能及时恢复运行,影响电网的接线方式及调度执行发输电计划。尤其是在隔离开关转动过程中突然停止,会产生拉弧情况,危急人生安全,造成跳闸事故。及时查明故障原因,消除缺陷,对缩短停电时间,提高设备可靠性具有重要意义。因此,对隔离开关操作异常的分析处理,长期以来是变电运维检修工作者的研究热点。文

献[2—3]分析了隔离开关因机械结构设计不完善造成操作失败的案例,并提出了相应的处理措施。文献[4—7]对隔离开关操作控制回路进行了梳理分析,并对异常问题提出了针对性的整改措施。以上文献仅从单方面分析了操作失败的原因,并未能从一般意义上阐明故障异常排查和处置的过程,未形成具有实用性的消缺方法。

下面结合某特高压变电站内 GW55-126D II 型隔离开关合闸失败事件,介绍完整的隔离开关操作异常排查处置流程,并提出有针对性的改进措施。

1 隔离开关正常操作及异常处置流程

1.1 遥控操作流程

相对于传统 500 kV 变电站采用的无人值班、少人值守的监控中心集中监控模式,在运的 1000 kV 特高压变电站一般采取运维人员驻站,站内人员自行监控值班的模式^[8—11]。站内包括断路器、隔离开关、接地开关等一次电气设备的倒闸操作采用站端变电运维人员遥控的方式进行。首先,主站操作人员通过后台操作员下发遥控操作命令,经过网络传输设备转换并经传输通道传输至现场测控装置;该指令经测控装置响应判断,导通相关二次遥控回路,驱动现场一次设备出口执行,一次设备操作成功^[12—13]。完整的遥控流程如图 1 所示。

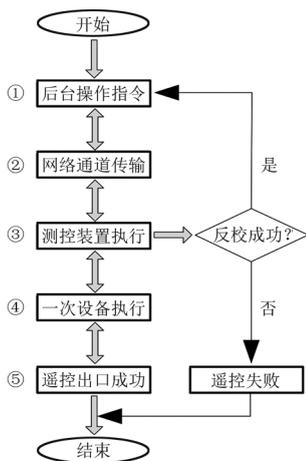


图 1 隔离开关遥控操作流程

1.2 防误操作闭锁

依据《变电站电气设备倒闸操作规定》和《电力安全工作规定》,为防止电气设备发生误操作,站端采用后台模拟预演闭锁、监控后台五防闭锁、测控装置逻辑闭锁、开关汇控箱电气闭锁,外加机构本体机

械闭锁等复合多重化防误闭锁功能^[14—16]。各闭锁功能之间为串联关系,只有所有闭锁关系均满足,隔离开关才能动作变位,其闭锁关系原理如图 2 所示。

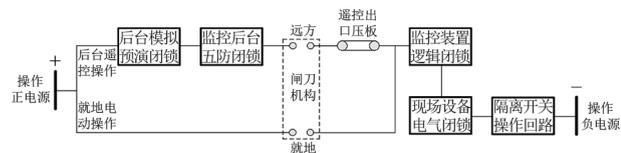


图 2 隔离开关防误操作闭锁原理

1.3 操作异常统计与处置流程

经长期的运行经验及设备缺陷异常统计,造成隔离开关操作失败的常见原因主要有防误闭锁关系、本体机构、操作控制回路三大类^[17—19],其具体原因如表 1 所示。

表 1 隔离开关操作异常原因统计

异常类别	具体原因
防误闭锁关系	测控装置防误闭锁逻辑条件不满足 汇控箱电气防误闭锁逻辑条件不满足
本体机构	机构卡涩失灵 开关辅助接点转换不良 隔离开关辅助接点切换不良 相关接地开关位置辅助接点接触不良
操作控制回路	三相操作电源不正常 闭锁电源不正常 操作回路断线、端子松动、接线错误 合闸接触器或电动机故障

针对这些异常,结合隔离开关遥控操作流程和防误闭锁原理制定了具有实用性的一般处置流程,如图 3 所示,便于查找故障点,消除缺陷。



图 3 操作异常一般处置流程

2 操作失败案例情况

某 1000 kV 特高压变电站 2 号主变压器及 110 kV 设备区年度检修工作结束后进行设备复役操作,在操作过程中相继发生了 2 号主变压器 110 kV IV 母线 1147 接地开关分闸不到位和同一间隔 2 号主变压器 1143 低电压电抗器 11431 隔离开关合闸失败的异常现象。2 号主变压器及 110 kV 设备接线方式如图 4 所示,图中黑框内为操作异常设备。

2.1 操作失败过程

在 2 号主变压器复役过程中,监控后台遥控拉开 2 号主变压器 110 kV IV 母线 1147 接地开关后,

监控后台显示 1147 接地开关位置不确定,测控装置无法采集到接地开关的位置接点信号。现场检查未见异常,初步推测一次设备可能操作未到位。因此,在 1147 接地开关机构箱内进行就地电动操作,在进行一次合闸、分闸操作后,监控后台显示接地开关在分闸位置,1147 接地开关分闸到位,位置不确定状态消失,异常消除。此后,依次遥控合上 11411 隔离开关、11421 隔离开关,当执行合上 11431 隔离开关指令时,发现监控后台合闸指令无法下发至一次设备,即图 1 中的前 3 个环节均已执行成功,但最后两个环节执行失败。

2.2 现场处置过程

发生 11431 隔离开关合闸异常情况后,根据如图 3 所示的倒闸操作设备异常处置流程进行了如下处理。

步骤 1:重新检查调度下发操作指令的正确性,梳理了倒闸操作票的操作顺序,并确认正确无误。

步骤 2:检查监控操作后台报文,确认没有异常告警信息,并确认后台五防闭锁关系满足要求。

步骤 3:至现场保护小室,检查确认遥控操作指令已下发至测控装置,且测控装置上逻辑闭锁关系满足要求。

步骤 4:至一次设备区,对 11431 隔离开关外观进行检查,发现设备无转动迹象,其两侧 114317、1147 接地开关均在拉开位置,对隔离开关机械闭锁开放。随后,进行现场手摇操作,隔离开关可以正常合上、分开,确认一次设备各传动机构状态良好。

步骤 5:对 11431 隔离开关机构箱开箱检查,确认电动机无发热发烫,各元器件无焦糊现象,隔离开关操作电源与电动机电源均在合位。鉴于检查无异常,在隔离开关机构箱内进行就地电动操作,但电动机无响应,推断可能是隔离开关控制操作回路存在异常。根据控制操作回路图(如图 5 所示),检修人员用万用表对合闸回路进行分段测量,排查消缺。测量图 5 中蓝色回路所示的各接点,依次测量各元件两端电位,发现 19 号端子与 20 号端子之间的电位差为交流 220 V。回路正常情况下,该两点之间应为等电位,因此将故障点定位在这两点之间。根据回路标识,该两点之间为 11431 隔离开关的外部联锁回路。

步骤 6:根据 11431 隔离开关闭锁关系的构成和外部联锁回路梳理,19 号端子与 20 号端子之间的回路及端子位置如图 6、图 7 所示。用万用表依次测量了 1143 断路器、114317、1147、110417 接地开关机构箱内接入闭锁回路的位置接点。发现这 4 组接点中,只有 1147 接地开关机构箱内 X1:7 接点与 X1:8 接点未导通,进一步测量发现其对应行程开关的常闭接点 SAUX:6 与 SAUX:8 未闭合,说明接地开关在分闸情况下,行程开关行程未到位。这与此前 1147 接地开关分闸不到位,监控后台位置显示不确定的异常情况相吻合。随后,用摇把插入 1147 接地开关机构箱手动分合闸插口,并往分闸方向轻微摇动,将行程开关行程走完,而后测量接地开关位置接点(7—8)发现其导通,再测量 11431 隔离开关闭锁回路首尾端子(19—20)亦呈导通状态。

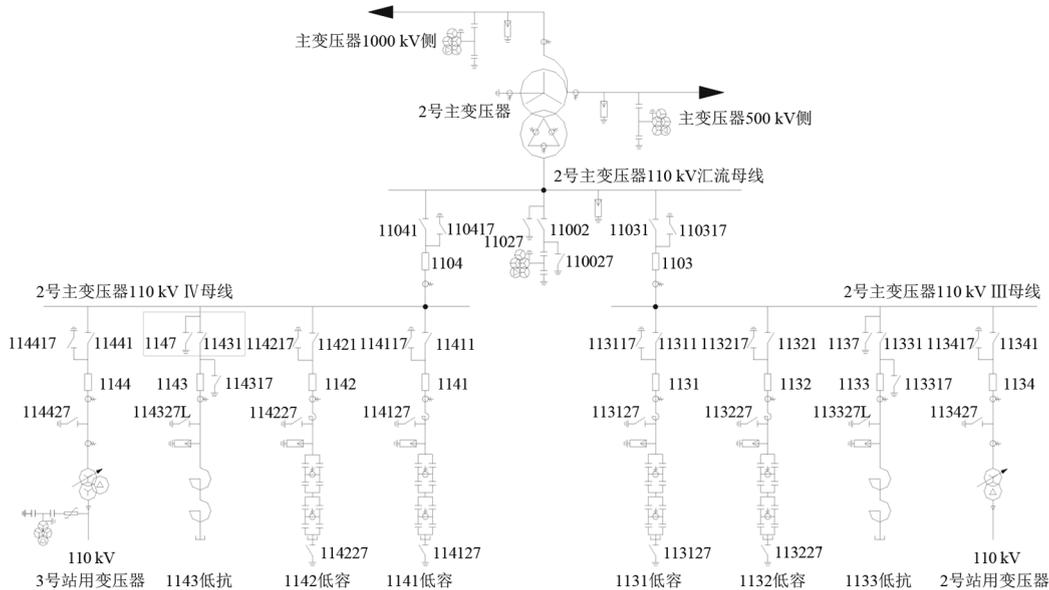


图 4 2 号主变压器 110 kV IV 母线各间隔一次设备接线

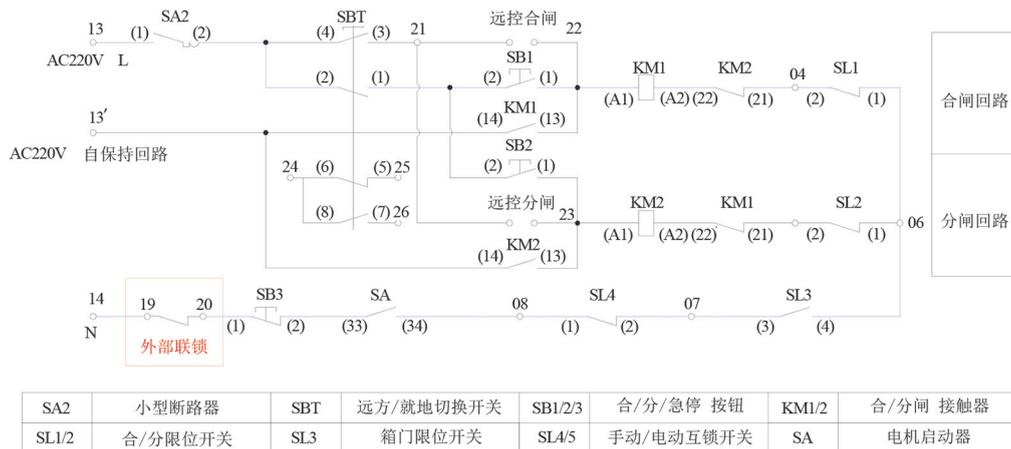


图 5 11431 隔离开关控制操作回路

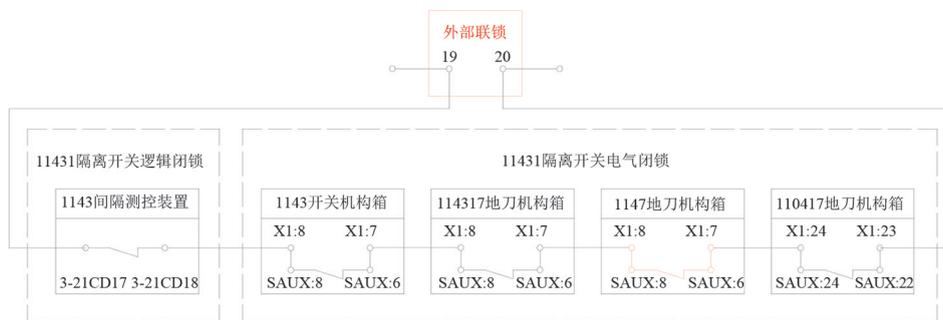


图 6 外部联锁回路

随后,在 11431 隔离开关机构箱进行就地电动操作,隔离开关顺利合上。但为何与 1147 接地开关构成电气闭锁关系的 11411、11421 隔离开关能先行正常合上仍是需要分析的问题。

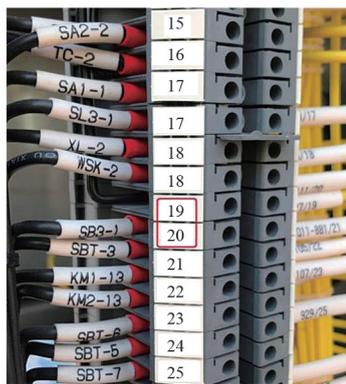


图 7 11431 隔离开关机构箱 X2 端子排外部联锁回路首尾端子(19—20)

关、11431 隔离开关、11441 隔离开关与 1147 接地开关均构成电气闭锁关系。

表 2 2 号主变压器 110 kV IV 母线各间隔电气闭锁关系

设备编号	操作命令	1141	114117	114127	1147	110417
11411	合闸	分	分	分	分	分
设备编号	操作命令	1142	114217	114227	1147	110417
11421	合闸	分	分	分	分	分
设备编号	操作命令	1143	114317	/	1147	110417
11431	合闸	分	分	/	分	分
设备编号	操作命令	1144	114417	114427	1147	110417
11441	合闸	分	分	分	分	分

3.2 1147 接地开关机构分析

1147 接地开关型号为 GW55-145D,工作方式为三相电动机械联动式。其机构箱内的行程开关(SAUX)共有 10 对常开接点和 10 对常闭接点。根据设计图纸和现场电缆标识,有 1 对常开接点和 1 对常闭接点输入至 2 号主变压器 110 kV IV 母线无功设备测控装置,用于构成相关设备间隔的逻辑闭锁、五防闭锁,并用于监控后台位置显示;另有 5 对常闭接点分别用于 1143 低压电抗器间隔、1141 低压电容器间隔、1142 低压电容器间隔、110 kV 3 号站用变压器间隔、1104 断路器间隔的电气闭锁回

3 案例分析

3.1 电气闭锁关系

根据设计图及图 4 的一次拓扑,2 号主变压器 110 kV IV 母线各间隔隔离开关电气闭锁关系如表 2 所示。由表 2 可知,11411 隔离开关、11421 隔离开

路,具体的接点编号及用途如表 3。

表 3 1147 接地开关行程开关接点编号及功能用途

序 号	SAUX 接点编号	接点 性质	对应 X1 端子 排接点编号	输出端 设备	用 途
1	1—3	常开	1—2	测控装置	逻辑闭锁、合闸位置显示
2	2—4	常闭	3—4	测控装置	逻辑闭锁、分闸位置显示
3	6—8	常闭	7—8	1143 断路器间隔	构成 11431 隔离开关电气闭锁
4	10—12	常闭	11—12	1141 断路器间隔	构成 11411 隔离开关电气闭锁
5	14—16	常闭	15—16	1142 断路器间隔	构成 11421 隔离开关电气闭锁
6	18—20	常闭	19—20	1144 断路器间隔	构成 11441 隔离开关电气闭锁
7	22—24	常闭	23—24	1104 断路器间隔	构成 11041 隔离开关电气闭锁

3.3 11431 隔离开关合闸异常回路分析

从 11431 隔离开关控制操作回路图可知,该隔离开关正常分合的前提条件是其机构箱内 X2 端子排上连接于外部联锁回路的 19—20 号端子导通,如图 5、图 7 所示。外部联锁回路包括逻辑闭锁回路和电气闭锁回路,如图 6 所示。从前述故障分析处置过程可得,11431 隔离开关的逻辑闭锁回路导通,而电气闭锁回路因 1147 接地开关机构箱内 X1 端子排 7—8 号端子未导通,进而造成 11431 隔离开关控制操作回路图中外部联锁 19—20 号端子未导通,控制操作回路断开,致使 11431 隔离开关无法合闸。

又从表 3 可知,除 1147 接地开关机构箱内 X1 端子排上 7—8 号常闭接点串接在 11431 隔离开关电气闭锁回路外,还有另外 4 对常闭接点 11—12、15—16、19—20、22—24 分别串接在 11411、11421、11441、11041 隔离开关的电气闭锁回路中,如图 8、图 9 所示。当执行分开 1147 接地开关操作后,串接于 11411、11421 隔离开关电气闭锁回路的 1147 接地开关的另外 2 对行程开关常闭接点 10—12、14—16 正常闭合,这两把隔离开关的合闸回路正常导通。因此,出现了 2 号主变压器 110 kV IV 母线各间隔依次由冷备用转为热备用的过程中,与 1147 接地开关构成电气闭锁关系的 11411、11421 隔离开关先行正常合上,而 11431 隔离开关无法合上的异常现象。

4 结 论

上面通过分析得出所述案例隔离开关合闸失败原因,是由于该隔离开关母线侧接地开关机构箱内

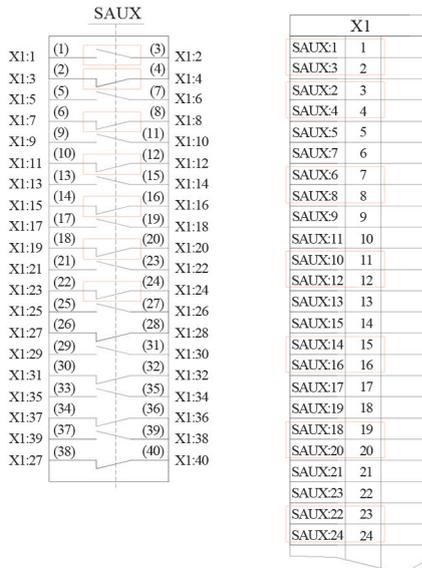


图 8 1147 接地开关控制操作回路行程开关和 X1 端子排分图

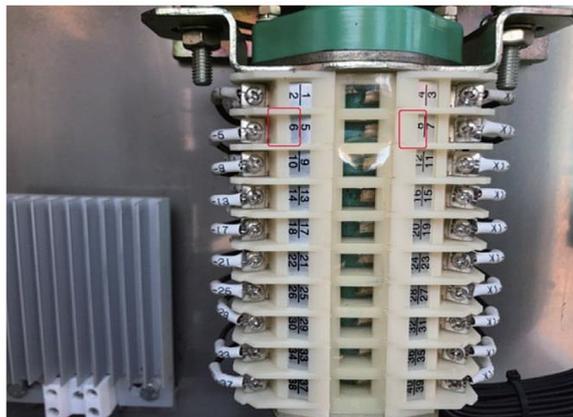


图 9 1147 接地开关行程开关接点

行程开关一对常闭触点未可靠闭合造成接地开关分闸不到位,影响到了与之相邻的隔离开关之间的电气闭锁回路,造成隔离开关控制操作回路断开合闸失败。为避免再次出现此类设备故障,影响设备停送电,从现场运维的角度提出以下改进措施。

1) 改进设备质量

由于接地开关及隔离开关的生产厂家众多,生产质量参差不齐,存在制造工艺老旧、装配质量差等情况,如导电部位螺栓未拧紧、底座齿轮与平键装配过紧、轴承润滑不够等问题。作为现场生产单位,对于设备运行过程中发现的问题应及时分析汇总,及时向设备制造厂家反馈所遇到的故障及异常,敦促改进。如对案例所述类型行程开关的生产和装配工艺进行改良,确保在接地开关主轴转动过程中,每个接点均同时可靠变位,从源头上确保设备质量的可靠性。

2) 提高验收质量

在变电站新建或改扩建工程中,新设备的交接验收工作要严格按照标准执行,建立新设备进站全过程跟踪验收机制;定期反馈施工进度和验收结果;一经发现诸如此类行程开关动作不能全部到位的情况,必须整体更换至验收合格,确保设备“零缺陷”投运。

3) 严控检修质量

结合设备计划或临时停电检修工作,开展在运接地开关和隔离开关防拒动排查,通过对设备进行多次分合操作,检查机构动作情况及行程开关的可靠性,消除因动作不到位或节点不良造成的设备隐患。在此基础上,调节存在异常的接地开关机构行程,检查接地开关拐臂是否转动到位,在机构转动处涂抹具有润滑功能的二硫化钼润滑脂(MoS_2),确保机构正常分合,避免出现机构卡涩及行程不到位;若调节之后,行程仍然不能可靠全部到位,则进行整体更换。

4) 强化日常运维

严格按照特高压运行维护的要求,对隔离开关/接地开关的行程开关等进行例行巡视和专业巡视。除了使用目视法等常规手段发现设备异常之外,积极应用红外测温、机器人巡检、可调式高清摄像头、无人机巡检等智能运维手段^[20],全面提升巡视质量。对于相关二次回路,通过加装剩余电流传感器、弧光传感器、水浸传感器、烟感传感器等技术手段^[21-22],加强对二次回路的日常运维水平,进一步提升设备运行的安全性。

参考文献

- [1] 陈昊,徐鹏,谭风雷,等.变电站设备检修调试工作优化决策[J].湖北电力,2021,45(2):1-6.
- [2] 张帆.一起GW22A-252 II型隔离开关拒动故障原因分析及处理[J].江西电力,2019,43(12):29-32.
- [3] 李运涛,刘同杰.GW16A-252DW型隔开关拒动故障原因分析及处理[J].四川电力技术,2014,37(2):75-77.
- [4] 夏业波.隔离开关控制回路常见问题及处理措施[J].设备管理与维修,2019(22):96-97.
- [5] 祖武强,霍克伟.一起220 kV敞开式隔离开关拒分的原因分析[J].红水河,2016,35(4):99-100.
- [6] 盛明学,王志清.户外高压隔离开关常见故障的原因分析及处理[J].高压电器,2010,46(10):93-96.
- [7] 孙亚辉.电动操作隔离开关控制回路设计分析与应用[J].电气技术,2010(9):66-69.
- [8] 李雨舒,李明珍.无人值班变电站遥控常见故障的分析与处理[J].电力系统保护与控制,2009,37(18):145-146.
- [9] 陈国华.无人值班变电站遥控操作技术改进[J].电力自动化设备,2003,21(10):90-92.
- [10] 梁运华,李琼.500 kV变电站无人值班改造遥控试验的新方法[J].湖南电力,2011,31(5):42-45.
- [11] 楼书氢,罗纯坚.改进的遥控试验方法在吉安监控中心的应用[J].华中电力,2012,25(2):8-10.
- [12] 罗馨豫.一起隔离开关遥控失败的原因分析与对策[J].广西电力,2021,44(3):65-69.
- [13] 赵文斯,刘雪飞,纪鹏.变电站断路器遥控失败原因分析[J].电世界,2020(4):25-27.
- [14] 王一清,杨志强,高海龙.综合自动化变电站中隔离刀闸防误操作的闭锁策略分析[J].电力自动化设备,2011,31(5):137-140.
- [15] 陈昊,郭湘奇,田涛,等.隔离开关闭锁回路电子档案构建及应用[J].中国电力,2012,45(7):20-23.
- [16] 杨震强,王志林.变电站在线式一体化防误操作闭锁系统技术研究[J].电网与清洁能源,2009,25(8):32-36.
- [17] 潘铭.一起变电站110 kV隔离开关无法电动分闸的分析与处理[J].电气开关,2021(3):98-100.
- [18] 刘善军.一起110 kV变电站防误闭锁装置异常引起的故障分析处理[J].江苏电机工程,2016,35(3):80-83.
- [19] 杨行方.电力系统遥控操作失败原因分析及对策[J].电力系统装备,2018,12(1):82-83.
- [20] 陈昊,姚凯,张海华,等.变电站设备缺陷图像识别的实用化评价方法[J].湖北电力,2021,45(5):52-57.
- [21] 陈昊,刘怀宇,姚凯,等.采用自补偿复合电流判据的变电站长段动力电缆漏电监测方法[J].电力系统保护与控制,2022,50(12):172-179.
- [22] 陈昊,崔运光,马兆兴,等.变电站站用电系统混合型负荷支路的漏电监测方法[J].消防科学与技术,2022,41(6):739-743.

作者简介:

郭杨(1986),男,硕士,工程师,主要研究方向为特高压运检技术;

高世宇(1990),男,硕士,工程师,主要研究方向为特高压运检技术;

陈昊(1980),男,博士,研究员级高级工程师,高级技师,主要研究方向为变电二次运检技术;

余爽(1991),男,硕士,工程师,主要研究方向为特高压运检技术;

李义峰(1983),男,高级工程师,技师,主要研究方向为特高压运检技术。

(收稿日期:2022-04-21)

利用油中溶解气体含量分析套管漏气的方法

鲁力铭

(西安交通大学电气工程学院,陕西 西安 710049)

摘要:目前尚无利用油中溶解气体含量分析变压器套管漏气的规程和文献。文中通过实际案例,说明如何利用油中溶解气体含量分析变压器套管是否存在漏气、是否存在过热故障或放电故障以及故障的严重程度。从而可以弥补相关的技术空白,为生产一线对变压器套管状态的判断提供有力的技术参考。

关键词:变压器套管;油中溶解气体;泄漏;过热;放电

中图分类号:TM 406 **文献标志码:**B **文章编号:**1003-6954(2022)05-0089-06

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220517

Gas Leakage Analysis Method for Bushing by Using Gas Content Dissolved in Oil

LU Liming

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi, China)

Abstract: At present, there is no regulations and literatures for analyzing gas leakage of transformer bushing by using gas content dissolved in oil. Through practical cases, how to use the gas content dissolved in oil is explained to analyze whether there is gas leakage in transformer bushing and whether there is overheating fault or discharge fault and the severity of the fault. Therefore, it can fill the gaps of related technology and provide a powerful technical reference for the production line to judge the condition of transformer bushing.

Key words: transformer bushing; dissolved gas in oil; leakage; overheating; discharge

0 引言

油浸电容式套管是一种少油设备,密封较好,油面空间不直接向大气呼吸,所以气体损失较小^[1];而过热或放电故障会导致油中溶解气体含量明显增加,根据油中溶解气体含量可以判断故障的类型及严重程度。自20世纪80年代至2002年年底的不完全统计,中国500 kV变压器先后发生因套管(及相关部位)引起的事故23台次,存在故障25台次,占同期总的变压器事故和故障数量的36%和12.4%^[2]。套管的典型故障之一便是渗漏问题,会对套管内部绝缘产生危害^[3]。当套管在运行过程中存在渗漏(漏气)的情况,即使存在较为明显的故障,由于油中溶解气体会逸散,特别是溶解系数较小的 H_2 、 CH_4 、 CO 等气体会大量逸散:一方面导致油

中气体总含量不高;另一方面也导致油中溶解气体各组分的含量既不符合发热的产气特征,也不符合放电的产气特征。这对判断套管是否有故障以及故障的类型增加了难度,也对变压器及套管的安全运行构成了风险。

目前利用油中溶解气体含量判断套管缺陷的标准DL/T 722—2014《变压器油中溶解气体分析和判断导则》^[4]以及GB/T 24624—2009《绝缘套管 油为主绝缘(通常为纸)浸渍介质套管中溶解气体分析(DGA)的判断导则》^[5],都未涉及利用油中溶解气体含量去判断套管是否存在漏气的缺陷以及存在漏气时如何判断故障类型的内容。

针对上述问题,下面以实际案例提出了一种利用套管油中溶解气体含量去判断套管是否存在漏气缺陷以及存在漏气时如何判断故障类型及严重程度的方法。

1 基本原理

油浸电容式套管,是由电缆纸和铝箔共同卷制而成的电容芯子经油浸渍后形成油纸绝缘的密封结构。其油量相对较少,内部一般属于微正压,在头部有供绝缘油随温度变化导致体积变化的膨胀器或油枕。根据文献[4—5]:当设备正常时,绝缘油、绝缘纸随运行时间的延长会正常老化,产生少量的 H_2 、 CH_4 、 C_2H_6 、 C_2H_4 、 CO 、 CO_2 等气体,但不会产生 C_2H_2 ;当内部发生低温过热时,油中 H_2 、 C_2H_4 、 CH_4 含量会增加,其中 CH_4 的含量大于 C_2H_4 的含量;当内部发生高温过热时,油中 H_2 、 C_2H_4 、 CH_4 含量会增加,其中 C_2H_4 的含量大于 CH_4 的含量,同时可能含有少量的 C_2H_2 ;当内部发生放电时,油中 H_2 、 C_2H_2 、 C_2H_4 、 CH_4 含量会增加,随着放电能量的增加 C_2H_2 含量会明显增加;如果过热或放电故障部位涉及到绝缘纸,油中还会产生较多的 CO 、 CO_2 。也就是说无论是过热还是放电,油中 C_2H_4 含量都会增加,对密封良好的套管,理论上油中各种故障气体的含量要么同时增加,要么某些增加、某些不变或由于实验误差小幅度减小。

根据文献[6],对油中气体而言,气体组分在一定温度下的密闭系统内的气液相达到分配平衡,气体在液相中的浓度等于该气体溶解系数与该气体在气相中浓度的乘积。那么,由于故障产生的气体不会全部溶解于油中,一部分气体在油面上方的空腔(气相)中,另一部分溶解于油(液相)中,套管中气体处于动态平衡。如果套管存在密封不良缺陷,气相中的气体会漏气而减小,液相中的气体便会释放到气相中从而浓度减小。同时由于各种故障气体在油中溶解系数 S 存在差异^[7],导致逸散速率存在差异,溶解系数小的逸散速率大,溶解系数大的逸散速率小。如果套管不存在过热或放电故障,那么油中各种故障气体的含量要么同时减小,要么某些不变

或由于实验误差小幅度波动;如果套管存在过热或放电故障,当某种气体的产气速率小于逸散速率时,该气体的含量就会呈现减小趋势,当某种气体的产气速率大于逸散速率时,该气体的含量就会呈现增加的趋势。由于各种故障气体逸散速率的差异,导致油中剩余故障气体的含量表现出既不符合过热特征,也不符合放电特征。如果油中部分故障气体含量呈先减小后又增加的趋势,说明故障的产气速率变大了(大于气体的逸散速率),故障有变严重的趋势。

2 案例一

2.1 油中溶解气体含量历史数据

110 kV 某变电站主变套管 B 于 1997 年 7 月出厂,1999 年 2 月投运,由于历史原因,少油设备投运前后未要求开展绝缘油分析。2009 年 2 月 24 日第一次进行绝缘油分析,其中油中溶解气体含量如表 1 所示。该套管从 1999 年 2 月投运后,未更换过绝缘油。

2.2 数据分析

1)从表 1 看主变压器套管 B 在 2022 年 3 月 14 日的油化数据: C_2H_2 、 H_2 、 CH_4 、 C_2H_6 对运行 23 年的设备来说,其油中含量未见异常;但 CO_2 的含量(7 313.10 $\mu\text{L/L}$),特别是 C_2H_4 含量(167.82 $\mu\text{L/L}$),远大于文献[5]中 C_2H_4 正常含量为 30 $\mu\text{L/L}$ 的规定,表明设备可能异常。 C_2H_4 在大约 500 $^{\circ}\text{C}$ 下生成^[7],对密封良好的充油设备,无 C_2H_2 、单 C_2H_4 高表明设备存在高温过热。但综合所有故障气体的含量既不符合过热特征(低温过热, H_2 、 CH_4 、 C_2H_4 含量高,其中 CH_4 的含量大于 C_2H_4 的含量;高温过热, H_2 、 C_2H_4 、 CH_4 含量高,其中 C_2H_4 的含量大于 CH_4 的含量),也不符合放电特征(含有 H_2 、 C_2H_2 、 C_2H_4 、 CH_4 ,随着放电能量的增加 C_2H_2 含量会明显增加)。

2)2009 年 2 月 24 日至 2012 年 7 月 6 日, H_2 含量从 34.95 $\mu\text{L/L}$ 变为 68.93 $\mu\text{L/L}$,其余气体

表 1 110 kV 某变电站主变套管 B 油中溶解气体含量

时间	溶解气体含量/ $(\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1})$							
	H_2	CO	CO_2	CH_4	C_2H_4	C_2H_6	C_2H_2	总烃
2009-02-24	34.95	711.26	3 331.19	18.23	9.87	10.13	0	38.23
2012-07-06	68.93	833.01	3 579.59	21.35	12.77	13.95	0	48.07
2015-11-20	5.54	203.29	5 374.29	4.46	72.54	4.94	0	81.94
2022-03-14	6.04	729.83	7 313.10	10.32	167.82	5.88	0	184.02

(CO、CO₂、CH₄、C₂H₄、C₂H₆)有少量增加,属于单 H₂ 增高,设备未见明显异常(若仅 H₂ 含量超过注意值,但无明显增长趋势,也可判断为正常^[4])。

3)2012年7月6日至2015年11月20日,气体含量变化情况如表2所示。

从表2看出:油中气体变化率 H₂ 减小 91.96%, CO 减小 75.60%, CH₄ 减小 79.11%, C₂H₆ 减小 64.59%,但 C₂H₄ 增加 468.05%, CO₂ 增加 50.14%。由于该套管从1999年2月投运以来,未更换过绝缘油,如果套管密封良好,油中故障特征气体的含量要么同时增加,要么某些增加、某些不变或由于实验误差小幅度减小,不会出现 C₂H₄、CO₂ 大幅增加而 H₂、CO、CH₄ 大幅减小的现象。同时由于充油设备过热或放电都会产生 C₂H₄,推测设备可能异常。

由于油中溶解气体各组分在油中溶解系数(50℃时) $S_{H_2}(0.06) < S_{CO}(0.12) < S_{CH_4}(0.39) < S_{CO_2}(0.92) < S_{C_2H_2}(1.02) < S_{C_2H_4}(1.46) < S_{C_2H_6}(2.30)$ ^[7],如果以 CO₂ 为分界线,比 CO₂ 溶解系数小的 H₂、CO、CH₄ 3种气体都呈明显的减小趋势,而比 CO₂ 溶解系数大的 C₂H₂ 始终为 0、C₂H₄ 呈明显增加趋势、C₂H₆ 呈明显减小趋势。初步推测套管 B 在 2012 年 7 月 6 日至 2015 年 11 月 20 日期间存在密封不良即漏气的缺陷,使得溶解系数较小的 H₂、CO、CH₄ 由于逸散速率大于故障的产气速率而呈现明显的减小趋势;而 C₂H₆ 虽溶解系数大,但由于其含量基数不大同时故障未导致油分解产生大量的 C₂H₆,同样因逸散速率大于故障的产气速率也呈现明显的减小趋势。CO₂、C₂H₄ 一方面由于溶解系数大,同时由于故障又产生了大量的这两种气体,造成其逸散速率小

于故障的产气速率使其含量呈现明显的增加趋势。

由于 CO₂ 含量呈增加趋势,理论上推断比 CO₂ 溶解系数大的烃类气体如果有产生且产气速率大于逸散速率,则其含量应该呈增加趋势。而实际情况是 C₂H₄ 含量特别高(而且呈增大趋势)、C₂H₂ 含量一直为 0,由此可以判断故障没有产生或极少量产生 C₂H₂,套管并未出现明显的放电故障。

综上推测,2012年7月6日至2015年11月20日期间该套管存在较高温度的过热故障。该故障产生了较多的 H₂、CO、CO₂、CH₄、C₂H₄,但由于套管存在密封不良即漏气的缺陷,其中:溶解系数较小的 H₂、CO、CH₄ 3种气体以及溶解系数较大 C₂H₆,由于产气速率小于逸散速率而大量逸散,呈现出明显的减小趋势;而溶解系数较大的 CO₂、C₂H₄,由于产气速率大于逸散速率,呈现出明显的增大趋势。

4)2015年11月20日至2022年3月14日,气体含量变化情况如表3所示。

从表3看:除 C₂H₂ 一直为 0 外,其余故障特征气体的含量都呈增加趋势。由于在 2015 年 11 月 20 日至 2022 年 3 月 14 日期间未进行过检修、未更换过油,漏气缺陷并未消除,说明在 2015 年 11 月 20 日至 2022 年 3 月 14 日产气速率变大了(产气速率大于逸散速率),故障有变严重的趋势,因此建议套管退出运行。

2.3 漏气验证

为了确认套管是否漏气,采用了以下两种方法进行验证。

1)查看压力监测系统压力变化情况

通过查看该主变压器 A、B、C 3 支套管压力监测系统数据,发现 3 支套管压力变化趋势并不一致,

表2 2012年7月6日至2015年11月20日气体含量变化情况

时间	溶解气体含量/($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)							总烃
	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	
2012-07-06	68.93	833.01	3 579.59	21.35	12.77	13.95	0	48.07
2015-11-20	5.54	203.29	5 374.29	4.46	72.54	4.94	0	81.94
变化率/%	-91.96	-75.60	50.14	-79.11	468.05	-64.59	0	70.46

表3 2015年11月20日至2022年3月14日气体含量变化情况

时间	溶解气体含量/($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)							总烃
	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	
2015-11-20	5.54	203.29	5 374.29	4.46	72.54	4.94	0	81.94
2022-03-14	6.04	729.83	7 313.10	10.32	167.82	5.88	0	184.02
变化率/%	9.03	259.01	36.08	131.39	131.35	19.03	0	124.58

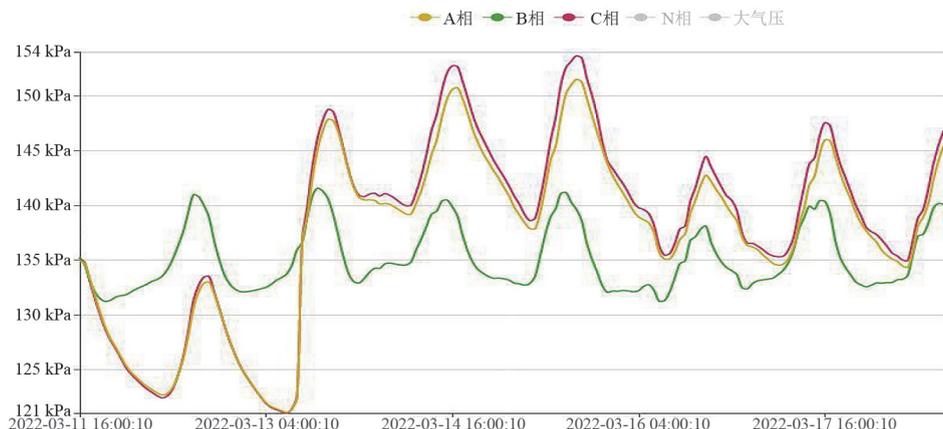


图 1 A、B、C 3 支套管压力监测情况

选取 2022 年 3 月 11 日至 2022 年 3 月 16 日压力变化趋势图进行说明,如图 1 所示。

套管在正常运行过程中如果没有特征气体产生的情况下,其内部压力主要由注油的高度和上部空腔的气体决定,内部压力的变化主要是由空腔内气压的变化决定^[4]。由于压力监测的探头在套管下部,套管底部的总压($P_{总}$)为绝缘油的压强($P_{油}$)和顶部气体压强($P_{气}$)的总和,即 $P_{总} = P_{气} + P_{油}$ 。如果存在漏气则 $P_{气}$ 减小,该少油设备的压力变化将主要由套管里绝缘油油位变化引起,将小于密封良好的套管的压力变化(既有绝缘油油位压力的变化引起,还有所有气体压力的变化引起)。绝缘油油位的变化主要由套管内油温变化引起,而油温主要由环境温度及负荷的变化引起。环境温度及负荷的变化总体呈现出周期性变化的规律,以 24 h 为一个周期。少油设备内部压强随着温度的改变,也呈现出周期性变化的规律,一般在下午压力达到峰值,在凌晨为谷值。

从图 1 可以看出:A 相(黄色)的压力变化范围约为 122~152 kPa;B 相(绿色)的压力变化范围约为 131~141 kPa;C 相(紫色)的压力变化范围约为 121~154 kPa;B 相压力明显小于 A、C 两相,同时 A、C 两相的变化趋势基本一致。由此可以判断套管 B 存在漏气的缺陷^[8]。

2)往套管里注入 SF_6 气体,用 SF_6 检漏仪进行检漏。

套管退出运行,将套管从变压器里吊出,在平地上用木方将套管垫高,将套管里的油从套管取样口放出一部分(自然状态下油流不出来);然后,往套管里充入 SF_6 气体至 0.2 MPa 左右,用检漏仪进行

检漏,发现在油枕上方螺帽下密封圈位置处漏气(见图 2),均压阀一端未见漏气。



图 2 利用 SF_6 检漏仪检查套管漏气情况

3 案例二

3.1 油中溶解气体含量历史数据

110 kV 某站主变压器套管 C 于 1998 年 5 月出厂,1999 年 7 月投运,投运后该套管未更换过绝缘油。2010 年 3 月 25 日以来绝缘油中溶解气体含量如表 4 所示。

3.2 数据分析

1)从表 4 看 2022 年 4 月 11 日的油化数据: C_2H_2 、 H_2 、 CH_4 、 C_2H_6 气体含量对运行近 23 年的设备来说未见异常。但 CO_2 的含量,特别是 C_2H_4 含量远大于文献[5]的规定,表明设备可能异常。综合所有故障气体的含量既不符合过热特征(过热 H_2 、 CH_4 、 C_2H_4 高),也不符合放电特征(至少有 C_2H_2)。

2)1999 年 7 月 2 日至 2010 年 3 月 25 日,除 C_2H_2 外,各种气体均呈增加趋势,但对运行近 11 年的设备故障气体含量未见明显异常。

表 4 110 kV 某变电站主变压器套管 C 油中溶解气体含量

时间	溶解气体含量/($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)							总烃
	H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	
1999-07-22	10.6	86.5	392.7	2.2	0.8	1.5	0	4.5
2010-03-25	87.5	1 362.7	4 253.4	19.3	3.5	7.3	0	30.1
2012-12-20	20.3	757.1	5 267.9	13.4	4.3	7.6	0	25.3
2014-04-29	5.7	550.5	4 985.0	9.0	24.0	6.0	0	39.0
2022-04-11	2.4	392.3	5 849.6	10.2	161.2	5.4	0	176.8

从 2010 年 3 月 25 日至 2022 年 4 月 11 日,不难看出,溶解系数较小的 H₂、CO、CH₄ 呈明显的减小趋势,溶解系数较大的 CO₂、C₂H₄ 呈明显增加的趋势。

从 1999 年 7 月 2 日至 2010 年 3 月 25 日再到 2022 年 4 月 11 日,总的来看:溶解系数较小的 H₂、CO、CH₄ 含量先增加后减小;溶解系数较大的 CO₂、C₂H₄ 呈明显增加的趋势。由于该套管从 1999 年 7 月投运以来,未更换过绝缘油,如果套管密封良好,油中故障特征气体的含量要么同时增加,要么某些增加、某些不变或由于实验误差小幅度波动,不会出现 C₂H₄、CO₂ 大幅增加而 H₂、CO、CH₄ 大幅减小的现象,推测设备在 2010 年 3 月 25 日之后可能存在密封不良漏气缺陷。

3)与案例一相同,通过各组分气体在油中溶解系数分析,以及 C₂H₄ 含量特别高(且呈增加趋势)、C₂H₂ 含量一直为 0 的实际情况,可以判断故障没有产生或极少量产生 C₂H₂,套管并未出现明显的放电故障。

综上推测该套管同样存在较高温度的过热故障,故障产生了较多的 H₂、CO、CO₂、CH₄、C₂H₄,但由于套管存在密封不良即漏气的缺陷,溶解系数较小的 H₂、CO、CH₄ 3 种气体以及溶解系数较大的 C₂H₆ 由于产气速率小于逸散速率大量逸散,呈现出明显的减小趋势;而溶解系数较大的 CO₂、C₂H₄ 由于产气速率大于逸散速率,呈现出明显的变大趋势。目前该套管已退出运行,经放油、充入 SF₆ 气体进行检漏,在将军帽处发现了漏点,同时对套管进行解体,发现将军帽处导体螺纹熔化痕迹(见图 3),验证了套管确实存在过热故障。该故障与文献[9]有一定的相似性,将军帽与绕组引线间接触电阻过大直接导致套管运行时顶部发生过热问题,进而促使接触电阻进一步增大,形成恶性循环,最终破坏密封件的密封性能。



图 3 C 相套管将军帽处导体螺纹熔化痕迹

4 共性分析

对以上两个主变压器套管故障案例进行共性分析,有以下特点:

- 1) 多年的跟踪数据, H₂、CO 含量明显减小, CO₂、C₂H₄ 含量却明显增加。
- 2) 长时间漏气后, H₂ 含量都小于 10 $\mu\text{L}/\text{L}$ 。
- 3) 表 1 中 2015 年 11 月 20 日数据, CH₄ 与 C₂H₄ 含量比值为 $4.46/72.54 = 0.06$; 表 1 中 2022 年 3 月 4 日数据, CH₄ 与 C₂H₄ 含量比值为 $10.32/167.82 = 0.06$; 表 2 中 2022 年 4 月 11 日数据, CH₄ 与 C₂H₄ 含量比值为 $10.2/161.2 = 0.06$ 。在这两个案例中,套管在长时间漏气后油中 CH₄ 与 C₂H₄ 含量比值差不多都为 0.06,但 CH₄ 与 C₂H₄ 在 20 $^{\circ}\text{C}$ 时溶解系数的比值为 0.27。下一步还需对这一现象进行试验研究,是否与现场温度的变化导致溶解系数变化有关。

5 结论

通过上述案例可以总结出利用套管油中溶解气体含量分析套管是否存在漏气的方法:

- 1) 利用油中溶解气体含量分析套管缺陷时,当套管投运后未更换过绝缘油首先判断套管是否漏气;在有历史数据的情况下,将套管油中溶解气体各

组分含量进行纵向比较,查看变化趋势,如果 H_2 、CO 含量明显减小, CO_2 、 C_2H_4 含量却明显增加,则可以推断套管存在漏气缺陷;在没有历史数据的情况下,与该变电站同类设备横向比较(同类设备使用相同的绝缘油),如果烃类气体中仅 C_2H_4 含量明显偏高,同时 H_2 含量明显偏小($<10 \mu L/L$),CO 含量也明显偏小,既不符合过热特征,也不符合放电特征,则可以判断套管存在漏气缺陷;在既没有历史数据,也没有同类设备的数据进行比较时,如果油中 H_2 、CO 含量明显偏小, CO_2 、 C_2H_4 含量却明显较高,既不符合过热特征,也不符合放电特征,则可以判断套管存在泄漏缺陷。

2) 当判断套管存在漏气缺陷时,再判断套管故障类型及故障严重程度:如果油中没有 C_2H_2 ,有 CH_4 且 C_2H_4 含量高,则套管存在过热故障;如果油中有较高含量的 C_2H_2 ,则套管存在放电或高温过热故障,当气体的产气速率大于逸散速率(即 H_2 、CO、 CH_4 、 C_2H_6 都是先增加、后减小然后又增加, CO_2 、 C_2H_4 一直处于增加的趋势)时,设备存在较为严重的故障,建议退出运行。

参考文献

[1] 操敦奎. 变压器油中溶解气体分析诊断与故障检查[M]. 北京:中国电力出版社,2005.

(上接第 53 页)

[3] UJLINGS J R R, VAN DE SANDE K E A, GEVERS T, et al. Selective search for object recognition[J]. International Conference on Computer Vision, 2013, 104(2):154-171.

[4] GIRSHICK R. Fast R-CNN[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision, 2015: 1440-1448.

[5] REN S Q, HE K M, GIRSHICK R, et al. Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2017, 39(6):1137-1149.

[6] LIU W, ANGUELOV D, ERHAN D, et al. SSD: Single shot multibox detector[C]//European Conference on Computer Vision, Springer, Cham, 2016: 21-37.

[7] REDMON J, DIVVALA S, GIRSHICK R, et al. You only look once: Unified, real-time object detection[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2016: 779-788.

[8] HARIHARAN B, HE Kaiming, DOLLAR Piotr, et al. Feature pyramid networks for object detection[C]//

[2] 张淑珍. 500 kV 变压器、电抗器的套管事故及障碍分析[J]. 电力设备, 2003, 4(6): 24-28.

[3] 凌愨. 变压器油中溶解气体分析诊断与故障检查[M]. 北京:中国电力出版社,2005.

[4] 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 722—2014[S]. 北京:中国电力出版社,2015.

[5] 全国绝缘子标准化技术委员会. 绝缘套管 油为主绝缘(通常为纸)浸渍介质套管中溶解气体分析(DGA)的判断导则: GB/T 24624—2009[S]. 北京:中国标准出版社,2010.

[6] 孟玉单,李萌才,贾瑞君,等. 油中溶解气体分析及变压器故障诊断[M]. 北京:中国电力出版社,2012.

[7] 中国电力科学研究院. 变压器油中溶解气体分析和判断导则: GB/T 7252—2001[S]. 北京:中国标准出版社,2002.

[8] 全国高电压试验技术和绝缘配合文件化技术委员会 高电压试验文件化分技术委员会. 高电压测试设备通用技术条件 第 16 部分: 电力少油设备压力检测装置: DL/T 846.16—2021[S]. 北京:中国电力出版社,2022.

[9] 黄晓峰. 变压器套管将军帽过热缺陷典型特征分析[J]. 电工电气, 2019(9): 54-57.

作者简介:

鲁力铭(2003),男,研究方向为电力设备状态检测与诊断。

(收稿日期:2022-06-04)

Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2017: 2117-2125.

[9] REDMON J, FARHADI A. YOLO9000: Better, faster, stronger[C]//Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2017: 7263-7271.

[10] REDMON J, FARHADI A. Yolov3: An incremental improvement[EB/OL]. [2021-03-25]. <https://arxiv.org/pdf/1804.02767.pdf>.

[11] BOCHKOVSKIY A, WANG C Y, LIAO H Y M. Yolov4: Optimal speed and accuracy of object detection [EB/OL]. [2021-04-15]. <https://arxiv.org/abs/2004.10934>.

作者简介:

庞博(1994),男,硕士,助理工程师,研究方向为人工智能图像识别;

鲍志远(1997),男,博士研究生,研究方向为电动汽车; 杨明坤(1994),男,助理工程师,研究方向为缺陷识别; 张凌浩(1985),男,博士,高级工程师,研究方向为电力人工智能技术。(收稿日期:2022-07-07)

《四川电力技术》2021年度 优秀论文评选结果

一等奖

多场景下梯级水-光-蓄容量配置与优化运行研究

李涛 胡维昊 陈刚 丁理杰 韩晓言 王胜 鲜喜敏 巫里尔沙 唐炯

500 kV高压单芯电缆并联运行关键技术研究

白亦斓 涂扬 李珊珊 李龙才 邹家勇 周特

二等奖

一种基于录波启动信息的电网故障诊断特征向量中心性方法

廖小君 冯先正 张里 王晓茹

单/双协同模式下配电网故障排查的最优巡线规划

苏学能 张华 龙呈 高艺文 李世龙

土壤异质性对模拟直流场环境下X70钢的腐蚀行为影响

田倩倩 王志高 丁德兰 兰新生 吴健 耿植 白晓春

考虑分布式电源接入的配电网电流保护配置及整定方案

何明 杨琪 陈虹静 吴穹 王利平

电场耦合取能技术的仿真与试验研究

倪源 谢施君 贾程乾 夏亚龙 张晨萌

GIS支撑绝缘子内部放电缺陷综合诊断方法现场应用

代晖 熊攀 周电波 杨帆 薛志航 何宇航 姚晓

三等奖

基于二端口散射参数的CVT宽频暂态模型

潘飞 穆舟 刘浩 王彤彤 江波 张榆 张晨萌 谢施君 林国松

考虑可再生能源配额分配的电力零售市场设计

崔东君 和敬涵 程晓春 程宏 王宇 李冬梅

含柔性负荷的火电机组深度调峰的源荷分层优化调度

樊国旗 刘海南 黄健 樊国伟 段青熙 潘伟东 宋朋飞 柳庆丰

考虑多种运行状态的台区拓扑辨识

曾顺奇 吴杰康 李欣 刘国新

配电网用户感知停电事故严重性分析及可靠性评估

刘立扬 李鑫 张文涛 魏俊 叶圣永

梯级水光互补联合发电系统运行安全分析方法及应用

罗彬 苗树敏 邱一苇 高浪 陈刚 王亮

基于地理信息的配电网感应雷闪络风险评估

雷潇 陈梦军 刘小江 廖文龙 刘强

±1100 kV分层接入换流站短路电流计算及地网设计研究

曾维雯 韩毅博 陈晨 李浩原 周思远 谢龙

GIL—架空线混合输电线路故障特性研究

李浩原 王文娟 刘超 李文津 曾维雯 雷雨田



“环保型绝缘气体与设备” 专题征稿启事

电网中广泛使用的绝缘介质SF₆是目前已知温室效应最严重的气体，其温室效应指数GWP是CO₂的23 500多倍，排放后可在大气中稳定存在3200多年。据不完全统计，中国SF₆使用量已超1.88万吨，其中电力系统所属发电、输配电单位SF₆使用量达90%以上。目前，全球SF₆年排放量已超8100吨，产生的温室效应相当于1亿辆小车每年尾气排放的CO₂，SF₆的使用给全球气候变暖带来的影响不容忽视。

近年来全球气候变暖日益严重，积极应对气候变化、推动绿色低碳发展，已成为全球共识和大势所趋。为助力实现“3060”双碳目标，中国正在加速构建清洁低碳、安全高效的能源体系。气体绝缘装备作为中国能源系统中的核心支撑，研究环保型绝缘气体装备对于实现中国能源系统的绿色低碳转型意义重大。为分享在环保型绝缘气体与设备领域取得的成果和进展，探讨该领域面临的机遇、挑战和未来发展，《四川电力技术》特邀武汉大学肖淞副教授、武汉大学李祜副研究员、国网四川电科院夏亚龙高级工程师作为特约主编，主持“环保型绝缘气体与设备”专题，诚邀从事相关研究的学者、研究人员及专业人士投稿。

征稿方向（包括但不限于）

- (1) 环保型绝缘气体的理化性能
- (2) 环保型绝缘气体的绝缘特性
- (3) 环保型绝缘气体的放电机理与放电特性
- (4) 环保型绝缘气体的分解特性与相容性
- (5) 环保型绝缘气体设备应用技术
- (6) 环保型绝缘气体设备运维技术

论文要求

- (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。
- (6) 来稿请用Word排版，格式、摘要、作者信息请参考《四川电力技术》论文模板。

投稿须知

- (1) 请登录《四川电力技术》投稿网站：<http://scdljls.ijournals.cn/scdljls/home>，栏目选择“环保型绝缘气体与设备”专题。
- (2) 投稿截止时间：2022年12月30日。
- (3) 投稿联系人：夏老师 028-69995628 程老师 028-69995169 罗老师 028-69995168