

★四川省一级期刊

• 万方数据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

• 北极星中华期刊网入网期刊

• 中国学术期刊综合评价数据库统计刊源期刊

• 中国农村电气化信息网

• 重庆维普中文科技期刊数据库

• 《超星数字图书馆》入网期刊

• 《中国核心期刊(遴选)数据库》收录

四川電力技术

SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY



川开电气股份有限公司
Chuan Kai Electric Co., LTD.

ISSN 1003-6954



9 771003 695142

四川省电机工程学会 四川电力科学研究院

Vol.38
2015
No.1

四川省电机工程学会 第七届五次常务理事会暨 电力系统智能化、规划专委会学术年会

四川省电机工程学会第七届五次常务理事会暨电力系统智能化、电力系统规划专委会学术年会于2015年1月16日召开。63名常务理事、18名电力系统智能化专委会委员、15名电力系统规划专委会委员出席了会议，9人列席了会议。



王平理事长总结发言



刘勇副理事长讲话



会议现场

常务理事会由副理事长刘俊勇主持，副理事长刘勇代表理事长单位国网四川省电力公司在讲话中简要回顾了过去一年四川电力事业发展所取得的重大成就，对学会的各项工作给予了充分肯定。常务理事胡灿汇报了2014年学会的工作总结及2015年工作计划；副理事长兼秘书长袁邦亮宣读了关于增补朱白桦、赵勤同志为四川省电机工程学会副秘书长的建议以及关于吸纳成都信息工程学院控制工程学院为学会单位会员，增补推荐其为学会第七届理事会常务理事单位的建议；副秘书长张治安传达了中国电机工程学会及四川省科学技术协会的有关会议精神，汇报了学会2014年度工作情况以及学会2014年度先进集体和先进个人建议名单。

王平理事长作总结发言，针对学会工作要主动应对改革新部署、积极适应发展新常态；找准位置，发挥优势，切实做好今年各项工作。

常务理事会后举行了四川省电机工程学会电力系统智能化专委会学术年会。会议由四川省电机工程学会副理事长兼秘书长、智能化专委会主任委员袁邦亮主持，四川大学电气信息学院李华强书记作了《电力系统运行风险预警与评估》报告；国网四川省电力公司原调度中心高工陈苑文女士作《智能电网中的调度控制系统》报告；国网四川电科院电网技术中心继保及自动化技术室姜振超副主任作《新一代智能变电站》报告；国网专家成都供电公司运维检修部郑毅高工作《DA发展与智能电网互操作多源应用》报告。

下午召开了四川省电机工程学会电力系统规划专委会学术年会，会议由电力系统规划专委会副主任委员余熙主持。中国电力工程顾问集团西南电力设计院副总工程师吴安平、国网四川省电力公司经济技术研究院唐权、中国电力工程顾问集团西南电力设计院智能电网技术中心夏雪、国网四川省电力公司电力科学研究院魏巍、中国电力工程顾问集团西南电力设计院杨帆、四川大学电气信息学院刘友波博士分别作了题为《第三次工业革命背景下对智能电网的再认识》、《电网与电源协调发展规划研究》、《新川创新科技园区智能电网规划研究》、《弱联系电网谐波过电压研究》、《云南电网与南方主网异步联网方案简介》、《大电网脆弱性分析及对电网规划的启示》的报告。

川开电气股份有限公司



川开电气股份有限公司 (Chuan Kai Electric Co., Ltd. 简称“**CCK**”或“川开电气”) 始建于1980年, 位于中国西部中心—成都。秉着“提供最优的整体输配电解决方案, 点亮和谐美好生活”的企业使命, 为国家和全球合作伙伴提供252kV及以下安全、稳定的电气产品。同时, 以卓越的创新技术、专业的服务满足不同客户的发展需求。在内部管理上, **CCK** 一直打造“培训兴企、人才强企, 稳定可持续发展”的企业战略, 以“感动客户、以人为本、和谐高效、回报社会”的企业核心价值观赢得了社会各界和广大客户的一致好评。

川开电气对于企业社会责任的承诺已经超过30年。在未来, 川开电气卓越的管理团队和可持续发展战略将为世界带来更多新的发现!



网 址: <http://www.cckdq.com>

服务热线: 400-008-0098



ISO9001质量体系认证证书
注册号: 00112Q21231R0S/4200

诚征全国代理商

全国统一咨询热线:
400-8818-755



国电西高

电力测试领航者

www.gdxgs.com



GDTF 系列

变频串联谐振耐压试验装置

DL/T 849.6 - 2004

适用范围

- 6kV-500kV的交流耐压试验
(电缆、变压器、GIS、开关、互感器等)
- 各种火力、水力发电机的交流耐压试验

国电西高旗下子站:

www.HIPOT.cn

www.SF6TEST.cn

www.CTTEST.cn

www.DCTEST.cn



GDVLF 超低频高压发生器



GDHL 智能回路电阻测试仪



GDJS-6G 绝缘工器具耐压试验装置



GDYZ-301 氧化锌避雷器测试仪



GDKC-6A 高压开关动特性测试仪

企业查询官方网站: www.whhd.gov.cn

武汉国电西高电气有限公司
HV HIPOT ELECTRIC CO., LTD.

电话: 027-65605916
传真: 027-65606183

邮箱: whgdxgs@163.com
地址: 武汉市东西湖区金银潭现代企业城B区7栋

国网达州供电公司

国网达州供电公司隶属国网四川省电力公司特（I）型供电企业，承担达州市四县一市二区的供电任务。

长期以来，达州供电公司坚持“安全第一、预防为主、综合治理”方针，践行“相互关爱、共保平安”理念，以安全、优质、可靠的电能服务达州经济社会发展。目前已建成以500 kV变电站、华蓥山电厂和东岳电厂为电源点，南、中、北部220 kV环网供电，中心区域220 kV双环网供电的高可靠性网架。

近年来，达州供电公司先后荣获“全国五一劳动奖状”、“全国精神文明建设先进单位”、“全国供电可靠性金牌企业”、“全国模范职工之家”“国家电网公司文明单位”、“四川省安全文化示范企业”、“四川省模范职工之家”等称号。



国网达州供电公司总经理、党委副书记倪力



国网达州供电公司党委书记、副总经理汪荣华



四川省电力公司总经理王抒祥调研指导迎峰度夏工作



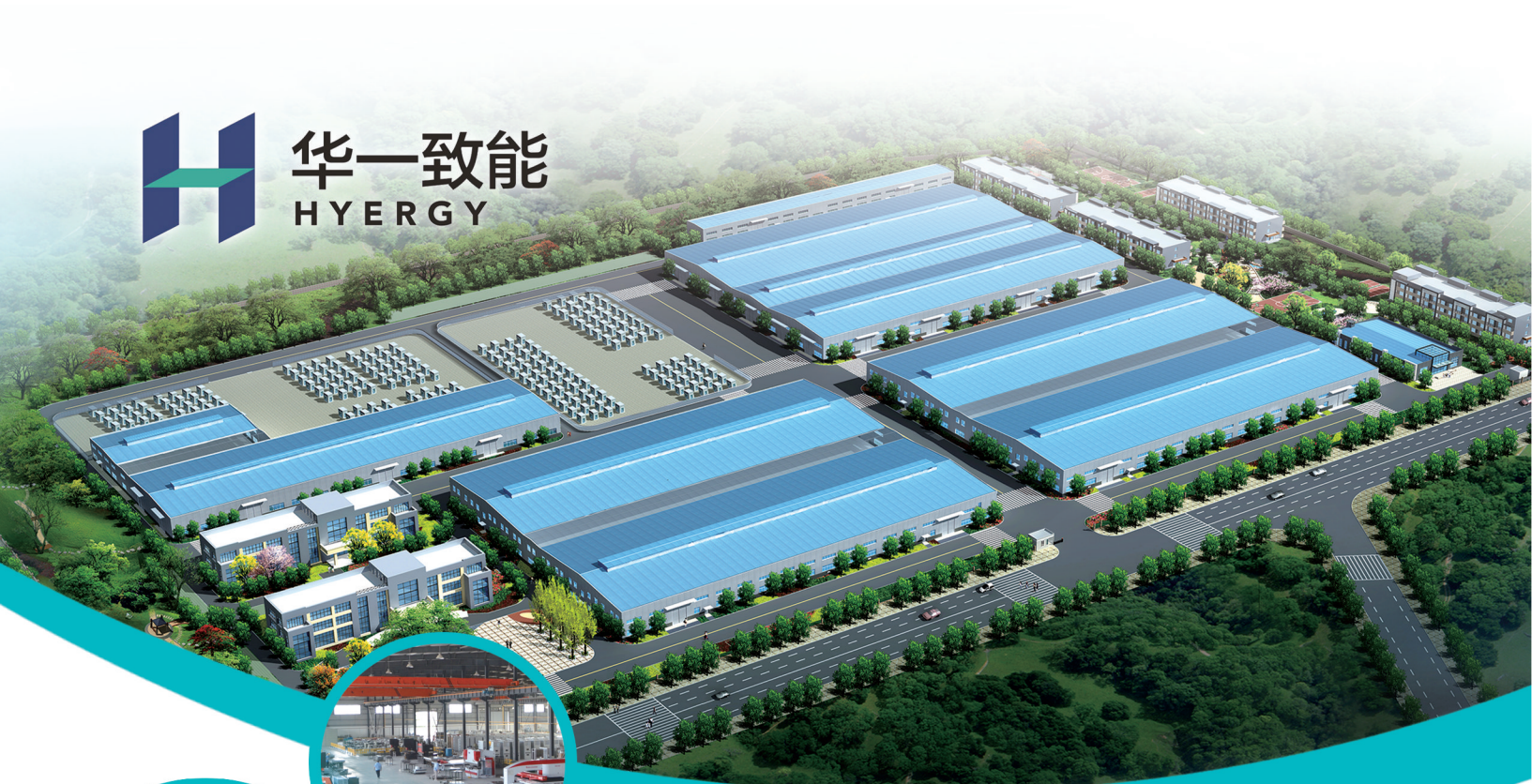
未雨绸缪抗灾害



电网建设如火如荼



华一致能
HYERGY



四川华一电器有限公司座落于四川省广汉市（三星堆古文化遗址），距离成都市区38公里，具有良好的交通运输条件。公司注册资金10160万元，占地230亩(其中生产厂房建筑面积67000平方米)；现有员工500余人，40%员工具有大专以上学历程度。

四川华一电器有限公司成立于2001年，是集研发、设计、制造、销售为一体的输配电成套设备制造企业。是四川省高新技术企业、四川省重合同守信用企业、省级企业技术中心，是低压成套开关设备CCC认证产品A类生产企业。

公司是西门子、ABB等世界知名电气公司战略合作伙伴及授权生产商。

公司主要产品：40.5 kV及以下高低压成套开关设备、户内和户外断路器、预装式变电站、开闭所、“三箱”类产品、电缆桥架、封闭式母线槽、变压器等。产品广泛应用于发电厂、变电站、石化、冶金、市政、轨道交通、机械、建材、军工等国民经济重要领域，畅销全国并出口越南、印度、阿塞拜疆、印度尼西亚、土耳其等国家。以其高品质及高效快捷的服务，赢得了广大客户的认同和好评。

公司按照ISO9001、ISO14001和OHSAS18001标准建立了质量、环境、职业健康与安全一体化的管理体系，使产品从设计、开发到生产、服务全过程都得到有效的管理和控制。所有产品均通过了国家级试验站型式试验，低压成套开关设备全部通过CCC认证。



四川华一电器有限公司

全国服务热线：400-1698-678

地址：四川省广汉市三亚路三段一号

电话：0838-5100668 0838-5105556

邮编：618300

传真：0838-5100888

《四川电力技术》 编辑委员会名单

主任委员 王 平

副主任委员 张 伟

刘俊勇

委 员

(按姓氏笔画为序)

方文弟 王 卓 白家棣

刘 勇 朱白桦 朱国俊

朱 康 邓亚军 鄢小端

李兴源 李建明 严 平

胡 灿 徐 波 唐茂林

韩晓言 谢 舫 甄 威

秘 书 李世平

吴小冬

四川电力技术

双月刊 1978 年创刊

中国标准连续出版号:

ISSN1003-6954
CN51-1315/TM

2015 年第 38 卷第 1 期(总 235 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:胡 灿

副 主 编:吴小冬

编辑出版:《四川电力技术》编辑部

发 行:四川电力科学研究院情报室

地 址:成都市青华路 24 号

邮政编码:610072 电话:(028) 87082037

传 真:(028) 87082036

E-mail:cdsdljs@163.com

印 刷:四川明源印务有限责任公司

封面设计:成都宏泰广告有限公司

国内定价:每册 6.00 元

[期刊基本参数] CN51-1315/TM* 1978*

b* A4* 94* zh* P* ¥6.00* 4300* 21*

2015-2

目 次

• 基金项目 •

一种光伏系统短期功率预测模型 刘沛汉 吐尔逊·伊不拉音 赵 力(1)

智能变电站继电保护仿真案例库研究

..... 黄忠胜 刘 娟 廖小君 王婷婷 韩花荣 刘兴海(5)

基于变电站视频图像的变压器冷却风机运行状态识别方法研究

..... 汶爱文 王印松 常政威(9)

• 高压技术 •

特高压直流输电线路大截面导线极间距取值深化研究

..... 周 唯 周 刚 吴子怡(14)

500 kV 输电线路引流板过热研究

..... 杜 毅 敬兴东 包健康 王利华 吴广宁 曹晓斌 沈金锁(19)

高压输电线视频智能处理防外力破坏方法 杨 帆 余艺翀 叶富彬(22)

线路避雷器在 220 kV 山越线雷害治理中的应用

..... 李晓东 刘守豹 江 来 孟令川 崔 涛 刘 强(25)

几何结构对油纸绝缘电介质频率响应特性影响规律

..... 刘 君 刘玉龙 许 勇 胡 琳 杨 帆(29)

• 智能变电站 •

基于智能视频分析技术的高压开关柜隐患预警与故障诊断方法

..... 周华东 李 晶 周电波 白吉昌(36)

500 kV 智能变电站的程序化操作应用探讨 庄秋月 李凡红(40)

换流站阀厅设备巡检监控系统研究 丁志林 王 超 刘 凡(44)

自适应 PI 控制的双馈变流器高电压穿越工况研究 韩永豪 聂满仓(47)

• 电网技术 •

考虑无功功率协调控制的优化低频减载 郭 健(51)

风电外送对直流系统的影响 辛超山 吕 盼(55)

吐鲁番地区电网低频减载方案对比分析

..... 胡仁祥 王雅捷 常喜强 冯小萍(61)

微源不同控制策略带不平衡负荷能力研究 朱云梦 陈莎莎 母晓莉(65)

基于改进细菌群体趋药性算法的风-蓄-火联合调度的研究 付 伟(71)

新疆电网区域稳控系统标准化讨论

..... 负 剑 常喜强 阿地利·巴拉提 梁 静(77)

铝合金芯铝绞线载流量简化计算的研究 叶 芳(83)

电网建设工程和技术改造工程计价依据差异化研究

..... 董媛媛 廖 磊 佟如意(87)

• 发电厂技术 •

330 MW 循环流化床锅炉启动节油优化探讨 丁 芸 王金鑫 彭北松(92)

《四川电力技术》投稿须知 (35)

CONTENTS

Short - term Power Forecasting Model of Photovoltaic System	Liu Peihan Tuerxun • Yibulayin Zhao Li (1)
Research on Case Database of Relaying Protection Simulation for Smart Substation	Huang Zhongsheng Liu Juan Liao Xiaojun Wang Tingting Han Huarong Liu Xinghai (5)
Research on Identification Method for Operating Condition of Transformer Cooling Fan Based on Video Image of Substation	. Wen Aiwen Wang Yinsong Chang Zhengwei (9)
Research on Electrode Spacing Value of Large Cross - section Conductor in UHV DC Transmission Lines	Zhou Wei Zhou Gang Wu Ziyi (14)
Research on Overheating of Current Plate in 500 kV Transmission Line	Du Yi Jing Xingdong Bao Jiankang Wang Lihua Wu Guangning Cao Xiaobin Shen Jinsuo (19)
Method against Damage from Outside Force for High - voltage Transmission Line Based on Intelligent Video Processing	Yang Fan She Yichong Ye Fubin (22)
Application of Line Arrester to Lightning Disturbance Treatment in 220 kV Shanyue Transmission Line	Li Xiaodong Liu Shoubao Jiang Lai Meng Lingchuan Cui Tao Liu Qiang (25)
Influence Law of Geometry on Dielectric Frequency Responses of Oil - paper Insulation	Liu Jun Liu Yulong Xu Yong Hu Lin Yang Fan (29)
Hidden Danger Early - warning and Fault Diagnosis Method of High - voltage Metal - enclosed Switchgear Based on Intelligent Video Analysis Technology	Zhou Huadong Li Jing Zhou Dianbo Bai Jichang (36)
Discussion on Programmed Operation Application to 500 kV Smart Substation	Zhuang Qiuyue Li Fanhong (40)
Research on Inspecting and Monitoring System for Valve Hall in Convert Station	Ding Zhiling Wang Chao Liu Fan (44)
Research on High Voltage Ride - through of Doubly - fed Converter Based on Adaptive PI Control	Han Yonghao Nie Mancang (47)
Optimal Under Frequency Load Shedding Considering Coordination Control of Reactive Power	Guo Jian (51)
Impact of Wind Power Transmission on HVDC System	Xin Chaoshan Lü Pan (55)
Comparison and Analysis of Low - frequency Load Shedding Scheme in Turfan Regional Power Grid	Hu Renxiang Wang Yajie Chang Xiqiang Feng Xiaoping (61)
Research on Different Control Strategies with Unbalanced Load for Micro - source	Zhu Yunmeng Chen Shasha Mu Xiaoli (65)
Research on Joint Dispatch of Wind - Storage - Thermal System Based on Improved Bacterial Colony Chemotaxis Algorithm	Fu Wei (71)
Discussion on Standardization of Regional Security and Stability Control System of Xinjiang Power Grid	Yun Jian Chang Xiqiang Adili • Balati Liang Jing (77)
Research on Simplified Calculation for Current - carrying Capacity of Aluminum Conductor Alloy Reinforced	Ye Fang (83)
Research on Pricing Basis Differentiation for Power Grid Construction Project and Technical Transformation Project	Dong Yuanyuan Liao Lei Tong Ruyi (87)
Discussion on Fuel? Economy? Optimization for Start - up of 330 MW Circulating? Fluidized Bed Boiler	Ding Yun Wang Jinxin Peng Beisong (92)

SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY

2015 Vol. 38 No. 1
(Ser. No. 235)

Bimonthly, Started in 1978

Address: No. 24, Qinghua Road, Chengdu, Sichuan, China
Postcode: 610072

Sponsor:

Sichuan Society of Electrical Engineering
Sichuan Electric Power Research Institute

Editor in chief: Hu Can

Editor & Publisher:

Editorial Department of SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY

一种光伏系统短期功率预测模型

刘沛汉^{1,2}, 吐尔逊·伊不拉音¹, 赵力¹

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047;

2. 国网新疆电力公司昌吉供电公司, 新疆 昌吉 831100)

摘要: 为提高光伏系统发电功率预测精度, 优化系统的发电计划和减少电力系统运行成本, 进而为系统调度和实时运行控制提供依据以有效减轻光伏发电系统接入对电网的影响, 建立一种基于三层神经网络和功率波动特性的短期光伏出力预测模型。首先利用气象局已发布的日类型和温度信息挑选与预测日最相关的相似日, 再基于神经网络将相似日历史太阳辐照、温度、输出功率建立光伏系统出力初步预测模型; 然后以预测日天气预报信息作为神经网络的输入来获得预测日的功率预测值; 最后基于数学量化的由光伏系统相似日历史出力数据统计分析得到的波动量统计规律对初步预测结果加以修正, 建立了具有较高精度的光伏系统出力预测模型。仿真结果表明, 该方法建立的预测模型具有较高的精度, 进而为调度运行人员提供决策辅助。

关键词: 光伏出力预测; 人工神经网络; 波动量统计规律; 预测模型

Abstract: In order to improve the prediction accuracy of photovoltaic power generation system, the power generation plans of the system are optimized and the operating costs of power system are reduced, and then it provides the basis for real-time scheduling and operating control to effectively mitigate the impact of photovoltaic power generation system on power grid, and a short-term forecasting model based on three-layer neural network and fluctuation characteristics of photovoltaic power is established. Firstly, the information of day type and temperature which have been released by meteorological bureau are used to pick up the similar day which is most relevant to the predicted day, and then a preliminary forecasting model based on neural network is established by using the previous solar irradiance, temperature, output power of the similar days. Secondly, the weather forecasting information of the predicted day is taken as the input of neural network to obtain the preliminary output power of the predicted day. At last, the fluctuation statistics law is obtained through counting and analyzing the historical output data of the similar days, and then the preliminary predictions are corrected by the law, thus a forecasting model with higher precision of PV system output is established. The simulation results show that the forecasting model established by the proposed method has a higher accuracy and can provide the decision support for dispatchers.

Key words: photovoltaic output forecasting; artificial neural network; fluctuation statistical law; forecasting model

中图分类号: TM74 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)01-0001-05

0 引言

光伏发电具有波动性和间歇性, 大规模光伏电站并网运行会对电力供需平衡、电力系统的安全稳定经济运行以及电能质量等产生不可忽视的影响。对光伏电站的输出功率进行预测有助于电网调度部门统筹安排常规电源和光伏发电的协调配合, 适时及时地调整调度计划, 合理安排电网运行方式, 一方面有效地减轻光伏接入对电网的不利影响, 提高电力系统运行的安全性和稳定性, 另一方面降低电力

基金项目: 国家自然科学基金项目(51167018)

系统的旋转备用容量和运行成本, 以充分利用太阳能资源, 获得更大的经济效益和社会效益。因此光伏系统出力预测就显得极为重要。

然而, 目前光伏系统出力预测在精度方面还远不能满足大规模光伏并网电力系统调度的要求, 并已成为阻碍光伏发展的主要瓶颈问题之一。因此, 亟待针对适应大规模光伏并网电力系统调度的光伏系统出力预测模型进行研究。

光伏电池(系统)具有高度非线性特性, 天气类型因素对其输出功率的影响尤为明显, 这种影响来源于不同天气类型条件下太阳辐射强度、温度和云量等各种气象因素的巨大差异。目前光伏出力的

研究大都基于其物理特性进行建模,但现有预测模型存在输入空间维数较高、模型结构复杂等不足^[1],因此,传统方法所建模型与实际系统特性相匹配程度低,吻合度不够,系统性能相差甚远,且对输出预测值亦未加修正,精度就显得极为有限。而神经网络具有逼近任意复杂非线性函数的能力,以之建模,可不考虑建模对象的具体物理意义,规避了模块内部的复杂性。目前,借助神经网络对光伏系统出力进行预测的方法大体归纳为两类:(1)利用系统自身历史输出功率数据的直接预测方法^[5-9];(2)基于太阳辐射强度和温度等天气信息的间接预测方法^[10-13]。但这些方法略显不足的地方就在于没有考虑光伏相似日历史出力波动特性的基础上对神经网络建模并进行二次修正以更大提高预测精度。

基于如上所述,首先以传统反传播神经网络作为建模基础;然后利用气象局发布的日类型和温度信息来挑选与预测日最相关的相似日的历史出力数据作为样本训练神经网络,进而以预测日太阳辐照、温度信息作为输入得到初步预测结果;再利用由历史出力数据分析得到的波动量统计规律对初步预测结果进行修正,建立了具有较高精度的光伏系统出力预测模型;最后,利用实际光伏系统历史数据进行了算例验证分析。

1 光伏系统输出功率特性

光伏系统的输出功率受气象因素、组成元件工作特性以及光伏电池类型与安装运行方式的影响较大^[2-3],具有随机性、不连续性等特点。在影响光伏系统出力的诸多因素中,太阳辐照强度和温度影响最大。从物理意义上讲,太阳的辐照是导致光伏电池产生伏特效应的的主导因素,辐照强度的大小直接影响光伏电池出力的大小^[4]。一般情况下,若天气晴朗少云,大气透明度高,则到达地面的太阳辐射就多,光伏系统出力亦大;相反,若天空中云雾、沙尘多时,大气透明度低,到达地面的太阳辐射就少,光伏电站输出功率小。在额定的太阳能转化率下,当温度一定时,光伏系统输出功率随着太阳辐照强度的增大而增大;当辐照强度一定而温度上升时,光伏系统的转换效率降低,其输出功率会减小。此外,光伏系统的输出功率变化还具有很强的周期性,包括日

变化周期和年变化周期,光伏系统主要是在每天 8:00 ~ 17:00 内输出功率,并且在大多数时间内它和电力负荷有较好的耦合性,在上午的负荷高峰时段光伏发电系统能较好地提供相当数量的功率,起到调峰的作用^[12]。

2 光伏系统出力预测模型建模

基于神经网络和相似日历史出力波动特性,以提高预测精度为目的,提出的光伏系统出力预测思路为:首先基于神经网络技术对预测日出力进行初步预测,然后利用相似日历史出力数据的波动量统计规律对初步预测值进行修正,得到最终预测值。具体预测流程如图 1 所示。

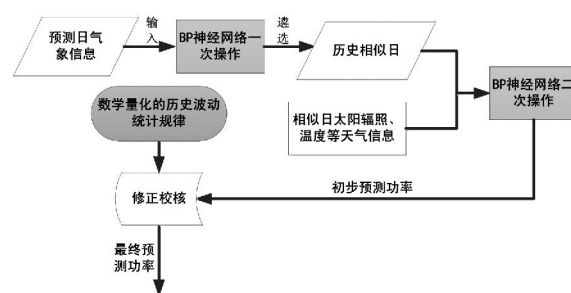


图 1 总预测思路

2.1 反馈型人工神经网络结构

采用反馈型人工神经网络算法的多层感知器是目前应用最广泛的神经网络,在多层感知器的应用中,以图 2 所示的单隐层网络的应用最为普遍。一般习惯将单隐层感知器称为 3 层感知器,所谓 3 层包括了输入层、隐层和输出层。图 2 为所选取的人工神经网络模型,3 层感知器中,输入矢量为 $X = (x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)^T$,图中 x_0 是为隐层神经元引入阈值而设置的;隐层输出矢量为 $Y = (y_1, y_2, \dots, y_j, \dots, y_m)^T$,图中 y_0 是为输出层神经元引入阈值而设置的;输出层输出矢量为 $O = (O_1, O_2, \dots, O_k, \dots, O_l)^T$;期望输出矢量为 $d = (d_1, d_2, \dots, d_k, \dots, d_l)^T$;输入层到输出层之间的权值矩阵用 V 表示, $V = (V_1, V_2, \dots, V_j, \dots, V_m)$,其中列矢量 V_j 为隐层第 j 个神经元对应的权矢量;隐层到输出层之间的权值矩阵用 $W = (w_1, w_2, \dots, w_k, \dots, w_n)$,其中列矢量 w_k 为输出层第 k 个神经元对应的权矢量。下面分析各层信号之间的数学关系。

$$net_j = \sum_{i=1}^n v_{ij}x_i + x_0, (j=1, 2, \dots, m) \quad (1)$$

$$y_j = f(\text{net}_j), (j = 1, 2, \dots, m) \quad (2)$$

隐层到输出层,有

$$\text{net}_k = \sum_{i=1}^m w_{ij} y_i + y_0, k = 1, 2, \dots, l \quad (3)$$

$$O_k = f(\text{net}_k), k = 1, 2, \dots, l \quad (4)$$

输入信息沿图 2 所示的方向正向传递,最后输出层的输出与期望值 O_d 比较,将误差反向传递,调整各个权值和阈值的大小,这样反复操作直至输出误差达到允许的范围。以温度 T 和太阳辐照强度 C 为网络的输入量(输入层输入) 光伏系统的输出功率 P 为网络的输出(输出层输出)。

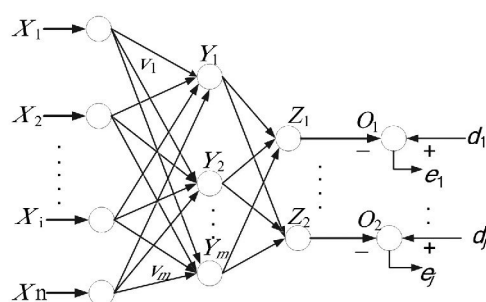


图 2 反馈型人工神经网络结构图

2.2 初步预测建模

在目前国内外的各种预测方法中,由于人工神经网络能够建立高度非线性的模型且特别适宜随机平稳变化过程的模拟,因此光伏系统输出功率预测也是其应用的一个重要领域。

某一时刻的太阳辐照强度、温度、云量等外界自然因素以及光伏系统本身利用太阳能的能力决定了光伏系统在该时刻的输出功率。影响光伏系统将太阳能转化成电能能力的因素比较多,如电池板的类型、电池板自身的特性曲线以及电池板的分布等。光伏系统自身具有高度的非线性特性,若孤立地考察每个影响因素与其输出功率之间的关系,这对于光伏系统并网电力系统的研究是没有实际意义的;但是将这些影响因素综合作为一个整体加以考虑,其与光伏系统的输出功率之间一定存在着某种映射关系^[8]。因此,光伏系统输出功率的预测模型必须要能够高精度地反映这种映射关系。

神经网络的主要优点是可以学习和自适应未知信息,能够通过学习已有样本信息来建立反映所要处理信息之间的内在联系的模型。对于光伏系统输出功率预测初步模型的建模思路是:构建神经网络,利用气象局发布的日类型和温度信息来挑选与预测日最相关的相似日,利用相似日的历史太阳辐照强

度、温度以及对应的光伏系统输出功率数据对模型进行训练。当用大量的历史数据将其训练到所要求精度时,该神经网络模型就能在所要求的精度范围内模拟作为研究对象的特定光伏系统,即实现初步预测模型的建立。由于训练模型需要的数据量较大,为了提高程序的运算速度和模型预测的精度,必须先对这些数据进行预处理,再用于模型的训练,进而得到较准确的初步预测模型,对光伏系统的未来某日内的输出功率曲线进行初步预测。具体程序流程如图 3 所示。

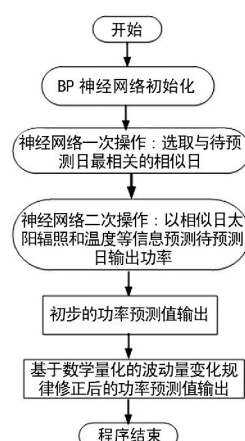


图 3 基于神经网络的光伏出力初步预测流程图

2.3 初步预测误差修正建模

光伏系统的历史出力存在着特定的出力波动特性,作为研究对象,预测日的预测出力也一定要满足该光伏系统中由相似日历史出力统计得到的波动特性,因此提出在初步预测的基础上,依据相似日历史出力波动量统计规律对预测值加以修正。

将相似日从 7:00 ~ 19:30 每隔 10 min 采样得到的 75 个历史出力值中相邻两个采样点出力值做差并取绝对值得到其波动量 $|P_{n+1} - P_n|$,并形成历史出力波动量序列 ΔP_n ,对该序列进行统计分析,根据波动量范围,划分出 0-1、1-2、2-3 以及 3-4 四个波动量区间,计算其在不同区间内的概率分布 P_i 和历史最大波动量 $\max(\Delta P_n)$;再将各波动量区间平均值 $\Delta \bar{P}_i$ 进行加权求和得到如公式(7)所示的综合置信度修正量 $C\Delta P$,式中 $\Delta \bar{P}_i$ 所占权重即为历史波动量在对应波动量区间内的概率分布;对初步预测出力 P_n^e 也做同样的处理,相邻两个采样点出力值做差得到初步预测波动量序列 ΔP_n^e ,将超过历史最大波动量的 ΔP_n^e 用式(5)综合置信度修正量 $C\Delta P$ 进行修正,修正后得到的新的波动量序列及最终预

测出力分别记为 ΔP_n^0 、 P_n^0 。综上所述,所提出的修正措施可以用公式(6)和公式(7)来表示。

$$C\Delta P = \sum_{i=1}^j P_i \Delta \bar{P}_i \quad j = \text{区间总个数} \quad (5)$$

$$\Delta P_n^0 = \begin{cases} \Delta P_n^e, & \Delta P_n^e \leq \max \Delta P \\ C\Delta P, & \Delta P_n^e > \max \Delta P \end{cases} \quad (6)$$

$$P_{n+1}^0 = \begin{cases} P_n^0 + \Delta P_n^0, & P_{n+1}^e \geq P_n^e \\ P_n^0 - \Delta P_n^0, & P_{n+1}^e < P_n^e \end{cases} \quad (7)$$

对初步预测值加以修正的流程如图 4 所示。

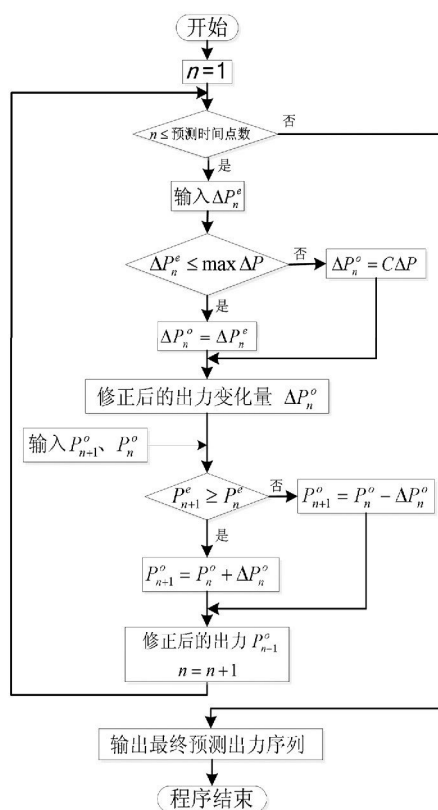


图 4 初步预测误差修正流程图

3 算例分析

3.1 算例仿真与分析

以新疆某光伏系统作为研究对象,对某年 9 月 21 日系统出力进行预测。根据 9 月 21 日最新天气预报,通过分析光伏电站每日监控数据的变化趋势,并比照该地区 9 月中旬每一天早、中、晚三时间段的太阳辐照强度、温度、湿度、风力等级以及云层状态等信息,在文献 [8] 所定义的相似日选取方法的基础上,遴选出 9 月 18 日作为样本来训练神经网络,拟对 9 月 20 日光伏出力进行预测。该光伏系统某年 9 月 18 日的太阳辐照强度、温度和相应输出功率

数据为分析样本,该样本从 7:00 ~ 19:30 以每隔 10 min 为一个采样点,共计连续 75 点。图 5、图 6 和图 7 分别给出了这 75 个采样点的太阳辐照强度、温度和相应输出功率的数据及其变化趋势,图 8 为其历史出力数据波动量统计图。

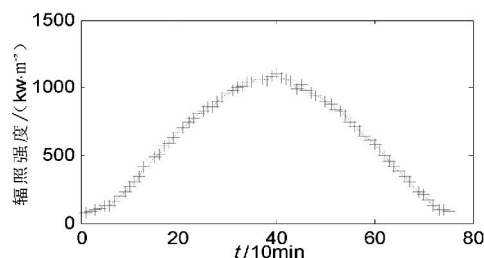


图 5 太阳辐照强度历史数据

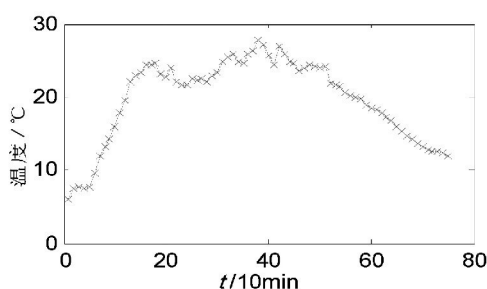


图 6 温度历史数据

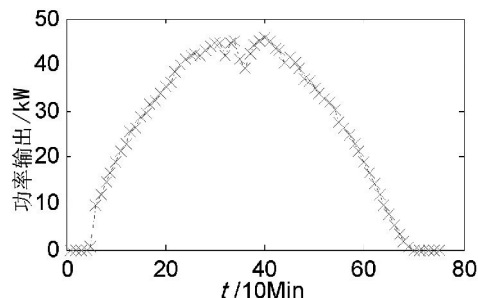


图 7 输出功率历史数据

用 18 日历史太阳辐照强度、温度和相应输出功率数据做学习样本对神经网络进行训练,最后应用训练好的神经网络对该光伏电站 21 日的输出功率进行预测,并与实际输出功率比较,考证其预测误差。该光伏电站预测模型预测得到的 21 日出力如图 9 所示,初步预测值、最终预测值和实测值 3 条曲线对比如图 10 所示。从图 10 可以看出初步预测值基本上跟踪了实测值的变化趋势,但在局部时段出现了畸变点;经过修正后的最终预测值就更加接近于实测值,基本趋于重合。通过仔细观察可以发现即使是修正后的预测值在某些时段依然存在较大误差,此现象的出现可能是由于该时段外界条件的急剧变化大大地增强了光伏系统的非线性特性所致。

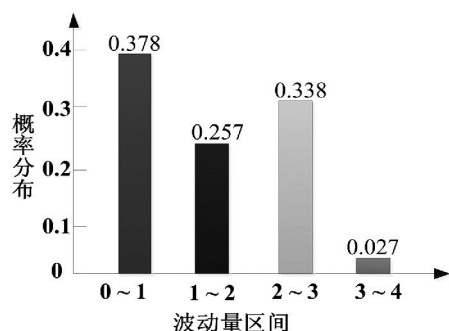


图 8 相似日历史数据波动量统计图

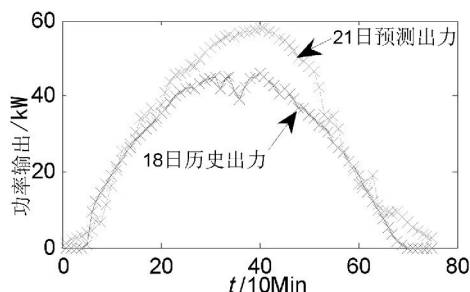


图 9 相似日历史出力与预测日预测出力

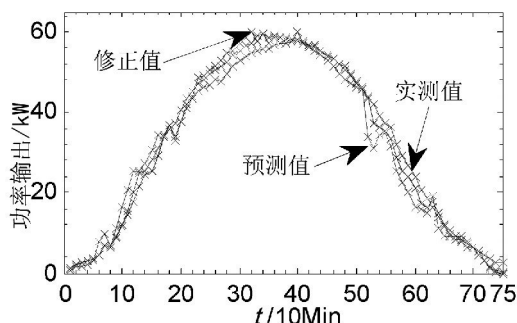


图 10 预测日输出功率预测值和实际值

3.2 光伏系统预测性能评估

利用 75 个采样点采用每日平均相对误差百分比 (daily mean relative percentage error, DMRPE) η_{DMRPE} 和均方根误差 (root mean square error, RMSE) η_{RMSE} 对发电预测结果评估, DMAPE 评估整个系统的预测能力, RMSE 评估整个光伏系统预测出力值的离散程度。

$$\eta_{\text{DMRPE}} = \frac{1}{75} \sum_{i=1}^{75} \frac{|P_{fi} - P_i|}{P_i} \times 100\% \quad (8)$$

$$\eta_{\text{RMSE}} = \frac{1}{p} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{75} (P_{fi} - P_i)^2}{75}} \quad (9)$$

式中, P_{fi} 、 P_i 为预测修正及实际的发电功率, kW · h; P 为光伏系统额定功率, kW · h。

计算表明, 预测相对误差 η_{DMRPE} 主要集中于 $\eta_{\text{DMRPE}} \leq 4.7\%$ 之间。如果误差落在 Δe_j 内的概率为

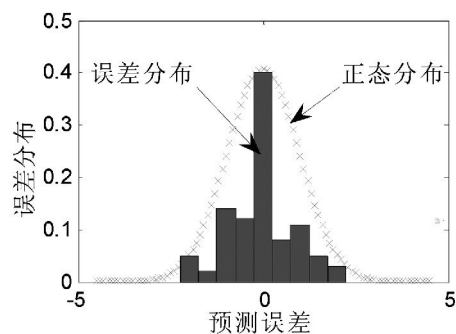


图 11 预测误差概率分布

P_j , 则 P_j 可以用公式 (10) 来计算。

$$P_j = \int_{p_k}^{p_{pk} + \Delta e_j} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot \exp\left(-\frac{e^2}{2\sigma^2}\right) \cdot de \quad (10)$$

由式 (10) 计算可得误差在 $\eta_{\text{DMRPE}} \leq 4.7\%$ 内的概率为 0.948 7, 大于 4.7% 的概率仅为 0.051 3。

所提预测模型在很大程度上高精度地反应了光伏系统外界条件与输出功率之间的映射关系。预测相对误差近似服从正态分布, 其期望值近似为 0, 其均方根误差 η_{RMSE} 为 0.951 7, 如图 11 所示。

4 结 论

高精度的光伏电站输出功率预测对优化系统发电计划、减少电力系统运行成本和系统经济可靠运行有着重要现实意义。提出以传统反馈型神经网络作为建模基础, 利用相似日太阳辐照、温度、历史出力信息对其训练建立的初步预测模型对预测日的光伏系统出力进行了预测, 再根据相似日历史出力波动量统计规律设计的算法对初步预测结果加以修正, 并做了预测误差的概率统计和分析。算例分析结果说明, 该预测模型显著提高了预测精度, 较好地模拟了现场光伏系统的实际情况, 为从预测太阳辐照强度、温度到预测功率提供了一种良好的方法。对于研究大规模光伏系统出力预测提供一定参考。

参考文献

- [1] 李晶, 许洪华, 赵海翔, 等. 并网光伏电站动态建模及仿真分析 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(24): 83 - 87.
- [2] 张艳霞, 赵杰, 邓中原. 太阳能光伏发电并网系统的建模和仿真 [J]. 高电压技术, 2010, 36(12): 3097 - 3012.

(下转第 13 页)

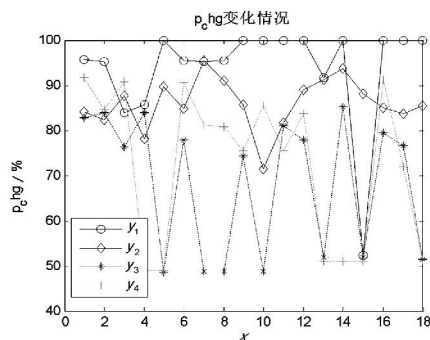


图 8 p_{chg} 变化情况

4 总结与展望

连通区域质心分析法有时不准确,其原因可能是因为这个方法中涉及到腐蚀、膨胀、阈值化和分水岭分割等操作,这些操作本身会改变图像,累加在一起有时候就会出现结果可能不准确现象。如果能够对连通区域有 2 个、3 个等质心时的变化情况更加详细的进行分析,则可以更好地判断风机转动与否,判断风机转动的结果将更加准确,适用场合将更加广泛。

两种方案各有优缺点,而对于两种方法,都存在如何去定义转动与不转动的界限问题及感兴趣区域大小的选定问题。如果能够采集大量的视频信息,并结合统计分析法等数学方法进行研究,可以更有

效地定义风机转动与不转动的界限,从而更广泛地适用于风机转动与否的判断。仅仅给出了两种思路,或许还可以结合两者的优点,再结合目前已有的跟踪算法如光流法、均值漂移算法等,然后通过大量的实验使其更加具有广泛实用性。

参考文献

- [1] 刘瑞祯,于仕琪. OpenCV 教程——基础篇 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社,2007.
- [2] (加) Robert Laganiere 著; 张静译. OpenCV 2 计算机视觉编程手册 [M]. 北京: 科学出版社,2013.
- [3] 高杨. 视频质量诊断算法研究与实现 [D]. 沈阳: 东北大学,2011: 13 - 14.
- [4] (美) 布拉德斯基,克勒著; 于仕琪,刘瑞祯译. 学习 OpenCV [M]. 北京: 清华大学出版社,2009: 1 - 16,351 - 355.
- [5] 岑银. 基于 OpenCV 的智能视频监控设计 [J]. 电子元件应用,2010,12(7): 47 - 49,52.

作者简介:

汶爱文(1990),硕士,主要研究方向为变电站视频质量诊断相关技术研究;

王印松(1967),博士生导师,主要研究方向为先进控制策略及其在电力系统中的应用、清洁能源发电控制技术;

常政威(1981),博士,高级工程师,主要研究方向为智能电网技术研究。

(收稿日期:2014 - 09 - 17)

(上接第 5 页)

- [6] 茆美琴,苏建徽,张国荣,等. 大型光伏并网系统的建模与仿真 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2005,28(9): 1069 - 1072.
- [7] Istvian Nagy, et al. Small - signal Analysis of a Dual Channel Resonant Buck and Boost Converter [J]. Industrial Electronics, Proceedings of the 2002 IEEE International Symposium on, July 2002, 4(8 - 11): 1279 - 1284.
- [8] 郭亮,陈维荣,贾俊波,等. 基于粒子群算法的 BP 神经网络光伏电池建模 [J]. 电工电能新技术,2011,30(2): 84 - 87.
- [9] 张艳霞,赵杰. 基于反馈型神经网络的光伏系统发电功率预测 [J]. 电力系统保护与控制,2011,39(15): 96 - 101.
- [10] 卢静,翟海青,刘纯,等. 光伏发电功率预测统计方法研究 [J]. 华东电力,2010,38(4): 0563 - 0567.
- [11] 王彬荃,苏适,严玉廷. 基于 BP 神经网络的光伏短期功率预测模型 [J]. 电气时代,2014(5): 78 - 81.

- [12] 张岚,张艳霞,郭端敏,等. 基于神经网络的光伏系统发电功率预测 [J]. 中国电力,2010,43(9): 75 - 78.
- [13] 王飞,米增强,杨奇逊,等. 基于神经网络与关联数据的光伏电站发电功率预测方法 [J]. 太阳能学报, 2012,33(7): 1171 - 1177.
- [14] 张艳霞,赵杰. 基于反馈型神经网络的光伏系统发电功率预测 [J]. 电力系统保护与控制,2011,39(15): 96 - 101.
- [15] 代倩,段善旭,蔡涛,等. 基于天气类型聚类识别的光伏系统短期无辐照度发电预测模型研究 [J]. 中国电机工程学报,2011,31(34): 28 - 35.
- [16] 金鑫,袁越,傅质馨,等. 天气类型聚类的支持向量机在光伏系统输出功率预测中的应用 [J]. 现代电力, 2013,30(4): 13 - 18.

作者简介:

刘沛汉(1988),硕士研究生,研究方向为洁净能源及其并网技术。

(收稿日期:2014 - 12 - 22)

智能变电站继电保护仿真案例库研究

黄忠胜¹, 刘 娟², 廖小君¹, 王婷婷¹, 韩花荣¹, 刘兴海¹

(1. 国网四川省电力公司技能培训中心, 四川 成都 610072;

2. 国网成都供电公司, 四川 成都 610081)

摘 要: 结合数字物理混合仿真系统和 110 kV 实训智能变电站对继电保护仿真案例库开发的有关问题进行研究, 包括数字物理混合仿真系统架构研究与智能站继电保护案例库开发方案, 提出了开发存在的问题和改进方法, 并对以后的应用前景进行了分析。该仿真案例库的开发有效地提高了智能变电站的培训效果。

关键词: 数字物理混合仿真系统; 智能变电站; 仿真案例库; 培训

Abstract: Combined with the digital - physical hybrid simulation system and the training of 110 kV smart substation, the relevant problems about the development of case database for relay protection simulation are studied, including the research on the structure of digital - physics hybrid simulation system and the development scheme for case database of relay protection in smart substation. The existing problems of the development and its improvement methods are proposed, and the future application is analyzed. The development of simulation case database can effectively improve the training effect of smart substation.

Key words: digital - physical hybrid simulation system; smart substation; simulation case database; training

中图分类号: TM74 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2015) 01 - 0006 - 03

0 引 言

智能变电站作为坚强智能电网的重要基础和节点支撑, 是必不可少的建设内容。随着智能变电站的相继投运, 为满足智能变电站检修和运行人员的培训需求, 国网四川省电力公司技能培训中心于 2011 年建成一座 110 kV 实训智能变电站, 主要作为教学培训使用。由于智能变电站技术是新事物, 智能变电站培训工作需要借助数字信号仿真这样的先进工具, 开发智能变电站继电保护仿真案例库能够满足继电保护和变电运行人员的培训, 并能承担变电站整组复杂调试、故障排查分析等高层次培训。

1 数字物理混合仿真系统架构研究

仿真系统采用数字物理混合仿真技术, 充分利用 110 kV 实训智能变电站现场真实的物理设备, 实现实时电网仿真与真实的物理设备无缝对接, 实现了智能变电站数字物理混合仿真。智能变电站混合仿真需要对仿真变电站及其相邻线路组成的局部电

网采用电磁暂态模型, 通过电磁暂态计算实时输出变电站正常运行和事故状态下的电压和电流波形, 实时反映保护动作后电网或变电站的电压和电流信号的动态特性。通过信号输入输出接口装置, 智能一次设备操作机构模拟装置、电子式互感器模拟装置等, 将电磁暂态仿真系统和真实二次设备有机结合起来, 实现了数字仿真与实际二次设备的无缝连接。智能变电站混合仿真可以将数字仿真设备和真实的二次设备放置于同一个仿真系统中有机连接、灵活配置, 构造了更为逼真的运行环境, 更加有效的对智能变电站继电保护和运行人员进行培训。图 1 是展示了数字物理混合仿真系统的结构。

1.1 软件系统

电磁暂态仿真软件采用并行计算技术、综合友元法以及输电线路任意点故障在线仿真算法实现实时电磁暂态仿真软件的长期连续稳定运行能力、高实时性及强交互性。该软件建立了交流电压源、多相分布参数输电线路、变压器、负荷、断路器、整流器、逆变器、交直流滤波器、平波电抗器各类刀闸以及集中电阻、电感和电容等一次设备的电磁暂态模型, 建立了母线、线路、变压器等设备的短路和断线等故障模型, 也可以进行任意的组合以构建更为复

基金项目: 2014 年国网四川省电力公司科技项目(521922140003)

现架构上需考虑许多问题,包括仿真模型系统如何搭建;仿真系统和实际保护装置设备的信息交互;故障模拟及考核方式等。除仿真案例网络模型外,还包括了培训时实施方案、故障模拟设置、考核方式(如波形分析、负荷测试、回路查找、事故判断方法等)。

2.1 仿真案例库模型搭建及相关设置

仿真案例库的模型搭建是一个很重要的问题,首先模型应该和接入的实际保护设备的一次接线满足一致,这样才能保证保护动作行为的正确性和合理性。其次,仿真案例库的运行方式应当灵活,以适应不同的培训需求,如可以方便调整潮流,以灵活地开展带负荷测试等培训模块,或者进行不同的故障设置模拟。最后,仿真案例库的搭建应考虑一定的扩展性,尤其外部等值系统的考虑,以及和安控系统的接口等等。图2是按照110 kV实训智能变电站搭建的一次设备模型。

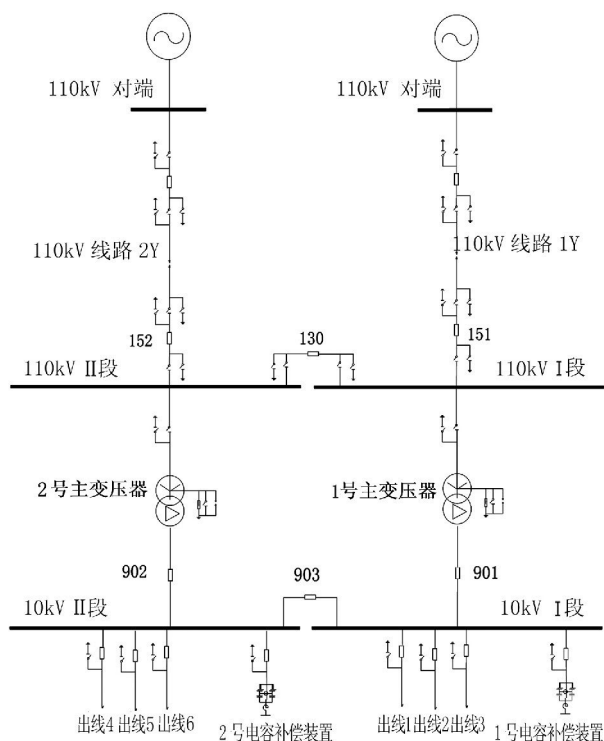


图2 110 kV实训智能变电站一次模型

2.2 仿真案例开发方案

仿真案例库开发充分和智能站继电保护培训课程体系相结合,其开发成果包括了继电保护专业培训和考核标准的多个模块,每个仿真案例应包含仿真案例说明和培训实施方案。仿真案例说明主要阐述该案例的分析说明、仿真的系统参数等,以便培训

时提供给培训师使用。培训实施方案主要包括故障前运行方式说明、保护相关定值、保护动作记录、故障录波报告、事故分析考核模块,培训时提供给学员使用,该部分通过图片和录波图的方式以附件报告的形式完成,便于进行离线培训。

目前结合110 kV实训智能变电站的保护装置,已完成110 kV线路保护、主变压器保护、110 kV备用电源投入装置的继电保护仿真案例。仿真案例库主要包括3个方面的内容:保护装置带负荷测试、典型故障仿真和典型事故仿真。仿真模型能方便进行各种潮流的调整,通过设置虚端子回路故障、修改TA变比等^[4],让培训学员掌握带负荷测试方法、仪器使用、分析和查找回路问题的方法。典型故障仿真库建设通过仿真系统仿真包括瞬时性故障、永久性故障、非全相故障、高阻接地故障等。通过仿真系统模拟保护正确动作,通过分析保护装置的动作报告和录波报告,让培训学员了解光纤差动保护、距离保护、零序保护及自动重合闸等保护正确动作时的动作行为,学会进行保护和故障录波装置典型录波报告的分析,掌握分析判别典型故障的特征。典型事故案例库的建设以近3年国网四川省电力公司典型保护事故案例以及各种保护选拔和竞赛典型回路故障为参考,精选有代表性的保护不正确动作案例。利用典型事故案例库,可以让培训学员掌握较复杂的事故分析方法、培训学员综合利用系统知识和技能知识的能力。

3 系统开发问题及应用前景

3.1 开发有关问题

仿真案例库开发过程中的主要问题包括以下几点。

(1) 仿真案例的选取具有一定的局限性,现场发生的相关案例如电子式互感器双A/D采样异常、丢帧、错序等,用仿真系统目前难以模拟。

(2) 目前该库仿真的变压器保护、线路保护都是110 kV电压等级的装置,其虚端子二次回路与220 kV及500 kV智能变电站比较相对简单,故障类型较少。待以后培训基地有220 kV及以上电压等级的智能变电站保护设备后,可以考虑扩展该库的内容,满足220 kV及以上电压等级的培训需求。

3.2 应用前景

(下转第18页)

线对极间距影响的计算分析结论,得出耐张塔的电
磁环境按照导线表面电场强度增加近百分之三,极
导线平均对地高度 23 m,在不同极导线间距下(11
~ 26 m) 正极性导线对地投影外 20 m 处可听噪声
50% 值,按中国电科院推荐的方法修正计算耐张塔
最小极间距。为了均衡挂点布置、方便铁塔加工、简
化施工组装,耐张塔最小极间距离可考虑统一取值,
汇总统计值如表 8 所示。

表 8 耐张塔最小极间距离

海拔/m	极间距离/m
500	14
1 000	14
1 500	15
2 000	16

参考文献

[1] 吴桂芳. ± 800 kV 直流和 1000 kV 交流线路同走廊时

的最小接近距离研究 [J]. 中国电力, 2007 (12): 22 - 26.

[2] GB/T 1179 - 2008, 圆线同心绞架空导线 [S].

[3] GB 50790 - 2013, ± 800 kV 直流架空输电线路设计规
范 [S].

[4] 布春磊, 周海鹰, 江明. 特高压直流输电线路大截面钢
芯铝绞线选型研究 [J]. 电力建设, 2013, 34(9): 102 -
104.

[5] 万建成, 李健, 陈媛, 等. 铝合金芯铝型绞线在大容量
直流线路中的应用 [J]. 电力建设, 2013, 34(8): 105 -
106.

作者简介:

周 唯(1982), 硕士, 工程师, 从事输电线路技术设计
工作;

周 刚(1964), 本科, 高级工程师, 主要从事输电规划、
研究、咨询设计工作;

吴子怡(1981), 硕士, 工程师, 主要从事电网工程咨询
设计及造价设计工作。

(收稿日期: 2014 - 10 - 28)

(上接第 8 页)

在仿真系统平台上完成的继电保护动作案例,
收集案例的参数设置、动作报告和故障波形,通过图
片和录波图的方式以附件的报告形式完成,便于进
行离线培训,即该案例库可以在实训站的仿真系统
上故障再现,也可以脱离 110 kV 实训智能变电站离
线使用,培训地点灵活。通过变压器保护、线路保
护、备自投装置案例,使智能变电站继电保护常见
的保护动作行为和带负荷测试分析得到了完整的、具
体的呈现,便于学员理解和掌握。

目前该案例库已在国网新员工培训和智能变电
站技术培训班中使用,在实训操作培训之后,再使用
案例具体地分析故障过程,易于学员理解,加深印
象,取得了良好的培训效果。后续可以在以下领域
发挥更大作用。

(1) 利用数字物理混合仿真系统和 110 kV 实
训智能变电站的现场设备,可以开展变电运行和厂
站端自动化专业的培训。

(2) 如果有继电保护故障信息培训系统,利用
仿真案例库,可以更好地对故障信息系统培训做有
益的补充。

(3) 仿真案例库开发建设的建模方法、测试技

术和方法可以为自动化子站、主站仿真案例库的
开发积累丰富的经验,促进这些专业技能培训的能力
提升。

参考文献

[1] Q/GDW 383 - 2009, 智能变电站技术导则 [S].

[2] Q/GDW 426 - 2010, 智能变电站合并单元技术规范
[S].

[3] Q/GDW 428 - 2010, 智能变电站智能终端技术规范
[S].

[4] 高亚栋, 朱炳铨, 李慧, 等. 数字化变电站的“虚端子”
设计方法应用研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2011
(5): 120 - 123.

作者简介:

黄忠胜(1982), 硕士, 讲师, 从事继电保护方面研究;

刘 娟(1984), 学士, 助理工程师, 主要研究方向智能
用电和配电自动化;

廖小君(1974), 硕士, 副教授, 从事微机继电保护方面
研究及信息系统的研究;

王婷婷(1977), 大学, 高级工程师, 从事继电保护方面
研究;

韩花荣(1981), 硕士, 讲师, 从事继电保护方面研究。

(收稿日期: 2014 - 12 - 22)

基于变电站视频图像的变压器冷却风机运行状态识别方法研究

汶爱文¹, 王印松¹, 常政威²

(1. 华北电力大学, 河北 保定 071003; 2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072)

摘要: 基于 OpenCV2 图像处理技术, 提出了两种针对变压器冷却风机转动情况判断的方案: ①连通区域质心分析法: 结合阈值算法和分水岭算法得到感兴趣区域的连通区域, 并求其质心, 通过分析质心位置的变化情况判断风机转动与否; ②直方图统计分析法: 通过求取图像直方图信息判断风机转动与否。实验结果和实验相关数据的分析验证了两种方案的可行性和实用性。

关键词: OpenCV2; 连通区域; 质心; 直方图

Abstract: Two schemes are proposed which are the judgments about the rotation of transformer cooling fan based on OpenCV2 image processing technology. One is centroid analysis of connected region: combined with threshold algorithm and watershed algorithm, the interested connected region is obtained to get its centroid, and then the changes of centroid's position are analyzed to judge whether the fan rotates or not. The other one is histogram statistical analysis: through calculating the histogram information of images, it is determined whether the fan rotates or not. The experiment results show that the proposed two schemes are feasible and practical.

Key words: OpenCV2; connected region; centroid; histogram

中图分类号: TM85 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)01-0009-05

0 引言

变压器是电网中的重要设备之一, 而变压器冷却问题是其中一个重要的问题。温升过高, 变压器将长期处于高温状态, 尤其是变压器满负荷运行且环境温度也较高时, 易使绝缘材料老化加速, 必将影响变压器的使用寿命和安全可靠性, 甚至导致短路, 造成事故, 给用户带来安全隐患。

目前, 变电站对变压器冷却风机(以下简称风机)转动情况的监视没有一个很好的手段, 当风机停止转动导致油温升高到一定程度从而引发报警, 然后才采取相应的措施。这样处理问题存在延时性, 并且会造成变压器寿命缩短等问题, 所以及时地检测风机的转动情况是一种非常有意义的解决方案。

随着电网技术的发展, 目前国内越来越多的变电站特别是智能变电站, 能远程对变电站的电气设备 & 运行状态进行遥测、遥信、遥控和遥调(即传统

的“四遥”), 从而可实现变电站的无人值守。而“第五遥”(遥视方面), 视频监控系统也已大量建设。

如果能有效利用视频监控系统, 通过视频处理、图像处理技术等将采集到的视频信息用于判断风机的转动情况, 这或许是未来一个发展的方向。

1 对象特性分析

研究对象风机整体相对于地面处于静止状态, 而目前被大量研究的为目标跟踪问题, 其研究对象相对于地面处于运动状态。另一方面, 风机整体呈灰色调, 彩色信息单一。基于上述两个难点, 将尝试两种方案用于判断风机扇叶相对于风机是否处于转动状态。

2 连通区域质心分析法

原理: 如果扇叶转动, 则图像中像素分布会发生变化; 而如果扇叶没有转动, 则图像中像素分布基本不发生变化。对于一幅图像, 通过提取其二值图像

的连通区域,然后计算连通区域的质心,当视频序列图像在发生变化时,其相应的连通区域的质心也会发生变化。围绕对象的这个显著特征,下面通过求取图像中连通区域的质心的变化情况进行风机转动与否的判断。

2.1 连通区域质心分析法判断步骤

(1) 求取连通区域

首先,(第一帧图像)选取风机所在位置作为感兴趣区域,并通过阈值函数 $cv::threshold$ 进行阈值处理,得到合适的阈值 $threshold_value$,并再次在上述感兴趣区域中选取一部分作为进行连通区域质心分析的感兴趣区域 $rect$ 。

然后,采用 $cv::cvtColor$ 函数将感兴趣 $dstImg$ 图像灰度化,得到 $binary$ 灰度图像。并用 $cv::threshold$ 函数得到 $binary$ 图像的二值图像 $binary$ 。

下面开始进行分水岭处理。首先需要识别出确定属于前景的像素和确定属于背景的像素。用标签 255 标记前景像素,用标签 128 标记背景像素,其他像素用 0 标记。

腐蚀和膨胀是最基本的形态学运算。形态学滤波通常使用二值图像,在此用高(白色)像素表示前景物体,用低(黑色)像素表示背景。

前景图像 fg 直接取 $binary$ 即可。

对 $binary$ 二值图像先进行 $cv::dilate$ 函数膨胀处理并调用 $cv::threshold$ 函数即可得到背景图像 bg 。生成的黑色像素对应的是背景像素。这就是膨胀之后的阈值化运算将像素赋值为 128 的原因。组合使用 fg 与 bg 图像形成标记图像 $markers$ 。

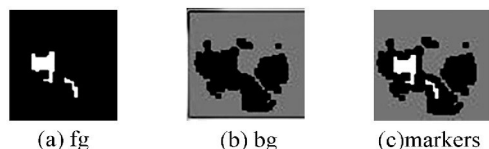


图1 标记图像

接着调用 $cv::watershed$ 函数进行分水岭分割,从而使输入的标记图像得到更新,生成最终的分水岭分割。

标记图像得到更新,每个零像素被赋值为输入标签之一,而隶属于当前发现的边界的像素被赋予 -1,生成最终的分水岭分割,经过处理得到最终的连通区域图像 $segment$ 。

(2) 提取连通区域质心信息

提取连通区域的轮廓需要二值图像,故先使用



图2 segment

$cv::threshold$ 进行阈值化处理,得到二值图像 $contour$ 。

使用 $cv::findContours$ 函数提取连通区域轮廓。该函数输入的为一幅二值图像,输出的是轮廓的向量,而轮廓本身是 $cv::Points$ 的向量。所以定义 $contours$ 为 $std::vector$ 的 $std::vector$ 作为第二个参数。第三个参数 CV_RETR_LIST 检索所有的轮廓,并将其放入 $list$ 中。

然后遍历所有轮廓,求取它们的力矩,并将质心坐标转化为整数得到二维点 $point_mom$ 。统计视频序列前 max_COUNT 帧中每一帧图像的 $point_mom$ 和 $contours.size()$ 的大小,并计算 $contours.size()$ 为 1 时的 $point_mom$ 点坐标的 x 和 y 变量的变动情况。

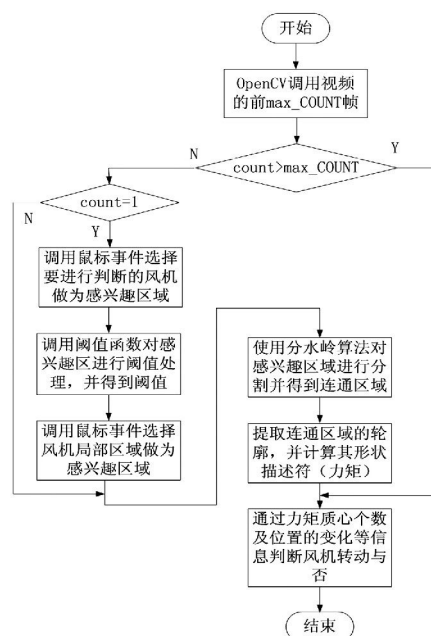


图3 连通区域质心分析程序流程示意图

因为选取的感兴趣区域 $rect$ 很小,强制限制了 $rect.width = 12, rect.height = 12$,所以基本保证了这个区域中 $contours.size()$ 的大小基本为 1、2、3 或者不存在连通区域(即 $contours$ 向量为空),为 1 的概率比较大,从而统计分析 $contours.size()$ 为 1 时的 $point_mom$ 点坐标的 x 和 y 变量的变动情况可以反应风机扇叶的转动情况。当风机转动时,由于像素

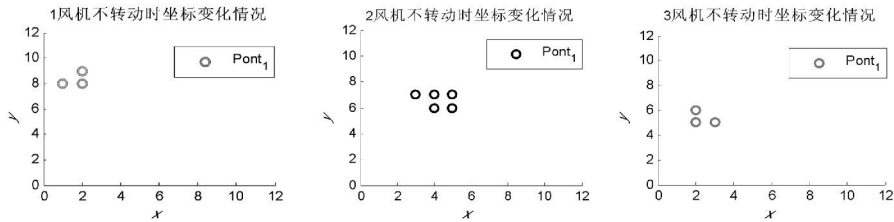


图 4 风机不转动时连通区域质心坐标变化情况

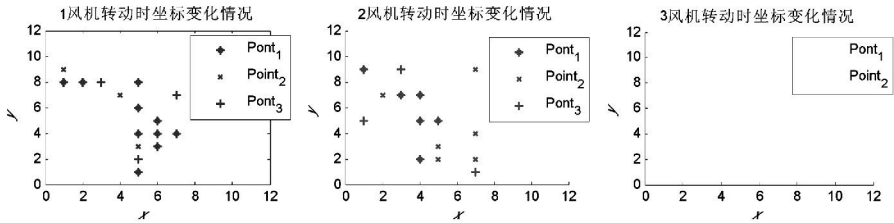


图 5 风机转动时连通区域质心坐标变化情况

分布的变化,会使感兴趣区域的连通区域发生变化,从而质心位置发生移动;而风机不转动时,连通区域基本不改变,从而质心位置基本也不移动。这样,通过计算坐标变量 x 和 y 位移大小占整个感兴趣区域的比例,便可以判断风机转动情况,从而完成所做判定。

整个程序流程示意图如图 3 所示。

2.2 数据结果分析

表 1 风机不转动数据统计表

组号	1	2	3
point_1 /个	20	20	20
point_2 /个	0	0	0
point_3 /个	0	0	0
point_oth /个	0	0	0
x_{avr} /%	1.911 8	4.274 91	1.911 8
y_{avr} /%	3.311 33	2.703 69	1.911 8
x_{per} /%	8.333 33	16.666 7	8.333 33
y_{per} /%	8.333 33	8.333 33	8.333 33
结果	不转动	不转动	不转动

表 2 风机转动数据统计表

组号	1	2	3
point_1 /个	11	8	9
point_2 /个	12	14	22
point_3 /个	9	6	0
point_oth /个	0	0	0
x_{avr} /%	12.909 9	11.356 4	9.771 7
y_{avr} /%	23.273 7	15.748 5	16.404 2
x_{per} /%	50	33.333 3	25
y_{per} /%	58.333 3	583.333 3	41.666 7
结果	转动	转动	转动

说明: point_1、point_2、point_3 分别表示一幅图像只有一个、两个、三个质心 point 时的总和,point_oth 统计不属于上述情况的 Point 总和; x_{avr} 、 y_{avr} 表示 (x,y) 坐标(平均)跳动幅度占 $rect()$ 的百分比; x_{per} 、 y_{per} 表示 (x,y) 坐标(整体)跳动幅度占 $rect()$ 的百分比。

由表 1、表 2 结果可以看出,当风机在转动时,质心位置偏移比较大,从而 x_{avr} 、 y_{avr} 、 x_{per} 、 y_{per} 值偏大。当风机转动时,质心位置变化比较大,而且连通区域的个数有时候也在交替变化。图 4、图 5 为风机不转动与转动时质心坐标的变化情况,由图 4 可以明显地看出当风机不转动时质心坐标变化不大,坐标较为集中,而由图 5 看出当风机转动时质心坐标变化很大,坐标分布很分散。这种方法最适合于阈值化后图像中扇叶与其他部分区分比较明显的场合。

3 直方图统计分析法

原理: 假设两幅图像完全一致,则它们采用 `cv::addWeighted` 函数相加后所得结果的图像的直方图会呈现“稀疏”现象,即在某一区段内,直方图中偶数容器的有值,而奇数容器的值为零。当两幅图像不完全相同时,采用上述方法得到的直方图呈现“密集”现象,即在某一区段内,直方图奇数偶数容器的值基本都不为零。利用这个现象即可判断风机的转动与否。

3.1 直方图统计分析法判断步骤

首先,(第一帧图像)选取风机一部分作为感兴趣区域 $rect$,并限定 $rect.width = 12, rect.height = 12$ 。

循环读取每相隔 5 帧的两幅图像的灰度图像 `origgray` 和 `origgray1`,将它们进行 `cv::addWeighted` 运算处理,得到 `add` 图像。`cv::addWeighted` 函数计算两数组的加权值的和(注意所有的数组必须有相同的类型和相同的大小)。

$dst(i) = src1(i) * alpha + src2(i) * beta + gamma;$

然后用 `cv::calcHist` 函数统计 `add` 图像的直方图信息。

直方图是一个简单的表,它给出了一幅图像或一组图像中拥有给定数值的像素数量。因此,灰度图像的直方图有 256 个容器。0 号容器给初值为 0 的像素个数,1 号容器给出值为 1 的像素个数,以此类推。

比如一幅图中 1、2、3 号容器有值,剩余的值为零。两幅完全相同的图像通过 `cv::addWeighted` 相加(假设 $\alpha = 1.0, \beta = 1.0, \gamma = 0.0$),则值不为零的容器变为 2、4、6 号容器了,直方图由原来的“连续”变为“间断”,即由“密集”(图 6(b))变为“稀疏”(图 6(a))。

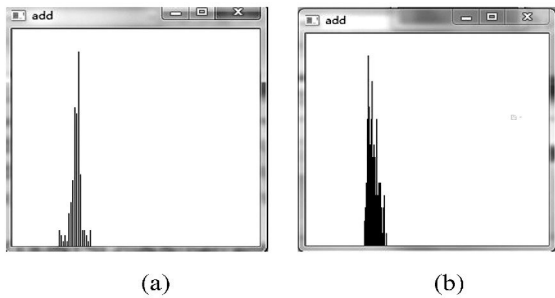


图 6 直方图的变化

通过统计视频序列前 `max_COUNT` 帧图像中感兴趣区域通过 `cv::addWeighted` 函数后直方图呈现的特征,并对其特征进行分析,即可判断风机的转动情况。

整个程序流程示意图如图 7 所示。

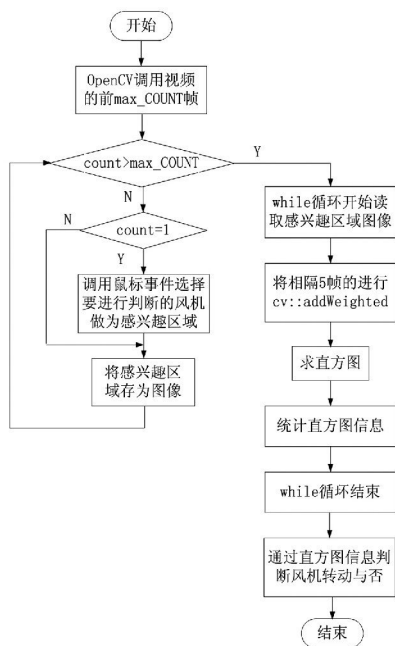


图 7 直方图统计分析法程序流程图

3.2 数据结果分析

由表 3 可以看出,当两幅图像差异大时, p_chg 值会偏大,即偏向于 100%,因为直方图容器有值的区间,不管奇数还是偶数容器都是有值的,所以趋于 100%;而当两幅图像差异很小时, p_chg 值会偏小,50% 左右。由这个现象,就可以通过 p_chg 值的大小变化判断风机转动与否。图 8 可以更直观的反应 p_chg 的变化情况,当两图像差异大,即风机转动时, p_chg 曲线偏向于上端 100% (曲线 $y1、y2$);反之, p_chg 曲线偏向于下端 50% 左右(曲线 $y3、y4$)。上述判断结果跟实际情况也基本符合,而且这个方案使用简单且适用范围也较广。

表 3 直方图数据统计表

p_chg	1	2	3	4
1	95.652 2	84.090 9	82.857 1	93.750 0
2	95.238 1	82.352 9	83.783 8	73.684 2
3	84	87.719 3	76.315 8	93.877 5
4	85.714 3	78.181 8	83.783 8	91.489 4
5	100	89.583 3	48.648 6	86.274 5
6	95.454 5	84.782 6	77.777 8	86.792 4
7	95.238 1	95.454 5	48.717 9	85
8	95.454 5	90.909 1	48.717 9	78.571 4
9	100	85.714 3	74.359 0	87.931 0
10	100	71.428 6	48.717 9	50.877 2
11	100	81.632 7	81.081 1	92.857 1
12	100	88.888 9	77.777 8	92
13	91.666 7	91.304 3	51.851 9	84
14	100	93.617 0	85.185 2	46.938 8
15	52.381 0	88.095 2	51.851 9	46.933 8
16	100	85.106 4	79.411 8	46.933 8
17	100	83.636 4	76.470 6	88
18	100	85.416 7	51.515 2	87.234 0
p_{60}	1	0	7	6
p_{85}	16	11	1	6
p_{95}	14	1	0	0
结果	转动	转动	不转	不转

说明: p_chg 表示直方图从非零元素开始到结束中非零元素个数; $p_{60}、p_{85}、p_{95}$ 分别表示 p_chg 小于 60%、大于 85%、大于 95% 时的图像个数。

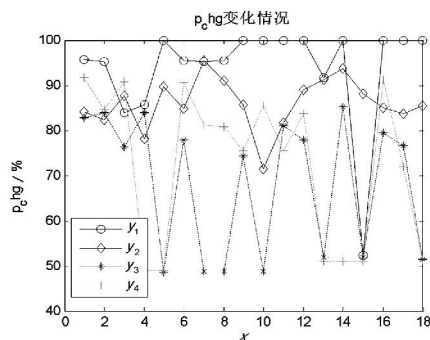


图 8 p_{chg} 变化情况

4 总结与展望

连通区域质心分析法有时不准确,其原因可能是因为这个方法中涉及到腐蚀、膨胀、阈值化和分水岭分割等操作,这些操作本身会改变图像,累加在一起有时候就会出现结果可能不准确现象。如果能够对连通区域有 2 个、3 个等质心时的变化情况更加详细的进行分析,则可以更好地判断风机转动与否,判断风机转动的结果将更加准确,适用场合将更加广泛。

两种方案各有优缺点,而对于两种方法,都存在如何去定义转动与不转动的界限问题及感兴趣区域大小的选定问题。如果能够采集大量的视频信息,并结合统计分析法等数学方法进行研究,可以更有

效地定义风机转动与不转动的界限,从而更广泛地适用于风机转动与否的判断。仅仅给出了两种思路,或许还可以结合两者的优点,再结合目前已有的跟踪算法如光流法、均值漂移算法等,然后通过大量的实验使其更加具有广泛实用性。

参考文献

- [1] 刘瑞祯,于仕琪. OpenCV 教程——基础篇 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社,2007.
- [2] (加) Robert Laganiere 著; 张静译. OpenCV 2 计算机视觉编程手册 [M]. 北京: 科学出版社,2013.
- [3] 高杨. 视频质量诊断算法研究与实现 [D]. 沈阳: 东北大学,2011: 13 - 14.
- [4] (美) 布拉德斯基,克勒著; 于仕琪,刘瑞祯译. 学习 OpenCV [M]. 北京: 清华大学出版社,2009: 1 - 16,351 - 355.
- [5] 岑银. 基于 OpenCV 的智能视频监控设计 [J]. 电子元件应用,2010,12(7): 47 - 49,52.

作者简介:

汶爱文(1990),硕士,主要研究方向为变电站视频质量诊断相关技术研究;

王印松(1967),博士生导师,主要研究方向为先进控制策略及其在电力系统中的应用、清洁能源发电控制技术;

常政威(1981),博士,高级工程师,主要研究方向为智能电网技术研究。

(收稿日期:2014 - 09 - 17)

(上接第 5 页)

- [6] 茆美琴,苏建徽,张国荣,等. 大型光伏并网系统的建模与仿真 [J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2005,28(9): 1069 - 1072.
- [7] Istvian Nagy, et al. Small - signal Analysis of a Dual Channel Resonant Buck and Boost Converter [J]. Industrial Electronics, Proceedings of the 2002 IEEE International Symposium on, July 2002, 4(8 - 11): 1279 - 1284.
- [8] 郭亮,陈维荣,贾俊波,等. 基于粒子群算法的 BP 神经网络光伏电池建模 [J]. 电工电能新技术,2011,30(2): 84 - 87.
- [9] 张艳霞,赵杰. 基于反馈型神经网络的光伏系统发电功率预测 [J]. 电力系统保护与控制,2011,39(15): 96 - 101.
- [10] 卢静,翟海青,刘纯,等. 光伏发电功率预测统计方法研究 [J]. 华东电力,2010,38(4): 0563 - 0567.
- [11] 王彬荃,苏适,严玉廷. 基于 BP 神经网络的光伏短期功率预测模型 [J]. 电气时代,2014(5): 78 - 81.

- [12] 张岚,张艳霞,郭端敏,等. 基于神经网络的光伏系统发电功率预测 [J]. 中国电力,2010,43(9): 75 - 78.
- [13] 王飞,米增强,杨奇逊,等. 基于神经网络与关联数据的光伏电站发电功率预测方法 [J]. 太阳能学报, 2012,33(7): 1171 - 1177.
- [14] 张艳霞,赵杰. 基于反馈型神经网络的光伏系统发电功率预测 [J]. 电力系统保护与控制,2011,39(15): 96 - 101.
- [15] 代倩,段善旭,蔡涛,等. 基于天气类型聚类识别的光伏系统短期无辐照度发电预测模型研究 [J]. 中国电机工程学报,2011,31(34): 28 - 35.
- [16] 金鑫,袁越,傅质馨,等. 天气类型聚类的支持向量机在光伏系统输出功率预测中的应用 [J]. 现代电力, 2013,30(4): 13 - 18.

作者简介:

刘沛汉(1988),硕士研究生,研究方向为洁净能源及其并网技术。

(收稿日期:2014 - 12 - 22)

特高压直流输电线路大截面导线 极间距取值深化研究

周 唯, 周 刚, 吴子怡
(西南电力设计院, 四川 成都 610021)

摘 要: 在特高压直流输电线路中, 极导线间距离直接影响杆塔塔头尺寸、杆塔高度和输电线路电磁环境指标, 进而影响工程建设投资和环保水平, 具有重要的经济和社会效益。通过对影响极间距取值的各种因素进行研究分析, 提出了采用大截面钢芯铝绞线的极间距控制因素、优化研究和经济效益等成果。

关键词: 特高压; 直流输电线路; 极间距; 大截面

Abstract: The electrode spacing has important economic and social benefits, and it also affects the towerhead size, tower height, electromagnetic environment, investment and environmental protection. Based on the research and analysis on various factors for the electrode spacing values, the achievements of control factors, optimization research and economic results etc are proposed.

Key words: ultra high voltage (UHV); DC transmission line; electrode spacing; large cross-section

中图分类号: TM723 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)01-0014-05

0 引 言

随着中国电力系统全国联网、西电东送、南北互供工程的实施, 以及国家特高压骨干电网的建设, 中国电网将形成大容量交直流并列运行的格局。由于输电线路走廊资源的紧缺, 有效控制 ± 800 kV 特高压直流线路极间距, 减小直流线路走廊宽度势在必行。这在经济发达地区尤为突出, 输送距离长达上百千米的特高压直流线路, 有效控制极间距减小走廊宽度非常重要。工程设计和建设中必须进行认真研究, 在保证安全运行的基础上, 严格控制空气间隙、杆塔高度和电磁环境指标, 能有效节省输电直流输电线路工程投资^[1]。

1 边界条件

研究的基本计算条件如下: 额定电压为 ± 800 kV; 系统最高运行电压为 ± 816 kV; 系统输送功率为 8 000 MW; 操作过电压倍数为 1.6。在各种计算中, 大截面导线采用双极水平排列, 绝缘子串为 V 串布置; 直线塔塔身宽度取为 3.6 m, 耐张塔塔身宽度取为 4.6 m; 10 mm 冰区, 27 m/s 风区; 极导线和

地线布置尺寸详见图 1。

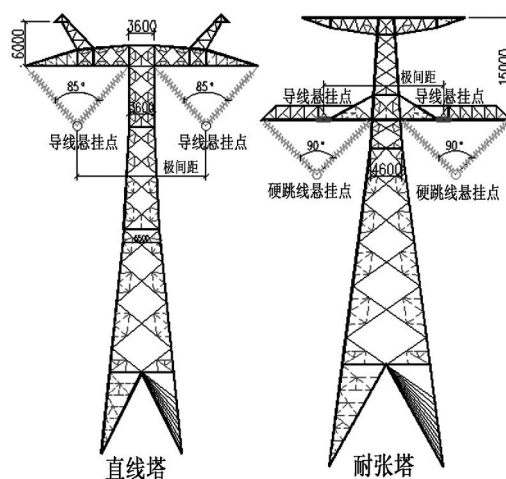


图 1 铁塔布置图

研究的特高压直流线路, 参考正在设计的灵州—绍兴和酒泉—湖南线路工程, 每极大截面导线, 采用 6 分裂 JL/G2A-1250/70 钢芯铝绞线, 参数见表 1^[2]。

2 主要控制因素

2.1 电磁环境限值

随着全球经济的不断发展和民众环境意识的增

表1 导线基本参数表

项 目	导地线型号
	JL/G2A-1250/70
截面积 /mm ²	1 320.43
直径 /mm	47.34
弹性模量 / (N·mm ⁻²)	62 000
热膨胀系数 1 /°C × 10 ⁻⁶	21.2
计算重量 / (kg·m ⁻¹)	3.9 994
额定拉断力 /kN	289.86
直流电阻 / (Ω·km ⁻¹)	0.02 291

强,输电工程的电磁环境影响越来越受到人们的关注,输电工程也受到环保的严厉制约,输电工程的电磁环境成为决定输电线路结构和影响建设费用等的重要因素。输电线路的电磁环境主要包括电场效应、可听噪声、无线电干扰及生态效应等方面。这些都是输电线路工程建设中必须考虑的重大技术课题。所研究的控制条件依据《±800 kV 直流架空输电线路设计规范》(GB 50790-2013)对电磁环境限值的规定^[4]。

2.2 空气间隙

直流线路极导线间距除受电磁环境限值制约外,还需满足塔头空气间隙要求。可用式(1)表达。

$$S \geq (\delta + R) \times 2 + D \quad (1)$$

式中, S 为极间距; δ 为空气间隙; R 为均压环至分裂导线中心距离; D 为塔身宽度。

2.3 绝缘子串长和V串夹角

直流线路极导线间距受绝缘子串长和V串夹角的控制,具体控制条件如式(2)。

$$S \geq ((L + d) \times \sin\alpha / 2) \times 2 + D \quad (2)$$

式中, S 为极间距; L 为绝缘子串长; d 为联板悬挂点至联板中心距离; α 为V串夹角; D 为塔身宽度。

3 极间距与电磁环境的变化关系

3.1 导线表面电场强度

导线表面电场强度是导线选择计算中的最基本条件,导线表面电场强度过高将会引起导线全面电晕,不但电晕损耗急剧增加,而且环境影响问题也更严重,所以在特高压线路设计中必须选择合理的导线表面电场强度^[4]。

3.1.1 导线起始电晕电场强度

电晕是高压线附近产生的微弱的辉光,当导线

表面的电场强度超过了空气电气击穿强度时所产生局部放电就形成了电晕。通过科研单位多次试验证明,导线的起始电晕电场强度与极性的关系较小,一般认为直流线路导线起晕场强和交流线路起晕场强的峰值相同,直流线路导线的起晕场强较交流线路低得多,不影响导线极间距布置。

3.1.2 导线表面最大电场强度

导线表面电场强度决定于运行电压、子导线直径、子导线分裂数、子导线分裂间距、极导线高度以及相间距离等因素。导线表面最大场强随极导线间距增加而减小,但降低的幅度不是很明显,从16 m增加到24 m,表面场强降低了约9~10%。导线表面最大场强随极导线截面的增大而减小,最大截面导线比最小截面的导线表面场强减小约14~15%。

3.2 地面标称场强、合成场强和离子流密度

对直流线路而言,决定地面电场效应危害程度的主要因素是线路下合成场强和地面离子流密度。合成电场为标称场强和由空间电荷产生的电场的合成。通过多种导线的组合计算,研究发现极间距对最大合成场强和地面离子流密度的影响很小。不同极导线间距时的地面最大标称场强随着极导线间距的增加而增加,地面最大离子流密度随极导线间距的变化不大,地面最大合成场强随极导线间距的增大而减小^[4,5]。不同极间距时的地面最大标称场强、地面最大合成场强、最大离子流密度计算结果详见图2、图3、图4。

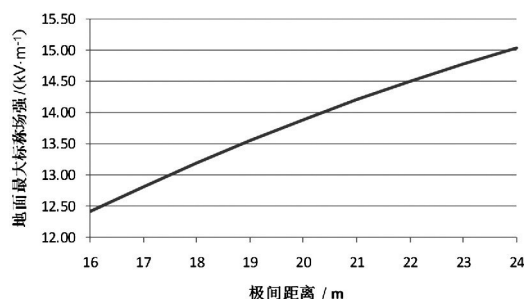


图2 不同极间距时的地面最大标称场强

3.3 无线电干扰分析

直流线路电晕形成的电流脉冲注入导线,并沿导线向注入点两边流动,从而在导线周围产生电磁场,即无线电干扰场。坏天气条件下的无线电干扰水平低于好天气,这是直流不同于交流线路的最大特点。正极性导线电晕放电,放电点在导线表面的分布随机性大,持续的放电点大多数出现在导线表

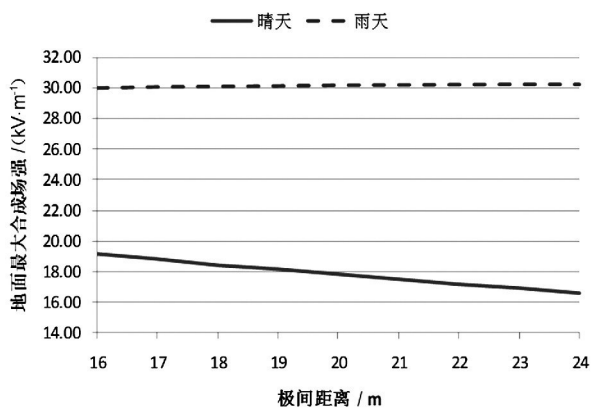


图3 不同极间距时的地面最大合成场强

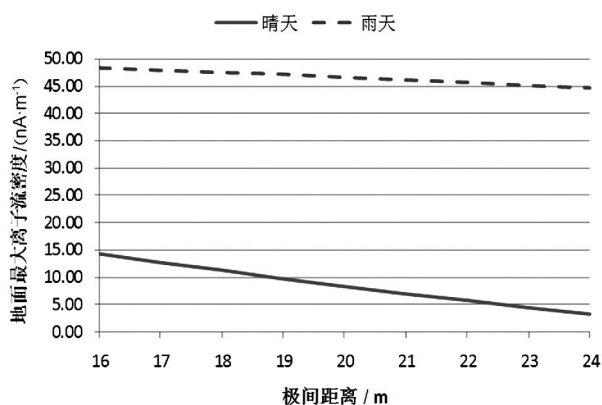


图4 不同极间距时的最大离子流密度

面有缺陷处,放电脉冲幅值大,且很不规则,是无线电干扰的主要来源。对于双极性直流输电线路,正极导线产生无线电干扰一般要比负极性大6 dB。

采用《±800 kV 直流架空输电线路设计规范》(GB 50790-2013)推荐的无线电干扰的经验公式进行无线电干扰场强的预估计算。对JL/G2A-1250/70导线按平均高度23 m的不同极间距进行组合计算。考虑海拔高度的影响,按海拔每增加300 m,无线电干扰场强增加1 dB($\mu\text{V}/\text{m}$)进行修正。无线电干扰计算结果如表2所示,变化趋势详见图5。

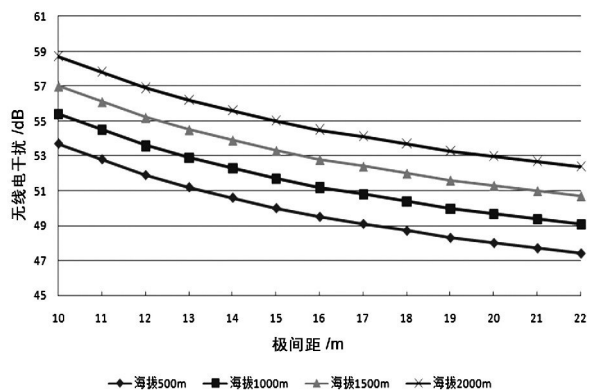


图5 无线电干扰影响的计算结果

表2 不同极间距下无线电干扰

序号	极间距 / m	无线电干扰 / dB			
		海拔 500 m	海拔 1 000 m	海拔 1 500 m	海拔 2 000 m
1	10	53.7	55.4	57	58.7
2	11	52.8	54.5	56.1	57.8
3	12	51.9	53.6	55.2	56.9
4	13	51.2	52.9	54.5	56.2
5	14	50.6	52.3	53.9	55.6
6	15	50	51.7	53.3	55
7	16	49.5	51.2	52.8	54.5
8	17	49.1	50.8	52.4	54.1
9	18	48.7	50.4	52	53.7
10	19	48.3	50	51.6	53.3
11	20	48	49.7	51.3	53
12	21	47.7	49.4	51	52.7
13	22	47.4	49.1	50.7	52.4

注:导线最小对地距离取23 m。表2为好天气,距正极性导线对地投影外20 m处,80%时间,80%置信度,0.5 MHz频率的无线电干扰场强。

无线电干扰随极间距离的增大而减小,平均变化陡度约-0.38 dB/m。因此,为降低无线电干扰,可采取加大极间距离的措施。

3.4 可听噪声分析

《±800 kV 直流架空输电线路设计规范》(GB 50790-2013)推荐采用EPRI和BPA的计算公式。这里采用EPRI推荐公式计算可听噪声。JL/G2A-1250/70导线在不同极间距下,距正极导线对地投影外20 m处的可听噪声计算结果如表3所示,可听噪声变化趋势详见图6。

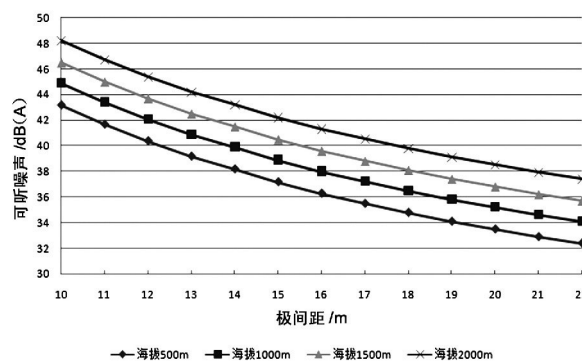


图6 可听噪声影响的计算结果

从以上计算结果可知,可听噪声随极间距离的增大而逐渐减小,平均变化陡度约-0.5 dB/m。为降低可听噪声,可采取加大极间距离、增大导线截面

等措施。

表 3 不同极间距下可听噪声

序号	极间距 /m	可听噪声 /dB(A)			
		海拔 500 m	海拔 1 000 m	海拔 1 500 m	海拔 2 000 m
1	10	43.2	44.9	46.5	48.2
2	11	41.7	43.4	45	46.7
3	12	40.4	42.1	43.7	45.4
4	13	39.2	40.9	42.5	44.2
5	14	38.2	39.9	41.5	43.2
6	15	37.2	38.9	40.5	42.2
7	16	36.3	38	39.6	41.3
8	17	35.5	37.2	38.8	40.5
9	18	34.8	36.5	38.1	39.8
10	19	34.1	35.8	37.4	39.1
11	20	33.5	35.2	36.8	38.5
12	21	32.9	34.6	36.2	37.9
13	22	32.4	34.1	35.7	37.4

注: 导线最小对地距离取 23 m。表 3 为好天气,距正极性导线对地投影外 20 m 处。

4 极间距离控制值

4.1 电磁环境限值要求的最小极间距

直流线路的离子流密度、合成电场强度、可听噪声和无线电干扰都与极导线间距有关,地面离子流密度和地面合成电场强度一般靠合理选择极导线高度加以控制,而控制可听噪声和无线电干扰首先需考虑选择合理的极导线间距。采用大截面导线,取平均对地高度 23 m 时,在不同海拔满足可听噪声不超过 45 dB(A),无线电干扰不超过 58 dB(μ V/m)的最小极间距离,见表 4。

表 4 不同海拔下直线塔电磁环境要求的最小极间距离

海拔 /m	可听噪声按美国 EPRI 推荐方法海拔修正	可听噪声按中国电科院 推荐方法海拔修正
500	11	10
1 000	12	11
1 500	13	12
2 000	15	13

4.2 空气间隙需要的最小极间距

特高压直流线路采用 V 串,塔头空气间隙距离由操作过电压控制。操作过电压倍数取 1.6 p. u. 。考虑均压环到分裂导线中心的距离为 1.3 m,导线

对应处塔身宽度 3.6 m,并考虑最小空气间隙距离,汇总表如表 5 所示。

表 5 空气间隙要求的最小极间距

海拔高度 /m	0	500	1 000	1 500	2 000
极导线间距 /m	15.2	16.0	16.8	17.4	18.0

4.3 绝缘子串长要求的最小极间距

根据目前 ± 800 kV 特高压直流线路绝缘配合研究结论,并结合绝缘子金具组装型式及塔身宽度的研究成果,计算得出绝缘子串长所要求的最小极间距。考虑金具的长度 0.9 m,联板悬挂点到联板中心 0.25 m,端部塔身宽度 3.6 m,绝缘子 V 串角度为 90°时,最小极间距见表 6。

表 6 绝缘子串长要求的最小极间距离

海拔 /m	极间距离/m	
	中污区 0.08 mg/cm ²	重污区 0.15 mg/cm ²
500	18.9	20.4
1 000	18.9	20.4
1 500	19.4	20.9
2 000	20.4	22.1

5 结 论

通过对极间距离与电磁环境、空气间隙、绝缘子串长及 V 串夹角的关系的研究,发现直线塔极间距离主要由电磁环境、最小空气间隙和绝缘子串长及 V 串夹角控制。每极导线采用 6 分裂 JL/G2A - 1250/70 钢芯铝绞线时,直线塔极间距离主要受绝缘子串长及 V 串夹角控制;电磁环境及空气间隙要求不控制极间距离。一般线路轻冰区的最小极间距离取值结论,按以上方式分析计算,汇总结论如表 7 所示。直线塔设计过程中,根据线路经过的不同海拔和污区分布,可对直线塔的极间距取值进行取整简化。

表 7 直线塔最小极间距

海拔 /m	极间距离/m	
	中污区 0.08 mg/cm ²	重污区 0.15 mg/cm ²
500	18.3	19.6
1 000	18.3	19.6
1 500	19.6	20.2
2 000	19.6	21.3

注: 此表采用直线塔绝缘子串 V 串夹角 85°。

根据科研单位的试验实测数据,结合大截面导

线对极间距影响的计算分析结论,得出耐张塔的电
磁环境按照导线表面电场强度增加近百分之三,极
导线平均对地高度 23 m,在不同极导线间距下(11
~ 26 m) 正极性导线对地投影外 20 m 处可听噪声
50% 值,按中国电科院推荐的方法修正计算耐张塔
最小极间距。为了均衡挂点布置、方便铁塔加工、简
化施工组装,耐张塔最小极间距离可考虑统一取值,
汇总统计值如表 8 所示。

表 8 耐张塔最小极间距离

海拔/m	极间距离/m
500	14
1 000	14
1 500	15
2 000	16

参考文献

[1] 吴桂芳. $\pm 800\text{kV}$ 直流和 1000kV 交流线路同走廊时

的最小接近距离研究 [J]. 中国电力, 2007 (12): 22 - 26.

[2] GB/T 1179 - 2008, 圆线同心绞架空导线 [S].

[3] GB 50790 - 2013, $\pm 800\text{kV}$ 直流架空输电线路设计规范 [S].

[4] 布春磊, 周海鹰, 江明. 特高压直流输电线路大截面钢芯铝绞线选型研究 [J]. 电力建设, 2013, 34(9): 102 - 104.

[5] 万建成, 李健, 陈媛, 等. 铝合金芯铝型绞线在大容量直流线路中的应用 [J]. 电力建设, 2013, 34(8): 105 - 106.

作者简介:

周 唯(1982), 硕士, 工程师, 从事输电线路技术设计工作;

周 刚(1964), 本科, 高级工程师, 主要从事输电规划、研究、咨询设计工作;

吴子怡(1981), 硕士, 工程师, 主要从事电网工程咨询设计及造价设计工作。

(收稿日期: 2014 - 10 - 28)

(上接第 8 页)

在仿真系统平台上完成的继电保护动作案例, 收集案例的参数设置、动作报告和故障波形, 通过图片和录波图的方式以附件的报告形式完成, 便于进行离线培训, 即该案例库可以在实训站的仿真系统上故障再现, 也可以脱离 110 kV 实训智能变电站离线使用, 培训地点灵活。通过变压器保护、线路保护、备自投装置案例, 使智能变电站继电保护常见的保护动作行为和带负荷测试分析得到了完整的、具体的呈现, 便于学员理解和掌握。

目前该案例库已在国网新员工培训和智能变电站技术培训班中使用, 在实训操作培训之后, 再使用案例具体地分析故障过程, 易于学员理解, 加深印象, 取得了良好的培训效果。后续可以在以下领域发挥更大作用。

(1) 利用数字物理混合仿真系统和 110 kV 实训智能变电站的现场设备, 可以开展变电运行和厂站端自动化专业的培训。

(2) 如果有继电保护故障信息培训系统, 利用仿真案例库, 可以更好地对故障信息系统培训做有益的补充。

(3) 仿真案例库开发建设的建模方法、测试技

术和方法可以为自动化子站、主站仿真案例库的开发积累丰富的经验, 促进这些专业技能培训的能力提升。

参考文献

[1] Q/GDW 383 - 2009, 智能变电站技术导则 [S].

[2] Q/GDW 426 - 2010, 智能变电站合并单元技术规范 [S].

[3] Q/GDW 428 - 2010, 智能变电站智能终端技术规范 [S].

[4] 高亚栋, 朱炳铨, 李慧, 等. 数字化变电站的“虚端子”设计方法应用研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2011 (5): 120 - 123.

作者简介:

黄忠胜(1982), 硕士, 讲师, 从事继电保护方面研究;

刘 娟(1984), 学士, 助理工程师, 主要研究方向智能用电和配电自动化;

廖小君(1974), 硕士, 副教授, 从事微机继电保护方面研究及信息系统的研究;

王婷婷(1977), 大学, 高级工程师, 从事继电保护方面研究;

韩花荣(1981), 硕士, 讲师, 从事继电保护方面研究。

(收稿日期: 2014 - 12 - 22)

500 kV 输电线路引流板过热研究

杜 毅¹, 敬兴东², 包健康², 王利华¹, 吴广宁², 曹晓斌², 沈金锁²

(1. 国网四川省电力公司检修公司, 四川 成都 610041; 2. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 随着用电需求的日益增长, 线路负荷大幅增加, 在高负荷的夏季容易出现耐张杆塔的耐张线夹特别是引流板部分出现过热问题, 对电力输送运行造成安全隐患。通过对输电线路耐张线夹部分进行加载大电流实验, 观测并记录在不同电流负载与接触压力下耐张线夹及对应引流板发热状况, 研究耐张线夹因电流过大或引流板接触不良可能造成的引流板过热现象。利用数据采集与图形分析总结在实际工程操作中需要改进的操作步骤, 并对不同条件下出现的引流板过热问题给出对应的解决措施。

关键词: 大电流; 电接触; 引流板

Abstract: With the growing demand of electricity, line load increases significantly, the strain clamp of strain tower, especially the current plate, becomes easy to occur overheating problems which leads to security issues for power transmission during the summer with high load. Through the test of loading large current to strain clamp in transmission line, the heat condition of strain clamp and the corresponding current plate under different load current and contact pressure is observed and recorded, and the overheating of current plate caused by the large current or the poor contact of current plate is studied. The operation steps which need to be improved in the actual project are summarized by using data acquisition and graphical analysis, and the corresponding solutions are given to deal with the overheating of current plate under different conditions.

Key words: heavy current; electrical contact; current plate

中图分类号: TM732 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)01-0019-03

0 引言

随着中国电力事业的飞速发展, 电网运行的电压等级与供电可靠性要求逐渐提高。对于输电线路而言, 外界工作环境复杂多变, 容易使线路产生锈蚀和过热等缺陷, 特别是在夏季负荷高峰期, 因耐张线夹的引流板区域过热所造成的热损毁已成为对电网安全运行越来越突出的问题隐患, 如在成都地区某线路上曾监测到耐张线夹的引流板温度超过 200℃, 远远高于线路温度, 严重影响到安全运行。

耐张线夹主要由耐张管、引流板和引流管 3 部分组成, 是用于连接、转免和固定导线承受张力, 并将导线挂在杆塔上的线路连接金具。按照其连接方式分为爆压式、液压式、螺栓式、楔式等几种类型, 近年来由于液压工艺的发展, 所使用的耐张线夹多为液压式。为了减少自身的电阻, 耐张线夹通常采用纯铝制造, 其纯度在 98% 以上。目前中国耐张线夹生产企业较少, 产品质量参差不齐。中国电力行业

标准《110 ~ 500 kV 架空送电线路设计技术规程》(DL/T 5092-1999) 规定, 导线在连续运行时, 它们的温度必须不超过 70℃。电力行业标准《架空送电线路运行规程》(DL/T 741-2001) 规定, 耐张线夹运行温度不得高于导线温度 10℃, 且导线与导电设备相对温差值超过 35% 为一般缺陷, 超过 80% 则为重大缺陷。从这个角度讲, 耐张线夹运行时超过 80℃ 就会对线路的安全运行带来隐患^[1,2]。下面通过对耐张线夹进行大电流实验观测在长时间工作条件下耐张线夹区域的温度分布, 研究并总结引流板在不同电流值及螺栓紧固力情况下的发热及温度分布规律, 探索引起输电线路中耐张线夹过热的主要因素, 并提出有效措施减小安全隐患, 提高电力输送可靠性。

1 电接触与接触电阻

电接触是研究固态导体与固态导体, 固态导体与液态导体, 固、液态导体与等离子体接触过渡区中

的机械现象。电接触形式有3种:点接触、线接触和面接触,接触形式对接触电阻的影响主要表现在接触点的数目上。一般而言,面接触的接触点数 n 最多,接触电阻最小。点接触的接触点数 n 最少,收缩电阻应最大,线接触介于二者之间。引流板接触区域表现为平面之间的面接触,其接触表面总是凹凸不平的,即使有很大的压力作用于接触面时,也只有少数的点实际发生了接触,这些点承受了全部的压力,形成的接触面是电流唯一的导通通道。为了区分在实际接触点中是否导电,通常将实际发生机械接触的斑点面称为接触斑点,而实际传导电流的更小的面称为导电斑点。

对于引流板而言,其体电阻相对接触电阻较小,而接触电阻随接触表面的材质、接触压力、接触面积等影响较大。图1显示了电流线收缩与接触斑点情况,其中接触面绝大部分是空隙,没有参与到实际接触,只有部分的轮廓峰点真正发生了接触形成导电斑点。当电流线通过导电斑点附近时发生收缩,使电流流过的路径增长,有效导电面积减少,从而产生收缩电阻。

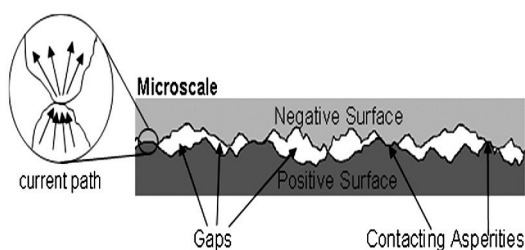


图1 接触面的微观形式图

20世纪50年代德国学者 R. Holm^[3]提出,总接触电阻是所有实际接触点电阻的并联值(即自身电阻 R_s)与因相互影响而造成的电阻值(即相互电阻 R_i)相串联。

$$R_j = R_s + R_i = \frac{\rho}{2 \sum_{i=1}^n a_i} + \frac{\rho}{2\alpha} = \frac{\rho}{2na} + \frac{\rho}{2\alpha}$$

式中, R_j 为总接触电阻; a 是圆形斑点的平均半径; α 称为斑点群的半径或 Holm 半径。

在工程计算中,由于计算导电斑点数 n 和平均半径非常困难,通常使用下面经验公式代替计算。

$$R_j = \frac{k_j}{(0.102F)^m}$$

式中, R_j 为接触电阻, $m\Omega$; F 为接触压力, N ; m 为与接触点数目、压力范围等因素相关的指数,在面接触

形式下通常取 $m=1$; k_j 为与接触材料、表面氧化程度等因素相关的系数,其值由实验决定。但此公式的局限性很大,不能概括各种因素对接触电阻的影响。在工厂中常使用测量接触电压的方法来实测接触电阻值,其中接触电压降是指通过一定电流时电接触连接处的电压降,即: $U_j = RI_j$ 。

近年来通过对热损毁线路的停电检修发现,大部分过热现象均由于户外环境造成引流板螺栓松动,导致引流板接触电阻增大并使周围温度不均匀升高,当设备产热量高于散热量时会产生恶性循环直至热损毁^[4,5]。使引流板接触电阻变化的因素主要有以下几方面:连接设备材料性质、接触面处理、螺栓紧固压力、环境温度、外界腐蚀等。

2 大电流实验下耐张线夹受热分析

2.1 实验设计方案

利用大电流发生器模拟在500 kV输电线路中耐张线夹的工作状况,拟通过变化电流载荷与引流板螺栓紧固力研究耐张线夹引流板处的发热变化,利用红外热像仪分析对应热流分布与温升,并利用万用表测量相关部分电势差,分析对应电阻的变化情况。由于耐张线夹电阻的大小影响着线路发热情况,其电阻变化规律成为实验中研究重点。实验中将要使用到以下设备。

(1) 大电流发生器



图2 大电流发生器产品图

大电流发生器又称升流器,型号HYDDL-3000A,具有实时显示输出、改变电流的能力。使用时按照调试要求,将大电流发生器与被试品接好,按所需实验电流值设定输出电流。

(2) 耐张线夹

将用螺栓连接好的耐张线夹通过软连接装置与导电铜线进行连接,并将耐张线夹进行分段标注作

为电压测点,标示如图 3 所示。

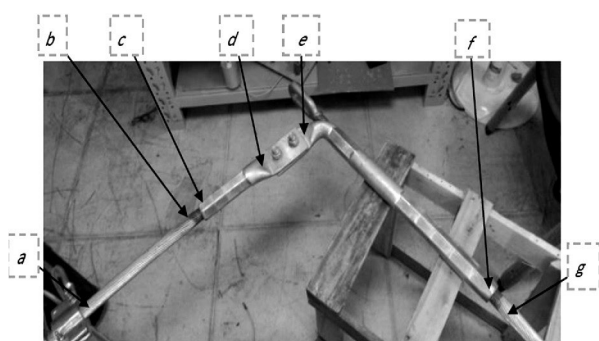


图 3 耐张线夹实验示意图

此外,实验还需要红外热像仪对耐张线夹温度分布进行拍摄,并用导电铜线作为载流体将耐张线夹设备与大电流发生器连接形成回路。

2.2 实验数据与现象

将实验设备连接后,使用大电流发生器对耐张线夹分别通以 100 A、200 A、300 A、400 A、500 A、600 A 电流值,利用红外热像仪对实验线路进行拍摄,记录并研究主要发热点与温度值;调节引流板处螺栓扭力大小,分别以不同螺栓力矩模拟不同接触状态下引流板发热现象,在实验中使用万用表对耐张线夹标注点测量电压值,利用对应电流载荷得出电阻值,并通过电压值变化趋势研究耐张线夹发热情况。红外成像仪测量的引流板处在不同工作条件下温度值如表 1 所示。

表 1 不同条件下引流板处温度值(℃)

电流 /A	螺栓紧固力 /N·m				
	10	20	30	40	50
100	29.9	26.4	23.3	21.7	20.7
200	31.1	29.5	27.6	25.9	22.3
300	34.6	31.1	29.7	26.7	23.1
400	38.8	35.3	32.8	28.6	26.7
500	41.1	38.9	35.4	32.3	31.2
600	44.1	40.3	37.2	34.4	33.3

在不同接触条件下,万用表所测各标记点电压值如表 2、表 3 所示。

综合以上的温度分布图与各表格可以得出以下结论。

1) 在相同电流不同螺栓扭力的情况下,引流板处的温度不同。这是由于随着接触压力的增大,引流板接触面轮廓发生压缩形变,导电斑点的数量开始增加。宏观上表现为接触电阻开始减小,引流板

处的工作温度降低;

表 2 螺栓拧紧情况下电压数据表(力矩 50 N·m)

电流 /A	U_{ab} /mV	U_{cd} /mV	U_{de} /mV	U_{ef} /mV	U_{gh} /mV
100	3.6	3.0	2.0	8.9	3.0
200	10.0	7.0	3.8	18.1	8.7
300	14.5	9.7	7.5	27.1	9.3
400	20.3	12.6	8.9	37.0	14.5
500	23.7	15.1	10.1	45.1	16.8
600	29.1	18.2	12.2	53.8	26.2

表 3 螺栓松动情况下电压数据表(力矩 10 N·m)

电流 /A	U_{ab} /mV	U_{cd} /mV	U_{de} /mV	U_{ef} /mV	U_{gh} /mV
100	6.0	2.4	134.2	9.4	7.2
200	9.5	6.7	209.1	24.6	15.3
300	13.1	7.8	235.5	27.0	21.6
400	22.6	14.2	271.2	43.6	31.3
500	28.4	18.4	298.8	54.3	36.3
600	37.3	23.8	321.2	63.9	53.8

2) 在相同扭力不同电流值的情况下,引流板处的温度随所加电流值递增。验证了电阻是引流板发热的主要因素,在用电高峰期需格外注意线路发热,防止出现输电线路热损毁;

3) 在红外图片中还发现引流管及耐张线夹与输电线路连接处也出现明显发热现象,这是因为在耐张线夹与线路压接过程中由于工艺问题产生较大的接触电阻,严重情况下也会产生过热损毁,在装配与更换过程中需要注意此类情况。

3 结 论

(1) 通过理论与实验分析得出,要解决引流板处的发热问题,就要减少发热功率。通过减小电流强度或降低接触电阻均可达到要求,但在实际工作中降低线路电流是比较困难的,常用的措施是降低接触电阻。一般采用在接触面涂抹导电膏以增大实际接触面积,防止表面氧化生成氧化膜,并对耐张线夹定期检修更换,始终保证螺栓处的良好接触以提高输电线路安全运行^[8]。

(2) 改进耐张线夹结构,增加引流板有效接触面积并提高产品制作时引流板表面平整度均能减小发热现象。也可改进耐张线夹材料,研究表明在铝中添加锆(Zr)、镍(Ni)、钛(Ti)和钒(V)等金属做

(下转第 76 页)

4 结 论

建立了风-蓄-火的联合调度模型,应用改进的细菌群体趋药性算法对模型进行优化求解,制定了日前调度计划和时前调度计划,为风-蓄-火联合运行系统的调度提供了有效的参考信息。具体内容如下。

1) 针对日前调度阶段,建立以经济效益最大为目标的模型,最后提供了提前一天每小时机组的计划出力,时前调度阶段,建立了以火电机组运行成本最低为目标的模型,提供了提前几小时机组的计划出力。

2) 仿真结果表明,时前对风电功率的预测精度更加精确,可对机组进行比较准确的调度。

参考文献

- [1] 卢锦玲,苗雨阳,张成相,等. 基于改进多目标粒子群算法的含风电场电力系统优化调度[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(17):25-31.
- [2] 杨媛媛,杨京燕,夏天,等. 基于改进差分进化算法的风电并网系统多目标动态经济调度[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(23):24-29.
- [3] 张鹏,刘继春,吕林,等. 基于风蓄协调的节能调度方法[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(2):29-24.
- [4] 胡国伟,别朝红,王锡凡. 考虑运行可靠性的含风电电力系统优化调度[J]. 电工技术学报,2013,28(5):58-65.
- [5] Lou Suhua, Wang Zhilei, Wu Yaowu, et al. Coordinated Economic Dispatch for Power System with Significant Wind Power Generation Based on Chance-constrained Programming[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 337-345.

=====

(上接第21页)

成相应的铝合金时,可以大幅提升金属铝的发热、耐热性能^[1],以满足更高的负荷电流并提升材料的耐热性能。

(3) 经对发热检修处理的经验,对故障引流部件电流进行分流或加装辅助引流线,也能有效解决发热缺陷,达到降低引流板温度的目的。

参考文献

- [1] 北京电力工业局. 电力设备过电压保护设计技术规程 SDJ7-76: 试行修订说明[M]. 北京: 水利电力出版社, 1977.
- [2] DL/T 71-2001, 架空送电线路运行规程[J].

- [6] 郑晓,张静,马韬韬,等. 基于改进决策方法的电力系统多目标优化调度[J]. 电工技术学报, 2010(9): 151-156.
- [7] 胡泽春,丁华杰,孔涛. 风电-抽水蓄能联合日运行优化调度模型[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(2): 36-41.
- [8] Abreu L V L, Khodayar M E, Shahidehpour M, et al. Risk-constrained coordination of Cascaded Hydro Units With Variable Wind Power Generation[J]. Sustainable Energy, IEEE Transactions on, 2012, 3(3): 359-368.
- [9] 王洪涛,何成明,房光华,等. 计及风电预测误差带的调度计划渐进优化模型[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 131-135.
- [10] 刘静,罗先觉. 处理梯级水电站复杂约束的短期水火电系统环境经济优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(014): 27-35.
- [11] 陈继明,王元元,高艳亮. 基于改进细菌群体趋药性算法的配电网无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(14): 98-102.
- [12] 黄伟,张建华,张聪,等. 基于细菌群体趋药性算法的电力系统无功优化[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(7): 29-33.
- [13] 李秀卿,孙守鑫,张超,等. 基于改进细菌群体趋药性算法的无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(8): 56-59.
- [14] Dicorato M, Forte G, Pisani M, et al. Planning and Operating Combined Wind-storage System in Electricity Market[J]. Sustainable Energy, IEEE Transactions on, 2012, 3(2): 209-217.
- [15] 孙元章,吴俊,李国杰,等. 基于风速预测和随机规划的含风电场电力系统动态经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(4): 41-47.

作者简介:

付伟(1981),工程师,研究方向为电网规划。

(收稿日期:2014-10-14)

- [6] Holm R. Electrical Contacts[M]. New York: Springer, 1979.
- [7] 葛猛,姜大宇,梁之林. 架空地线耐张线夹过热原因分析[J]. 电力安全技术, 2005, 7(4): 17, 22.
- [8] 郭晓飞,李拥春,赵元林. 耐张引流发热的分析与处理[J]. 电气技术, 2010(8): 136-139.
- [9] 孟波. 电气静态接触发热的原因及处理方法[J]. 电气开关, 2008, 46(4): 58-59.
- [10] 李雪. 耐热导线耐张线夹发热问题解决方案研究[J]. 保定: 华北电力大学, 2010.

作者简介:

敬兴东(1989),硕士,研究方向为电气工程。

(收稿时间:2014-09-22)

高压输电线视频智能处理防外力破坏方法

杨帆, 余艺舫, 叶富彬

(国网成都供电公司, 四川 成都 610051)

摘要: 提出了一种高压输电线视频智能处理防外力破坏方法, 这种方法将高清视频摄像机和视频智能处理设备都安装在高压输电线路的铁塔上, 结合激光和振动传感器, 实现了对高压输电线路外力破坏事件的实时检测与智能处理, 有效减少外力破坏事件对输电线路安全的影响。

关键词: 高压输电线路; 高清视频; 智能处理; 外力破坏; 线路安全

Abstract: In order to preventing damage from outside force for high-voltage (HV) transmission line, a novel method using intelligent video processing is proposed, that is, to install high definition (HD) video camera and intelligent video processing device on the towers of HV transmission line, and use laser and vibration sensors as a system so as to achieve the real-time detection and intelligent processing for the damage from outside force, which effectively reduces the negative influence on the safety of transmission line caused by the damage from outside force.

Key words: high-voltage transmission line; high definition video; intelligent processing; damage from outside force; line safety

中图分类号: TM726.1 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)01-0022-03

0 引言

高压输电线路是电力系统的重要组成部分, 随着电网规模的不断扩大, 并且由于电力线路所处地理位置和环境条件的特殊性, 除了要遭受恶劣气候的侵袭外, 人为外力破坏引起的线路跳闸及线路被迫停电事故的概率也呈上升趋势。当前输电网络正在加速发展, 怎样有效地保障输电线路的安全生产, 减少外力破坏事件的发生, 提高输电系统的智能化水平, 成为输电线路设计、运检部门共同关心并急需解决的问题^[1]。

目前行业内广泛使用的方法是使用摄像机采集现场的视频, 然后由视频服务器将视频信息通过无线或光纤方式传回后台主站进行视频处理和外力破坏识别^[2]。这种方法的优点是后台有着充足的运算能力, 可以高效地完成视频处理和识别。但是, 这种方法也有着很多显著的缺点, 如传输数据量过大、通信费用高、受通信条件影响较大。

嵌入式技术的发展为解决上述难题提供了条件。通过应用嵌入式技术, 可以在塔上完成视频处理和外力破坏识别等复杂的计算, 并保证对外力破

坏行为具有较高的判别精度^[3]。

采用对高压输电线路进行实时视频监控, 并在前端完成对视频图像的实时智能分析, 检测出在输电线路附近的大型施工机械或异常树木生长等事件, 并自动控制前端设备完成自动录像或图片抓拍, 将录像结果或图片资料上传服务器, 根据外力破坏事件的等级, 自动完成外力破坏现场的声光报警, 实时将相关报警信息发送到运检人员的手机终端等上, 及时制止外力破坏事件发生, 可以提高输电线路的生产安全, 减少由外力造成的各种经济损失和人员伤亡。

1 智能防外力破坏系统的结构

智能防外力破坏在线监测系统由塔上前端设备和后台服务主站组成。塔上前端设备主要由智能视频处理平台、视频图像采集设备(球机、枪机)、探测传感器(激光、振动、声音)、通信装置、电源装置及告警装置等组成, 如图1所示。

塔上前端设备实时采集的视频信息, 当有外力破坏发生时, 前端设备会在现场发出声光报警信息, 并通过GPRS/3G/4G/光纤等通信方式将报警信息

和报警视频传回后台主站,后台主站设有存储服务,可以存储前端设备发回的视频信息,以方便运维人员随时查看。

视频采集设备使用球机和枪机。球机可以完成对杆塔基座和周围的监测,枪机安装在杆塔顶部,对输电通道、绝缘子串等进行定点监测。球机和枪机配合,同时实现对杆塔周围和输电线路通道的实时监测。

系统主要有两类通信方式:光纤通信和无线通信。在运营商网络受限制的地区,系统可以采用WiFi + OPGW 通信组网方式完成通信,这种组网通信方式可以解决偏远地区大数据量传输的难题。

塔上前端设备电源系统主要有以下3种形式。

- (1) 太阳能 + 蓄电池;
- (2) 太阳能 + 风能 + 蓄电池;
- (3) 地线取电 + 太阳能 + 蓄电池。

蓄电池需要采用高性能宽温电池,以保证在 -40°C 到 $+85^{\circ}\text{C}$ 的环境温度下电池能正常工作。在风能资源丰富的地方,可以选择风光互补的供电方式完成对前端设备的供电。随着技术的进步,地线取电将成为前端设备供电的另一可选方案,并可以有效解决太阳能供电不稳定的问题。

系统还配备移动终端管理软件,可以实现在手机等智能移动终端设备上接收报警信息和报警视频,方便运维人员随时随地接收报警信息和查看实时视频。

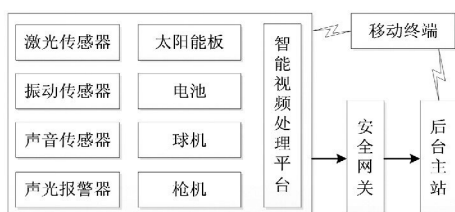


图1 智能防外力破坏系统结构图

2 视频智能防外力破坏的实现方法

2.1 视频智能防外力破坏系统工作流程

塔上前端设备触发报警有两种方式,其一是通过安装在塔上的激光传感器、振动传感器、声音传感器触发,由于这些传感器功耗小,可以24 h开启;其二通过分析前端摄像机的实时视频来触发报警。这两种方法可以同时开启,如在电源不足时,可以暂时

关闭摄像机或控制摄像机处于休眠待机状态,在有激光传感器、振动传感器、声音传感器触发报警时再开启摄像机,这样处理可以有效节约用电,保证监测设备24 h不间断连续工作。

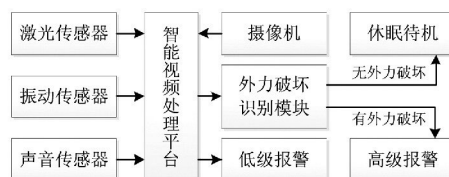


图2 智能视频防外力破坏实现流程

系统报警分为低级别报警和高级别报警。低级别报警由激光、振动、声音传感器触发;高级别报警是在低级别报警的基础上,再经视频分析确认有外力破坏行为发生时,即产生高级别报警,实现流程如图2所示。

2.2 防外力破坏智能处理算法

智能视频防外力破坏涉及人、车辆、各种大型工程机械以及山火、烟雾等目标的检测、跟踪与识别。对采集到的视频图像进行滤波去除噪声和直方图增强预处理。目标检测采用帧间差分法和背景差分法相结合的方法^[4]。首先对视频序列进行帧间差分运算。设 $f_{t-1}(x,y)$, $f_t(x,y)$, $f_{t+1}(x,y)$ 分别为 $t-1$, t , $t+1$ 时刻的视频图像,则差分图像为

$$\begin{cases} FD_t(x,y) = |f_t(x,y) - f_{t-1}(x,y)| \\ FD_{t+1}(x,y) = |f_{t+1}(x,y) - f_t(x,y)| \\ fd_t(x,y) = |FD_t(x,y) \cup FD_{t+1}(x,y)| \end{cases} \quad (1)$$

式中, FD_t 和 FD_{t+1} 为相邻帧间差分; fd_t 为 t 时刻的帧间差分图像。设定阈值二值化帧间差分图像可得到二值的 fd_t 。然后对视频序列进行背景差分运算。此法关键是建立背景模型,系统采用混合高斯背景模型^[5]。构造好背景图像后,将当前帧图像与背景图像作差分运算。

$$bd_t(x,y) = |f_t(x,y) - B_t(x,y)| \quad (2)$$

式中, bd_t 为背景差分图像; f_t 为 t 时刻的视频图像; B_t 为 t 时刻的背景图像。设定阈值二值化背景差分图像可得到二值的 bd_t 。 fd_t 与 bd_t 的背景像素均设置成0,目标像素均设置成1,此时可得目标区域为

$$O(x,y) = |fd_t(x,y) \cup bd_t(x,y)| \quad (3)$$

式中, O 为二值的目标图像。对 O 进行形态学处理和连通区域检测,消除孤立点,填充空洞,可得到完整的目标区域。

通过前边的处理,可以检测到移动目标,接下来

需要对移动目标进行特征提取。由于颜色直方图不易受形状和尺寸变化的影响,所以建立目标的直方图模型用于目标跟踪。假设跟踪目标在初始化中心为 y_0 、初始化窗宽为 S 的矩形框内,目标区域像素总数为 N ,HSV颜色空间色调分量特征值有 H 个,则目标色调直方图模型为

$$q_h = C_h \sum_{i=1}^N k \left(\left\| \frac{y_0 - x_i}{S} \right\|^2 \right) \delta [b(x_i) - h] \quad (4)$$

式中, $x_i (i = 0, 1, \dots, N)$ 为目标区域像素; $h (h = 0, 1, \dots, H - 1)$ 分别取 H 个特征值; $b(x_i)$ 将目标的每个像素映射为特征空间对应值。若 $b(x_i) = h$,则 $\delta [b(x_i) - h] = 1$;否则, $\delta [b(x_i) - h] = 0$ 。归一化常数 C_h 为

$$C_h = \frac{1}{\sum_{i=1}^N k \left(\left\| \frac{y_0 - x_i}{S} \right\|^2 \right)} \quad (5)$$

假设当前帧和后续帧中,候选目标模型中心位置为 y ,则候选目标模型为

$$\begin{cases} p_h(y) = C_c \sum_{i=1}^N k \left(\left\| \frac{y_0 - x_i}{S} \right\|^2 \right) \delta [b(x_i) - h] \\ C_c = \frac{1}{\sum_{i=1}^N k \left(\left\| \frac{y_0 - x_i}{S} \right\|^2 \right)} \end{cases} \quad (6)$$

建立目标跟踪模型和候选目标模型后,系统采用均值偏移(Meanshift)算法^[6-8]实现目标追踪。定义 Bhattacharyya 系数衡量目标模型和候选模型的相似度为

$$\rho(p(y), q) = \sum_{h=1}^{H-1} \sqrt{p_h(y) q_h} \quad (7)$$

对式(7)进行泰勒展开,得

$$\begin{aligned} \rho[p(y), q] &\approx \frac{1}{2} \sum_{h=1}^h \sqrt{p(y_0) q_h} + \\ &\frac{1}{2} \sum_{h=1}^h p_h(y) \sqrt{\frac{q_h}{p_h(y_0)}} \end{aligned} \quad (8)$$

对式(8)整理可得

$$\begin{aligned} \rho[p(y), q] &\approx \frac{1}{2} \sum_{h=1}^h \sqrt{p(y_0) q_h} + \\ &\frac{C_h}{2} \sum_{i=1}^n w_i k \left(\left\| \frac{y_0 - x_i}{h} \right\|^2 \right) \end{aligned} \quad (9)$$

式中, $w_i = \sum_{h=1}^h \delta [b(x_i - u)] \sqrt{\frac{q_h}{p_h(y_0)}}$ 。

将每帧视频图像目标区域内的像素通过 $b(x)$ 映射为符合目标特征值的概率值。以 y_0 为起点计算目标新位置 y ,并将 y 作为下次迭代运算的起点,把跟踪窗口移到目标新位置处。目标新位置计算式为

$$y = \frac{\sum_{x_i \in M} W(x_i) x_i}{\sum_{x_i} W(x_i)} \quad (10)$$

式中, x_i 为各点坐标向量; w_i 为表示对坐标向量贡献大小的权重值。

$$W_i = \sum_{h=0}^{H-1} \sqrt{\frac{q_h}{p_h(y_0)}} \delta [b(x_i) - h] \quad (11)$$

更新目标模型和候选模型之间的相似度 $\rho(p(y), q)$ 。如果 $\rho(p(y), q) < \rho(p(y_0), q)$,则更新目标位置: $y = (y_0 + y) / 2$ 。倘若

$$\|y - y_0\| < \varepsilon \quad (12)$$

式中, ε 为预设阈值;或迭代次数过多,则输出跟踪窗口并读取下一帧,重复上述过程。否则重新计算目标新位置。以 y_0 为起点沿符合目标特征值概率密度估计较大的方向移动,直至找到概率密度估计最大的点并将其作为跟踪的目标区域中心。重复上述步骤即可实现对视频图像中运动目标的跟踪。

3 系统运行结果及分析

系统可设定距离导线弧垂最低点一定距离以上为非安全区域,当有大型机械等外物闯入非安全区域时,如图3所示,系统会在现场发出声光报警,并同时向相关人员的手机上发送报警短信。当导线上有飘挂物时,如图4所示,监测系统只向相关人员的手机上发送报警短信,对此类报警不产生现场的声光报警。



图3 对大型机械的实时监测与报警

(下转第64页)

压器跳闸,吐鲁番地区电网孤网运行,不同低频方案动作后,对电网频率恢复和电压恢复进行了分析,方案 1 低频动作对电网频率和电压瞬间影响较小,但方案 2 在频率和电压恢复上略好于方案 1。

具体到实际电网中,选择方案 1(保工业负荷)或者方案 2(保居民以及农网负荷),从保居民和农网负荷的角度出发,吐鲁番电网选择了方案 2。

参考文献

- [1] 余虹云,顾锦纹. 华东电力系统低频减载方案的推定[J]. 浙江电力,1995(1):29-31.

(上接第 24 页)

根据公司安装在 220 kV 高压输电线路上的智能防外力破坏监测设备的运行测试结果,能准确监测识别出工程车辆侵入非安全区域,报警准确率达到 90% 以上,达到设计准确率大于 85% 要求。由于系统采用前端设备实时处理视频数据的方式,对比传统的传回后台主站处理方式,数据流量不到传统设备的 5%。本智能视频防外破装置能够满足防外力破坏的实际工程需要。



图 4 对线路上飘挂物的实时监测与报警

4 结 论

采用前端视频智能处理与多种传感器探测相结合的方法完成防外力破坏监测。多种灵敏、可靠的传感器辅助监测,弥补了只安装摄像机拍摄的监控盲点,减少对外力破坏行为的漏报,同时多种探测方式的结合也降低了对外力破坏行为的误报率。本系统采用视频图像前置处理的方法可以及时地启动报警,阻止外力破坏事件的发生,大幅度减少外力破坏

- [2] 新疆电网 2014 年度运行方式 [J]. 新疆电力调度控制中心,2014.
- [3] 吐鲁番电网 2014 年度运行方式 [J]. 吐鲁番电力调度控制中心,2014.
- [4] P. Kundur. 电力系统稳定与控制 [M]. 北京: 中国电力出版社,2002: 581-626.
- [5] 刘肇旭,赵强,卜广全. 全国电网互联系统频率特性及低频减载方案研究 [M]. 北京: 中国电力科学研究院,2007.

作者简介:

胡仁祥(1987),硕士,从事电网安全稳定运行控制。

(收稿日期:2014-10-08)

造成的停电事故以及由此带来的经济损失和人员伤亡。同时,采用在前端设备上完成视频数据处理的方法,极大地减少了回传至后台的通信数据量,有效降低系统的运行费用,具有良好的工程应用价值。

参考文献

- [1] 谢兵,许金彤. 基于 3G 网络的输电线路防外力破坏智能视频监控系统研究 [J]. 华东电力,2010,38(11):30-31.
- [2] 焦媛媛. 在线视频监测系统在高压输电线路防外破工作中的技术实现及应用效果 [J]. 广东科技,2012(23):13-15.
- [3] 刘高,懿辉. 嵌入式视频和图像识别技术在架空输电线路智能监控中的应用研究 [J]. 计算机系统应用,2013,22(11):58-61.
- [4] 秦晓敏. 智能视频监控中目标跟踪的研究与实现 [J]. 电子设计工程,2011,19(9):40-42.
- [5] 鲁振山. 基于视频图像的运动人体检测与跟踪算法研究 [J]. 南京: 南京理工大学,2010.
- [6] 胡威. 基于 Meanshift 的视频人体目标跟踪算法研究 [J]. 上海: 上海交通大学,2012.
- [7] 井亮. 基于视觉图像的移动目标跟踪技术研究 [J]. 南京: 南京航空航天大学,2011.
- [8] 康烈. 序列图像中目标跟踪算法研究 [J]. 武汉: 华中科技大学,2012.

作者简介:

杨帆(1980),大学本科,工程师,主要从事输电线路生产技术管理与研究;

余艺琳(1984),男,大学本科,助理工程师,主要从事输电线路运行维护技术管理与研究;

叶富彬(1982),大学本科,助理工程师,主要从事输电线路运行维护技术管理与研究。

(收稿时间:2014-09-11)

线路避雷器在 220 kV 山越线雷害治理中的应用

李晓东¹, 刘守豹², 江 来¹, 孟令川¹, 崔 涛², 刘 强²

(1. 国网凉山供电公司, 四川 凉山 615001;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072)

摘 要: 雷害是导致输电线路跳闸的主要原因, 其中 110 kV 及以上电压等级线路雷击跳闸中绕击跳闸占大多数。线路避雷器是公认的治理线路绕击雷害的有效措施, 对于地形复杂的山区线路尤其如此。首先利用电气几何模型对地形参数对线路绕击雷害的影响进行了分析; 接着基于电磁暂态分析软件 ATP-EMTP 对线路避雷器工作原理及使用中的注意事项进行了研究; 最后以凉山电网 220 kV 山越线防雷治理为对象, 介绍了线路避雷器在雷害严重的山区输电线路防雷治理中的巨大功效。

关键词: 绕击; 线路避雷器; 电气几何模型; ATP-EMTP

Abstract: Lightning disturbance is the main cause for the tripping of transmission lines, in which the tripping caused by shield failure is in the majority for transmission line of 110 kV and above. Line arrester is an effective mean for shielding failure protection, especially for the transmission line in the complicated mountain area. Firstly, the impact of terrain parameters on shielding failure of typical 220 kV line is analyzed based on electrical geometric model, and then the working principle and points for attention of line arrester are studied with ATP-EMTP. Finally, taking 220 kV Shanyue transmission line in Liangshan power grid as the object of protection against lightning, the good results in protection treatment against lightning for the transmission lines in mountain area which have a serious lightning disturbance are introduced.

Key words: shielding failure; line arrester; electric geometry method; ATP-EMTP

中图分类号: TM863 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2015)01-0025-04

0 引 言

雷击跳闸是输电线路跳闸的主要原因, 而绕击跳闸又占线路雷击跳闸的大多数^[1-4], 根据 2006—2013 年四川电网雷击跳闸情况统计显示, 220 kV 线路中绕击跳闸占雷击跳闸总数的 89.2%, 因此防治线路绕击跳闸对于线路雷害治理具有重要意义^[5-7]。

线路避雷器是治理线路绕击跳闸的有效手段^[8-11], 在四川复杂地形山区线路中被广泛使用, 取得了很好效果, 大幅减少了绕击跳闸现象。实际工作中, 对于线路易绕击区段的评估, 避雷器安装的位置及配制方式的确定还存在很多误区, 阻碍了线路避雷器正常发挥其防雷功效^[12]。

下面以凉山电网 220 kV 山越线防雷治理为对象, 使用电气几何模型^[5,13,14] 对典型 220 kV 线路在不同地形条件下最大绕击雷电流的幅值进行了计

算; 使用电磁暂态程序 ATP-EMTP^[15] 对线路避雷器工作原理及配合方式进行了阐述; 通过对比山越线雷害治理工作前后雷击跳闸数据, 说明了在正确进行防雷评估和使用线路避雷器的前提下, 山区线路雷害治理可以取得实效。

1 地形因素对线路防绕击的影响

这里研究地形因素对输电线路最大绕击雷电流的影响, 选取地面倾角和导线对地高度两个重要参数作为变量^[16], 使用电气几何模型对典型 220 kV 猫头塔(如图 1 所示) 的最大绕击雷电流进行计算。

1.1 地面倾角对雷击跳闸率的影响

当线路位于山坡或者山顶时, 由于地面倾角的作用使得地面对外侧边相导线的屏蔽作用减弱, 导致大幅值雷电流侵入, 基于图 1 所示模型尺寸的导线及地线挂点位置如图 2 所示。

图中, θ 表示地面倾角, 逆时针方向为正。改变

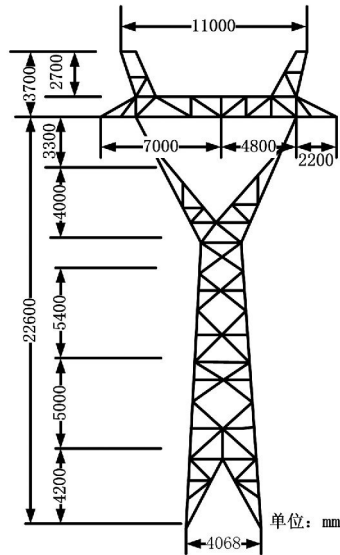


图 1 典型 220 kV 杆塔尺寸

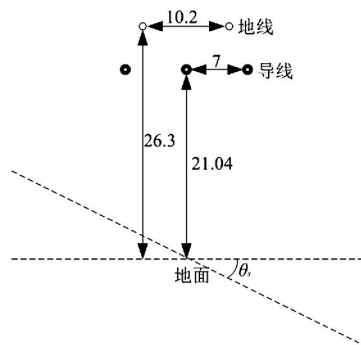


图 2 线路尺寸与地面倾角

地线之间的间距(亦即改变地线保护角),在不同地面倾角情况下外侧边相导线的最大绕击电流见图 3。

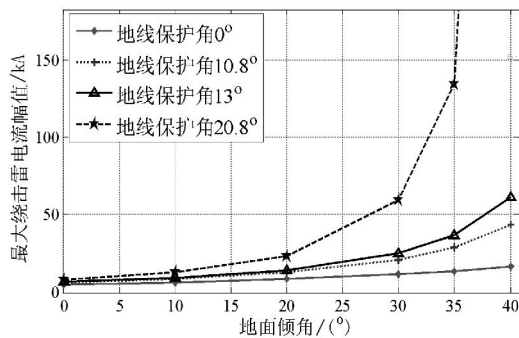


图 3 不同地线保护角和地面倾角时
最大绕击雷电流幅值

从图 3 可以知道,地线保护角对绕击雷电流具有重要影响,对于部分采用大地线保护角的山区线路,其遭受绕击雷害的问题尤为突出;随着地面倾角的增大,线路外侧边相的最大绕击电流迅速增大,导致线路遭受大雷电流绕击的概率增加。

1.2 大跨越对线路绕击跳闸率的影响

大跨越对线路绕击跳闸的影响主要表现在:大

跨越杆塔的高度较普通杆塔高,当导线跨越峡谷地带时由于峡谷深度的影响,导线中间部分对地高度增加,地面对导线屏蔽减弱,最大绕击侵入电流增加。表 1 给出了按图 2 方式布置的导线,边相导线对地高度改变时其最大绕击电流变化情况。

表 1 不同导线对地高度下最大绕击电流

边相导线对地高度 /m	最大绕击电流 /kA
25	9.9
30	13.4
35	17.9
40	23.4
45	30.3

由此可知,线路绕击受地形地貌影响明显,在复杂地形区域,杆塔难免位于山顶、大倾角山坡并跨越山谷,使得线路无法避免大幅值雷电流的绕击。

2 大雷电流绕击引起高电位转移

在 ATP – EMTP 中建立 220 kV 绕击分析模型如图 4 所示,其中中间杆塔的 A 相为雷电流绕击相,左右两侧杆塔距中间杆塔均为 300 m,杆塔接地电阻为 10 Ω。

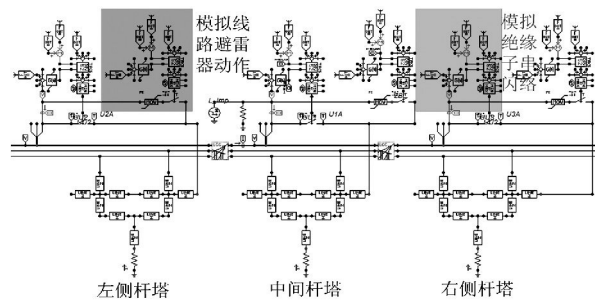


图 4 连续 3 基塔 A 相安装线路避雷器时的
仿真模型

其中杆塔波阻抗模型依据图 1 中杆塔尺寸计算,线路避雷器型号为 YH10CX1 – 192/560。绝缘子串和线路避雷器串联空气间隙的伏秒特性曲线如图 5 所示,在模型中通过控制系统实现间隙击穿。

雷击时刻对应 A 相的初始相角取 0°时,该线路绕击电流耐受能力为 10.6 kA。如果仅中间杆塔的 A 相安装线路避雷器,在 12 kA 绕击电流作用下,相关电气参数波形如图 6 所示。

从图 6 可以看出,在幅值不大的绕击雷电流作用下,中间杆塔的避雷器动作,保证了中间杆塔和右

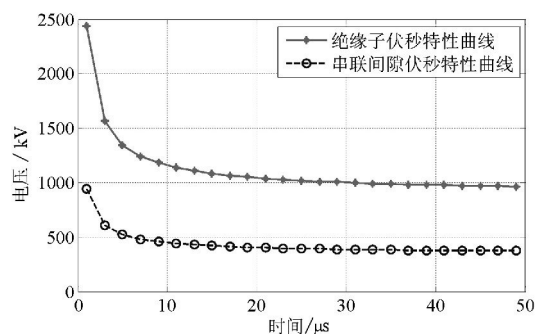
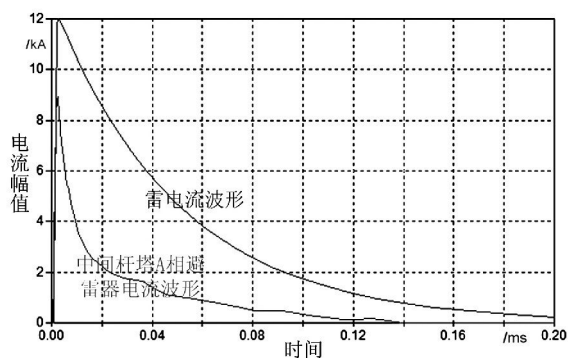
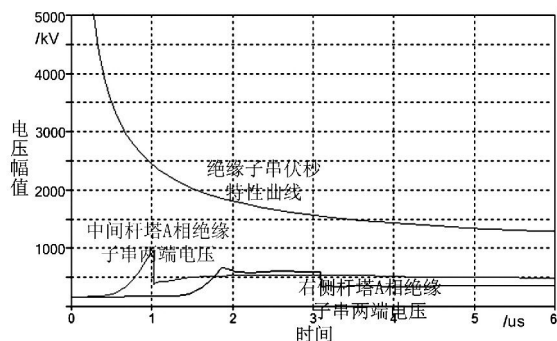


图5 绝缘子串与避雷器串联空气间隙
伏秒特性曲线



(a) 电流波形



(b) 电压波形

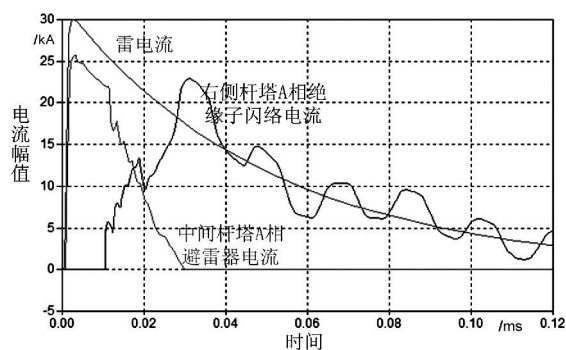
图6 20 kA 雷电流绕击时的参数波形

侧杆塔的 A 相绝缘子串电压波形与绝缘子串伏秒特性曲线不相交,线路不发生绕击跳闸。

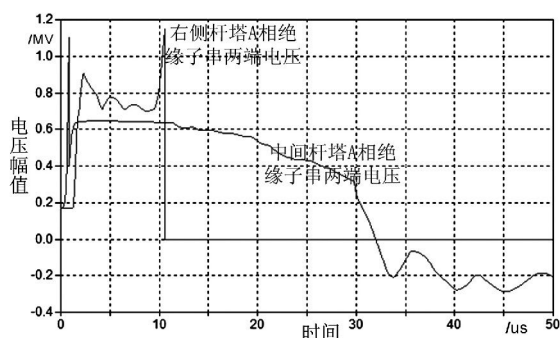
随着绕击雷电流幅值增大,将出现即使中间杆塔避雷器动作,相邻杆塔绝缘子串仍被击穿的情况。绕击雷电流为 30 kA 时,仿真得到的相关电气参数波形如图 7 所示。

从图 7 可知,在大雷电流绕击下,虽然中间杆塔 A 相避雷器动作,部分雷电流得到了释放,但由于雷电流太大,仍然使得右侧杆塔绝缘子串被击穿。

对于所用模型,当中间杆塔 A 相绕击雷电流幅值大于 30 kA,就会引起相邻杆塔的 A 相绝缘子串闪络。线路避雷器动作后并不能无限泄放雷电能,当绕击雷电流幅值不断增大时会出现高电位转

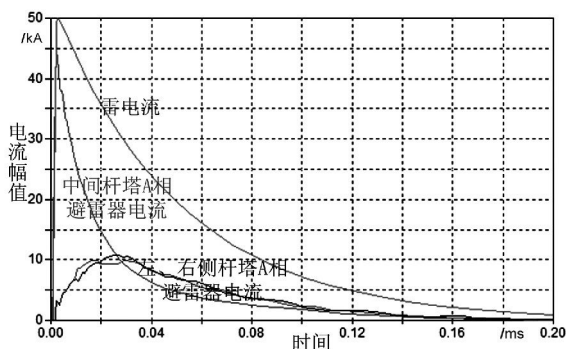


(a) 电流波形

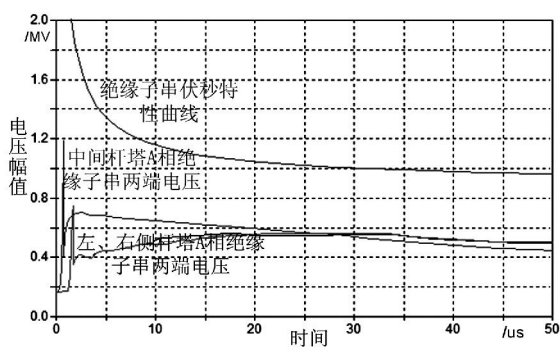


(b) 电压波形

图7 30 kA 雷电流绕击时的参数波形



(a) 电流波形



(b) 电压波形

图8 连续安装线路避雷器 50 kA 雷电流
绕击时参量波形

移,导致本基杆塔被保护但相邻杆塔仍发生绝缘子串闪络的情况。

3 连续多基杆塔安装线路避雷器

为防止大幅值雷电流绕击导致的高电位转移,可以采用连续多基杆塔安装线路避雷器的方式进行防治,如图 3 所示。当 50 kA 的雷电流绕击中间杆塔的 A 相时,相关电气参量波形如图 8 所示。

从图 8 可知,此种情况下大绕击雷电流将使 3 支线路避雷器先后动作,使得中间杆塔线路避雷器无法充分泄放的雷电能量在相邻杆塔得到了释放。线路避雷器动作钳制了导线电压,抑制了绕击高电位转移。

为对 3 基塔连续安装线路避雷器情况下线路的绕击耐受能力进行分析,将中间杆塔 A 相的绕击雷电流幅值增大至 100 kA,右侧杆塔下基塔 A 相绝缘子承受的电压波形如图 9 所示。

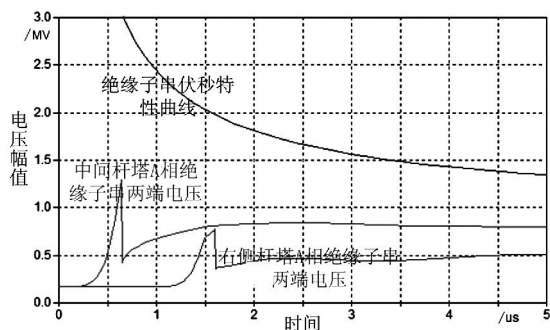


图 9 右侧杆塔下基塔 A 相绝缘子串电压波形

从图 9 可以看出,从理论上讲在 3 基塔连续安装线路避雷器的情况下,中间杆塔遭受 100 kA 雷电流绕击也不至于因高电位转移导致线路跳闸。实际运行中发生 100 kA 及以上幅值的雷电流绕击 220 kV 导线还未见报道,由此可以认为使用在易受大雷电流绕击杆塔及其两侧临近杆塔连续安装线路避雷可以有效防止绕击高电位转移,避免雷击跳闸。

4 220 kV 山越线防雷治理

凉山电网 220 kV 山越线途经丘陵、高山大岭地区,跨越多个微气候地区,线路走廊所经地形极其复杂,且线路沿途有丰富的矿产资源,加上线路走廊内雷电活动频繁(2006—2012 年走廊平均落雷密度见图 10),防雷问题突出。线路 2006 年投运至 2012 年防雷改造前共发生 9 次雷击跳闸,其中因绕击引起的跳闸 5 次。

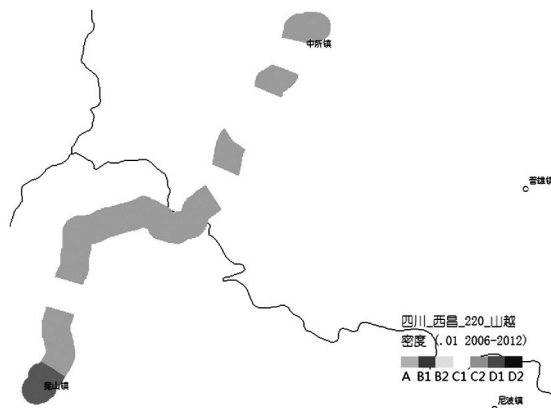


图 10 山越线 2006—2012 年平均地闪密度

为此,国网四川省电力公司电科院与凉山供电公司一起于 2012 年年初对该线路实施了防雷评估和改造,重点关注易绕击线路区段,经现场勘测找到容易绕击杆塔 35 基,其中 14 基绕击风险尤其大。在改造过程中共安装线路避雷器 52 只,其中直线 23 基,31 只;耐张 12 基,21 只。部分杆塔如 28~30 号,由于位于坡度较陡的山腰,采取了连续 3 基塔安装线路避雷器的方式;36~37 号跨越山谷,采用连续两基塔安装线路避雷器的方式。

改造至今,山越线仅发生两次雷击跳闸,均为反击雷电引起,证明了以线路避雷器为主要防雷手段的复杂地形多雷地区输电线路防雷改造工作的有效性。

5 结 语

(1) 对于复杂山地输电线路,由于其不可避免地处于大坡度山腰或山顶以及跨越山谷,绕击雷害较为突出;

(2) 大幅值雷电流绕击将引起高电位转移,在本基杆塔线路避雷器动作的情况下仍会导致相邻杆塔绝缘子串闪络;

(3) 使用在易受大幅值雷电流绕击杆塔及其相邻杆塔连续安装线路避雷器的方式可以有效防止高电位转移,从而避免绕击跳闸;

(4) 基于线路避雷器的 220 kV 山越线防雷改造的成功,显示了在正确安装线路避雷器的情况下,绕击雷害可以得到很好的治理。

参考文献

- [1] 束洪春,曹璞麟,张广斌,等.雷电流波形参数检测视角下 ± 800 kV 直流输电线路导线绕击分析[J].高电压技术,2011,37(5):1203-1215.

(下转第 91 页)

革新,因而设置的此项费用。项目技术服务费中的前期工作费以建安工程费为取费基数,与 2013 版“预规”中前期工程费取费基数一致,但费率不分专业,统一为 2.75%。

2013 版《预规》其他费用比 2010 版技改《预规》在其他费用的设置上增加生产准备费、大件运输费,但不包括新技术应用研究测试费。这种设置是与两种计价定额适用的工程建设性质相配套的。但 2013 版《预规》将基本预备费从其他费用中独立出来,形成单独的项目。2013 版《预规》项目建设管理费比 2010 版技改《预规》中增加了“工程结算审核费”,这适应了近年来电网工程结算审核工作中引进工程造价咨询机构这一现象,并为其发生的费用计取提供了必要依据。电网技术改造工程在此方面也可借鉴电网建设管理中的先进经验,引入工程造价咨询机构,为技术改造工程合理准确定价提供有力保证。

5 结 语

通过上述分析,归结出电网建设工程和技术改造工程计价依据呈现出以下 3 方面的差异化:①不同时期编制的计价定额造成的价格水平差异;②新技术、新设备、新工艺的运用造成的定额子目差异;

③不同建设性质造成的其他费用计取差异。虽然两种计价依据存在一定程度的差异,但作为电网建设工程计价依据,在分析比较电网建设项目造价水平合理性和科学性等方面仍有其重要的参考价值和值得分析探讨之处。

参考文献

(上接第 28 页)

- [1] 曹晓斌,马御棠,吴广宁,等. 利用地形参数计算超高压输电线路绕击跳闸率[J]. 高电压技术, 2010, 36(5): 1178-1183.
- [2] 何俊佳,姚帅,贺恒鑫,等. 复杂地形下 500 kV 超高压输电线路的绕击耐雷性能[J]. 高电压技术, 2010, 36(8): 1877-1883.
- [3] 姚陈果,王婷婷,杨庆,等. 特高压交流输电线路绕击耐雷性能仿真分析[J]. 高电压技术, 2013, 39(3): 526-533.
- [4] 杜颖. 超(特)高压输电线路耐雷性能计算方法综述[J]. 广东电力, 2010, 23(9): 15-20.
- [5] 郝俊琦,李琳,王平. 基于蒙特卡罗法的超高压输电线路绕击跳闸率的计算[J]. 华北电力大学学报, 2012, 39(5): 35-41.
- [6] 赵立进,袁明仁,谭进,等. 高原山地 500kV 输电线路雷电屏蔽特性试验研究[J]. 高电压技术, 2011, 37(7): 1663-1669.
- [7] 王兰义,赵冬一,胡淑慧,等. 线路避雷器的研究进展[J]. 电瓷避雷器, 2011(1): 26-34.

- [8] 国家能源局. 电力建设工程预算定额(第三册) 电气设备安装工程(2013 年版)[M]. 北京:中国电力出版社,2013.
- [9] 国家能源局. 电力建设工程预算定额(第四册) 输电线路工程(2013 年版)[M]. 北京:中国电力出版社,2013.
- [10] 国家能源局. 电力建设工程预算定额(第五册) 调试工程(2013 年版)[M]. 北京:中国电力出版社,2013.
- [11] 国家能源局. 电网工程建设预算编制与计算规定(2013 年版)[M]. 北京:中国电力出版社,2013.
- [12] 国家能源局. 电力技术改造工程预算定额(第一册) 电气工程(试行)[M]. 北京:中国电力出版社,2010.
- [13] 国家能源局. 电力技术改造工程预算定额(第二册) 送电线路工程(试行)[M]. 北京:中国电力出版社,2010.
- [14] 国家能源局. 电力技术改造工程预算定额(第三册) 调试工程(试行)[M]. 北京:中国电力出版社,2010.
- [15] 国家能源局. 电网技术改造工程预算编制与计算标准(试行)[M]. 北京:中国电力出版社,2010.
- [16] 电力工程造价与定额管理总站. 电网工程建设预算编制与计算标准[M]. 北京:中国电力出版社,2007.

(收稿日期:2014-10-22)

- [17] 马春华. 线路避雷器和绝缘子串的伏秒特性配合问题研究[J]. 高压电器, 2007, 43(1): 68-70.
- [18] 胡中. 500 kV 线路型不带支撑件串联间隙 MOA[J]. 武汉:武汉大学, 2003.
- [19] 张益民,申萌,罗六寿,等. 带外串联间隙线路避雷器续流切断试验探讨[J]. 电瓷避雷器, 2012(6): 91-96.
- [20] 郭清滔,廖福旺,黄海鲲. 220 kV 棉紫线线路避雷器安装方案研究[J]. 电瓷避雷器, 2011(6): 89-95.
- [21] 吴广宁,熊万亮,曹晓斌,等. 输电线路绕击特性的三维分析方法[J]. 高电压技术, 2013, 39(2): 374-382.
- [22] 袁海燕,傅正财,魏本刚,等. 综合考虑风偏、地形和工作电压的特高压交流线路雷电绕击性能[J]. 电工技术学报, 2009, 24(5): 148-153.
- [23] 陈冬,刘建华,贾晨曦. 基于 ATP-EMTP 的耐雷水平研究[J]. 电瓷避雷器, 2011(5): 8-12.
- [24] 马御棠,吴广宁,曹晓斌,等. 微地形下输电线路绕击闪络率的计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(22): 135-141.

(收稿日期:2014-10-14)

几何结构对油纸绝缘电介质频率响应特性影响规律

刘 君, 刘玉龙, 许 勇, 胡 琳, 杨 帆
(国网成都供电公司, 四川 成都 610041)

摘 要: 为将电介质频率响应更准确地应用于工程实际, 研究几何结构对油纸绝缘电介质频率响应特性影响规律。根据电介质频率响应原理, 建立测试系统; 根据电介质理论建立油纸绝缘几何结构物理模型; 对不同油-纸相对大小油纸绝缘电介质频率响应进行了数值计算及试验验证; 拟合得到任意频率及几何结构下油纸绝缘电介质频率响应曲面; 分析了几何结构变化过程中, 油纸绝缘电介质频率响应变化规律。结果表明, 油隙增大, 复介电常数实部趋于减小, 复介电常数虚部在低频段增大, 高频段起减小。

关键词: 油隙; 频率响应; 复介电常数; 曲面拟合; 油纸绝缘

Abstract: The influence law of geometry on dielectric frequency responses of oil-paper insulation is studied in order to apply the dielectric frequency response to diagnosing the equipment in operating condition more accurately. According to the principle of dielectric frequency response, the test system is established. The model of geometry structure of oil-paper insulation is built based on the dielectric theory. The dielectric frequency responses of oil-paper insulation with different geometry structure are calculated and validated by experimental data. The surface of dielectric frequency response with arbitrary geometry and frequency is obtained by fitting. Also, the relationship of dielectric frequency response and geometry of oil-paper insulation is analyzed. The results show that the real part of complex permittivity is decreased when the oil clearance increases, and the imaginary part of complex permittivity is increased at low frequency but decreased at high frequency.

Key words: oil clearance; frequency response; complex permittivity; surface fitting; oil-paper insulation

中图分类号: TM855 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)01-0029-07

0 引 言

变压器在电网中承担着电压转换的任务, 其绝缘状况关系着电网运行安全性及可靠性^[1]。油纸绝缘是大型变压器的主要绝缘体系, 其状态及性能将严重影响变压器电气及机械寿命^[2-3]。电介质频率响应法作为一种新的绝缘状态评估方法^[4-7], 通过测试一定频率范围内油纸绝缘的复介电常数, 分析其幅值、形状的变化趋势来分析评估油纸绝缘性能^[8]。国内外针对电介质频率响应的研究主要集中在电介质频率响应的理论模型^[9-13], 以及尝试用频率响应法评估现场变压器的微水含量及绝缘状态^[14,15]。频率响应法为表征变压器油纸绝缘的老化状态及微水含量评估提供了新的手段, 但不同影响因素对测试结果有严重的影响^[16-18]。目前国内外研究还主要集中在微水含量、温度、油纸绝缘老化程度对电介质频率响应结果的影响规律。但不同变

压器油纸绝缘几何结构各不相同, 其对油纸绝缘电介质频率响应的影响规律关系到电介质响应评估准确性。因此, 建立了油纸绝缘几何结构物理模型; 对不同油-纸相对大小油纸绝缘电介质频率响应进行了数值计算及试验验证; 拟合得到任意频率及几何结构下油纸绝缘电介质频率响应; 得到几何结构对油纸绝缘电介质频率响应特性影响规律。

1 电介质频率响应原理

电介质在电场作用下的电流密度可以表示为^[13]

$$\begin{aligned} J(\omega) &= j\omega\varepsilon_0\{\varepsilon_\infty + x(\omega) - j[\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0\omega} + x''(\omega)]\} \cdot E(\omega) \\ &= j\omega\varepsilon_0[\varepsilon'(\omega) - j\varepsilon''(\omega)]E(\omega) \end{aligned} \quad (1)$$

式中, $E(\omega)$ 为电场; ε_∞ 为极高频介电常数; ω 为角频率; $x(\omega)$ 为频率相关的复极化系数; $\varepsilon'(\omega)$ 为复介电常数 $\varepsilon(\omega)$ 实部; $\varepsilon''(\omega)$ 为虚部。故极化过程可以

通过测试激励电压下的响应电流幅值和相位来研究^[19-22]。系统响应电流为

$$I(\omega) = j\omega C_0 \left\{ \varepsilon_\infty + x \left\{ \omega \right\} - j \left[\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0 \omega} + x''(\omega) \right] \right\} \cdot U(\omega)$$

$$= j\omega \left[C'(\omega) - jC''(\omega) \right] \cdot U(\omega)$$

$$= j\omega C(\omega) U(\omega) \quad (2)$$

式中, C_0 为几何电容; $U(\omega)$ 为激励电压; $I(\omega)$ 为响应电流; $C'(\omega)$ 、 $C''(\omega)$ 分别为复电容 $C(\omega)$ 的实部及虚部。不同频率时, 油纸复合绝缘老化、温度、微水含量将改变其值。

2 油纸绝缘物理模型

图1为变压器绕组绝缘结构及其简化模型, 其中 X 为绝缘纸相对大小, 实际变压器中 X 的取值一般为 $0.5 \sim 0.8$ ^[23], 为了对比分析, X 取值为 $0.5 \sim 1$ 。图2为搭建的电介质频率响应法测试系统, 实验前首先将干燥后的新绝缘纸板裁剪成圆形并置于两极板之间, 浸于变压器油中 24 h 后(使其充分浸渍), 压紧上电极, 使油浸纸与上下极板之间的间隙都很小, 可以忽略不计。实验时升起上电极, 改变上极板与油浸纸板之间油隙的距离, 测试其频率响应特性。

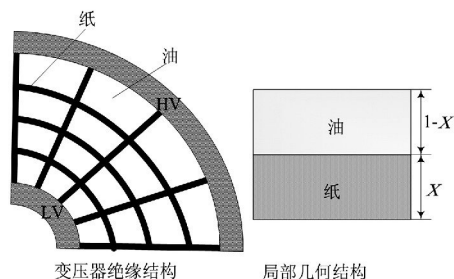


图1 变压器油纸绝缘几何结构及简化模型

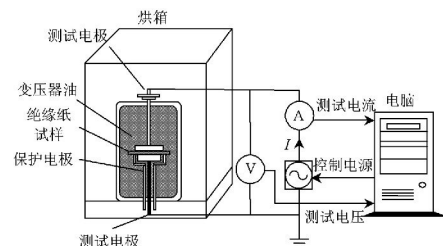


图2 试验装置

从图1中可以看出, 绝缘纸与上、下电极间存在油隙, 构成油/纸/油板系统, 如图3所示, 可等效为两相绝缘体系^[17-20], 如图4所示。系统复介电常数与绝缘油、绝缘纸复介电常数的关系为

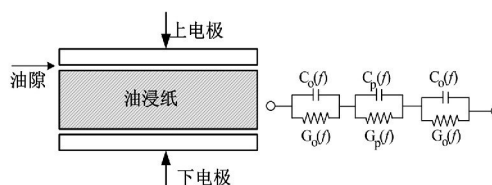


图3 油/纸/油体系及其等效体系

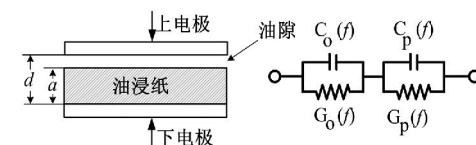


图4 油纸绝缘等效两相绝缘体系

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_o} + \frac{1}{C_p}, \quad \frac{1}{\varepsilon} = \left(1 - a/d\right) \frac{1}{\varepsilon_o} + \frac{a/d}{\varepsilon_p} \quad (3)$$

式中, C 为整个体系复电容; C_o 为油隙复电容; C_p 为油纸复电容。

$$C_o = C_o - j \frac{G_o}{\omega} \quad (4)$$

$$\varepsilon_o = \frac{d}{S \varepsilon_0} C_o = \frac{\varepsilon}{4\pi k \varepsilon_0} - j \frac{\sigma_o}{\omega \varepsilon_0} \quad (5)$$

式中, G_o 为油隙并联电导; k 为静电力常数。60℃时, $\sigma_o = 10.7$ pS/m, 而本实验所用的变压器油相对介电常数 $\varepsilon = 2.2$, 利用卡尔费休法测得油中微水含量 1%。油隙复介电常数为

$$\varepsilon_o = \frac{\varepsilon_o}{4\pi k \varepsilon_0} - j \frac{\sigma_o}{\omega \varepsilon_0} = 2.2 - j \frac{1.2}{\omega} \quad (6)$$

测试油隙复介电常数, 测试结果与计算结果基本一致, 如图5所示。

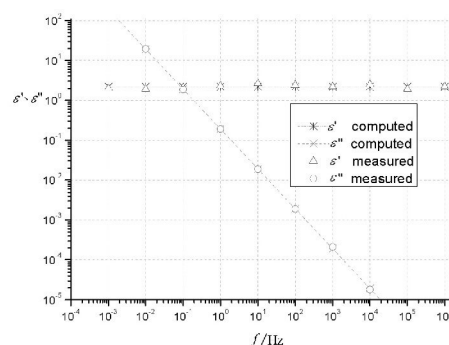


图5 60℃变压器油的介质响应

针对如图4所示的油浸纸-油绝缘体系, 测试其整体的电介质频率响应, 通过系统电介质频率响应计算单独油浸纸的电介质频率响应。式(3)中, 设 $X = a/d$, 可重写为

$$\frac{1}{\varepsilon} = \frac{1-X}{\varepsilon_o} + \frac{X}{\varepsilon_p} \quad (7)$$

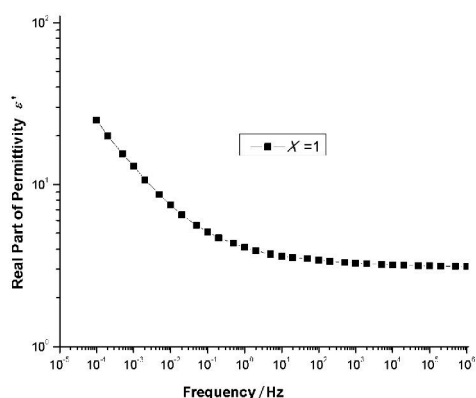
含油隙油纸绝缘体系复介电常数为

$$\varepsilon' = \frac{(\varepsilon'_o \varepsilon'_p - \varepsilon''_o \varepsilon''_p) [1 - X] \varepsilon'_p + X \varepsilon'_o + (\varepsilon'_o \varepsilon''_p + \varepsilon''_o \varepsilon'_p) [1 - X] \varepsilon''_p + X \varepsilon''_o}{[1 - X] \varepsilon'_p + X \varepsilon'_o + [1 - X] \varepsilon''_p + X \varepsilon''_o} \quad (8)$$

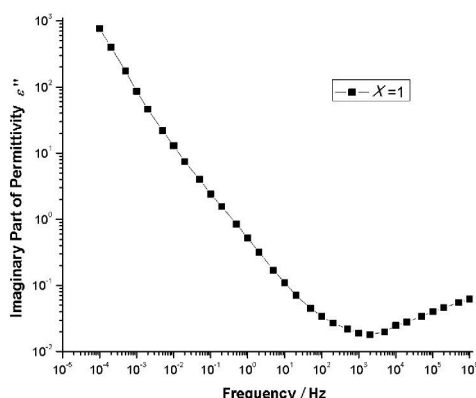
$$\varepsilon'' = \frac{(\varepsilon'_o \varepsilon''_p + \varepsilon''_o \varepsilon'_p) [1 - X] \varepsilon'_p + X \varepsilon'_o - (\varepsilon'_o \varepsilon'_p - \varepsilon''_o \varepsilon''_p) [1 - X] \varepsilon''_p + X \varepsilon''_o}{[1 - X] \varepsilon'_p + X \varepsilon'_o + [1 - X] \varepsilon''_p + X \varepsilon''_o} \quad (9)$$

3 数值计算及试验验证

利用图2所示的测试系统,测试 $X = 1$, 即单独油浸纸电介质频率响应 ε_p , 如图6所示。



a) 复介电常数实部 ε'

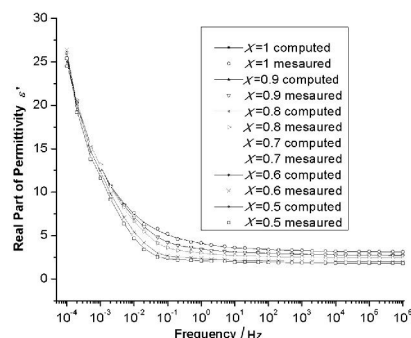


b) 复介电常数虚部 ε''

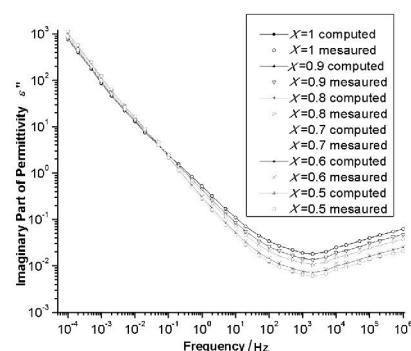
图6 单独油浸纸电介质频率响应

设定 X 为 $0.5 \sim 1$, 即油隙逐渐增大过程中, 测试系统电介质频率响应。并将图5、图6的数据带入式(8)、式(9)中, 通过模型计算系统电介质频率响应进行对比。计算值及测试值如图7所示。

由图7可以看出, 随着变压器油相对尺寸的增大, 即 X 从1逐渐减至0.5的过程中, 复介电常数实部在 10^{-3} Hz 以下超低频略微增加, 而在 10^{-3} Hz 以上部分逐渐减小, 随着频率增加, 减小幅度越大, 且随着 X 的减小, 变化越为显著; 复介电常数虚部体



a) 复介电常数实部 ε'



b) 复介电常数虚部 ε''

图7 不同几何结构 ($X = 0.5 \sim 1$) 油纸绝缘电介质频率响应测试值及计算值

现了相似规律, 只是由增大变至减小的分界点位于 0.1 Hz 左右。实验值与计算值的最大误差实部 7.45% , 虚部为 8.1% , 主要原因为试验过程的随机误差及试验系统误差。

4 频率响应特性曲面拟合分析

为进一步分析任意频率下, 不同几何结构对油纸绝缘电介质频率响应特性影响规律, 根据基于参数拟合的曲面拟合法, 进行曲面拟合。设自变量 y 一定的情况下, 函数 f 与 x 可表达为多项式为

$$f(x, y) = \sum_{i=0}^n a_i(y) x^i \quad (10)$$

且令函数

$$a_i(y) = \sum_{j=0}^m b_{ij} y^j \quad (11)$$

则函数 f 与自变量 x, y 的关系可表达为曲面。

表 1 不同几何结构($X=0.5 \sim 1$) 油纸绝缘复介电常数实部拟合曲线参数

X	a_6	a_5	a_4	a_3	a_2	a_1	a_0
0.5	1.92×10^{-5}	-2.32×10^{-3}	0.031	-0.141	0.237	-0.110	1.966
0.6	-1.39×10^{-5}	-1.75×10^{-3}	0.028	-0.145	0.287	-0.211	2.201
0.7	1.99×10^{-5}	-1.75×10^{-3}	0.025	-0.135	0.315	-0.335	2.512
0.8	4.99×10^{-5}	-1.83×10^{-3}	0.023	-0.124	0.322	-0.446	2.903
0.9	1.60×10^{-4}	-2.68×10^{-3}	0.020	-0.096	0.297	-0.579	3.425
1.0	2.48×10^{-4}	-3.54×10^{-3}	0.019	-0.070	0.243	-0.681	4.109

表 2 不同几何结构($X=0.5 \sim 1$) 油纸绝缘复介电常数虚部拟合曲线参数

X	a_6	a_5	a_4	a_3	a_2	a_1	a_0
0.5	0.097	-0.973	1.407	8.915	-15.32	-21.33	18.08
0.6	0.090	-0.901	1.298	8.257	-14.11	-19.93	16.81
0.7	0.082	-0.829	1.203	7.556	-12.96	-18.31	15.54
0.8	0.076	-0.770	1.122	6.997	-12.01	-17.02	14.51
0.9	0.071	-0.719	1.052	6.522	-11.21	-15.92	13.63
1.0	0.067	-0.674	0.99	6.092	-10.51	-14.88	12.83

表 3 表 1 参数 a_i 曲线拟合的参数 b_{ij}

i	j				
	4	3	2	1	0
0	5.279 17	-10.416 90	10.778 21	-3.549 20	2.017 75
1	3.391 67	-8.682 04	7.787 92	-3.992 54	0.813 36
2	0.533 33	-2.265 19	1.954 58	0.044 85	-0.024 44
3	-1.106 25	3.008 29	-2.560 15	0.792 83	-0.204 25
4	0.039 58	-0.031 44	-0.043 60	0.024 34	0.030 69
5	0.056 25	-0.161 99	0.151 98	-0.052 44	0.002 65
6	-0.006 75	0.018 45	-0.016 65	0.005 80	-0.000 61

表 4 表 2 参数 a_i 曲线拟合的参数 b_{ij}

i	j				
	4	3	2	1	0
0	-64.210 40	194.060 10	-208.604 00	83.205 22	8.381 09
1	139.833 30	-428.019 00	474.660 80	-212.225 00	10.873 68
2	38.291 67	-115.018 00	119.897 90	-40.750 70	-12.933 40
3	-46.060 40	140.657 50	-154.249 00	65.937 43	-0.193 90
4	-0.179 17	0.228 61	0.709 29	-1.959 69	2.192 17
5	3.250 00	-9.848 33	10.570 00	-4.114 67	-0.531 06
6	-0.375 00	1.139 63	-1.233 92	0.499 88	0.036 06

$$f(x,y) = \sum_{i=0}^n x^i \sum_{j=0}^m b_{ij} y^j \quad (12)$$

令测试频率对数 $\lg f$ 为 x , 纸板相对大小 X 为 y , 测量所得油纸绝缘系统复介电常数实部和虚部分别

为 $f(x,y)$ 。 n 取 6, m 取 4, 用最小二乘法对 X 分别为 0.5、0.6、0.7、0.8、0.9、1.0 的 6 个点的曲线进行拟合, 得到 a_i 的数值见表 1 和表 2。

根据式(8) 对每个 a_i 进行拟合得到 b_{ij} 的数值见

表 3 和表 4, 即可得到纸板相对大小 X 在 0.5 ~ 1.0 之间, 油纸绝缘系统复介电常数实部和与虚部与测试频率及纸板相对大小的关系曲面分别如图 8 所示。

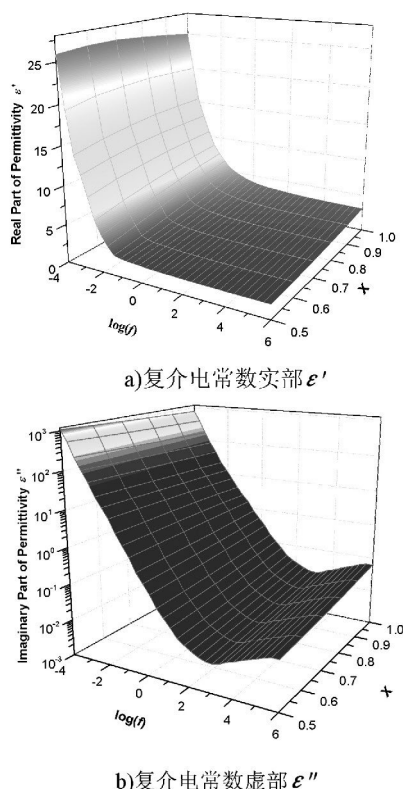


图 8 不同几何结构油纸绝缘电介质
频率响应拟合曲面

根据参数拟合的曲面, 获得油纸绝缘在几何结构 X 在 0.5 ~ 1 任意变化情况下, 油纸绝缘电介质频率响应变化规律, 为修正不同变压器几何结构电介质频率响应提供了依据。

5 几何结构影响规律分析

为直观理解油纸绝缘几何结构变化过程中, 油纸绝缘电介质频率响应变化规律, 对比分析油隙增大与单独油浸纸电介质频率响应相对变化量, 记为

$$e_x = \frac{f(\lg f, X) - f(\lg f, 1)}{f(\lg f, 1)} \quad (17)$$

当 $X = 1 \sim 0.5$ 时, 复介电常数实部及虚部相对变化量规律如图 9 所示。

可以看出, 油隙增大对复介电常数实部主要起减小作用, 只在最低频有微略增加, 幅度减小最大出现在 0.05 Hz, $X = 0.5$ 时是 $X = 1$ 时相对变化达到 54%。油隙增大对复介电常数虚部在低频段起增大作用, 高频段起减小作用。 $X = 0.5$ 时, 随着频率增

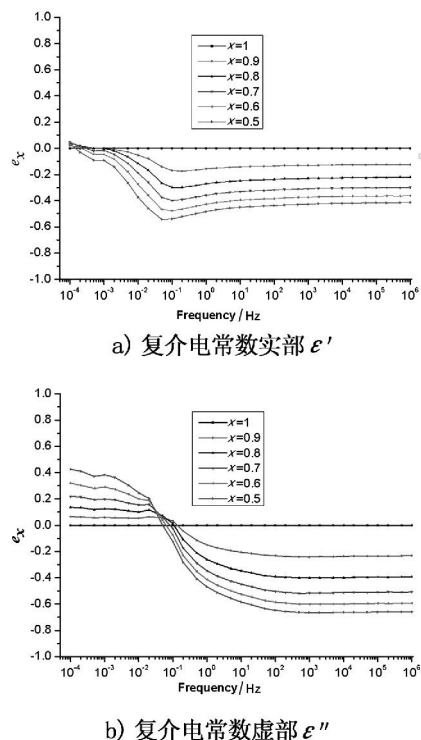


图 9 复介电常数实部及虚部相对变化量规律
高, 相对变化量从正值最大 42% (10^{-4} Hz 时) 逐渐减小至正值最大 -66% (102 Hz 时), 10^2 Hz 后基本维持不变。

因此, 在油纸绝缘频率响应特性的测试和分析过程中, 必须将油纸绝缘几何结构作为一个不可忽略的因子, 考虑其对油纸绝缘频率响应特性的影响, 以便对油纸绝缘状态和水分含量进行准确评估。

6 结 论

根据 Maxwell - Wagner 理论, 建立了不同几何结构油纸绝缘物理模型及其数值计算公式, 并建立了油纸绝缘电介质频率响应测试系统, 对不同油隙大小油纸绝缘电介质频率响应进行试验验证。结论如下。

(1) 试验结果与数值计算结果体现出良好的一致性, 实验值与计算值的最大误差实部 7.45%, 虚部为 8.1%, 主要由系统误差及随机误差造成。

(2) 根据参数拟合的曲面, 获得油纸绝缘在几何结构 X 在 0.5 ~ 1 任意变化情况下, 油纸绝缘电介质频率响应变化规律, 为修正不同变压器几何结构电介质频率响应提供了依据。

(3) 油隙增大对复介电常数实部主要起减小作

用,只在最低频有微略增加,幅度减小最大出现在0.05 Hz;油隙增大对复介电常数虚部在低频段起增大作用,高频段起减小作用。

在油纸绝缘频率响应特性的测试和分析过程中,必须将油纸绝缘几何结构作为一个不可忽略的因子,考虑其对油纸绝缘频率响应特性的影响,修正测试结果,以便对油纸绝缘状态和水分含量进行准确评估。

参考文献

- [1] M. Wang, A. J. Vandermaar, K. D. Srivastava. Review of Condition Assessment of Power Transformers in Service [J]. IEEE Elec. Insul. Mag., 2002, 18(6): 12 – 25.
- [2] L. E. Lundgaard, W. Hansen, D. Linhjell, et al. Aging of Oil – impregnated Paper in Power Transformers [J]. IEEE Trans. Power. Del., 2004, 19(2): 230 – 239.
- [3] 刘君,吴广宁,周利军,等. 油纸绝缘体系微水扩散的分子模拟 [J]. 高电压技术, 2010, 36(12): 2907 – 2912.
- [4] T. K. Saha, Z. T. Yao. Experience with Return Voltage Measurements for Assessing Insulation Conditions in Service – aged Transformers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(1): 128 – 135.
- [5] T. K. Saha, P. Purkait. Investigation of Polarization and Depolarization Current Measurements for the Assessment of Oil – paper Insulation of Aged Transformers [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11(1): 144 – 154.
- [6] Linhjell D, Lundgaard L. Dielectric Response of Mineral Oil Impregnated Cellulose and the Impact of Aging [J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(1): 156 – 169.
- [7] Jun Liu, Lijun Zhou, Guangning Wu, et al. Dielectric Frequency Response of Oil – paper Composite Insulation Modified by Nanoparticles [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(2): 510 – 520.
- [8] S. L. M. Berleze, R. Robert. Response Functions and After – effect in Dielectrics [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10(4): 665 – 669.
- [9] J. Blennow, S. M. Gubanski. Field Experiences with Measurements of Dielectric Response in Frequency Domain for Power Transformer Diagnostics [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 21(2): 681 – 688.
- [10] A. Dernfalk, Diagnostic Methods for Composite Insulators with Biological Growth [M]. Gothenburg, Sweden: Chalmers University of Technology, 2004.
- [11] T. K. Saha, P. Purkait. Investigation of Polarization and Depolarization Current Measurements for the Assessment of Oil – paper Insulation of Aged Transformers [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11(1): 144 – 154.
- [12] Vahe Der Houhanessian, Walter S. Zaengl. Application of Relaxation Current to On – site Diagnosis of Power Transformers [J]. 1997 IEEE Annual Report Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Minneapolis, USA, 1997: 45 – 51.
- [13] C. Ekanayake, S. M. Gubanski, A. Graczkowski, et al. Frequency Response of Oil Impregnated Pressboard and Paper Samples for Estimating Moisture in Transformer Insulation [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1309 – 1317.
- [14] C. Ekanayake. Diagnosis of Moisture in Transformer Insulation – application of Frequency Domain Spectroscopy [M]. Gothenburg, Sweden: Chalmers University of Technology, 2006.
- [15] S. M. Gubanski, P. Boss, G. Csépes, et al. Dielectric Response Methods for Diagnostics of Power Transformers [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2003, 19(3): 12 – 18.
- [16] B. Nettelblad. Effects of Moisture Content on the Dielectric Properties of Celulose [C]. Nordic Insulation Symposium NORD – IS, 1992: 6 – 12.
- [17] Y. Sheiretov and M. Zahn. Dielectrometry Measurements of Moisture Dynamics in Oil – impregnated Pressboard [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, 2(3): 329 – 351.
- [18] Y. Du, M. Zahn, A. V. Mamishev, et al. Moisture Dynamics Measurements of Transformer Board Using a Three – wavelength Dielectrometry Sensor [C]. IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Montreal, Canada, 1996: 53 – 56.
- [19] Jonscher A K. Dielectric Relaxation in Solids [M]. London: Dielectrics Press Limited, 1996: 66 – 110.
- [20] 殷之文. 电介质物理学 [M]. 北京: 科学出版社, 2003:

- 57-65.
- [1] 赵孔双. 介电谱方法及应用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 50-57.
- [2] L. J. Zhou, G. N. Wu, J. Liu, Modeling of Transient Moisture Equilibrium in Oil-paper Insulation [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(3): 872-878.
- [3] T. K. Saha, P. Purkait. Understanding the Impacts of

Moisture and Thermal Ageing on Transformer's Insulation by Dielectric Response and Molecular Weight Measurements [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(2): 568-582.

作者简介:

刘君(1984), 博士, 主要从事高压电气设备绝缘状态评估及其方法研究。

(收稿日期: 2014-09-31)

《四川电力技术》投稿须知

《四川电力技术》是四川省电力公司主管、四川省电机工程学会和四川电力科学研究院联合主办的国内外公开发行的综合性学术的电力科技期刊, 主要刊登电力系统的科研、规划、生产运行、设备和系统维护等方面的研究报告、专题论述、应用研究、经验交流、技术讨论等文稿, 尤其是科研创新方面的论文。本刊热诚欢迎投稿。根据科技论文规范化的要求, 本刊对来稿提出以下要求。

1) 文稿内容应具有科学性、创新性和实用性; 论点明确、数据可靠、说明严谨、数学推导简明; 语言流畅、文字简练、层次分明、重点突出。学术论文请按 GB 7713-1987《科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式》书写, 篇幅以版面不超过 6 000 字(包括图表所占篇幅)为宜。

2) 文稿须写有中文摘要、关键词。摘要内容包括研究目的、方法、结果和结论四要素。摘要在 150~300 字之内。关键词是反映论文的词组, 选 3~8 个。摘要及关键词、文章题目均附英文译文。

3) 文稿表格尽量采用“三线表”。表格上方写表序和表名。表注放在表底。插图应清晰, 少而精, 插图下方应有图序和图名。能用文字和表格描述的尽可能不用插图。

4) 来稿计量单位一律采用《中华人民共和国法定计量单位》和符号。

5) 文中或公式中外文字母符号要注明文种、大小写、上下标、正体、斜体。

6) 参考文献应尽量选用公开发表的资料, 按在正文中出现的先后次序列于文后, 以 [1]、[2]……标识序号, 且与正文中的指标序号一致。按 GB/T 7714-2005《文后参考文献著录规则》、CAJ-CD B/T 1-2006《中国学术期刊(光盘版)检索与评价数据规范修证版试行稿》的要求著录文后参考文献。

文献类型及其标识为: 普通图书 [M]; 会议论文 [C]; 报纸文章 [N]; 期刊文章 [J]; 学位论文 [D]; 报告 [R]; 标准 [S]; 专利 [P]; 汇编 [G]; 档案 [B]; 古籍 [O]; 参考工具 [K]; 其他未说明的文献类型, 例如可公开的政府行政部门编号文件、行业或大公司的技术规范或工作手册 [Z]; 网上期刊 [J/OL]; 网上电子公司 [EB/OL]。电子文献尚需在载体标记后加上发表或更新日期(加圆括号)、引用日期(加方括号)和电子文献网址。

7) 投稿可通过 E-mail 提供电子文件, 信箱为 cdscljs@163.com。稿件上注明详细地址、邮政编码、联系电话, 并请自留底稿, 本刊一律不退稿。作者在投稿 3 个月后可致电 028-87082036 或 E-mail 到编辑部了解审稿情况。

8) 本刊投稿自愿, 文责自负。对录用稿件编辑部有权进行必要的删改, 如不愿被删改, 请在原稿上注明。

9) 本刊已加入《中国学术期刊(光盘版)》、中国期刊网、北极星网站、万方数据库、《中国期刊全文数据库》等网站, 稿件一经录用刊登, 作者著作权使用费用及稿酬已一次付清, 如作者不同意收录, 请在来稿时提出声明, 本刊将作适当处理。

来稿请寄: 四川省成都市青华路 24 号《四川电力技术》编辑部收

邮政编码: 610072

电话: (028) 87082036, 87082037

E-mail: cdscljs@163.com

基于智能视频分析技术的高压开关柜 隐患预警与故障诊断方法

周华东¹, 李 晶², 周电波², 白吉昌³

(1. 国网内江供电公司, 四川 内江 641000; 2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072;
3. 国网南充供电公司, 四川 南充 637000)

摘 要: 基于智能视频分析技术, 研究了高压开关智能视频分析系统及配套的新式高压开关柜内部照明系统。该系统的智能视频分析功能, 一方面, 可以对柜内隔离开关和接地开关位置状态进行识别、判断, 在隔离开关和接地开关位置状态异常时进行告警, 可以避免因传动系统异常导致五防闭锁装置失效和设备误操作情况; 另一方面, 结合示温蜡片, 还有助于发现柜内载流故障隐患。同时, 全方位、多角度布置的前端摄像头, 可对高压开关柜内整体情况进行可视化视频监控, 有助于发现开关柜内存在的其他异常情况, 并且, 大量存储的高清晰度影像资料, 在开关柜遭遇故障后, 有助于对故障发生位置和故障发生原因进行分析。

关键词: 智能视频分析; 高压开关柜; 隐患; 故障

Abstract: Intelligent video analysis system and its matched new type interior lighting system of high-voltage metal-enclosed switchgear are studied based on intelligent video analysis technology. Because of its intelligent video analysis function, the position of disconnector and grounding switch can be identified and judged, and it will have an early-warning when the positions of disconnector and grounding switch are abnormal, which can avoid the misoperation and failures. On the other hand, it is useful to find the hidden danger of interior current-carrying fault if combining with the temperature wax tablet. This system arranges many cameras in the corresponding positions in high-voltage metal-enclosed switchgear, its interior conditions can be monitored which is helpful to find other existing abnormal phenomenon. And many images with high resolution can be stored to analyze the fault position and fault reason if the fault happened.

Key words: intelligent video analysis; HV metal-enclosed switchgear; hidden danger; fault

中图分类号: TM866 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2015)01-0036-04

0 引 言

高压开关柜在电力系统中被广泛应用且绝大部分直接承担用户负荷, 其运行状况对供电可靠性和电网安全影响极大。然而, 高压开关柜内集成了多个电气设备, 这些设备被金属外壳完全封闭在柜内, 会因各隔室空间狭小和散热不佳, 相比敞开式电器设备, 属于紧凑型的开关柜内部各电气设备和机械部件面临更复杂、更恶劣的运行环境, 从而更容易造成安全隐患滋生故障^[1]。

相关文献对 6~40.5 kV 高压开关柜故障进行的统计分析显示, 机械故障和载流故障在开关柜故障中占有相当大的比例, 超过 60%^[2,3]。并且, 上述故障发生后, 极有可能引发恶性误操作和相间、对地

闪络等绝缘故障, 不仅损坏设备, 导致非正常停运, 还有可能危害电网安全运行, 造成电网事故。为此, 各高校、科研院所、设备厂家以及电网生产运行单位积极展开研究, 开发了多种监测手段, 希望借此准确判断开关柜运行状态, 及时、准确地发现开关柜存在的故障隐患, 将其处置在萌芽状态^[4]。

目前对开关柜机械故障隐患尚无可靠的监测手段, 设备运维人员往往通过柜门观察窗直接观察隔离开关、接地开关分合闸位置状况, 以避免传动系统故障、分合闸指示装置指示异常的情况, 但是, 该方法在视线受阻或光线投射不佳的情况下无法确认隔离开关位置状态, 并且, 柜体开窗会影响开关柜柜体防护等级。而对载流故障隐患的监测, 主要采取在开关柜内高电位处安装在线测温装置的方式^[5,6], 但目前的测温装置价格不菲、功能单一且维护不便。

为此,介绍开展的高压开关柜智能视频分析技术研究,运用行为模式识别、目标检测与分析、自动跟踪识别、运动理解等技术,开发完成高压开关柜智能视频分析系统,对开关柜内整体情况进行可视化视频监控,降低开关柜内隔离开关分、合闸状态误判概率,帮助发现开关柜内存在的载流故障隐患,为开关柜故障诊断提供相应视频资料,填补开关柜状态检测和故障诊断的技术盲区。

1 高压开关柜智能视频分析技术方案

作为模拟视频监控、数字视频监控之后的第三代视频监控技术,智能视频监控技术一方面可以适应更为复杂和多变的场景,另一方面能识别和分析更多的行为和异常事件,改变了之前“只记录不判断”的视频监控方式。其中,行为模式识别、生物识别、目标检测与分析、自动跟踪识别、运动理解等技术是智能化技术发展的主要内容。

将智能视频监控技术应用于高压开关柜中,即采用视频编解码技术、图像智能分析技术、计算机网络和通信技术等技术方法,研制高压开关柜智能视频分析系统,对开关柜内情况进行可视化视频监控和智能分析,并可将监测、分析结果上传至变电站综合自动化系统。具体而言,高压开关柜智能视频分析系统的多个前端摄像头被安装在开关柜内多个位置,对柜内情况进行实时监测,结合图像智能分析技术和示温蜡片有助于发现隔离开关分、合闸异常和载流故障隐患,并且,通过视频摄录得到的故障发生前的高清晰度影像资料,可以为开关柜故障诊断提供可靠依据。

要实现智能视频分析技术在开关柜中的应用,首先需要研究视频信息的传输和分析技术,即视频编解码技术和图像智能分析技术。

1.1 高性能视频编解码技术 H. 264

作为常用的视频压缩算法和标准,在同等图像质量的条件下,H. 264 系列标准是 MPEG-2 系列标准的 2 倍以上,是 MPEG-4 系列标准的 1.5~2 倍。并且,H. 264 系列标准具有更好的网络适应性,能够在相对较小的带宽条件下提供高画质视频信息传输服务。

H. 264 采用“预测+变换编码+熵编码”的编码模式,研制的系统采用最常用的 DCT 变换编码模

块^[8],变换方法如下。

$$F(u, v) = \frac{1}{2} k(u) k(v) \sum_{x=0}^3 \sum_{y=0}^3 f(x, y) \cos \frac{(2y+1)u\pi}{8} \cos \frac{(2y+1)v\pi}{8} \quad (1)$$

式中, $k(0) = \frac{1}{\sqrt{2}}$, 当 $u \neq 0$ 时, $k(u) = 1$, 根据余弦函数性质,有

$$|F(u, v)| + \frac{Q_{step}}{3} < Q_{step} \quad (2)$$

在 INTRA 帧量化中,满足式(2)时, $F(u, v)$ 量化为 0,即所有变换系数量化为 0。

因此,选用 H. 264 标准作为高压开关柜智能视频分析系统的视频编解码算法,解决多通道大数据量视频流传输和组网的需要。

1.2 图像智能分析技术

将拍摄的高压开关柜内部影像通过高性能视频编解码技术传输至变电站综合自动化系统后,要实现智能分析功能,对柜内隔离开关/接地开关位置状态、载流回路所用示温蜡片进行状态监测和异常告警,就必须借助第三代视频监控的重要技术手段——图像智能分析技术。图像智能分析技术需要开发相应的动态图像分析算法,其中,前景检测、行为检测和动态区域设置是关键技术。

前景检测的目的是把监测对象从视频图像背景区域中分割出来。经过多年的研究与发展,基本背景差法、混合高斯算法、帧差法等经典算法被应用到了前景检测中。要使得前景检测符合开关柜内隔离开关/接地开关和示温蜡片状态识别的需求,必须考虑光照、阴影等干扰的影响。这里选取混合高斯算法,能可靠处理长期的光照和场景变化。每个像素点建立一个自适应的混合高斯模型,定义 K 个状态,每个像素值是随机变量 X 的一个采样, X 服从 K 个状态的混合高斯分布,第 k 个分布的定义为

$$f_{x/k}(X/k, \theta_k) = \frac{1}{(2\pi)^k |\Sigma|^{1/2}} e^{-\frac{1}{2}(X-\mu_k)^T \Sigma_k^{-1}(X-\mu_k)} \quad (3)$$

式中, $k \in (1, 2, \dots, K)$; μ_k 是均值向量; Σ_k 是协方差矩阵。

行为检测的目的则是正确检测出隔离开关/接地开关和示温蜡片状态变化,并应具有较好的鲁棒性。行为检测需要在前景检测基础上实现目标检测

和跟踪,并进一步完成行为或事件模式识别。

动态区域设置即在需要设置检测区域的场景下,保证在任何时刻对一个检测区域进行编辑修改,生效后可立即按照新的检测区域设置规则进行检测,无需重新进行背景学习。

2 高压开关柜智能视频分析系统

如图 1 所示,在高性能视频编解码算法和图像智能分析技术研究的基础上,开发了高压开关柜智能视频分析系统,同时,为提升监测效果,专门研制了新式高压开关柜内部照明系统。

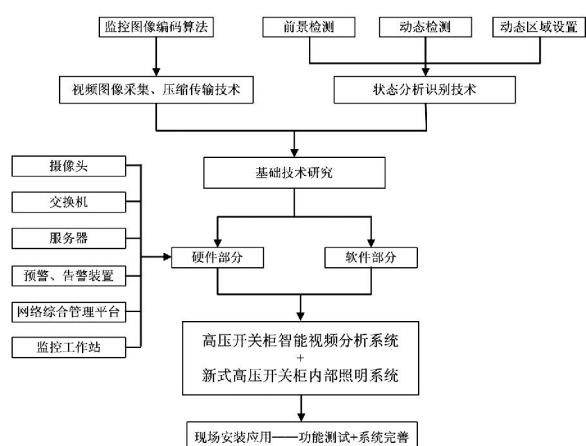


图 1 系统组成及研制路线

高压开关柜智能视频分析系统的硬件部分主要由前端摄像头、光纤以太网交换机、可支持多路智能视频分析功能的单服务器、预警/告警装置、网络综合管理平台以及监控工作站组成。前端摄像头完成模拟视频的拍摄,具有高像素和高分辨率,可确保获得清晰的影像,通过有线和无线两种方式传输至上一级设备,如图 2 所示,120°水平广角有助于一个前端摄像头获得三相的影像资料,便于用户观察和分析。



图 2 安装于开关柜内的水平广角摄像头

光纤以太网交换机将前端摄像头摄录的图像进行实时传输(传输损耗小、传输质量可靠)。服务器

完成模拟视频监视信号的数字采集、图像压缩、监控数据记录和检索、硬盘录像、给前端发送控制信息等功能。该系统通过统一界面对系统结构、用户角色、前端摄像头、告警设备、智能分析服务器进行集中配置和全面管理,基于 Client/Service 架构管理,远程实现实时录像、告警录像、集中备份、索引查询、下载回放和存储配置等服务功能。管理平台支持 8 个 SATA 接口和多路告警输出接口。每个 SATA 接口支持最大容量 2TB 的硬盘接入,可满足长达 3 个月以上的高清晰度摄录影像记录,并支持在本地或客户端按时间、关联事件、日志、告警等多种方式检索,查找某时段监控录像。告警输出接口则可通过外接方式发出告警信号,第一时间通知电网运维人员,同时启动告警录像并将事件信息写入到系统数据库中。管理平台还具备二次开发功能,提供外部开发接口,可与变电站综合自动化系统进行信息共享及联合操作。高压开关柜智能视频分析系统的主要技术参数如下。

压缩标准: H. 264——具有很高的数据压缩比率,在同等图像质量的条件下,是 MPEG-2 的 2 倍以上,是 MPEG-4 的 1.5~2 倍;

帧速率: ≥ 25 F/s 可调;

图像分辨率: CIF、4CIF、D1 可调;

平均带宽占用: 512 kbps (CIF 全帧); 1280 kbps (4CIF/D1 全帧);

显示分辨率: 1024 × 768、1280 × 1024、1680 × 1050 可调;

输出信号制式: PAL/NTSC;

输出阻抗: 75 Ω ;

接口: BNC-75 Ω , SMB-75 Ω ;

图像延时: < 300 ms;

报警响应时间: < 300 ms;

90% 以上实时视频画面调出响应时间: ≤ 0.5 s;

系统时间与标准时间的误差: < 1 s;

系统从断电后重启至恢复正常运行黑启动时间: < 5 min。

研制了新式高压开关柜内部照明系统,以协助前端摄像头获得更好效果的影像,配合智能视频分析系统工作。由镓、砷、磷的化合物制成的 LED 工作电压低、工作电流小、抗冲击和抗震性能好、可靠性高、寿命长,目前被各行业广泛用于显示、装饰和照明。将 LED 通过串并联方式组装在电路板上,几

个 LED 串联组成一组,再和其他组进行并联,是这里研制的 LED 长效节能条形光源的基础。这种组装方式具有以下优点:(1) 可以最大限度提高对供电电压的使用率,减少无用功损耗;(2) 几个串联 LED 的驱动电流是一致的,有利于恒定 LED 的电流,确保 LED 的使用寿命;(3) 串联后的 LED 灯组再和其他组进行并联,可以保证在一组损坏的情况下,不会影响到其他组的正常使用;(4) 由于每组都有一个限流电阻,因此,不会因为其中一组的损坏而影响其他组的使用寿命。

因此,结合新式高压开关柜内部照明系统的高压开关柜智能视频分析系统,能够全方位、多角度实时监测开关柜内情况,实现如下功能:(1) 对柜内隔离开关和接地开关位置状态进行识别、判断,记录隔离开关和接地开关动作情况,在隔离开关和接地开关位置状态异常时进行告警;(2) 结合示温蜡片有助于发现柜内载流故障隐患;(3) 系统的多路告警输出接口,可利用动态视频分析技术,通过系统设置,对各种异常情况进行分类告警,例如,具有特色的语音告警功能,可以向电网运维人员语音提示存在的异常情况及其分类;(4) 存储的柜内高清晰度影像资料在开关柜发生故障后可以为故障诊断提供可靠依据。

3 实验验证

本项目研制的高压开关柜智能视频分析系统和基于长效节能型光源的新式高压开关柜内部照明系统,在国网四川省电力公司南充供电公司某 XGN2-40.5 kV 型高压开关柜试验平台(如图 3 所示)上进行了安装应用。



图 3 XGN2-40.5 kV 型高压开关柜试验平台

应用情况表明,高压开关柜智能视频分析系统的前端摄像头将实时采集的视频信号提供给视频编码器,视频编码器将模拟码流进行标准 H.264 编码压缩,然后传输到监控中心的视频智能分析服务器采用状态分析算法对视频码流进行实时智能分析,提取状态数据信息,并将开关柜状态数据和视频码流一起实时发送给监控工作站。因此,高压开关柜智能视频分析系统可全方位、多角度对开关柜内情况进行实时可视化视频监控,并在下方列表中实时刷新开关柜内隔离开关的状态数据(如图 4 所示),同时,网络综合管理平台 24 h 对前端视频进行录像,当视频智能分析服务器分析到隔离开关状态发生变化时,一方面以事件方式通知网络综合管理平台记录事件信息并和录像文件进行关联,在出现异常状态的情况下进行告警,同时将事件信息写入到系统数据库中以提供录像查询及回放功能。

在上述工作方式下,高压开关柜智能视频分析系统能够对开关柜内隔离开关和接地开关位置状态、动作情况进行可视化视频监控,并具有隔离开关动作事件记录及录像、隔离开关位置状态异常情况告警及录像等功能,结合示温蜡片则有助于发现柜内载流故障隐患,此外,大量存储的高清晰度录像资料,在开关柜发生故障后可用于分析故障位置和故障原因,为故障诊断提供新的技术手段。



图 4 系统界面

4 结 论

所研制的高压开关柜智能视频分析系统及其配套软件,通过在开关柜内多个位置安装前端摄像头,可以全方位、多角度对高压开关柜内部情况进行实
(下转第 94 页)

速率。

2.2.7 优化汽机运行操作

按照机组升温、升压曲线,适时投入汽缸倒暖、夹层加热,合理选择抽真空、投轴封时机,保证暖缸、暖机充分,有效保证汽轮机膨胀及胀差在规定范围内,控制机组启动时间,降低锅炉启动油耗。

3 结 语

在实施启动点火优化措施后,点火油耗由以前的 40 ~ 60 t/次,降为现在的 15 ~ 20 t/次,各金属受热面也未有超温现象;每次节约点火油耗 50% 以上,取得了显著的经济效益,同时保证了机组启动的安全,为同类机组提供借鉴。机组启动过程部分参数趋势见图 2。

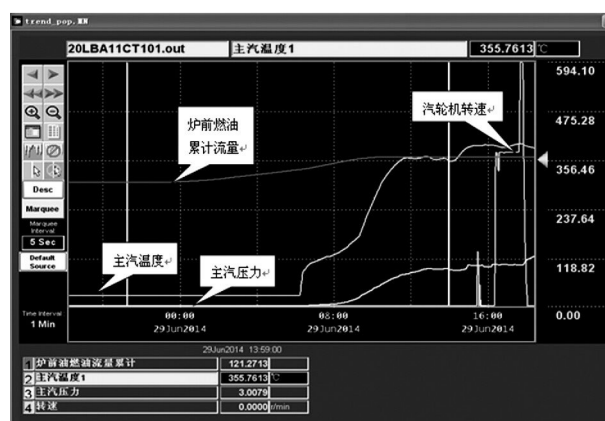


图 2 燃油流量、汽轮机转速、主汽温度、主汽压力
点火前及冲转时的趋势图

作者简介:

丁芸(1968),从事循环流化床机组调试、运行优化及生产技术管理工作。

(收稿日期:2014-11-05)

(上接第 39 页)

时监测并存储影像数据。在此基础上,可实现如下功能。

①全方位、多角度对柜内情况进行可视化视频监控,使得运行期间封闭的开关柜内部情况对于电网运维人员而言不再是“盲点”。

②对开关柜内隔离开关和接地开关进行专门监控,对隔离开关和接地开关的位置状态进行自动识别、判断,在隔离开关和接地开关动作时进行事件记录并录像,在隔离开关和接地开关位置状态出现异常时进行告警并录像。相比现有的利用隔离开关分/合闸状态指示装置指示隔离开关位置状态和在柜体开观察窗直接观察隔离开关位置状态的方法,本项目研究的方法能更安全、更可靠地监测柜内隔离开关位置状态,提示存在的异常情况,若与五防闭锁装置相结合,作为隔离开关位置状态的判据之一,可有效降低因传动系统异常导致五防闭锁装置失效引发设备误操作的概率。

③实时视频监控,再结合相应部位安装的示温蜡片,有助于发现开关柜载流故障隐患。相比现有的开关柜在线测温技术,本项目研究的方法在监测期间不会影响开关柜各项性能,对设备更加安全,避免了因测温装置安装给设备可靠运行带来隐患。

④本项目研制的系统可存储大量高清晰度视频影像资料,因此,过去很长一段时间的开关柜内部影

像被完整保存并可由电网运维人员从本地或客户端按时间、关联事件、日志、告警等多种方式检索,在开关柜遭遇故障后,故障前柜内录像内容可用于分析故障位置和故障原因,为开关柜故障诊断提供新的技术手段。

参考文献

- 苑舜. 高压开关设备状态监测与诊断技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- 候静. 基于光纤测温的高压开关柜温度故障预警 [M]. 济南: 山东大学, 2009.
- Sergheie Vlase, Marian Duta, Sebastian Popescu, et al. Local Monitoring System of the Permissible Temperature for the Medium Voltage Metal - enclosed Switchgear and Control Gear [C]. Proceedings of the 3th International Symposium on Electrical and Engineering (ISEEE), Galati, 2010: 311 - 313.
- 郭钢, 李进. 光纤在开关柜触头温度监测中的应用 [J]. 高压电器, 2006, 32(2): 122.
- 韩玉兰, 芦兴, 路灿, 等. 高压开关柜隔离触头温度红外检测系统的研制 [J]. 高压电器, 2008, 44(6): 578 - 581.
- 许一声, 顾霓鸿. 高压开关柜触头温度在线检测仪 [J]. 高压电器, 2005, 41(2): 139 - 140.
- 李洛, 张剑. 基于整数变换的 H. 264 标准量化过程 [J]. 计算机应用研究, 2006(5): 31 - 33.

(收稿日期:2014-08-06)

500 kV 智能变电站的程序化操作应用探讨

庄秋月, 李凡红

(国网四川省电力公司检修公司, 四川 绵阳 621000)

摘 要: 随着 500 kV 智能变电站的陆续投产以及变电运维无人值守模式的推进, 程序化操作为减少人力投入和提高倒闸效率带来了可观的效果, 同时也对管理工作提出了新的课题。基于此, 借助川内首座 500 kV 智能变电站, 结合程序化操作的概念、实现条件、控制策略、功能模块等方面的关键点进行分析探讨, 并从工程实际、运维管理等方面提出了思考与建议, 为今后此类应用研究提供一定的技术参考。

关键词: 500 kV 智能变电站; 程序化操作; 一键式操作模式; 实现条件; 控制策略; 运维管理

Abstract: With the continuous production of 500 kV smart substations and the promotion of unattended operating mode, the programmed operation brings a considerable effect to reduce human input and improve the efficiency of switching operation, but it also proposes a new topic on management. On this basis, taking the first 500 kV smart substation in Sichuan for example, the key points of the programmed operation are analyzed and discussed such as its concept, achievement conditions, control strategy and function modules and so on, and the thinking and practical advice are proposed as viewed from engineering, management, operation and maintenance, which provides a technical reference for the future research of such applications.

Key words: 500 kV smart substation; programmed operation; one - button operation mode; achievement condition; control strategy; operation and maintenance management

中图分类号: TM769 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2015) 01 - 0040 - 04

0 引 言

随着国家电网公司“三集五大”改革和 500 kV 变电站“无人值守”模式的快速推进, 使程序化操作逐步成为无人值守站安全运维的必然趋势。其最大优势在于提高倒闸操作的效率并在一定程度上减少人为因素导致的误操作事件, 有效提升变电运维自动化应用水平, 进而实现减员增效、简化操作流程、提高操作和管理效率的目标, 并能有效缩短突发事故下电网的恢复时间。以川内首座 500 kV 路平智能变电站为应用案例, 对程序化操作相关问题进行了分析和总结, 并对程序化操作在技术和管理等层面进行了深入探讨, 为今后程序化操作模式的实现提供必要的运维经验。

1 简 介

安规明确“倒闸操作可以通过就地操作、遥控操作、程序操作来完成”^[1]。其中, 程序化操作借助

变电站自动化系统对操作票和程序进行合理的描述和编码, 并结合站内完善的五防闭锁逻辑, 通过变电站自动化系统、测控装置、通信装置完成对变电站相关电气一次设备的自动控制, 从而实现所需的倒闸操作。其可划分为间隔层设备和跨间隔设备两大类型, 差异在于前者为单间隔的操作, 后者需间隔信息共同决策^[2]。其操作流程简图如图 1 所示。

从流程图中不难看出如下技术特点。

(1) 程序化操作的实质为顺控模式, 即以传统倒闸操作模式为基础, 将其进行合理的描述和编码, 结合传统倒闸规则定义出一系列的操作序列, 并将其分门别类, 为某一具体倒闸操作提供指令。以 220 kV 线路由“运行转冷备用”的操作为例, 其实施过程为“分线路开关→分线路侧隔离开关→分母线侧隔离开关”, 每一步操作都应包括操作前检查判断逻辑(防误闭锁逻辑)、操作内容、操作后确认条件(操作是否成功、位置及状态的确认)。

(2) 程序化操作执行过程与传统人工操作无区别, 差异仅在于执行元件由程序指令代替, 将传统人为操作序列进行集成和优化。以 500 kV 线路由“运

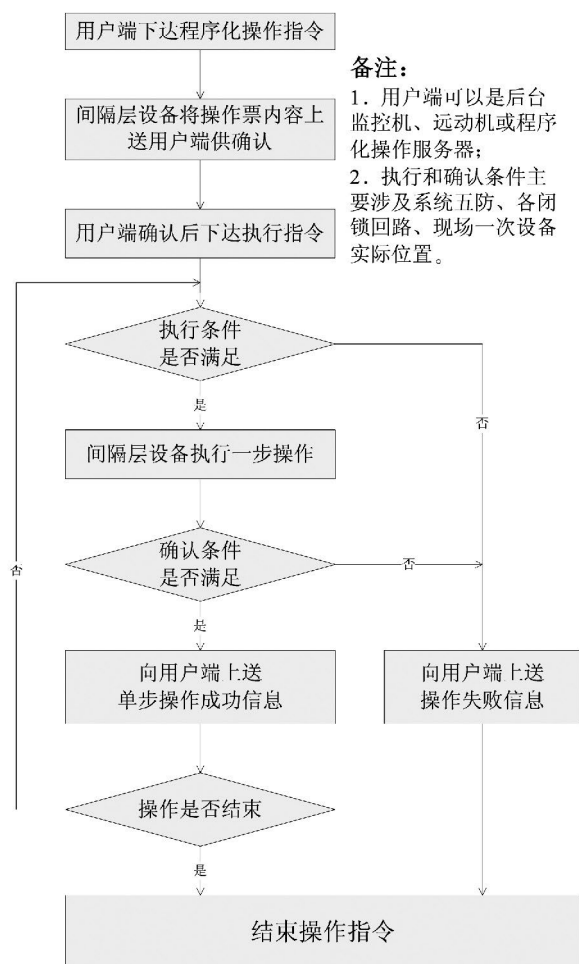


图1 程序化流程简图

行转检修”的操作为例,传统人为操作至少需要四人进行,需多步、多张操作票来完成设备从初始状态到最终状态的实现,而程序化操作则整合了传统方式的步骤,优化其操作方式来实现。

(3) 程序化操作是将既定好的操作序列通过站内保护、通信以及自动化系统来实现。即一次设备运行状态的改变所涉及的控制、监视、测量、操作等工作全部通过一个程序包来完成,将原本人为多步完成的操作简化为“一键式”操作模式。

2 实现条件

要实现“一键式”程序化操作,变电站的一、二次设备以及监控系统必须满足以下主要技术指标。

(1) 参与程序化操作的一次设备均应满足电动操作条件和高可靠性的要求:即断路器、隔离开关、接地刀闸需配备电动操作机构,且操作机构本身及附属设备应可靠。若一次设备存在固有的缺陷或不适用于电气指示一次设备状态,则对此类设备进行

程序化设计将会导致一次设备的损坏和电网的安全运行,这在运维管理中是绝对不允许的。比如一次设备辅助触点位置需与一次设备实际位置的严格对应且辅助接点必须可靠耐用;再如GIS设备中的隔离开关操作往往通过机械连杆来实现三相“分-合”操作,其机械连杆的质量以及“分-合”行程的合理也是其保证程序化操作正确性和操作成功率的关键因素。在此需重点指出的是接地刀闸,它在目前的GIS设备中配备有电动操作机构,而以往的传统接地刀闸仅有手动操作机构,故在对这类设备进行程序化设计时需将其进行相应的改造使其具备电动操作功能。

(2) 参与程序化操作的二次设备要求稳定、可靠,带有一定的容错功能,并能正确执行和反馈程序化操作的各项指令:即一方面二次设备能够按照程序化操作指令正确发出控制信号,另一方面能将执行过程中一次设备状态准确无误地得以反馈。比如将220 kV线路由“运行”转入“检修”,在执行开关分闸过程中二次设备既要接收并正确执行开关分闸指令,同时也应将开关的跳闸位置信号正确反馈给程序化控制系统以便于其决策;另外,程序化操作时能够自动识别一次设备的异常情况,并在异常情况下做出正确动作(提示告警或者终止程序)以避免误操作的发生。

(3) 变电站监控系统应能满足搭建程序化操作系统平台的要求^[4]:即具备搭载程序化操作系统平台,在此平台上可根据现场的一次设备或间隔来编制多套程序化操作票,并与站内微机五防系统构架相容以形成防误闭锁逻辑校验;同时,五防系统通过通信接口与监控系统进行通信,交换一次设备的实时位置状态信息,实现信息共享和设备状态参数的校验。比如线路接地刀闸的“分-合”操作时,程序化操作中能否执行其指令需与微机五防系统通信,若能通过其闭锁校验则可进行操作,否则将失败。

3 应用模式

程序化操作应用模式可归纳为:结合现场操作实际、站内五防系统和跨间隔联锁逻辑并采用站控层、间隔层或两者并用模式^[5](依赖于各站的程序化设计)来顺序执行和改变一次设备的运行工况,其目的在于实现“一键式”操作。

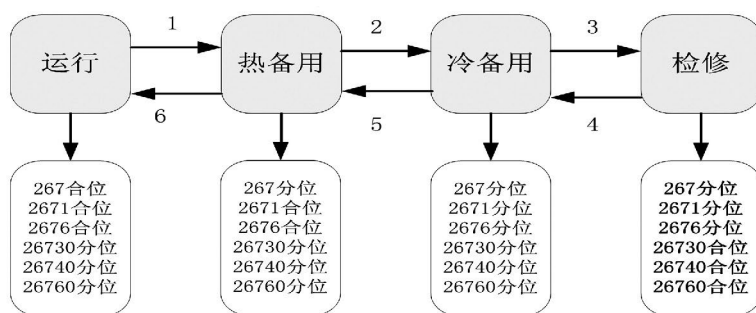


图 2 单间隔设备工况转换图

图 2 以 220 kV 线路间隔为例来详细阐述其运行工况的转换。从图中不难发现: 要实现一个电气间隔的程序化操作, 其控制方向仅两类: 即“运行→热备用→冷备用→检修”和“检修→冷备用→热备用→运行”。设计时应保证系统具备自动识别某电气间隔当前状态的功能, 且用户根据操作需要向上述 4 种状态中发一条程序化操作命令即可自动判别并实现。以某一电气间隔由“检修”转“热备用”的倒闸操作为例, 采用程序化操作时系统应自动识别其初始状态为“检修”, 然后系统接收“热备用”程序指令后, 程序化操作能够自动按“检修→冷备用→热备用”的顺序来完成。

对于线路、主变压器停电或倒母线等复杂操作而言, 其程序化操作都是基于上述单间隔设备状态的状态转换来实现其“一键式”操作的目标, 它将其程序化指令按照电压等级、电气间隔为单位分门别类集成和优化, 通过系统的自动识别待操作间隔设备的运行工况、用户的操作需要以及间隔间的电气闭锁来完成一系列程序指令。

4 应用案例

以 500 kV 路平智能变电站为例来分析程序化操作实现的关键点以及应具有的功能模块。由于站内的一次设备(500 kV 和 220 kV 部分)均采用户外 GIS 设备, 各类执行机构均具备电动操作功能且采用其各自辅助接点来反映其状态变位, 二次设备的保护、测控装置均采用“六统一”规范设计, 监控系统采用国电南瑞 NSS300 信息一体化平台, 可实现程序化系统的搭载。因此站内设备的硬件指标均能满足程序化操作的要求。

结合站内特点, 该站程序化操作设计应包括以下 5 类功能模块, 其结构简图如图 3 所示。

(1) 操作票编辑及生成模块。其实现原则是按

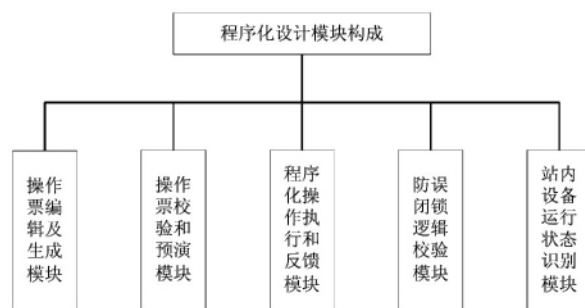


图 3 程序化设计功能简图

电网运行管理要求和常规操作流程来梳理、编制以及修改操作票使之形成适用于现场操作的指令, 并将生成的操作票下装到程序化操作的执行器中(间隔装置或站控层设备), 形成全站唯一的程序化操作票库。操作票的生成应根据站内的典型操作票人工编制, 具备可编辑和修改的功能。

(2) 操作票校验和预演模块。运维人员可随时提取程序化操作执行器中的操作票, 通过友善的人机界面进行核对和校验, 并通过图形显示系统进行预演, 校验程序化操作票步骤的正确性和合理性, 进而确保其准确性。

(3) 程序化操作执行和反馈模块^[9]。其功能在于接收用户的操作指令, 从程序化操作票库中查找并关联相应操作票, 若成功则校验核对, 得到确认命令后执行, 并将每步操作结果返回给监控后台。

(4) 防误闭锁逻辑编辑及校验模块。根据站内各一次设备防误闭锁逻辑并结合站内五防进行编制。在执行每一步前均应进行相关的闭锁逻辑验证, 通过后方可执行, 否则将暂停或终止当前操作并给用户告警提示^[9]。

(5) 设备运行状态的识别。通过站控层、间隔层的状态量的采集识别来确定一次设备的初始状态, 为程序化操作提供基准, 为系统选择合理的执行指令提供决策。

由于程序化操作的执行是自动进行, 因此采取

一定的措施来保证操作的正确性就显得很有必要。例如操作票的每一步执行前必须有严格的检查和校验条件;采用不同源的测控手段;具备提供执行结果信息以便人为干预;紧急或异常情况下自动中断并预警。

5 运维管理

由于程序化操作的实现受制于一、二次设备的功能及可靠,因此它的发展和应用与传统的人工及遥控操作相比较为滞后,因此为相应的运维管理工作带来了新的研究课题。为此,结合现场的实际总结并梳理出相应运维管理的思考和经验以供借鉴。

(1) 需完善程序化相关运维管理规定。现阶段电力系统内规程及规定对程序化操作涉及较少,且无较为全面的规范规定来指导此类工作。《国家电网公司电力安全工作规程(变电部分)》中仅提及“程序化操作”可作为操作的一种方式。为此,建议所辖公司有关部门专门制定《变电站程序化操作运维管理规定》、《程序化操作技术指导规范》等,进一步明确《安规》所涉及的3种操作方式的操作任务划分和典型操作票的维护要求,并针对今后的“无人值守”运维模式明确省调监控、站端后台以及运维操作队间的工作界面,并针对性提出正常操作和事故处理等一系列标准化程序操作原则,为程序化操作提供强有力的技术支撑。

(2) 明确程序化操作系统的运行维护界面。由于变电站程序化操作系统是变电站自动化系统的组成部分,其运行维护责任与变电站自动化系统一致,因此,建议其建设和维护由自动化专业或二次专业负责,程序化操作功能的验收和运维工作由变电运维专业负责。

(3) 加强一、二次设备的运维管理。定期进行设备的巡视,及时发现其存在隐患,确保程序化操作的正确执行。同时智能站的二次设备大幅度缩减了其外部硬压板数量并增加了相应的软压板,因此,若变电站已具备程序化操作的功能时还应加强对软压板的管理,定期核对其软压板的投退情况,是否符合正常运行工况,为程序化操作的执行成功率以及设备的正常运行提供保障。

(4) 加强运维班组异常处理的培训。对于已实现程序化操作的变电站,运维班组要定期进行程序

化操作的技术培训,并就可能出现的异常进行分析:比如发生事故或异常告警信号,设备出现分、合不到位或未满足操作条件等。针对不同的异常情况总结和提炼出符合站内特色的应对措施,通过诸如此类的培训来强化运维人员对程序化操作的运行和紧急情况下处理。

(5) 由于变电站因远景规划会不断进行扩建,新增间隔的程序化操作设计往往会涉及已有带电间隔,如何将扩建对已运行间隔的影响降低到最小是有待于探索的方向。这也是今后程序化操作实施过程中亟待突破的瓶颈。

6 结 语

程序化操作因其操作效率高、节约人力等优势将会成为未来站内操作的首选方式,但就目前的程序化操作而言,由于出于安全运行考虑,其在国内高电压等级变电站的应用还不广泛,尤其在智能站应用中。因此,需在今后设计、调试、运行及后期维护中不断积累经验,将其技术进行规范以满足现场需求并提高可靠性和安全性,逐步将程序化操作得以科学管理和安全发展。

参考文献

- [1] 国家电网公司. 国家电网公司电力安全工作规程(变电部分) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [2] 王文龙, 胡绍谦, 汤震宇. 程序化操作在变电站中实现的几个关键问题 [J]. 电力系统自动化, 2008, 30(22): 66-68.
- [3] 肖亦, 杨昕. 试析如何实现变电站程序化操作及其控制条件 [J]. 中国电力教育, 2012(33): 142-143.
- [4] 丁泉, 朱来强, 胡道徐, 等. 变电站程序化操作及远动装置执行 [J]. 电力自动化设备, 2007, 27(8): 119-121.
- [5] 郑博明, 吴奕, 杨洪, 等. 变电程序化操作的设计与实现 [J]. 电力系统自动化, 2006, 30(9): 105-107.
- [6] 陈志峰. 程序化操作变电站的防误措施 [J]. 江苏电机工程, 2007, 26(增刊): 83-84.

作者简介:

庄秋月(1986), 硕士、工程师、技师, 现从事电力系统变电运维管理工作;

李凡红(1984), 硕士、工程师、技师, 现从事电力系统继电保护等二次调试方面的工作。

(收稿日期: 2014-10-15)

换流站阀厅设备巡检监控系统研究

丁志林, 王超, 刘凡

(国网四川省电力公司, 四川 成都 610041)

摘要: 随着国内直流输电系统的不断建设和发展, 换流站阀厅设备巡检业务迫切需要通过实现由传统巡检模式向智能化巡检转变。通过研究智能轨道移动平台、红外热成像检测、可见光图像识别、实时数据库等技术, 关联阀厅防火报警系统, 研究适用于换流站阀厅的巡检监控系统, 对提升换流站的智能化巡检水平具有重要意义和参考价值。

关键词: 换流站; 阀厅; 巡检; 监控

Abstract: With the continuous construction and development of HVDC system in China, the inspection for the valve hall devices in convert station urgently needs to be changed from the traditional modes to the intelligent modes. The technologies of the intelligent orbital platform, the infrared thermal imaging detection, the visible image recognition and the real-time database are studied and associated with the fire alarm system in valve hall so as to study the suitable inspection and monitoring system for valve hall in convert station, which will have an important and reference value to enhance the intelligent level of inspection in convert station.

Key words: convert station; valve hall; inspection; monitoring

中图分类号: TM763 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)01-0044-03

0 引言

在高压直流输电系统中, 阀厅内换流阀等设备是交直流转换最核心的设备, 其异常、故障(如过热、短路、漏水、爆炸)将导致直流输电系统强迫停运, 甚至对跨区电网的运行带来灾难性后果。

目前, 换流站阀厅内设备日常巡视主要依靠人工巡检和工业电视远方监视两种方式。这些巡视、巡检结果易受运行人员主观因素影响等突出问题, 固定位置工业电视摄像头也存在很大的监控盲区, 很难满足巡视范围全方位覆盖、及时发现隐患的要求。从近几年发生的换流站阀塔着火事件可知, 依靠传统巡视方式越来越难以满足阀厅设备巡检实时性、准确性、全覆盖的要求。

调研了国内电力行业设备巡检系统的应用和研究情况, 变电站场地设备机器人巡检系统正在逐步推广应用, 而对换流站阀厅设备进行检测的室内智能化巡检监控系统的开发和应用还仍处于空白阶段^[1]。因此, 随着国内直流输电系统的不断建设和发展, 针对空间封闭、强电磁干扰环境下的阀厅设备, 迫切需要开展换流站阀厅智能巡检监控系统的

研究, 加快开发性能可靠、检测精确高的智能化巡检系统, 替代传统巡检模式, 实现阀厅设备巡检智能化。下面从阀厅设备智能化巡检的功能需求、硬件和软件研究与设计等方面论述, 对提升换流站的智能化巡检水平具有重要意义和参考价值。

1 主要研究内容及功能需求

换流站阀厅智能化巡检系统主要通过研究智能轨道移动平台技术、红外热成像检测技术、可见光图像模式识别技术、实时数据库技术等内容, 与已改造的阀厅防火报警系统(由报警改跳闸)信息数据相关联, 研制出一套适用于换流站阀厅的智能巡检监控系统, 替代人工巡检模式, 实现对阀厅设备进行远程巡检和监控。系统相关研究内容如下: (1) 适用于阀厅内强电磁环境下巡检监控系统前端数据采集装置; (2) 高效率、高定位精度的阀厅室内轨道移动平台; (3) 可见光、红外识别技术^[2]; (4) 后台监控系统软件设计。

巡检监控系统通过轨道移动平台控制智能巡检监控设备的所在位置, 然后通过遥控信号控制智能巡检监控设备的一些动作(如俯、仰、旋转等), 将阀

厅被检测设备的相关巡检和监控信息进行前端的数据采集,再将所采集的数据回传至智能巡检监控系统的后台进行储存、分析和显示,并生成相应的报告或告警信息,以供运检人员查阅。主要功能需求如下:(1)实时监控和检测功能:对阀厅内设备进行 24 小时不间断的实时高清视频监控、红外检测;(2)自动巡航和智能识别功能:实现阀厅设备巡视的本地及远方操作,并可对巡检内容和要求进行预设; (3)与已改造的阀厅防火报警系统(由报警改跳闸)信息数据(烟雾、紫外光信号)相关联^[6,4],实现迅速定位故障设备功能;(4)信息和数据分析及报警功能:通过智能专家系统对采集的信息和数据进行实时分析,及时告警,自动生成报表。

2 系统硬件研究

巡检监控系统主要硬件由前端数据采集装置、通信控制系统、数据存储系统等部分组成。

(1) 前端数据采集装置

前端数据采集装置由监测仪、轨道平台及其相关组件构成。其中,监测仪集可见光视频监测和红外检测于一体,其红外测温模块能对视场内任意像素点进行测温,并将测温数据进行压缩打包通过网络接口转换模块上传。

装置的轨道移动平台在结构工艺设计和运动关系方面需重点研究。受阀塔等设备布局限制,要实现设备全方位的检测功能,需要装置能够在垂直方向运动。传统轮式驱动或履带式驱动方式实现垂直方向运动时相对困难,故在阀厅巡检监控系统设计上采用轨道式设计。轨道垂直安装阀厅壁面上,轨道上有同步带和滑座,同步带带动滑座上下移动,滑座上安装辅控箱和相关检测组件,实现阀厅内设备的可见光和红外检测。轨道平台组成及外形如图 1 所示。

运动控制核心部分采用 DSP 数字信号处理器芯片,该芯片中主要负责水平和俯仰两个自由度上电机的运动控制以及与接口转换模块的通信。接口模块将接收到的网络接口指令解码后通过串行通信将运动控制指令发送至 DSP,在 DSP 中会校验上位机发送的控制指令数据的完整性,当确认信息无误时响应上位机的指令,通过光耦进行电平转换后,把运动控制信号传送给电机驱动模块,保证了电机能够准确的按照上位机的指令运动。在水平和俯仰两

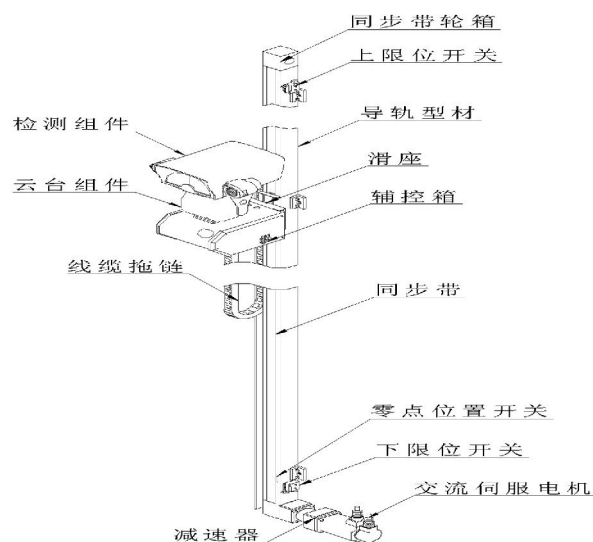


图 1 轨道平台外形

个方向上均安装了测角码盘,实时测量方位、俯仰是否转到相应角度位置。

此外,DSP 还收集来自阀厅防火报警系统(由报警改跳闸)的极早期烟雾探测传感器信号、阀厅紫外光探测信号,根据信号报警设备点位,把运动控制信号传送给电机驱动模块,实现迅速定位故障设备的功能,第一时间为值班监控人员提供现场视频信息。

(2) 通信控制系统

考虑到阀厅设备的运行安全,无法采用无线通信,采用拖链拖缆或者滑线加电力载波的通信方式。利用轨道供电的滑触线设备,在装置和滑触线供电端设置电力载波仪,滑触线供电端的电力载波仪接入站级以太网。通信网络设备实现数据存储转发功能,前端高清监控接入交换机,通过光缆和铜缆进行数据传输实现视频数据流的存储转发;核心交换机负责将所有接入交换机的数据集中向后台视频控制服务器进行传输。

(3) 数据存储系统

数据集中存储系统是巡检系统基础架构的重要组成部分,由服务器、光纤存储交换机、存储磁盘阵列共同组成。集中存储使用适应集中式的物理拓扑结构,满足大量数据的存储、共享和分析的要求,并结合内置的信息安全技术,全面保证信息数据的存储安全。

前端数字高清监控系统将实时视频流、图片、信息通过网络传输至视频管理服务器,视频管理服务器通过管理平台软件将视频流分解成前端显示流和

后端存储流。前端显示流通过前端 IP 网络将实时监控数据显示在监控人员的桌面显示器上,后端存储流通过光纤存储网络将数据写入存储磁盘阵列。

3 系统软件研究

巡检监控系统的软件平台采用分层的模块化结构,采用纯面向对象的编程语言 C#进行托管代码编程,将面向对象的内存实时数据库和大型商用关系型数据库相结合,通过多线程后台处理,避免数据阻塞,用户操作界面人性化,可靠性高,维护和扩展方便。软件系统的体系结构共分为 4 层,分别为数据层、功能层、逻辑层和表示层,如图 2 所示。

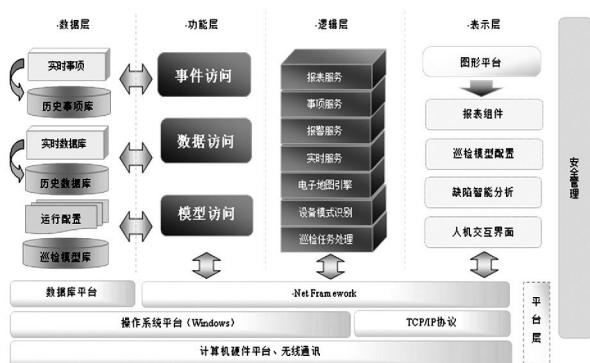


图 2 监控系统软件体系结构

后台监控系统基于 web 开放式的应用服务程序进行开发,程序安装于视频服务器上,支持运维工作人员利用远程终端对该巡检系统进行操作。系统可以实现用户管理、前端数据采集管理(如机器人位置控制)、信息数据分析及告警、自动生成巡检报告和状态检修报表等功能。后台监控系统应用功能模块如图 3 所示。

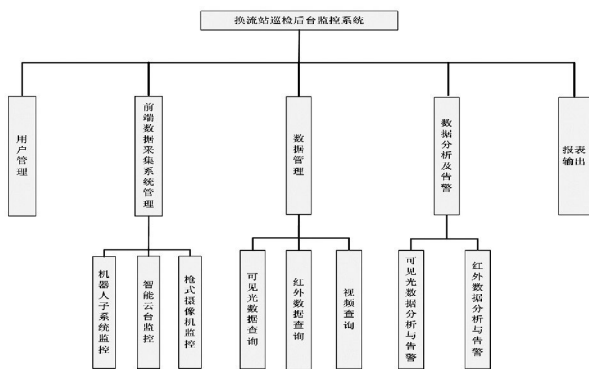


图 3 后台监控系统功能模块

(1) 前端数据采集管理: 主要用于协助运维人员前端数据采集系统管理,对采集回传的数据

据进行挖掘。

(2) 数据管理: 主要数据类型包括录放像、可见光图片、红外图片等信息,支持视频服务器录像码流在 NVR 中录像,录放像支持本地、远程管理;采用原型匹配模型识别技术,实现可见光图片的相关表计数据读取、识别及储存;采用热成像技术,实现相关设备的红外测温数据的(检测时间、设备类型、传输功率等信息)读取、识别及储存。

(3) 数据分析及告警: 数据分析及告警是智能巡检系统智能化体现的一个方面,辅助运检人员进行隐患、故障分析,对常见的故障类型能够自主监测和报警。数据分析及告警主要分为可见光、红外光、紫外光、烟雾分析及告警。通过红外测温技术对电气设备进行温度测量,采用绝对温度判断法、相对温差判断法、三相温差判断法、历史温度趋势判断、图像特征判断等故障分析方法,分析出对应电气设备是否存在潜在隐患。

(4) 报告(报表)自动生成: 智能巡检系统能够自动生成巡检报告和状态检修报表以及 SG186 系统需要填写的各类报表。

4 结 语

针对某 ± 500 kV 换流站阀厅实际布局情况,研究并设计了一套智能巡检系统,采用 3 套轨道式监测仪、2 套固定式监测仪,可实现整个阀厅设备监测范围的全覆盖,如图 4、图 5 所示,3 套轨道式热像仪主要监测 3 个主阀塔,2 套固定式热像仪辅助监测轨道式热像仪无法监测到的盲区。

通过本系统的研究和设计,将在一定程度上填补国内智能化巡检监控系统在换流站阀厅巡检领域的空白,对于换流站的阀厅实现智能化巡检具有很大的参考价值。

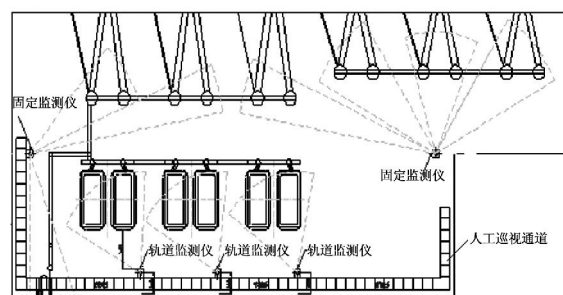


图 4 阀厅监测仪采集点水平面布置

(下转第 86 页)

表 3 铝合金芯铝绞线 JL/LHA1-465/210-42/19
载流量试验值结果

导线型号	工作温度 /℃			
	60	70	80	90
铝合金芯铝绞线 JL/LHA1-465/210-42/19	567	879	1 085	1 246

将表 2、表 3 中的数据作对比,如图 1 所示。

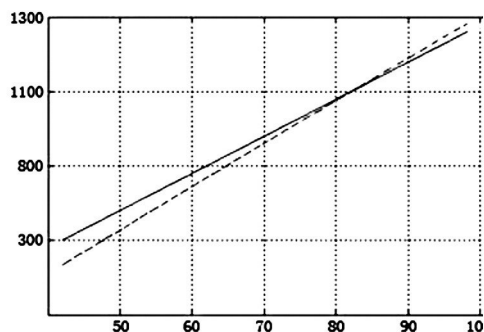


图 1 铝合金芯铝绞线 JL/LHA1-465/210-42/19
载流量计算值与试验值的对比

图 1 中虚线表示铝合金芯铝绞线 JL/LHA1-465/210-42/19 载流量的试验结果,实线表示该导线载流量的计算结果。可以看出,当工作温度高载流量大时,计算结果与试验结果很接近,误差较小,而工作温度较低载流量小时,计算结果与试验结果偏差增大。产生此现象的原因是由于 Morgan 公式不是纯线性公式,而在计算过程中为了简化计算,使相应型号的铝合金芯铝绞线载流量和钢芯铝绞线载流量关系直观明了,利用了线性拟合,因此舍去的非线性部分造成了误差出现。该舍去部分在载流量大时所占比很小,误差不明显,但是随着载流量的减小,误差逐渐增大;但是通过上述结论可知,利用载流量简化计算方法造成的误差最大仅为 2.6%,可以满足工程需要,而且大大缩短了计算时间。

(上接第 46 页)

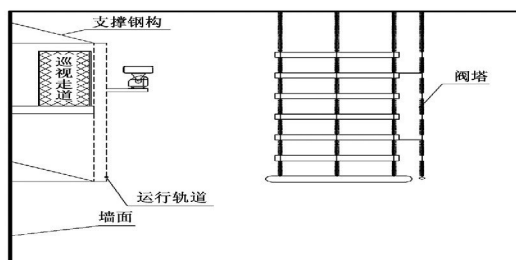


图 5 阀厅轨道式监测仪采集点立面布置

参考文献

- 王志滨, 张望平. 高压直流输电换流站晶闸管阀冷却系统阀厅温度控制探究 [J]. 2011 年中国电机工程学

4 结 论

利用理论公式推导了铝合金芯铝绞线载流量与钢芯铝绞线载流量的关系,通过钢芯铝绞线现有的载流量数据计算出铝合金芯铝绞线的载流量,并通过实际条件下的试验对该方法进行了验证,验证结果表明该简化方法数据可靠,计算简单,可以运用到工程实践中,其计算的快捷有效性保证了在输电线路安全可靠运行条件下最大限度地提高线路的输送容量。

参考文献

- 张瑞永, 赵新宇, 李明, 等. 输电线路新型节能导线的推广应用 [J]. 电力建设, 2012, 33(6): 89-92.
- 马国栋. 电线电缆载流量 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- 张辉, 韩学山, 王艳玲. 架空输电线路运行载流量分析 [J]. 电网技术, 2008, 32(14): 31-35.
- 陆鑫森, 曾奕, 盛戈峰, 等. 基于导线温度模型的线路动态容量误差分析 [J]. 华东电力, 2007, 35(12): 47-49.
- 韩晓燕, 黄新波, 赵小惠, 等. 输电线路摩尔根载流量简化公式的初步研究 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(5): 92-96.
- 韩晓燕, 张虹. 架空导线摩尔根载流量简化公式的初步研究 [J]. 河南电力, 2010, 1: 33-49.
- 韩芳, 徐青松, 侯炜, 等. 架空导线动态载流量计算方法的应用 [J]. 电力建设, 2008, 29(1): 39-43.
- 林玉章. 高压架空输电线路载流量和温度计算 [J]. 南方电网技术, 2012, 6(4): 23-27.

作者简介:

叶 芳 (1986), 助理工程师, 硕士研究生, 从事线路运行分析及故障研究。

(收稿日期: 2014-08-04)

会年会议文集, 2011.

- 王晓文, 赵宗贵, 汤磊. 一种新的红外与可见光图像融合评价方法 [J]. 系统工程与电子技术, 2012, 34(5): 871-875.
- 许峰, 于春雨, 徐放. 视频烟雾火灾探测技术研究趋势 [J]. 消防科学与技术, 2012, 31(11): 1185-1188.
- 律方成, 戴日俊, 金虎, 等. 特高压输变电系统绝缘子紫外放电数据管理及故障诊断系统设计 [J]. 高压技术, 2012, 38(2): 273-279.

作者简介:

丁志林 (1978), 工学学士, 工程师, 从事高压直流输电系统工程与研究;

王 超 (1976), 工学硕士, 高级工程师, 从事电力系统自动化装备、高压直流输电系统工程与研究。

(收稿日期: 2014-11-17)

自适应 PI 控制的双馈变流器高电压穿越工况研究

韩永豪, 聂满仓

(许昌许继风电科技有限公司, 河南 许昌 461000)

摘 要: 针对电网高电压条件, 分析了双馈变流器的数学模型, 推导出电压骤升下双馈电机的定子磁链与转子电压分量。提出一种新型高电压穿越方案, 网侧变流器发出感性无功; 转子采用自适应 PI 控制器, 在电网电压正常时设置带宽较小的 PI 参数, 以获得较好的电能质量, 在故障时刻设置带宽较大的 PI 参数, 以获得较快的动态响应。仿真研究与样机测试均表明, 所提方案具有较好的动态效果, 能够实现高电压穿越功能。

关键词: 变流器; 双馈变流器; 高电压穿越; 自适应

Abstract: For high voltage conditions of power grid, the mathematical model of doubly-fed converter is analyzed, and the stator flux component and the rotor voltage are derived. A novel high voltage ride-through control strategy is proposed, that is, the grid-side converter produces reactive power and the rotor-side converter uses adaptive PI controller. When the grid voltage is normal, the smaller bandwidth PI is used to obtain a better power quality. When the grid voltage is high, the larger bandwidth PI is used to obtain a fast dynamic response. Simulation and prototype test show that the proposed scheme has good dynamic effect and can achieve the high voltage ride-through function.

Key words: converter; doubly-fed converter; high voltage ride-through; adaptive

中图分类号: TM761 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2015)01-0047-04

0 引 言

目前, 风电装机容量居于世界第一, 但由于风电场多采用集中式大规模分布, 其发电效率低、电能质量差容易引起电网波动。例如, 对普遍存在低电压穿越(low voltage ride-through, LVRT) 现象, 风电场常采用投入 FC、SVC、SVG 等无功补偿装置, 但现有的无功补偿装置控制精度较差会引起无功过剩, 导致电压恢复时产生过电压现象。

针对高电压穿越技术(high voltage ride-through, HVRT), 国外已有完整的标准, 如澳大利亚 AEM、加拿大 AESO、爱尔兰 EIRGRID、丹麦 Energinet.dk。它们在低电压穿越、高电压穿越等方面都有详细的标准规范和技术要求^[1]。

国内并没有关于 HVRT 的国家统一标准, 如 GB/T 19963-2011《风电场接入电力系统技术规定》只有低电压穿越(LVRT) 的相关标准, 没有 HVRT 的具体标准。国内的冀北电科院提出了一些 HVRT 标准, 并在 2013 年 1 月, 针对金风科技做了首次的 HVRT 测试工作, 但只是个案测试, 不能成为行业标准。

对双馈变流器, HVRT 技术集中在两种方向: 一是改进硬件方案, 通过转子侧增加主动式 Crowbar、直流侧增加 DC Chopper, 来实现对过压时的能量泄放^[2]; 二是通过改进软件算法, 对网侧变流器进行吸收过剩无功控制, 对机侧变流器进行控制参数优化。文献^[3]提出了机侧虚拟阻抗的控制方案, 可加速转子直流量衰减, 但文献^[4]指出虚拟阻抗方案效果有限, 难以抑制转子侧的过流。目前, HVRT 下转子侧交直流分量的振荡抑制仍是难题。

于是提出一种新型的 HVRT 方案: 1) 在网侧发出感性无功, 保持直流母线电压的稳定; 2) 在机侧设计自适应 PI 控制器动态调节 PI 参数, 加快因定子磁链突变产生的转子交流分量衰减; 3) 硬件上采用主动式 Crowbar、直流 Chopper, 来实现对过压时的能量泄放。

Matlab 仿真验证了所提方案的有效性, 为实际产品的应用提供了参考依据。

1 双馈变流器的高电压穿越模型

1.1 双馈变流器网侧 HVRT 模型

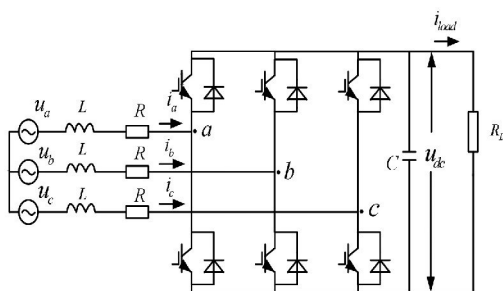


图1 网侧变流器的等效电路图

将同步旋转坐标系的 d 轴定向于电网电压矢量 u_g 的方向上, u_m 为电网电压的幅值, 电网电压的 $d-q$ 分量为

$$\begin{cases} u_{gd} = u_m \\ u_{gq} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

输入电流满足

$$\begin{cases} L \frac{di_{ds}}{dt} = -Ri_{ds} + \omega_g Li_{qs} + u_m - u_{ds} \\ L \frac{di_{qs}}{dt} = -Ri_{qs} - \omega_g Li_{ds} - u_{qs} \end{cases} \quad (2)$$

式中, u_{ds} 、 u_{qs} 为整流器交流侧电压的 $d-q$ 轴分量; i_{ds} 、 i_{qs} 为电流^[5-7]。

上式表明 $d-q$ 轴电流除受控制量 u_{ds} 、 u_{qs} 的制约外, 还受交叉耦合项 $\omega_g Li_{qs}$ 、 $\omega_g Li_{ds}$ 和电网电压的影响。

采用电压空间矢量 SVPWM 调制理论, 调制比 m 满足

$$m = \sqrt{u_{ds}^2 + u_{qs}^2} / u_{dc} \leq 1/2 \quad (3)$$

当系统进入稳态时, $L \frac{di_{ds}}{dt} = 0$, $L \frac{di_{qs}}{dt} = 0$, 并忽略进线电阻 R_g 上的压降, 则由式(2)、式(3)可得

$$u_{dc} \geq 2 \sqrt{(u_m + \omega_g Li_{qs})^2 + (-\omega_g Li_{ds})^2} \quad (4)$$

式(4)给出了网侧变流器进入稳态后直流母线电压、电网相电压峰值、进线电感以及负载电流间的关系。

HVRT 期间, u_m 升高, 为保持直流母线电压 u_{dc} 的稳定控制, 可利用进线电抗进行分压, 即网侧变流器输出一定的感性无功电流 I_{qs} 。

根据式(4)可得出网侧变流器正常工作时, 其无功电流最小值、电网相电压峰值、有功电流间的关系为

$$I_{dsmin} = \frac{1}{\omega_g L} [\sqrt{u_{dc}^2/4 - (-\omega_g Li_{ds})^2} - u_m] \quad (5)$$

1.2 双馈变流器机侧 HVRT 模型

采用定子磁链定向矢量控制技术, 对双馈发电机的模型进行分析。由于兆瓦级发电机的定转子电阻很小, 为简化分析忽略其定转子电阻的影响。

在电网电压正常时, 定子磁链 ψ_s 恒定, 忽略定子电阻, 稳态定子磁链矢量可表述为

$$V_{sdq} = j\omega_s \psi_{sdq} \quad (6)$$

忽略转子电阻项, 稳态时双馈发电机的反电动势与转子滑差 ω_{slip} 成正比。

$$E_{dq} = j\omega_{slip} \frac{L_m}{L_s} \psi_{sdq} \quad (7)$$

在电网电压发生过电压骤升瞬间, 定子磁链不会像电网电压一样突变并产生直流分量。该直流分量在 $d-q$ 同步旋转坐标系下变为交流扰动项, 并以定子磁链时间常数衰减。

电网突变前后正序同步旋转坐标系下的定子磁链方程为

$$\psi_{sdq}(t) = \begin{cases} \psi_{sdq0} = \frac{V_{sdq0}}{j\omega_s} & t < t_0 \\ \psi_{sdq2} + (\psi_{sdq0} - \psi_{sdq2}) e^{-\sigma t} e^{-j\omega_s t} & t > t_0 \end{cases} \quad (8)$$

式中, ψ_{sdq0} 、 V_{sdq0} 分别为电压骤升前的定子磁链与定子电压; ψ_{sdq2} 、 V_{sdq2} 为电压突变稳态后的定子磁链与定子电压; σ 为定子磁链时间常数。

忽略定子电阻项, 转子电流环中反电动势可表述如式(9)。

$$E_{dq}(t) = \frac{L_m}{L_s} [\omega_{slip} \psi_{sdq0} - j\omega_{slip} (\psi_{sdq0} - \psi_{sdq2}) \varepsilon(t) - j\omega_r (\psi_{sdq0} - \psi_{sdq2}) e^{-\sigma t} e^{-j\omega_s t} \varepsilon(t)] \quad (9)$$

电网电压突变后, 反电动势分量由三项组成。

1) 第一项对应的是电网电压稳态情况的定子磁链, 其幅值很小。

2) 第二、三项是在电网电压突变下产生的, 其中第三项在转子 $d-q$ 同步旋转坐标系中为振荡衰减项, 由于电网电压突变下反电动势的幅值很大, 其感应的转子电流、电压的幅值也较大。

通常情况下直流项的衰减较快。若定子磁链时间常数较小, 振荡项衰减较慢, 转子电流动态性能较差。

2 双馈变流器的高电压穿越方案

为高电压穿越, 采用图2的硬件方案, 其中转子

侧采用 Crowbar, 直流侧采用 Chopper。

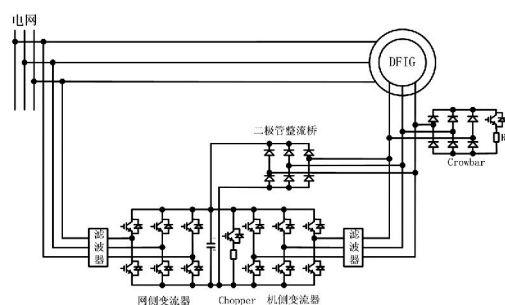


图 2 双馈变频器的电路图

2.1 双馈变流器网侧 HVRT 方案

由公式 (5) 可得无功电流的最小值为

$$I_{q\min} = \frac{1}{\omega_g L} [\sqrt{u_{dc}^2/4 - (-\omega_g L I_{ds})^2} - u_m]$$

考虑动态过程 I_{ds} 的突变, 无功电流应至少为

$$I_{qs}^* = \frac{1}{\omega_g L} [u_{dc}/2 - u_m] \quad (10)$$

为完成较大的感性无功出力, 在 1.15 p. u. 高压时, 统一按网侧基准电流 0.5 p. u. 发出感性无功。

2.2 双馈变流器机侧 HVRT 方案

以下设计自适应 PI 调节器^[8,9], 在转子电流交流分量振荡较大的情况下, 增大 PI 参数, 在电压恢复正常后恢复 PI 参数。

当电网电压稳定时, 转子电压与电流的关系为

$$\begin{cases} u_{dr} = R_r i_{dr} + L_r \frac{di_{dr}}{dt} \\ u_{qr} = R_r i_{qr} + L_r \frac{di_{qr}}{dt} \end{cases} \quad (11)$$

其中, u_{dr} 、 u_{qr} 为转子电压电流; R_r 、 L_r 为等效电阻电感。

$$\text{传递函数为 } G(s) = \frac{1}{R_r + L_r s}$$

由公式 (9) 可见, 当电网骤升故障过程中, u_{dr} 、 u_{qr} 中含有转子交流振荡项, 其频率为定子电压在转子 $d-q$ 同步坐标系下的频率, 即频率为 $f_{r1} = 50 \pm f_{ri}$ 。

其中, f_{r1} 为转子交流振荡电流频率, f_{ri} 为转子电流基波频率。

考虑了转子交流振荡电流的转子电压与电流的公式为

$$\begin{cases} u_{dr} = R_r i_{dr} + L_r \frac{di_{dr}}{dt} + f(i_{dr1}) \\ u_{qr} = R_r i_{qr} + L_r \frac{di_{qr}}{dt} + f(i_{qr1}) \end{cases} \quad (12)$$

其中, $f(i_{dr1})$ 、 $f(i_{qr1})$ 作为交流扰动项, 扰动项与转子电流的传递函数为

$$G(s) = \frac{1}{1 + f(\sigma)s} \quad (13)$$

考虑 i_{dr1} 、 i_{qr1} 为频率为 $50 \pm f_{ri}$ 的交流分量, 故可通过动态调节 PI 的积分增益使其截止频率高于 $f_g \pm f_{ri}$, 达到快速衰减的目的。

具体实现过程是, 动态监测电网电压: ①当电网电压正常时, 设定带宽小于 PI 参数 f_{ri} 的积分项, 以获得电能质量较好的转子电流。②当电网电压骤升时, 设定带宽小于 $f_g \pm f_{ri}$ 的 PI 参数, 以获得较快的动态穿越效果。

3 仿真分析

3.1 仿真参数

双馈变流器系统参数如下。

电网线电压 690 kV (RMS), 频率 50 Hz, 适用于额定功率 2 MW 的双馈电机。

网侧变流器 LCL 滤波器, $L_g = 0.4$ mH, $L_{con} = 0.2$ mH, $C = 60$ μ F。直流母线电容 $C_1 = 12$ mF, U_{dc} 电压指令 $U_{dc}^* = 1100$ V。电流标么基准值 $I_e = 310$ A (RMS)。开关频率 2500 Hz。

转子进线电抗 0.06 mH, 电流标么基准值 $I_e = 650$ A (RMS)。开关频率 2500 Hz。

3.2 仿真分析结果

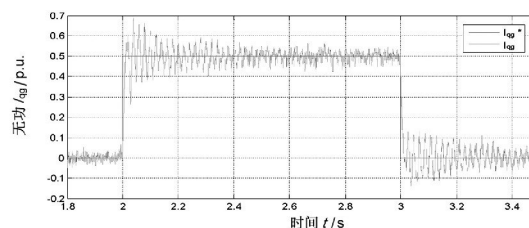


图 3 网侧无功指令与反馈分量

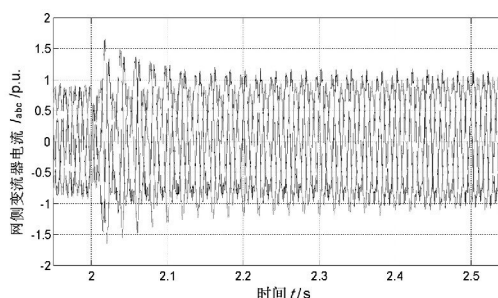


图 4 网侧三相电流波形

图 3、图 4 显示, 2~3 s, 电压处于 1.15 p. u 高

压时,网侧变流器输出0.5 p. u. 的无功电流分量,网侧变流器的交流分量显著上升,此时需要放大网侧过流保护值。

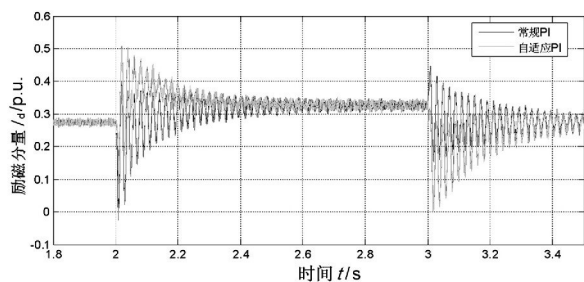


图5 常规PI与自适应PI对比(机侧励磁电流分量)

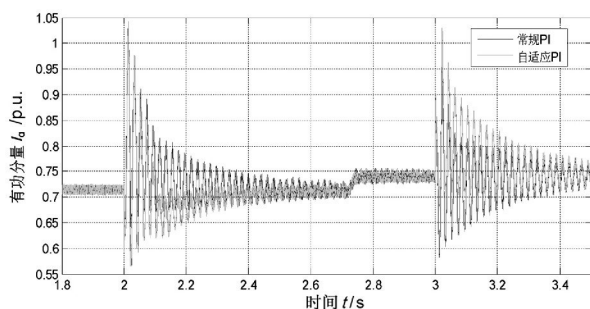


图6 常规PI与自适应PI对比(机侧有功电流分量)

图5、图6显示,采用常规PI,转子电流 $d-q$ 分量在过电压穿越过程中,出现交流振荡电流,其频率为70 Hz。采用自适应PI控制器,明显加快了交流振荡项的衰减时间,并且振荡幅值大幅减小,说明所设计的自适应PI控制器效果较佳。

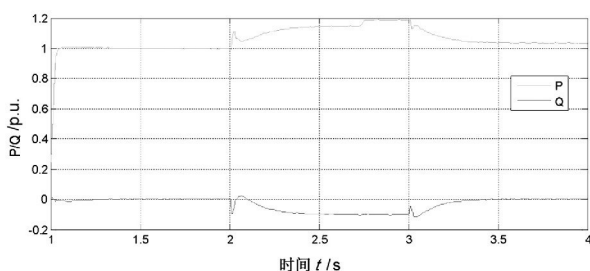


图7 机组总功率波形

图7中,2~3 s发生1.15 p. u. 过电压,由于网侧输出了感性无功电流,机组总无功出现-0.12 p. u. 的感性无功。由于转子有功电流保持稳定,机组总有功达到1.2 p. u. 左右,这对变流器的硬件是一种考验。

4 结 论

针对风场电网高电压的恶劣工况,对双馈变流器的高电压穿越技术做了详细研究。

通过分析HVRT暂态过程,提出一种新型高电

压穿越方案,网侧变流器发出感性无功;转子采用自适应PI控制器,在电网电压正常时设置带宽较小的PI参数,以获得较好的电能质量,在故障时刻设置带宽较大的PI参数,以获得较快的动态响应。

通过仿真分析,所提方案完全能够实现1.15 p. u. 过电压工况下的高电压穿越功能,显示了良好的动态响应效果。

参考文献

- [1] 刘雪菁,朱丹,宋飞,等. 风电机组高电压穿越技术研究[J]. 可再生能源,2013,31(11):34-38.
- [2] 徐海亮,章玮,陈建生,等. 考虑动态无功支持的双馈风电机组高电压穿越控制策略[J]. 中国电机工程学报,2013,33(36):112-119.
- [3] 谢震,张兴,杨淑英,等. 基于虚拟阻抗的双馈风力发电机高电压穿越控制策略[J]. 中国电机工程学报,2012,32(27):16-23.
- [4] 曲庭余. 双馈风力发电机高电压穿越技术研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2012.
- [5] 张崇巍,张兴. PWM整流器及其控制[M]. 北京:机械工业出版社,2003.
- [6] Abeyasekera T, Johnson C M, Atkinson D J, et al. Suppression of Line Voltage Related Distortion in Current Controlled Grid Connected Inverters[J]. Power Electronics, IEEE Transactions on Power Delivery,2005,20(6):1393-1401.
- [7] Yazdani A, Iravani R A. Generalized State-space Averaged Model of the Three-level NPC Converter for Systematic DC-voltage-balancer and Current-controller Design[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2005,20(2):1105-1114.
- [8] Luo An, Shuai Zhikang, Zhu Wenji, et al. Development of Hybrid Active Power Filter Based on the Adaptive Fuzzy Dividing Frequency-Control Method[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2009,24(1):424-432.
- [9] 陈新海. 自适应控制及应用[M]. 西安:西北工业大学出版社,2003.

作者简介:

韩永豪(1987),本科,工程师,研究方向为大功率变流器技术;

聂满仓(1985),硕士,工程师,研究方向为大功率变流器技术。

(收稿日期:2014-09-17)

考虑无功功率协调控制的优化低频减载

郭健

(国网攀枝花供电公司, 四川 攀枝花 617000)

摘要: 针对一个有较大无功功率剩余的受端孤立电网, 分析在低频减载切除有功负荷时, 发电机进相运行、电容器投切等无功控制手段对受端孤网低频减载的影响, 提出在低频减载过程中使发电机适度进相运行的同时控制电容器投切, 使用按电压切除电容器、按频率投入电容器的控制策略, 配合低频减载使系统频率在满足要求的情况下尽快恢复稳定。仿真结果表明, 对无功功率的适当控制能够有效提高孤立电网低频减载的有效性, 更有利于维持系统频率稳定和孤立电网的安全稳定运行。

关键词: 低频减载; 进相运行; 协调控制; 受端孤立电网; 频率稳定

Abstract: For an isolated receiving - end power grid with large surplus of reactive power, the influences of reactive power control methods, such as the leading phase operation of generator and the switching of capacitor, on under frequency load shedding in isolated receiving - end power grid are analyzed when under frequency load shedding removes active power. It is proposed that during under frequency load shedding, the switching of capacitor should be controlled while the leading phase operation of generator is moderate, and the control strategies in which the capacitor is removed according to voltage and the capacitor is put into operation according to frequency are used to cooperate with under frequency load shedding so that the system frequency can be resumed stable situation as soon as possible when it meets the requirements. The simulation results show that the proper control of reactive power can effectively improve the effectiveness of under frequency load shedding in isolated power grid and it is more useful to maintain the stability of system frequency and the safe and stable operation of isolated power grid.

Key words: under frequency load shedding; leading phase operation; coordination control; isolated receiving - end power grid; frequency stability

中图分类号: TM714 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2015) 01 - 0051 - 04

电力系统频率稳定性是指电力系统受到严重扰动造成出力和负荷出现较大的不平衡时, 维持系统频率在可接受范围内的能力^[1]。对于小系统或孤网而言, 频率的稳定尤为重要^[2]。大电网通过联络线远距离外送大量功率, 一旦联络线发生故障而解列, 形成的受端孤网由于大功率缺额就会使频率严重降低, 甚至导致频率崩溃, 严重危害电力系统的安全运行。而低频减载作为电力系统第三道防线^[3], 是抑制频率下降、维持频率稳定的有效方法。

与大系统、大区域电网相比, 孤立电网有其自身的特点: ①系统中机组和负荷相对集中, 便于发配电的集中统一管理, 为在全局层次上的优化控制提供了现实基础。②系统的发电功率、机组投退可以实时测量, 通过记录扰动发生前各机组出力或联络线功率等数据, 可以实时识别出当前的功率缺额。③孤立电网一般是由地区电网与大电网发生解列故障

产生、满足异常情况下的负荷变化规律: 负荷变化的幅值大; 负荷的变化率大, 整个过程在瞬间完成; 负荷的变化是单方向, 不会自行改变方向^[4-7]。

目前的低频减载方案主要是采用按轮次逐次逼近的减载方式, 文献^[8]在计算负荷减载量时, 往往只将负荷表示为频率的函数, 而忽略了负荷随电压的变化特性; 文献^[9]根据母线电压的频率变化量或频率变化率来分级启动切除定量负荷; 计算确定的负荷减载量也以有功功率为主, 较少考虑无功功率^[7-11]。这种方案会对有较大无功缺额或无功剩余的孤立电网的低频减载造成很大影响, 容易出现过切、欠切等多方面的问题, 从而导致系统过电压, 有时甚至会导致电压崩溃事故。而随着电网的建设和发展, 超高压输电线路和电缆线路大量增加, 线间和线对地电容也相应增大, 系统重负荷时, 还会投入并联电容补偿, 当系统处于负荷低谷时, 就会造成无

功率大量过剩。因此,电容器投切是无功功率的一种重要控制手段,另外,发电机进相运行是利用系统现有设备的一种调压手段,它可以吸收系统过剩的无功功率,通过控制发电机适当进相运行和电容器投切可以优化低频减载。

1 所研究的受端孤立电网

此处所研究的是参考文献 [4] 中例子,是一个因区域解列而形成的孤立电网,其发电出力 2 218 MW,负荷 3 156 MW。解列之前,该区域输入 1 197 MW 有功功率,输出 1 008 Mvar 无功功率,如图 1 所示。区域的发电由两个电厂组成,一个电厂为 2 台 600 MW 火电机组,供给 1 200 MW 火电,满载运行于负荷极限。另一个电厂为 6 台 2 00 MW 水电机组,供给 1 018 MW 水电。水电厂共有约 180 MW 旋转备用。

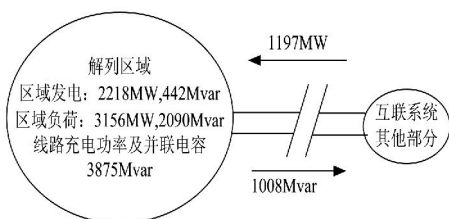


图 1 电网解列前的潮流情况

根据文献 [4] 中参数,在 Simulink 中搭建仿真模型,其中负荷模型采用 60% 的电动机负荷 + 40% 的恒定阻抗负荷。系统解列前处于稳态运行状态,1 s 时刻解列,形成无功功率过剩的受端孤立电网,孤立电网有较大有功功率缺额,旋转备用无法满足需要,必须采用低频减载才能维持系统稳定。

按照文献 [5] 中给出的低频减载方案,采用按频率分级减载,频率级差 0.2 Hz,每级切除延时 0.2 s,每级负荷切除量参见文献 [6]。考虑暂态过程不同节点的频率差异,若系统有 n 台发电机,则由广域测量系统可得第 i 台发电机出口母线的电压的角频率 ω_i ,定义系统角频率为其惯量中心(center of inertia, COI) 的等值角速度,即

$$\omega_{\text{COI}} = \frac{1}{T_{JT}} \sum_{i=1}^n T_{ji} \omega_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中, $T_{JT} = \sum_{i=1}^n T_{ji}$ 为第 i 台发电机的惯性时间常数。而系统惯性中心角频率与系统惯性中心频率的关系为 $\omega_{\text{COI}} = 2\pi f_{\text{COI}}$,定义系统频率为系统惯性中心角

频率相应的频率,即 $f_{\text{sys}} = f_{\text{COI}} = \omega_{\text{COI}} / 2\pi$ 。考虑到所形成的受端孤网无功功率过剩,为防止无功功率进一步过剩,在低频减载时只针对有功负荷进行切除,不采用同时等比例切除无功负荷的方案。若不考虑针对系统无功功率进行控制,则可得系统频率曲线如图 2 所示。

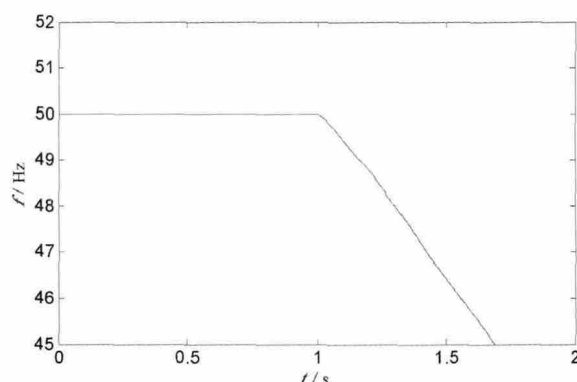


图 2 不考虑无功控制的系统频率曲线

由图 2 可得,不考虑系统无功功率控制时,解列区域与互联系统解列后孤立电网频率一直下降到系统不允许的范围,系统频率失去稳定,造成“频率崩溃”。整个低频减载过程中,某一个电动机负荷母线电压及其所消耗的电磁功率如图 3、图 4 所示。

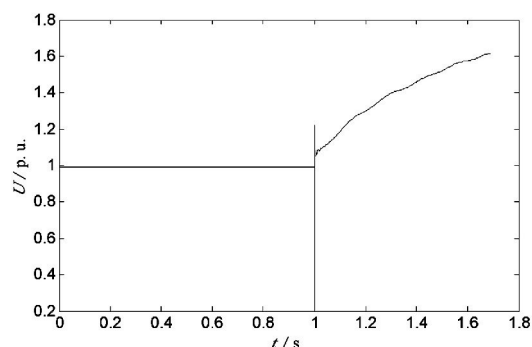


图 3 电动机负荷母线电压

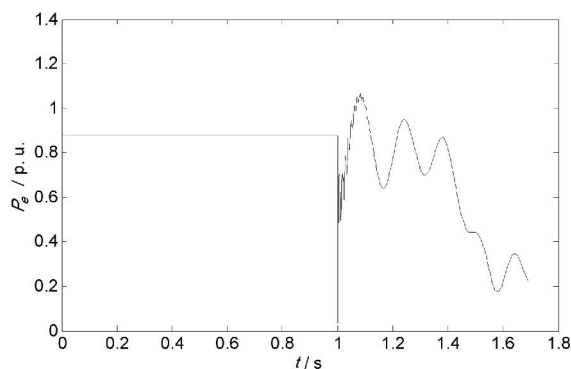


图 4 电动机消耗功率曲线

由图 3、图 4 可以看出,整个低频减载过程中,电动机负荷母线电压一直大于其额定电压,最大值达到额定电压的 1.6 倍。而正常运行时,电力系统

节点允许的最高运行电压一般不得超过其额定电压的1.1倍^[3]。电压升高导致电动机负荷在初始的减载过程中所消耗的电磁功率不仅没有下降,反而在振荡中超过正常运行时的功率,增大了负载,降低了系统低频减载的效果。同时,电压过高还会对系统设备以及负荷产生很大的不利影响,严重影响电力系统的安全运行。

2 无功功率协调控制的优化低频减载

2.1 发电机无功功率极限的限制对低频减载的影响

通过控制发电机励磁电流可使发电机进入进相运行状态。由文献[5]可知,限制发电机进相运行的因素主要有静态稳定极限限制和发电机定子端部温度的限制,所以发电机进相运行深度是有限的^[2]。这里为了说明发电机进相运行对低频减载的影响,暂不考虑限制发电机进相运行的因素,假设其进相运行时,最大能够吸收1.0 p.u.的无功功率。则通过调节励磁电流使火电厂、水电厂各一台机组进相运行,得到只考虑发电机进相运行时其中一台火电机组发出的无功功率曲线如图5所示,系统频率曲线如图6所示。

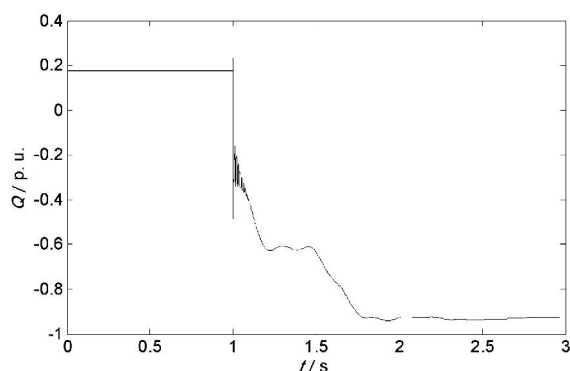


图5 发电机发出的无功功率曲线

由图5、图6可知,只考虑发电机进相运行时,即便不考虑进相运行的约束,能够吸收接近于1.0 p.u.的无功功率,解列区域系统频率还是无法恢复稳定,在与互联系统解列后孤立电网频率一直下降到系统不允许的范围之内直至频率崩溃,失去稳定。整个低频减载过程中,某一个电动机负荷母线电压、电动机所消耗的电磁功率如图7、图8所示。

由图7、图8可以看出,整个低频减载过程中,虽然有发电机进相运行吸收无功功率,但是电动机负荷母线电压仍然一直大于额定电压,最大值达到

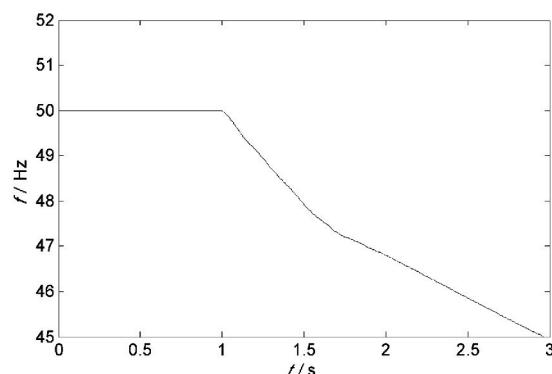


图6 只考虑发电机进相运行的系统频率曲线

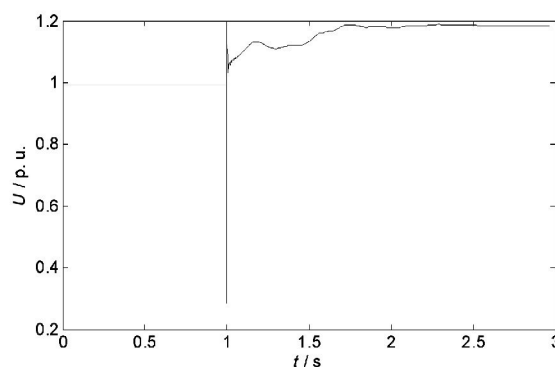


图7 电动机负荷母线电压

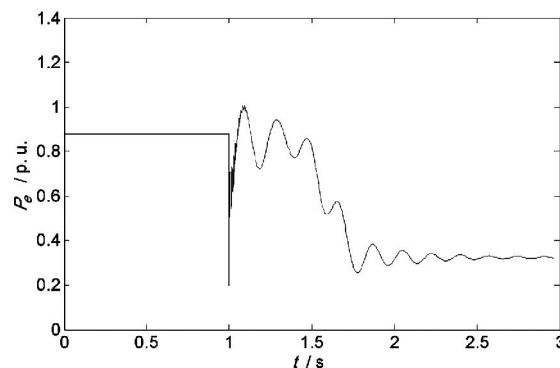


图8 电动机消耗的功率曲线

额定电压的1.2倍,比发电机不进相运行时要小,但是仍然超过正常运行时允许的最高电压,导致电动机负荷在初始的减载过程中所消耗的电磁功率不仅没有下降,反而在振荡中仍超过正常运行时的功率,增大了负载,降低了系统低频减载的效果。

2.2 电容器投切对低频减载的影响

由于仅靠发电机进相运行时,即便不考虑进相限制,也难以在有大量无功剩余时维持孤立电网频率稳定,而重负荷时的并联电容补偿是形成孤立电网后无功剩余的重要原因。因此在考虑发电机能够进相运行的基础上,考虑发电机进相运行的深度限制,限制进相运行时最大能够吸收的无功功率为0.35 p.u.^[3],进一步考虑电容器的投切对孤网频率稳定的影响。

由于无功过剩会产生过电压,因此这里引入并联电容器节点电压值作为并联电容器切除的启动条件。参照低频减载方案的设计,考虑电压变化的快速性,以及正常电压限制范围,以并联电容器电压的 1.05 p. u. 作为启动信号,分别延时 0.05 s、0.2 s、0.5 s 切除电容器。参考解列前的潮流情况,考虑发电机可以进相运行,但又只能浅度进相运行,设置总电容器切除量为 1 000 Mvar。前两级每级切除 300 Mvar,最后一级切除 400 Mvar。按照此方案得到的系统频率恢复曲线如图 9 所示。进相运行火电机组发电机无功功率曲线如图 10 所示。

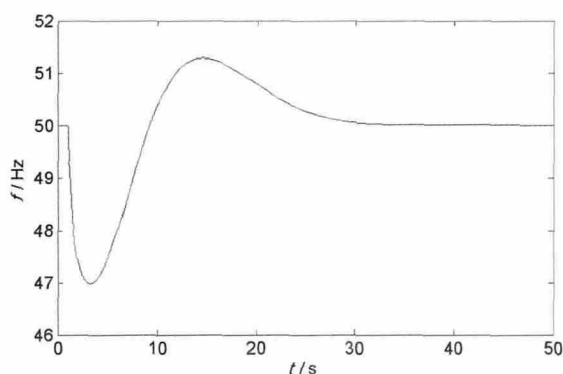


图 9 系统频率曲线

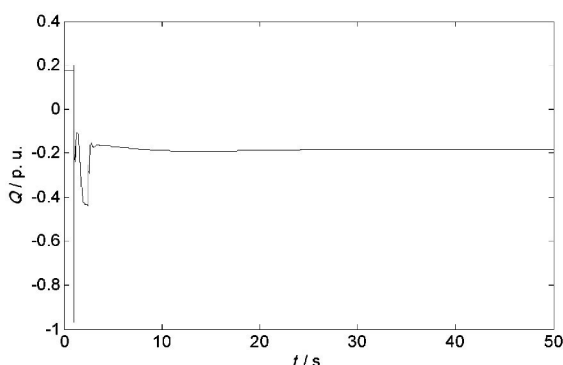


图 10 发电机无功功率曲线

其中某一个电动机负荷母线电压曲线和电动机消耗的电磁功率曲线如图 11、图 12 所示。

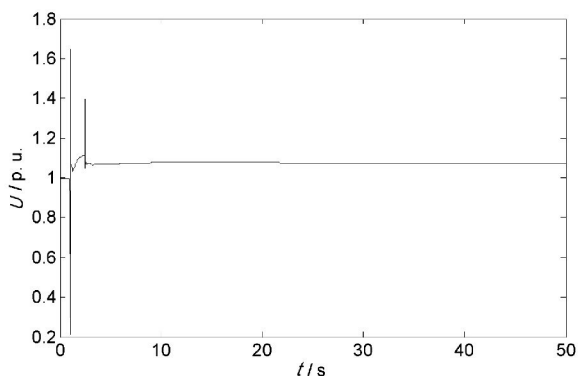


图 11 电动机负荷母线电压曲线

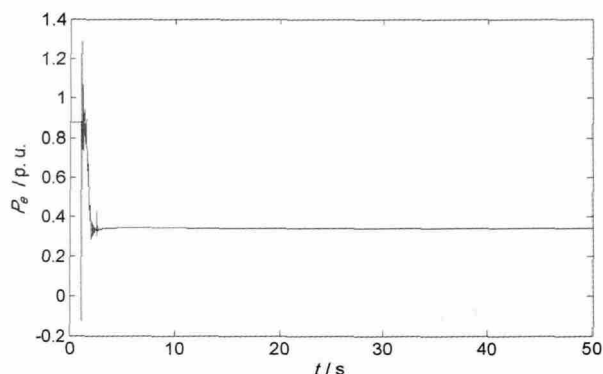


图 12 电动机消耗功率曲线

由图 9 ~ 图 12 可以看出,在满足发电机进相运行约束和切除部分电容器的情况下,低频减载可以维持系统频率稳定,并维持系统节点电压在允许范围之内。但同时由图 9 可以看出,系统频率恢复过程中,最高频率超过了 51 Hz,已经超出了低频减载过程中要求的频率范围^[3]。因此,考虑在系统频率恢复后期重新投入部分已切除的电容器,电容器的投入使负荷节点电压升高,负荷消耗功率增大,就可以降低低频减载过程的最高频率。同样参考低频减载的设计,以系统频率达到 50.5 Hz 作为启动频率,分别延时 0 s、0.5 s、2 s 投入电容器,考虑电容器切除时最大一级切除 400 Mvar,因此再投入时将第一级设定为 200 Mvar,后两级每级设定为 100 Mvar 投入。为防止电容器重新投入后节点电压长期超过 1.05 p. u.,会使电容器二次切除,检测系统频率变化率,在频率上升阶段闭锁电容器切除动作。得出系统频率曲线如图 13 所示,某一个电动机负荷母线电压如图 14 所示。

由图 13、图 14 可知,系统频率恢复曲线在无功控制下已能够完全满足要求。频率恢复后期投入电容器后,电动机负荷母线电压略有上升,但只有 1.1 p. u.,没有超出允许范围。

3 结 论

1) 在无功过剩孤立电网中,发电机进相运行和电容器投切是提高低频减载有效性的重要控制手段。

2) 电容器按电压切除、按频率投入,与低频减载合理配合能够获得较好的频率恢复特性。

3) 无功控制及其与低频减载配合的具体方案要根据实际电网具体制定。 (下转第 70 页)

- H. M. EL - Fouly. Optimum Microgrid Design for Enhancing Reliability and Supply Security [J]. IEEE Trans. on Smart Grid, 2013, 4(3): 1567 - 1575.
- [6] 池源. 含非线性及不平衡负荷的微电网控制策略研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [7] 周龙华, 舒杰, 张先勇, 等. 分布式能源微网电压质量的控制策略研究 [J]. 电网技术, 2012, 36(10): 17 - 22.
- [8] Blaabjerg Frede, Teodorescu Remus, Liserre Macro, et al. Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2006, 53(5): 1398 - 1409.
- [9] 张建华, 黄伟. 微电网运行控制与保护技术 [M]. 北

京: 中国电力出版社, 2012.

- [10] Phongsak Phakamach, Chumphol Akkaraphong. An Optimal Feedforward Integral Variable Structure Controller for the Electrohydraulic Position Servo Control Systems [J]. Tencon, 2004(4): 459 - 462.
- [11] 中国标准出版社. 电能质量标准汇编 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2013.

作者简介:

朱云梦(1983), 研究方向为电力系统稳定与分析、分布式发电;

陈莎莎(1983), 研究方向为分布式发电控制;

母晓莉(1984), 研究方向为电力系统稳定与分析、分布式发电。 (收稿日期: 2014-09-02)

(上接第54页)

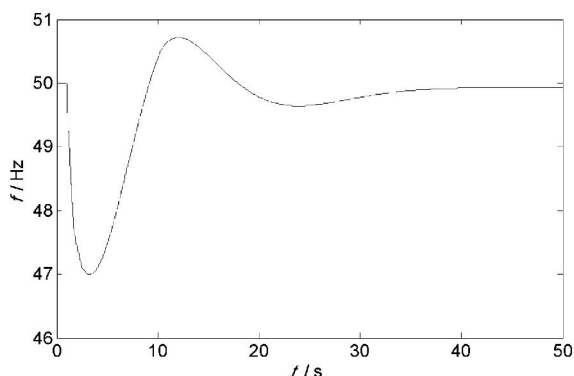


图13 系统频率恢复曲线

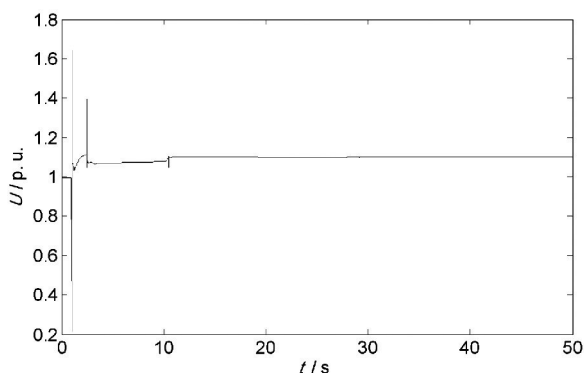


图14 电动机负荷母线电压

参考文献

- [1] IEEE/CIGRE Joint Task Force. On Stability Terms and Definitions Definition and Classification of Power System Stability [J]. IEEE Trans. PWRS, 2004, 19(2): 1387 - 1401.
- [2] Jonathan Horne, Damian Flynn and Tim Littler. Frequency Stability Issues for Islanded Power Systems [C]. IEEE PES Power System Conference and Exposition, 2004.
- [3] 袁季修. 防御大停电的广域保护和紧急控制 [M]. 北

- 京: 中国电力出版社, 2007: 141 - 175
- [4] P. Kundur 著, 周孝信、李兴源, 等译. 电力系统稳定和控制 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [5] Kottick D, Or O. Neural - networks for Predicting the Operation of an Under - frequency Load Shedding System [J]. IEEE Trans, on Power Systems, 1996, 11(3): 1350 - 1358.
- [6] Luan W. P, Irving M. R, Daniel J. S. Genetic Algorithm for Supply Restoration and Optimal Load Shedding in Power System Distribution Networks [J]. IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, 2002, 149(2): 145 - 151.
- [7] 王君, 王晓茹, 谢大鹏, 等. 孤岛系统的低频减载方案研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(3): 30 - 33.
- [8] 何恒靖, 解大, 常喜强, 等. 基于割集的电力系统低频减载同调分区算法 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(9): 12 - 17.
- [9] 秦明亮, 杨秀朝. 在频率紧急控制装置中扩充 df/dt 应用的探讨 [J]. 电网技术, 1998, 22(6): 39 - 41, 45.
- [10] 常喜强, 何恒靖, 解大. 计及频率差变化率的低频减载方案的研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(4): 12 - 17.
- [11] Concordia C, Fink L H, Poullikkas G. Load Shedding on an Isolated System [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(3): 1467 - 1472.
- [12] 严伟, 陈俊, 沈全荣. 大型隐极发电机进相运行的探讨 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(2): 94 - 97.
- [13] 王正风. 无功功率与电力系统运行 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 41 - 44.
- [14] 杨传箭. 电力系统运行 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1995: 26 - 36.
- [15] 鞠平, 代飞. 电力系统广域测量技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 102 - 109.
- (收稿日期: 2014-11-10)

风电外送对直流系统的影响

辛超山, 吕 盼

(国网新疆经济技术研究院, 新疆 乌鲁木齐 830047)

摘 要: 随着西北地区大规模能源基地的建成与 ± 800 kV 特高压直流输电系统的投运, 西北电网已形成了特高压直流输电与超高压交流输电共存运行的主网架结构, 特高压交直流系统的相互影响已成为新疆电网这种特殊电力系统研究中最关注的问题之一。针对大规模双馈风电场交直流外送系统, 构建了 3 种交直流运行方式的网络拓扑结构; 研究了 3 种情况, 即风电场风速变化、风电场故障、换流母线故障时送端系统对直流系统的影响。基于 PSCAD/EMTDC 软件, 搭建了仿真模型, 并进行了仿真分析, 得到了仿真实验数据和曲线; 由仿真结果得到以下结论: 风电场处于不同的风速类型时, 对火电所需容量需求不同; 不同的交直流输电运行方式下, 风电场故障对直流系统的影响程度不同, 换流站交流母线故障对直流系统影响差异不大。

关键词: 交直流混联系统; 大规模双馈风电场; 运行方式; 短路故障

Abstract: With the completion of large-scale energy base in northwest China and ± 800 kV UHVDC system being put into operation, the Northwest Power Grid has formed the main grid structure that HVDC transmission and HVAC transmission coexist in the operation. The interaction between AC system and DC system has become one of the most concerned issues in Xinjiang power grid. Aiming at AC-DC transmission of large-scale DFIG-based wind farms and based on PSCAD/EMTDC software, the network topology for three AC and DC operating modes is built. Through the simulation and analysis, the influence of the changes in wind speed, wind farm fault and AC bus fault of converter station on DC system is studied. It is obtained from the simulation results that, when the types of wind are different, the requirements of thermal power capacity are different. The impact degree of wind farm fault on DC system is different and the impact of AC bus fault of converter station on DC system is similar under different AC/DC transmission modes.

Key words: AC/DC hybrid system; large-scale DFIG-based wind farm; operating mode; short-circuit fault

中图分类号: TM721.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2015)01-0055-06

0 引 言

中国的发电能源主要分布在西北、东北等地区, 新疆与甘肃的风能资源充足, 在风力发电方面有很大的发展潜力, 而这些地区的用电负荷相对较低, 无法就地消纳大规模的风电。为了提高资源的利用, 根据国家规划, 在新疆、甘肃等地建立了数个大规模风电场, 总装机容量达到了 GW 级, 将这些大容量的风电远距离输送至电力负荷集中的东部地区^[1]。由于高压直流输电具有输送容量大、距离远、非同步联接等优势^[2], 高压直流输电技术在西电东送工程中占据了重要的地位。

目前, 关于双馈风电场的研究已经达到了成熟的阶段, 文献^[3]搭建了双馈风力发电机组的空气动力学模型、风力机模型、变频器模型, 但该模型由

于容量较小, 用于大规模风电场并网时较为复杂, 计算速度慢。文献^[4]针对双馈变速风电机, 根据双馈变速风电机控制特点, 在控制环节中加入了频率调节, 在系统频率变化时, 双馈风电机组通过吸收或者释放转子中的一部分动能来, 相应增加或者减少有功出力, 从而实现风电机组的频率控制。许多学者对直流系统的建模进行了研究, 文献^[5-8]对交直流系统搭建了仿真模型, 分析了交流系统与直流系统之间的相互作用。近年来大规模风电直流外送备受关注, 文献^[9]对风电的几种直流外送方案进行了比较, 得出了风火打捆并网后直流外送对系统电压及频率的稳定性影响较小。文献^[10-11]提出了大规模风电多端直流外送的方案, 给出了相应的控制策略, 并验证了方案的可行性。

针对含大规模双馈风电场的交流系统, 经不同

运行方式下的交直流输电系统,将送端电能输送至受端。给出了 3 种运行方式下的交直流输电系统,基于 PSCAD/EMTDC 软件,搭建大规模双馈风电场和交直流输电系统的仿真模型。从风电场风速变化、风电场故障、换流母线故障等方面,仿真分析不同运行方式下送端系统对直流系统的影响,从而为电力系统调度及稳定分析提供帮助。

1 所研究系统结构

以新疆电网为代表的送端系统已经投运了哈密至郑州的 ± 800 kV 直流输电,哈密至重庆的特高压直流输电也在规划中,在高压交流输电方面,已经完成了哈密至敦煌,哈密南至沙洲的 750 kV 交流输电。以新疆为送端的电网形成了如图 1 所示的交直流输电系统。

从图 1 中可以看出,以新疆为例的交直流送端系统将形成多端直流输电系统,即将送端电能输送至不同受端。交直流输电系统分为交直流并联运行与交直流非并联运行两种运行方式。根据多端直流系统并联与非并联运行方式的不同,构建分别如图 2 中的 (a)、(b)、(c) 所示 3 种运行方式。

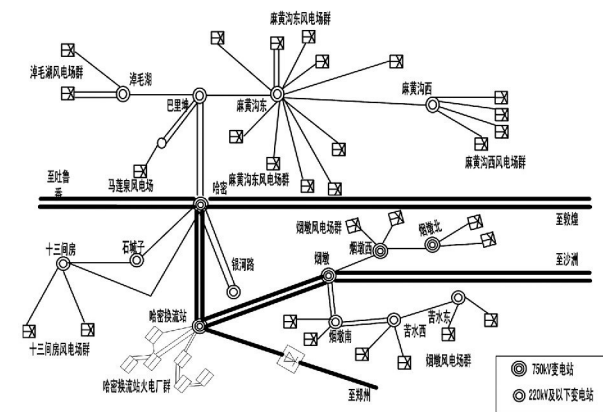
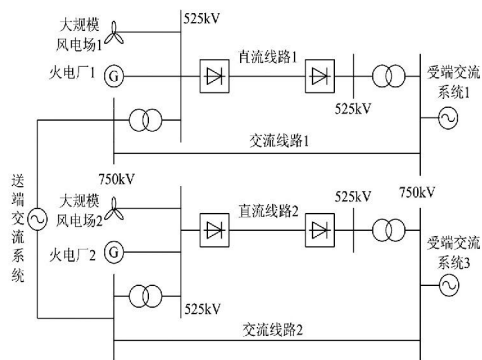
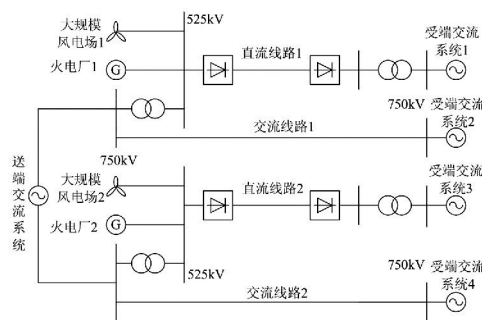


图 1 新疆哈密地区电网接线图

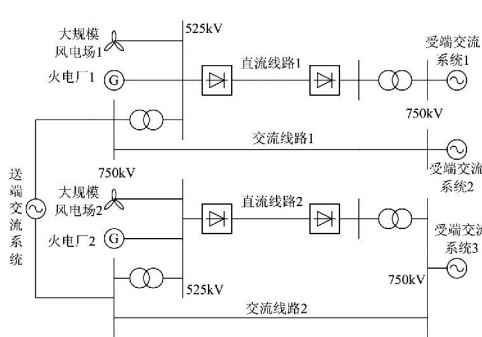
图 2 中,送端交流系统和受端交流系统均为 750 kV 电压等级下等值交流系统,将其等效为 750 kV 的交流电压源与阻抗的串联,阻抗值可通过 PSASP 软件的短路计算求得。将大规模双馈风电场等效为 1 台风机,使其输出响应与等值前相同。每 1 个火电厂的装机容量为 1 000 MW。直流输电系统采用单极运行方式,容量为 1 600 MW,直流线路采用 T 型等效电路。



(a) 方式 1



(a) 方式 2



(a) 方式 3

图 2 含大规模双馈风电场的交直流系统拓扑图

2 大规模双馈风电场建模

大规模风电场的风机数量达到了上百台,若在仿真软件中搭建每台风机的模型,会导致计算速度过慢,因此需要对大规模风电场进行等值,将其等效为 1 台风机,使其输出功率和电压与实际相差较小。单台双馈风力发电机组由风力机、双馈异步发电机、变流器、控制系统构成。其中,风力机与变频器的建模较为成熟^[1],这里重点对双馈异步发电机及控制系统进行建模。

2.1 双馈异步发电机模型

双馈异步发电机等效电路^[13]如图 3 所示。

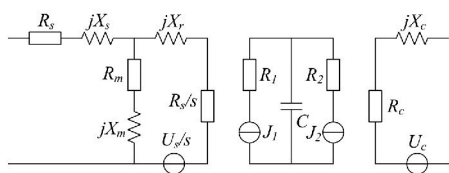


图 3 发电机等效电路

根据图 3, 在旋转坐标系下, 所建立的双馈发电机模型为

$$\begin{cases} u_{sd} = \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \omega_s \psi_{sq} + R_s i_{sd} \\ u_{sq} = \frac{d\psi_{sq}}{dt} - \omega_s \psi_{sd} + R_s i_{sq} \\ u_{rd} = \frac{d\psi_{rd}}{dt} - s\omega_s \psi_{rq} + R_r i_{rd} \\ u_{rq} = \frac{d\psi_{rq}}{dt} - s\omega_s \psi_{rd} + R_r i_{rq} \end{cases} \quad (1)$$

式中, 角标 s, r 分别为定子侧和转子侧; d, q 分别为 d 轴分量和 q 轴分量; ψ 代表磁链; i 代表电流; L_s, L_r 代表定、转子侧电感 (包含互感); L_m 定转子间的互感。

2.2 控制系统

双馈风力发电机组的控制系统主要目的是捕获最大的风能利用率, 使风电电能质量达到最佳状态。其主要的控制思想是矢量控制, 即通过补偿方式消除电压电流 d 轴和 q 轴分量之间的耦合, 实现有功无功的解耦控制。主要分为网侧变频器控制和转子侧变频器控制, 分别如图 4 和图 5 所示。

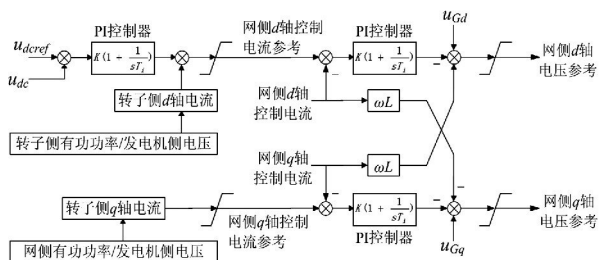


图 4 网侧控制框图

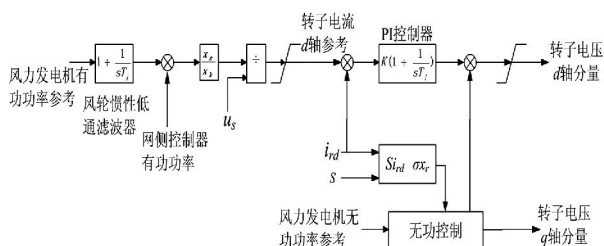


图 5 发电机侧控制框图

2.3 风电场建模

由于大规模风电场占地面积较大, 即使每台风机的型号及参数完全一致, 所处位置风速的差异也会导致每台风机输出功率不同。因此除了对风力发电机参数的等值, 还需对风速等值。大规模风电场模型结构如图 6 所示。

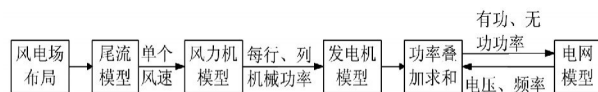


图 6 风电场模型结构

对风速的等值可简单表示为

$$\begin{cases} P_{Weq} = \sum P_{Wi} \\ P_{Wi} = f(v_i) \text{ 单台风机} \\ P_{Weq} = f(v_{eq}) \text{ 等值机} \end{cases} \quad (2)$$

因此可得等值后风速为

$$v_{eq} = f^{-1}(\sum P_{Wi}) \quad (3)$$

对风力发电机参数的等值采用常用的容量加权法^[4], 常用于同类型风电机组构成的风电场中, 其前提条件是风电场内所有风力发电机组通过出口变压器接于同一母线上。引入加权系数得

$$\delta_i = S_i / \sum_{i=1}^N S_i \quad (4)$$

式(2) ~ 式(4)中, 角标 i 为第 i 台风机的参数, S 为风机容量。利用容量加权法对风力发电机的主要参数等值得

$$\begin{cases} X_{meq} = \frac{1}{\sum \delta_i / X_{mi}} \\ R_{seq} = \frac{a_s}{a_s^2 + b_s^2}, X_{seq} = \frac{b_s}{a_s^2 + b_s^2} \\ a_s = \sum_{i=1}^N \frac{\delta_i R_{si}}{R_{si}^2 + X_{si}^2}, b_s = \sum_{i=1}^N \frac{\delta_i X_{si}}{R_{si}^2 + X_{si}^2} \\ R_{req} = \frac{a_r}{a_r^2 + b_r^2}, X_{req} = \frac{b_r}{a_r^2 + b_r^2} \\ a_r = \sum_{i=1}^N \frac{\delta_i R_{ri}}{R_{ri}^2 + X_{ri}^2}, b_r = \sum_{i=1}^N \frac{\delta_i X_{ri}}{R_{ri}^2 + X_{ri}^2} \\ T_{Jeq} = \sum \delta_i T_{Ji} \end{cases} \quad (5)$$

式中, s, r 为定子和转子的参数; e_q 为等值参数。

3 直流系统建模

换流器是直流系统的核心设备, 其稳态时数学模型^[5]如下。

$$\begin{cases} U_{d0} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi T} E \\ I_d = \frac{U_{dor} \cos \alpha - U_{doi} \cos \beta}{3X_{Tr}/\pi + R_d + 3X_{Ti}/\pi} \\ U_d = U_{d0} \cos \alpha - 3X_{Tr} I_d / \pi \\ P_{ac} = U_d I_d \\ \beta = \pi - \alpha \\ \gamma = \beta - \mu \end{cases} \quad (6)$$

式中,角标 r 代表整流侧; i 代表逆变侧; α 为整流器触发角; β 为逆变器触发超前角; γ 为熄弧角; μ 为换相角; T 为换流变压器变比; U_{d0} 为空载直流电压; U_d 为直流侧电压; I_d 为直流电流; P_{ac} 为直流输送功率。

所研究系统用于电力直流外送,需保证输送功率恒定,因此,采用整流侧定电流控制,逆变侧定 r 角控制。这种控制方式的优点在于:整流侧控制直流系统的电流不产生大幅度的变化,逆变侧控制直流系统电压保持额定电压附近,从而既保障了输送功率的稳定性,又具有经济性。此外,为了防止交流系统故障对直流系统造成的影响,配置了低压限流装置(VDCOL)、最小电流限制控制 $\alpha_{\min}$ 定控制。

4 交直流相互影响机理

当交流系统发生故障时,故障类型和电气距离的不同会导致换流站交流母线电压跌落程度的不同。当电压下降不严重时,换流站能够通过触发角和熄弧角的调节,保证直流系统运行于稳定状态。当电压下降严重时,熄弧角减至很小,不能够完成换相过程,发生换相失败,若故障及时消除,且交流系统电压能够恢复正常,则直流系统可以逐渐恢复稳定。若故障无法消除,会发生连续的换相失败,从而导致直流闭锁,直流输送有功功率减小,送端有功功率增大,受端有功功率减小,使潮流大范围的转移,有可能造成系统崩溃。

当直流系统发生闭锁故障时,直流输送有功功率降为零,导致换流站无功补偿大量剩余,使交流母线电压瞬间增大。若能够及时切除无功装置,交流母线电压恢复正常,若无法及时切除无功功率,交流系统电压升高,严重时有可能导致电压崩溃。

5 仿真分析

基于 PSCAD/EMTDC,在图 2 所示 3 种运行方

式下,分别对风电场风速变化、风电场故障、换流母线故障等情况下仿真,比较不同运行方式下送端系统对直流输电的影响。

5.1 风速变化时送端对直流系统影响

仿真阵风、渐变风、随机风的风速变化范围为 4 m/s 时所需火电临界容量,得到表 1 至表 3 的数据。

表 1 阵风时风电与火电临界容量比值

运行方式	风电容量 /p. u.	火电容量 /p. u.	比值
方式 1	0.5	1.07	1:2.14
方式 2	0.5	1.32	1:2.64
方式 3	0.5	1.22	1:2.44

表 2 渐变风时风电与火电临界容量比值

运行方式	风电容量 /p. u.	火电容量 /p. u.	比值
方式 1	0.5	1.11	1:2.20
方式 2	0.5	1.35	1:2.70
方式 3	0.5	1.25	1:2.50

表 3 随机风时风电与火电临界容量比值

运行方式	风电容量 /p. u.	火电容量 /p. u.	比值
方式 1	0.5	1.35	1:2.70
方式 2	0.5	1.60	1:3.20
方式 3	0.5	1.50	1:3.00

当风速变化时,风电场有功出力随着风速变化而变化,当火电容量不够充足时,风速变化导致的风电场有功功率波动会影响到直流系统输送功率的稳定性。从表 1、表 2、表 3 可以看出,无论风电场处于何种风速,交直流系统运行于方式 1 下所需火电容量最小。阵风与渐变风条件下,相同的风速变化范围导致的风电场输出有功功率差异不大,而随机风下风电场的频率波动较大。比较表 1 至表 3 可以看出,当风电场风速类型不同时,为保证直流输电输送有功功率恒定,所需火电容量不同,噪声风所需火电容量最大,渐变风、阵风较小。因此,当火电容量不足够大时,噪声风对直流输电传输功率的影响最大。

5.2 风电场故障对直流系统影响

分别设置 3 种运行方式下的风电场 PCC 母线在 1 s 时发生 3 相短路故障,持续时间为 0.15 s,得到系统响应如图 7 所示,其中,左侧为方式 1、中间为方式 2、右侧为方式 3。

从图 7 中可以看出,当风电场 PCC 母线处发生短路瞬间,风电场 PCC 点母线电压降至零, Crowbar 保护不投入,风机脱网,导致换流站交流母线换相电压降低,直流侧电压跟随换相电压降低,直流电流瞬间降低,整流站触发角 α 处于最小值状态,使 α 角保持在 5° ,直流电压的降低,使直流电流急剧上升,为了防止直流电流在电压降低时的过大,依靠低压限流控制的作用使直流电流保持在 0.5 p.u. 。故障消除后,交直流系统能够恢复到稳定运行状态。风电场的短路故障对与之不相联的直流系统影响几乎可忽略不计。

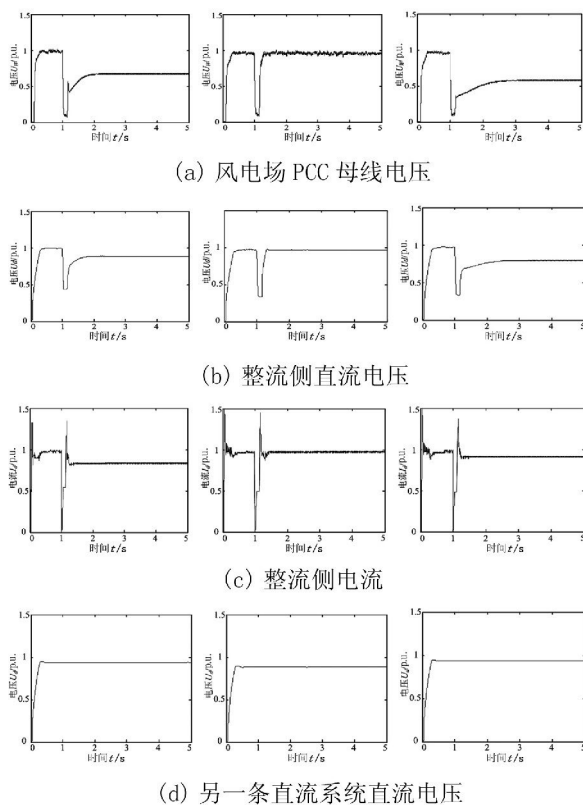


图 7 风电场 PCC 短路时系统响应曲线

比较 3 种运行方式,风电场发生故障后,运行在方式 2 下的交直流系统能够恢复到故障前的运行状态,并且恢复到稳定状态所用的时间较短,大规模风电场的故障对方式 2 的交直流系统影响最小。这是由于方式 2 下,两个交直流输电系统均采用非并联运行方式,将电能输送至 4 个不同受端系统,交流系统与直流系统间的相互耦合作用可忽略不计。

5.3 换流母线故障对直流系统的影响

将前面所述故障分别设置于整流侧交流母线与逆变侧交流母线,仿真结果如图 8、图 9 所示。

在图 8 和图 9 中,整流侧发生故障时,换流母线

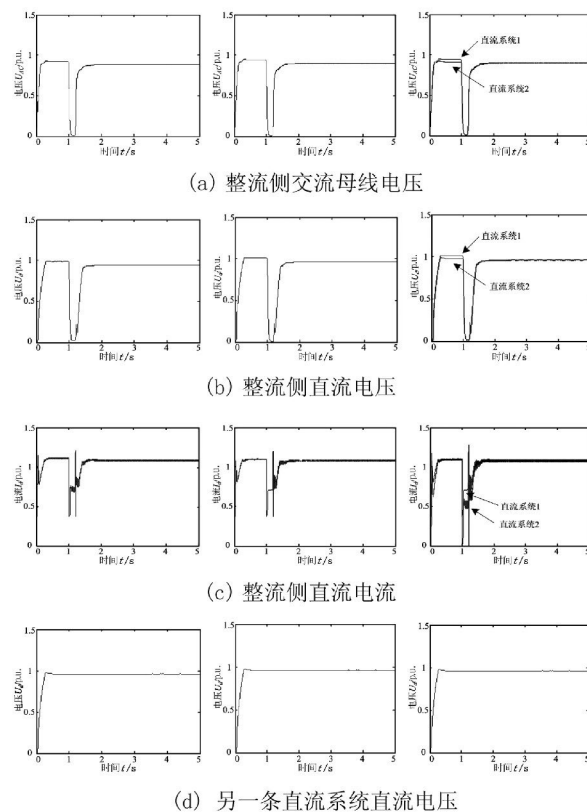


图 8 整流侧交流母线短路系统响应图

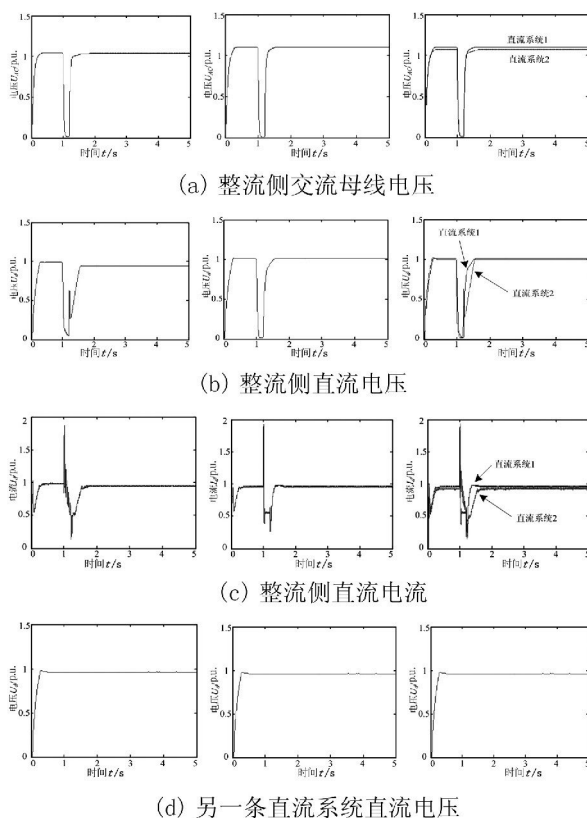


图 9 逆变侧交流母线短路系统响应图

电压降至零,根据式(6)可得,直流电压下降,从而引起直流电流下降,定电流控制从整流侧转到逆变

侧,使得直流输送功率下降;逆变侧发生故障时,使逆变器的反电动势降低,从而增大了直流电流,可能发生换相失败。逆变侧交流母线故障对直流系统的影响比整流侧的大。

整流侧交流母线发生故障时,3 种运行方式下故障对直流系统的影响程度几乎相同;逆变侧交流母线发生故障时,方式 2 下的交流母线故障对直流系统影响最小。在方式 3 下,交直流非并联运行时故障对直流系统的影响较小。换流站故障母线对另一条直流系统的几乎没有任何影响。

6 结 论

通过对大规模双馈风电场及交直流混联系统的建模,仿真并详细分析了不同交直流系统运行方式下,含大规模双馈风电场的送端系统对直流系统的影响,得出以下结论。

(1) 为保证直流输送功率的稳定性,风电场无论处于何种风速类型时,运行于方式 1 下交直流输电系统对火电容量需求最小。

(2) 在不同交直流系统的运行方式下,送端系统故障对直流系统的影响不同。当风电场 PCC 母线故障时,运行在方式 2 下的交流系统故障对直流系统的影响最小,当整流侧交流母线故障时,3 种运行方式下的交流故障对直流系统影响程度差异不大。

(3) 发生于某条直流输电系统交流母线的故障对另外一条直流系统的影响较小。

通过仿真与分析得到了上述结论,能够为大规模双馈风电场直流外送的调度及控制提供相应的帮助。对于交直流输送比例不同时的稳定极限问题还需继续研究。

参考文献

- [1] Wind Power Installed Capacity Statistics in China, 2009. [Online]. Available: <http://www.cwea.org.cn/main.asp>.
- [2] Szechtman M, Wess T, Thio C V. First Benchmark Model for HVDC Control Studies [J]. Electra, 1991, 135(4): 54-67.

- [3] 李晶,宋家骅,王伟胜,等. 大型变速恒频风力发电机组建模与仿真 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 100-105.
- [4] 曹军,王虹富,邱家驹. 变速恒频双馈风电机组频率控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(13): 78-82.
- [5] 陈水明,余占清,谢海滨,等. 互联系统电磁暂态交互作用研究, I: 直流侧设备电磁暂态模型 [J]. 高电压技术, 2011, 37(2): 395-403.
- [6] 陈水明,黄璐璐,谢海滨,等. 互联系统电磁暂态交互作用研究, II: 交流侧系统等值及稳态调试 [J]. 高电压技术, 2011, 37(3): 537-547.
- [7] 陈水明,黄璐璐,谢海滨,等. 互联系统电磁暂态交互作用研究, III: 交流侧对直流侧的影响 [J]. 高电压技术, 2011, 37(5): 1082-1092.
- [8] 陈水明,黄璐璐,谢海滨,等. 互联系统电磁暂态交互作用研究, IV: 直流侧对交流侧的影响 [J]. 高电压技术, 2011, 37(7): 1590-1597.
- [9] 郭小江,马世英,申洪,等. 大规模风电直流外送方案与系统稳定控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36(15): 107-115.
- [10] 陈霞,林卫星,孙海顺,等. 基于多端直流输电的风电并网技术 [J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 60-67.
- [11] 孙文博,徐华利,付媛,等. 应用于大型风电基地功率外送的多端直流输电系统协调控制 [J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1596-1601.
- [12] 蔺红,晁勤. 并网型直驱式永磁同步风力发电系统暂态特性仿真分析 [J]. 电力自动化设备, 2010, 30(11): 1-5.
- [13] 张新燕. 风电并网运行与维护 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [14] A. Shafiu, O. Anaya-Lara, G. Bathurst, et al. Aggregated Wind Turbine Models for Power System Dynamic Studies [J]. Wind Engineering, 2006, 30(3): 171-186.
- [15] 赵晚君. 高压直流输电工程技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [16] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

作者简介:

辛超山(1989), 硕士, 从事电网规划相关工作。

(收稿日期: 2014-10-09)

吐鲁番地区电网低频减载方案对比分析

胡仁祥¹, 王雅捷², 常喜强³, 冯小萍³

(1. 国网吐鲁番供电公司, 新疆 吐鲁番 838000; 2. 国网博尔塔拉供电公司, 新疆 博州 833400;
3. 国网新疆电力公司, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘要: 通过 PSASP 程序仿真分析, 吐鲁番地区电网与新疆主网解列后, 系统出现有功功率不同缺额时, 不同的低频减载方案动作后, 对电网频率和电压恢复进行了对标分析。结果表明, 方案 1 低频动作对电网频率和电压瞬间影响较小, 但方案 2 在频率和电压恢复上好于方案 1。该结论可为供电部门对低频定值整定提供一定的参考。

关键词: 孤网; 低频减载; 方案; 对比分析

Abstract: Through the simulation analysis with PSASP, when there are different active power vacancy after Turpan regional power grid is separated from the main grid of Xinjiang, the recovery of power grid frequency and voltage are analyzed for different low-frequency load shedding schemes. The results show that the low-frequency action in the first scheme has smaller instantaneous influence on the frequency and voltage of power grid, and it has a better recovery of frequency and voltage in the second scheme. The conclusion could provide a reference for low-frequency fixed value setting.

Key words: isolated power grid; low-frequency load shedding; scheme; comparison and analysis

中图分类号: TM714 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)01-0061-04

0 引言

频率是电力系统运行参数中最重要的参数之一, 电力系统频率变化过大会对发电机和系统的安全运行带来严重影响。因此, 将电力系统频率变化控制在很小的范围内是电力系统安全稳定运行的主要目标之一。

当系统中的有功功率电源不足或负荷增长时, 将会出现有功功率不平衡, 系统频率下降, 对电力系统的安全、稳定运行构成很大的威胁。随着电力系统的不断扩大, 系统结构及运行方式不断复杂, 在电力系统中任何一处发生故障或误操作, 如处理不当, 极易影响系统的有功平衡, 发生频率过低甚至频率崩溃, 最终造成整个系统的频率瓦解, 扩大停电范围。针对这一情况提出了电力系统第三道防线的概念。

电力系统第三道防线是通过低频减载 (under frequency load shedding, UFLS) 来防止事故扩大、避免大面积停电的有效手段。合理而快速地切除负荷, 可以使电网在最短时间内恢复至稳定运行状态。低频减载装置的整定方案对低频切负荷的性能起着

重要的作用。整定低频减载方案的方法主要有传统法、自适应法、半适应法及其他计算机辅助算法。切负荷方案的参数包括切负荷轮次, 每轮切负荷频率、切负荷量及时间延迟, 这些参数直接决定了方案在实际低频减载中频率恢复的效果, 不同的电网, 同一电网的不同时期, 低频减载方案的设置不同。

这里主要对 750 kV 吐鲁番主变压器故障跳闸后, 吐鲁番电网孤网时, 不同低频减载切负荷方案对电网频率恢复影响进行分析。

1 低频减载动作逻辑

低频减载设 5 个基本轮、3 个特殊轮、2 个加速轮, 可以用配置字投退, 各轮的动作频率和时间单独整定; 基本轮和特殊轮的出口单独整定。各轮使用同一个滑差闭锁和低电压闭锁。5 个基本轮采用顺序动作的原则, 即本轮动作的前提是上一轮 (基本轮) 动作。3 个特殊轮独立动作, 不受其它轮的限制。2 个加速轮分别是加速 2 轮和加速 2、3 轮。加速 2 轮动作时加速第 1 轮和第 2 轮; 加速 2、3 轮动作时加速第 1 轮、第 2 轮和第 3 轮。

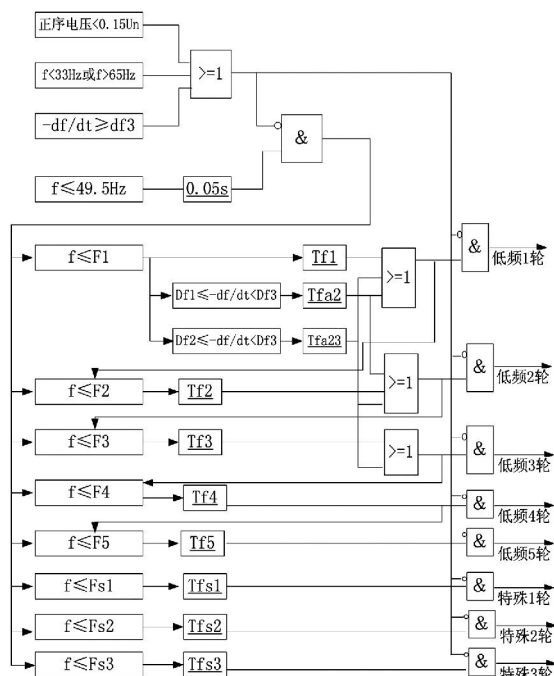


图 1 低频减载逻辑框图

2 低频减负荷方案的整定

当系统频率低于第 1 轮整定值时,设定的低频低压减载装置切除一部分负荷。如果频率继续下降,那么说明切负荷量不足,当频率又低于第 2 轮整定值时,切除另一部分负荷,并重复如上步骤,直到频率恢复。

低频减载方案的整定是离线的,基于操作人员的运行经验和系统仿真。

考虑低频减载方案时,应从以下几点出发:①系统安全运行的最低频率值,即频率危险点;②切负荷量,在系统严重故障时,防止系统崩溃的最大切负荷量;③不同的频率点,即在什么频率时开始切负荷;④切负荷动作频率的步长数量和大小。

针对以上要求,在低频减载方案的整定中,切负荷总量和切负荷点以及动作时间的选择是设计减载方案的关键。

整定方案 1: 根据网内变电站分布情况,尽量涉及到每个变电站,首先农网负荷线路,其次小工业用户负荷线路,最后大工业用户负荷线路(保工业负荷用电)。

整定方案 2: 为保居民以及农网负荷用电,减少居民投诉,首先工业用户负荷,含小工业和大工业负荷,其次考虑农网排灌负荷,最后居民用电负荷。

3 吐鲁番地区电网简介

吐鲁番电网向东与哈密电网、向南与巴州电网、向北与乌鲁木齐电网相连。750 kV 电磁解环后,750 kV 吐鲁番变电站单变接带吐鲁番电网。网内火电总容量 909 MW,水电 29.705 MW(径流式水电,不具备调频能力)。全网最大负荷夏季预计 1300 MW,若主变压器跳闸,吐鲁番电网孤网运行,存在有功缺额 300~400 MW。

表 1 主要电源构成情况

机组类型	发电厂名称	装机容量 /MW	单机组合	合计 /MW
火电	艾维尔沟电厂 1 号~3 号	9	3 × 3	909
	沈宏热电厂 1 号~3 号	30	6 + 18 + 6	
	吐鲁番电厂 1 号~2 号	270	135 + 135	
	圣雄电厂 1 号~2 号	600	300 × 2	

孤网后,主要依靠吐鲁番电厂和圣雄电厂机组调频。

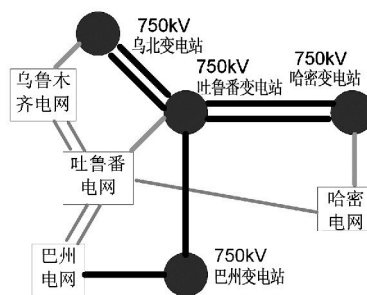


图 2 吐鲁番电网地理接线图

4 不同方案仿真分析比较

仿真设置,1 s 时,750 kV 吐鲁番主变压器三侧断路器跳闸,火电机组正常满出力。

(1) 吐鲁番主变压器下网(396.77 + 40.223) MVA,火电机组满出力。

方案 1: 低频动作第 1 轮 49 Hz/0.3 s,第 2 轮 48.7 Hz/0.3 s,第 3 轮 48.4 Hz/0.3 s,3 轮共切负荷 392.19 MW,占全网负荷 31.99%,占下网负荷 98.84%。

方案 2: 低频动作第 1 轮 49 Hz/0.3 s,第 2 轮 48.7 Hz/0.3 s,第 3 轮 48.4 Hz/0.3 s,3 轮共切负荷

412.304 MW, 占全网负荷 33.6%, 占下网负荷 103.92%。

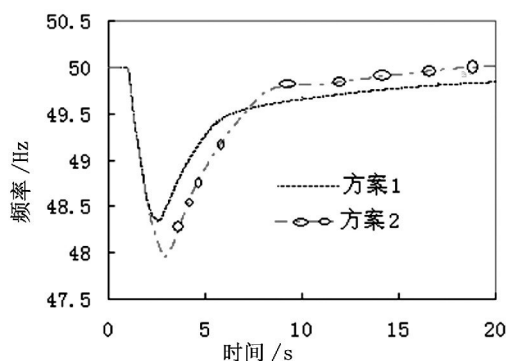


图3 吐鲁番电网孤网频率恢复曲线

从图3可以看出,方案1低频动作后,最低频率为48.35 Hz/2.67 s;方案2低频动作后,最低频率为47.95 Hz/2.93 s。表明分散切负荷效果优于集中切工业用户负荷,频率差在0.4 Hz。从恢复效果来看,恢复到49.75 Hz频率点时,方案2比方案1快5.8 s。

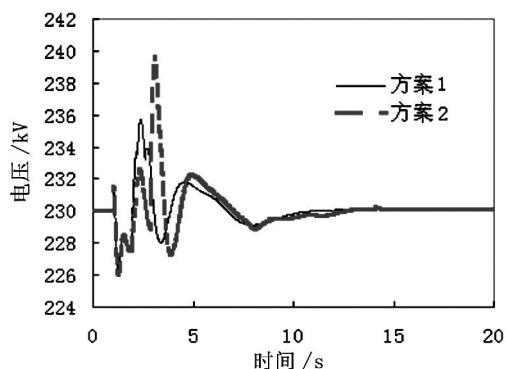


图4 圣雄电厂220 kV母线电压波动曲线

从图4可以看出,方案1和方案2在1.28 s时,同时降到最低电压226.1 kV。低频切负荷动作后,方案1最高电压达到235.53 kV,波动幅度在2.4%。方案2最高电压达到239.47 kV,波动幅度达4.1%。方案2电压曲线波动幅值略高于方案1。

(2) 吐鲁番主变压器下网(293.085 + j49.77) MVA,火电机组旋转备用100 MW。

方案1: 低频动作第1轮49 Hz/0.3 s,第2轮48.7 Hz/0.3 s,第3轮48.4 Hz/0.3 s,3轮共切负荷343.16 MW,占全网负荷27.99%,占下网负荷117.08%。

方案2: 低频动作第1轮49 Hz/0.3 s,第2轮48.7 Hz/0.3 s,第3轮48.4 Hz/0.3 s,3轮共切负荷357.26 MW,占全网负荷29.14%,占下网负荷121.89%。

从图5可以看出,方案1低频动作后,最低频率为48.33 Hz/3.05 s;方案2低频动作后,最低频率为48.36 Hz/3.87 s。表明两种切负荷方案对电网

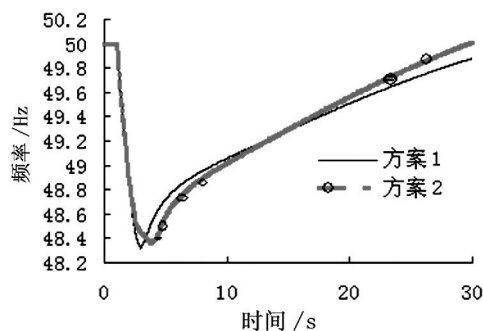


图5 吐鲁番电网孤网频率恢复曲线

的影响几乎一致,方案2略好一点,频率差在0.03 Hz。从恢复效果来看,恢复到49.75 Hz频率点时,方案2比方案1快2.3 s。

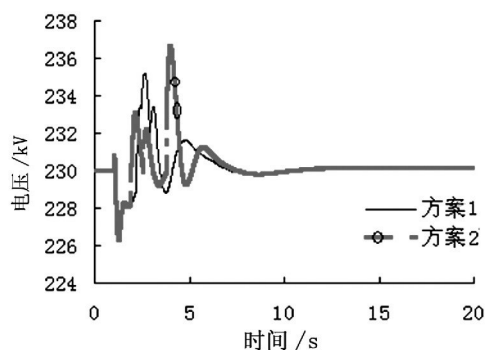


图6 圣雄电厂220 kV母线电压波动曲线

从图6可以看出,方案1和方案2在1.29 s时,同时降到最低电压226.35 kV。低频切负荷动作后,方案1最高电压达到235.04 kV,波动幅度在2.19%。方案2最高电压达到236.59 kV,波动幅度达2.86%。方案2电压曲线波动幅值略高于方案1。

(1) 下网400 MW时,从电网下降最低频率来看,方案1略优于方案2(高0.4 Hz),恢复情况方案2略快于方案1(快5.8 s);

从电压波动来看,方案1小于方案2(低3.59 kV),恢复情况来看,两者几乎一致。

(2) 下网300 MW时,电网下降频率几乎一致,频率恢复情况,方案2略快于方案1(快2.3 s)。

从电压波动来看,方案1小于方案2(低1.55 kV),恢复情况来看,两者几乎一致。

(3) 孤网后,内网机组运行情况(备用容量)对孤网的频率和电压影响较大。

5 结 语

通过对吐鲁番主变压器下网不同负荷时,主变

压器跳闸,吐鲁番地区电网孤网运行,不同低频方案动作后,对电网频率恢复和电压恢复进行了分析,方案1低频动作对电网频率和电压瞬间影响较小,但方案2在频率和电压恢复上略好于方案1。

具体到实际电网中,选择方案1(保工业负荷)或者方案2(保居民以及农网负荷),从保居民和农网负荷的角度出发,吐鲁番电网选择了方案2。

参考文献

- [1] 余虹云,顾锦纹. 华东电力系统低频减载方案的推定[J]. 浙江电力,1995(1):29-31.

(上接第24页)

根据公司安装在220 kV高压输电线路上的智能防外力破坏监测设备的运行测试结果,能准确监测识别出工程车辆侵入非安全区域,报警准确率达到90%以上,达到设计准确率大于85%要求。由于系统采用前端设备实时处理视频数据的方式,对比传统的传回后台主站处理方式,数据流量不到传统设备的5%。本智能视频防外破装置能够满足防外力破坏的实际工程需要。



图4 对线路上飘挂物的实时监测与报警

4 结 论

采用前端视频智能处理与多种传感器探测相结合的方法完成防外力破坏监测。多种灵敏、可靠的传感器辅助监测,弥补了只安装摄像机拍摄的监控盲点,减少对外力破坏行为的漏报,同时多种探测方式的结合也降低了对外力破坏行为的误报率。本系统采用视频图像前置处理的方法可以及时地启动报警,阻止外力破坏事件的发生,大幅度减少外力破坏

- [2] 新疆电网2014年度运行方式[J]. 新疆电力调度控制中心,2014.
- [3] 吐鲁番电网2014年度运行方式[J]. 吐鲁番电力调度控制中心,2014.
- [4] P. Kundur. 电力系统稳定与控制[M]. 北京: 中国电力出版社,2002:581-626.
- [5] 刘肇旭,赵强,卜广全. 全国电网互联系统频率特性及低频减载方案研究[M]. 北京: 中国电力科学研究院,2007.

作者简介:

胡仁祥(1987),硕士,从事电网安全稳定运行控制。

(收稿日期:2014-10-08)

造成的停电事故以及由此带来的经济损失和人员伤亡。同时,采用在前端设备上完成视频数据处理的方法,极大地减少了回传至后台的通信数据量,有效降低系统的运行费用,具有良好的工程应用价值。

参考文献

- [1] 谢兵,许金彤. 基于3G网络的输电线路防外力破坏智能视频监控系统研究[J]. 华东电力,2010,38(11):30-31.
- [2] 焦媛媛. 在线视频监测系统在高压输电线路防外破工作中的技术实现及应用效果[J]. 广东科技,2012(23):13-15.
- [3] 刘高,懿辉. 嵌入式视频和图像识别技术在架空输电线路智能监控中的应用研究[J]. 计算机系统应用,2013,22(11):58-61.
- [4] 秦晓敏. 智能视频监控中目标跟踪的研究与实现[J]. 电子设计工程,2011,19(9):40-42.
- [5] 鲁振山. 基于视频图像的运动人体检测与跟踪算法研究[J]. 南京: 南京理工大学,2010.
- [6] 胡威. 基于Meanshift的视频人体目标跟踪算法研究[J]. 上海: 上海交通大学,2012.
- [7] 井亮. 基于视觉图像的移动目标跟踪技术研究[J]. 南京: 南京航空航天大学,2011.
- [8] 康烈. 序列图像中目标跟踪算法研究[J]. 武汉: 华中科技大学,2012.

作者简介:

杨帆(1980),大学本科,工程师,主要从事输电线路生产技术管理与研究;

余艺琳(1984),男,大学本科,助理工程师,主要从事输电线路运行维护技术管理与研究;

叶富彬(1982),大学本科,助理工程师,主要从事输电线路运行维护技术管理与研究。

(收稿时间:2014-09-11)

微源不同控制策略带不平衡负荷能力研究

朱云梦¹, 陈莎莎¹, 母晓莉²

(1. 国网成都市高新供电公司, 四川 成都 610041;

2. 四川省电力公司电力经济技术研究院, 四川 成都 610065)

摘 要: 微网中各类本地负荷靠近微源接入微网使得该微源输出电压易受本地负荷影响。而随着微网的发展, 大量单相负荷及三相不对称负荷的接入会造成微源输出电压不对称, 影响微网电能质量。在相同的硬件条件和控制参数下对 PQ 控制、V/f 控制、滑模变结构控制 3 种控制策略搭建了各系统模型, 调整参数使系统能在各控制策略下达到最优控制效果。最后通过 PSCAD/EMTDC 软件仿真结果分析了 3 种控制方式在相同不平衡负荷情况下运行的抗不平衡度能力。

关键词: 微源; 控制策略; 不平衡负荷; 滑模变结构

Abstract: The output voltage of micro-source is easily affected by local load caused by all kinds of local load in micro-grid closing to micro-source when connecting with the micro-grid. With the development of micro-grid, the integration of a large number of single-phase and three-phase unbalanced load may cause the output voltage of micro-source asymmetry, which may affect the power quality of micro-grid. Under the same conditions and control parameters, the system models for PQ control, V/f control and sliding-mode variable structure control are built, which allows the system to adjust the parameters to achieve the optimal control results in each control strategy. Finally according to the PSCAD/EMTDC software simulation results, the anti-unbalance ability in three control methods under the same unbalanced load is analyzed.

Key words: micro-source; control strategy; unbalanced load; sliding-mode various structure control (SMVSC)

中图分类号: TM714 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2015)01-0065-06

0 前 言

随着以煤、石油为首的传统化石能源的日益枯竭, 寻求一种能满足社会不断增长的能源需求和兼顾功耗与环保平衡的新兴能源成为必然。因此, 具有投资省、损耗低、清洁环保的太阳能、风力发电等分布式发电技术获得了越来越多的重视和应用。各类分布式发电单元及本地负荷通常以组成微网的形式并网或独立运行。然而在微网中各类本地负荷与微源的距离可能致使微源输出电压易受本地负荷影响。即随着微网中大量单相负荷和三相不对称负荷的投入, 造成了微源本地运行负荷的不平衡问题^[1,2]。

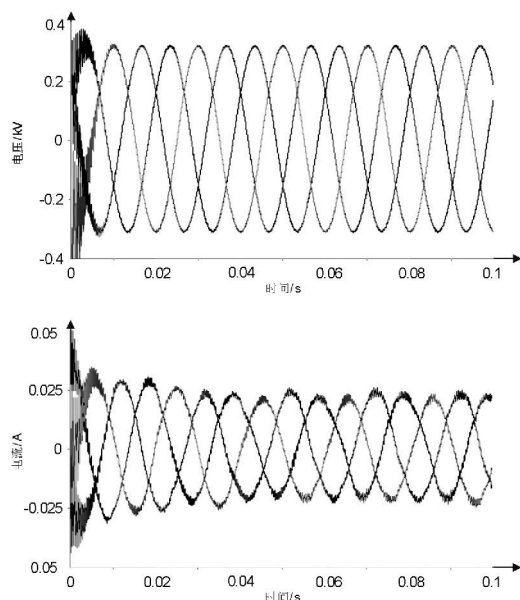
微源本地负荷不平衡会引起微源逆变器输出端三相电压不平衡、产生基波负序和三次谐波^[3]。而输出电压的不平衡会造成微网中电力电子设备运行失常甚至损坏^[4,5]。而在当今微网控制中对逆变型

微源通常采用的控制方式有 PQ 控制、V/f 控制^[6]。在针对各类微网及微源控制的分析中, 研究的主要方向为时变性微源的 MPPT 输出、各微源之间的协调控制、微网不同运行模式之间的切换等, 未将各控制方式单独带不平衡负荷能力进行分析。

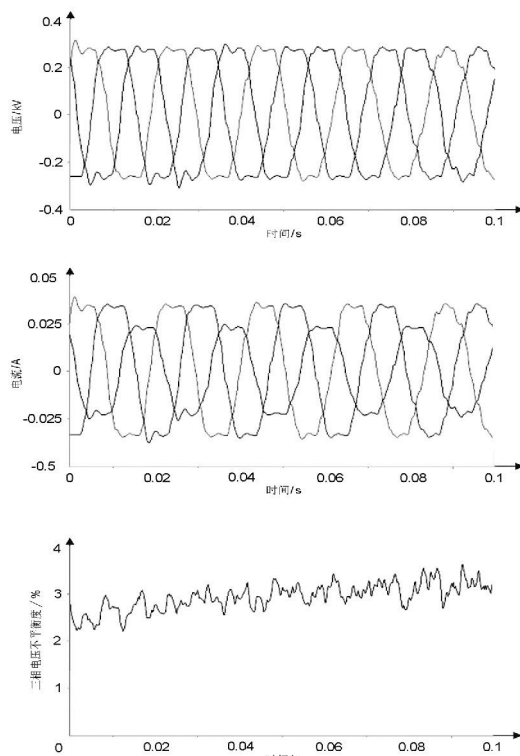
下面分别利用 PQ 控制、V/f 控制、滑模变结构控制^[7] 3 种控制策略进行研究, 选择每种控制策略的控制传递函数并进行相关理论推导。根据其控制策略搭建各系统模型, 调整控制参数得出每种控制的理想控制结果。针对每种控制策略在相同的硬件结构和控制参数情况下进行了微源本地带平衡负荷和不平衡负荷的研究。

1 微源结构

研究微源结构如图 1 所示, 分布式发电系统通常由风力机(光伏板)、发电系统、逆变单元、滤波单元构成。在研究中, 为了简化分析, 逆变型微源将用



(a) 带平衡负荷时电压电流仿真结果



(b) 带不平衡负荷时电压电流仿真结果

图 3 PQ 控制电流仿真图

采用恒压恒频控制的目的是逆变器出口电压幅值和系统输出的频率维持不随分布式电源的输出功率变化而变化,其控制原理如图 4 所示。

分布式电源系统的初始运行点为 A,系统输出频率为 f_{ref} ,分布式电源所接交流母线的电压为 U_{ref} ,分布式电源输出的有功功率和无功功率分别为 P_0 和 Q_0 。频率控制器通过调节分布式电源输出的有

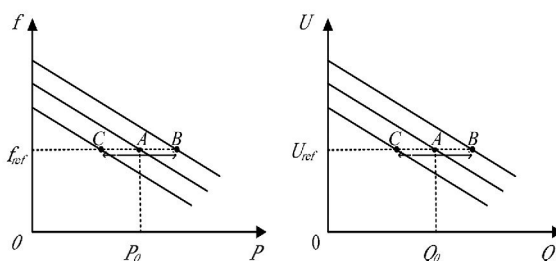


图 4 恒压恒频控制原理图

功功率,是频率维持在给定的参考值;电压调节器调节分布式电源输出的无功功率,是电压维持在给定的参考值。这种控制方式主要用于主从控制模式的微网运行在孤网状态的主源逆变器,该源主要为微网系统提供电压和频率支撑,相当于常规电力系统中的平衡节点。由于任何分布式电源都有容量限制,只能提供有限的功率,采用此控制方法时需要提前确定孤岛运行条件下负荷于电源之间的功率匹配情况。根据上述原理,图 5 给出了一种典型的恒压恒频外环控制器结构。

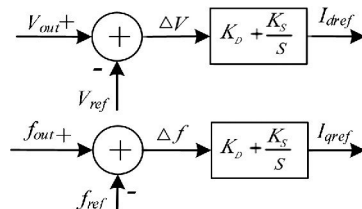


图 5 电压外环示意图

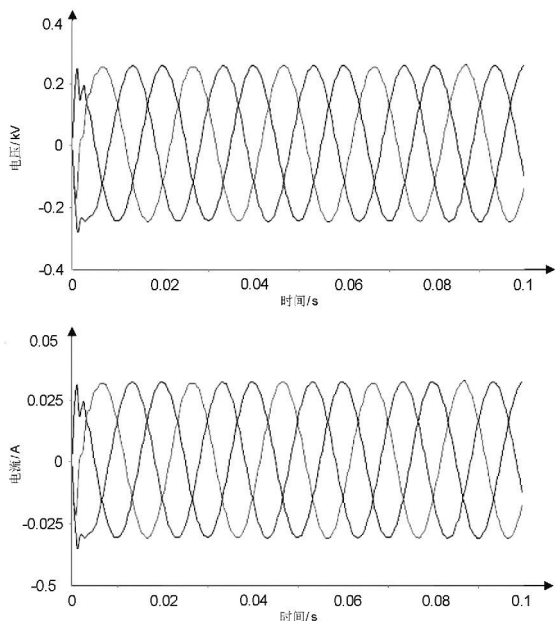
与 PQ 控制相比,V/f 控制的差别主要在外环控制。在外部环节中,由锁相环输出的系统频率 f 与 f_{ref} 相比较,差值通过 PI 调节器产生内环所需的 d 轴电流参考信号。电压与参考电压相比较,差值通过 PI 调节器产生内环所需的 q 轴电流参考信号。电流内环调节与 PQ 控制一致。

仿真结果如图 6 所示。

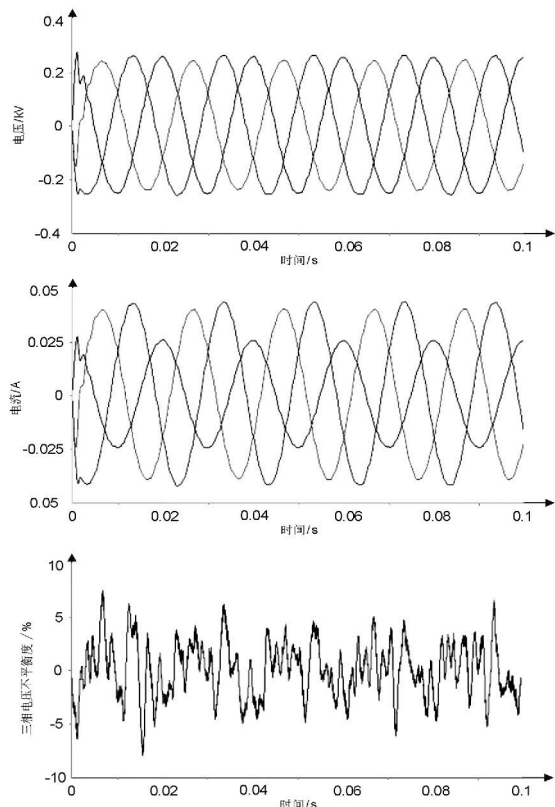
4 滑模变结构控制抗不平衡能力分析

研究中,在分析 PQ、V/f 控制带不平衡负荷能力的基础上,利用滑模变结构控制对系统的变化和外界参数扰动不敏感、鲁棒性好的特点,设计了如图 7 所示适用于微源逆变器的滑模控制器。

图 7 所示为图 1 所示结构的控制示意图。通过



(a) 带平衡负荷时电压电流仿真图



(b) 带不平衡负荷时电压电流仿真图

图6 V/f控制电流仿真图

采集滤波器输出的电压作为滑模控制器的信号输入,再将滑模控制器的输出信号、滤波器输出的电压电流值及三相全桥的输出电流作为逆系统的输入,进而得到门极控制信号。

根据图7示意图中所示电压电流关系可建立数学模型为

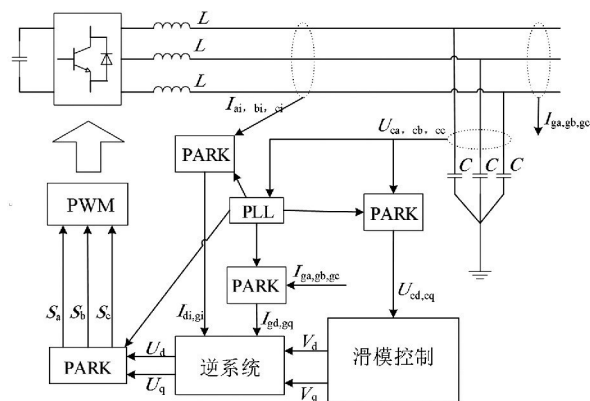


图7 滑模变结构示意图

$$\begin{cases} U_{Ca} = (I_{ai} - I_{ga}) / C \\ U_{Cb} = (I_{bi} - I_{gb}) / C \\ U_{Cc} = (I_{ci} - I_{gc}) / C \\ I_{ai} = (U_a - U_{Ca}) / L \\ I_{bi} = (U_b - U_{Cb}) / L \\ I_{ci} = (U_c - U_{Cc}) / L \end{cases} \quad (4)$$

通过式(5)可以得出逆变器在 d 、 q 坐标下的数学模型为

$$\begin{cases} \dot{U}_{C-dq} = \frac{I_{i-dq}}{C} - \frac{I_{g-dq}}{C} + \omega J U_{C-dq} \\ \dot{I}_{L-dq} = -\frac{U_{C-dq}}{L} - \frac{U_{dq}}{L} + \omega J I_{L-dq} \end{cases} \quad (5)$$

设 U_{C-d} 、 U_{C-q} 、 I_{i-d} 、 I_{i-q} 为 x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 , 则原系统可以表示为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_3 / C - I_{g-d} / C + \omega x_1 \\ \dot{x}_2 = x_4 / C - I_{g-q} / C + \omega x_2 \\ \dot{x}_3 = -x_1 / L + U_d / L + \omega x_3 \\ \dot{x}_4 = -x_2 / L + U_q / L + \omega x_4 \\ y_1 = x_1 - x_{10} \\ y_2 = x_2 - x_{20} \end{cases} \quad (6)$$

式中, x_1 、 x_2 、 x_3 、 x_4 为状态变量; U_d 、 U_q 为控制输入; y_1 、 y_2 为控制输出; x_{10} 、 x_{20} 为给定指令值。

进一步,令

$$\begin{cases} v_1 = \dot{y}_1 = -\left(\frac{1}{CL} + \omega^2\right)x_1 + \frac{2\omega I_{g-q}}{C} - \frac{I_{g-d}}{C} + \frac{U_d}{CL} - \frac{\omega I_{g-q}}{C} \\ v_2 = \dot{y}_2 = -\left(\frac{1}{CL} + \omega^2\right)x_2 + \frac{2\omega I_{g-d}}{C} - \frac{I_{g-q}}{C} + \frac{U_q}{CL} - \frac{\omega I_{g-d}}{C} \end{cases} \quad (7)$$

可求解出逆系统方程如下。

$$\begin{cases} U_q = CLv_1 + (1 + LC\omega^2)x_1 - 2L\omega I_{i-q} + LI_{g-d} + L\omega I_{g-q} \\ U_d = CLv_2 + (1 + LC\omega^2)x_2 - 2L\omega I_{i-d} + LI_{g-q} + L\omega I_{g-d} \end{cases} \quad (8)$$

解耦得出两个线性子系统为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = v_1 \\ y_1 = x_1 - x_{10} \end{cases} \quad \begin{cases} \dot{x}_2 = v_2 \\ y_2 = x_2 - x_{20} \end{cases} \quad (9)$$

所研究的主要控制对象为三相电压,主要通过对比电压不平衡度来比较各控制方式的优缺点,故在设计时选择参考信号与状态信号之差与其导数的函数作为滑模面,以求得到期望的三相电压。

$$\begin{cases} S_1 = c_1 y_1 + \dot{y}_1 \\ S_2 = c_2 y_2 + \dot{y}_2 \end{cases} \quad (10)$$

为了保持变结构固有的鲁棒性和减小滑模控制器本身的抖震。这里采用指数趋近率。

$$\begin{cases} \dot{S}_1 = -\varepsilon_1 \operatorname{sgn}(S_1) - kS_1 \\ \dot{S}_2 = -\varepsilon_2 \operatorname{sgn}(S_2) - kS_2 \end{cases} \quad (11)$$

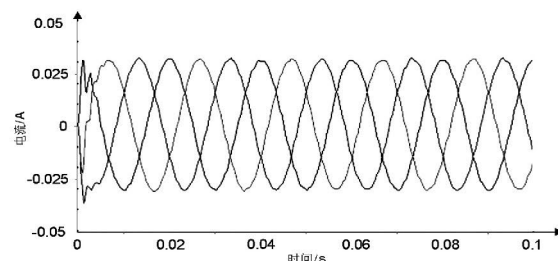
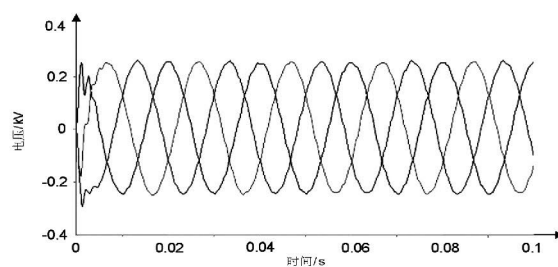
联立解式(8)、(10)、(11)、(12),可得

$$\begin{cases} v_1 = -\varepsilon_1 \operatorname{sgn}(S_1) - kS_1 - c_1 \dot{y}_1 \\ v_2 = -\varepsilon_2 \operatorname{sgn}(S_2) - kS_2 - c_2 \dot{y}_2 \end{cases} \quad (12)$$

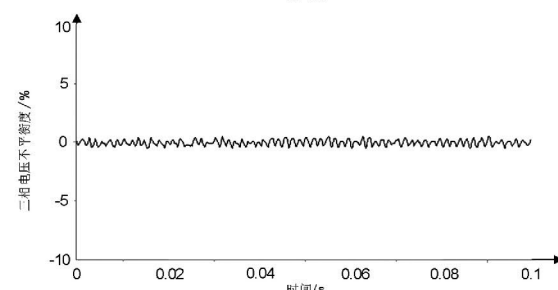
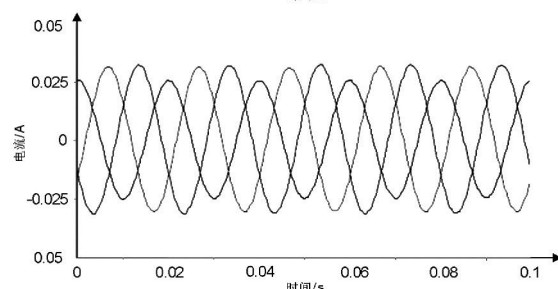
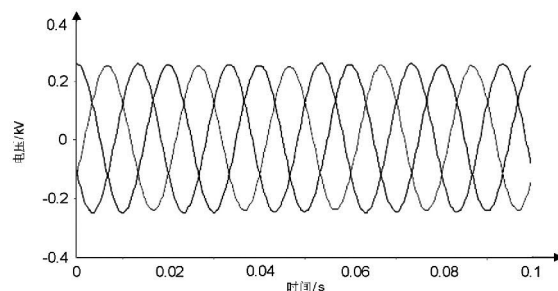
由式(9)可得出变结构控制律 U_d 、 U_q ,进而由派克变换得出 U_a 、 U_b 、 U_c 。仿真结果如图8所示。

5 分析与结论

通过以上仿真可知,典型微网控制方式带不平衡负荷能力有较大差异。从控制过程上看,3种控制方式算法都较易实现,但从式(10)可以看出滑模变结构的控制效果与线路参数无关,鲁棒性好,而其他两种控制方式则不然。从控制效果上看,当在3种控制方式负载都设定在PQ控制额定值时,3种控制方式带平衡负荷能力相差不大,电压不平衡度均能保持在电网规定安全范围内^[8]。但当负载为三相不平衡负荷时,3种控制方式的控制效果相差较大:PQ控制的抗不平衡度低,在其控制作用下电压不平衡度已超出电力系统安全稳定运行范围,并且电网中有大量谐波产生。V/f控制效果介于其他两种控制效果之间,但电压不平衡度波动范围较大,不能保证系统运行在安全的范围。滑模变结构控制因其不受线路参数摄动影响、鲁棒性强而能取得很好的控制效果,电压不平衡度仅为1%左右,系统能安全稳定地运行。



(a) 带平衡负荷电压电流仿真图



(b) 带不平衡负荷电压电流仿真图

图8 滑模变结构控制电流仿真图

参考文献

- [1] Zhang Haiyang Li Shande. Research on Micro-grid [C] // 2011 The International Conference on Advanced Power System Automation and Protection. 2011: 595 - 598.
- [2] Seyed Ali Arefifar, Yasser A. - R. I. Mohamed, Tarek

- H. M. EL - Fouly. Optimum Microgrid Design for Enhancing Reliability and Supply Security [J]. IEEE Trans. on Smart Grid, 2013, 4(3): 1567 - 1575.
- [6] 池源. 含非线性及不平衡负荷的微电网控制策略研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [7] 周龙华, 舒杰, 张先勇, 等. 分布式能源微网电压质量的控制策略研究 [J]. 电网技术, 2012, 36(10): 17 - 22.
- [8] Blaabjerg Frede, Teodorescu Remus, Liserre Macro, et al. Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems [J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2006, 53(5): 1398 - 1409.
- [9] 张建华, 黄伟. 微电网运行控制与保护技术 [M]. 北

京: 中国电力出版社, 2012.

- [10] Phongsak Phakamach, Chumphol Akkaraphong. An Optimal Feedforward Integral Variable Structure Controller for the Electrohydraulic Position Servo Control Systems [J]. Tencon, 2004(4): 459 - 462.
- [11] 中国标准出版社. 电能质量标准汇编 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2013.

作者简介:

朱云梦(1983), 研究方向为电力系统稳定与分析、分布式发电;

陈莎莎(1983), 研究方向为分布式发电控制;

母晓莉(1984), 研究方向为电力系统稳定与分析、分布式发电。 (收稿日期: 2014-09-02)

(上接第54页)

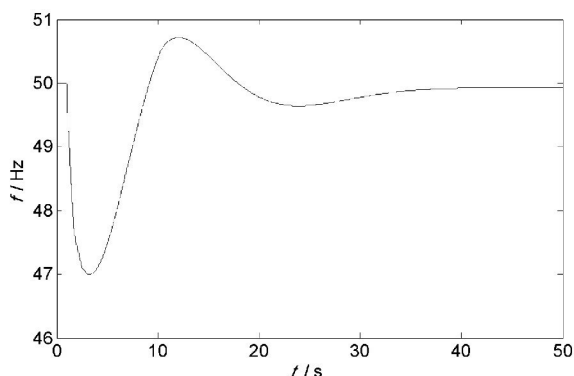


图13 系统频率恢复曲线

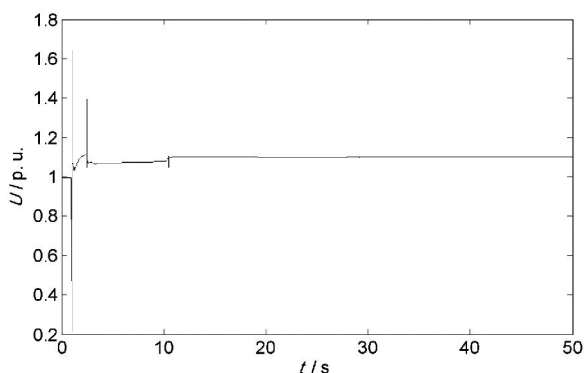


图14 电动机负荷母线电压

参考文献

- [1] IEEE/CIGRE Joint Task Force. On Stability Terms and Definitions Definition and Classification of Power System Stability [J]. IEEE Trans. PWRS, 2004, 19(2): 1387 - 1401.
- [2] Jonathan Horne, Damian Flynn and Tim Littler. Frequency Stability Issues for Islanded Power Systems [C]. IEEE PES Power System Conference and Exposition, 2004.
- [3] 袁季修. 防御大停电的广域保护和紧急控制 [M]. 北

- 京: 中国电力出版社, 2007: 141 - 175
- [4] P. Kundur 著, 周孝信、李兴源, 等译. 电力系统稳定和控制 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [5] Kottick D, Or O. Neural - networks for Predicting the Operation of an Under - frequency Load Shedding System [J]. IEEE Trans, on Power Systems, 1996, 11(3): 1350 - 1358.
- [6] Luan W. P, Irving M. R, Daniel J. S. Genetic Algorithm for Supply Restoration and Optimal Load Shedding in Power System Distribution Networks [J]. IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, 2002, 149(2): 145 - 151.
- [7] 王君, 王晓茹, 谢大鹏, 等. 孤岛系统的低频减载方案研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(3): 30 - 33.
- [8] 何恒靖, 解大, 常喜强, 等. 基于割集的电力系统低频减载同调分区算法 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(9): 12 - 17.
- [9] 秦明亮, 杨秀朝. 在频率紧急控制装置中扩充 df/dt 应用的探讨 [J]. 电网技术, 1998, 22(6): 39 - 41, 45.
- [10] 常喜强, 何恒靖, 解大. 计及频率差变化率的低频减载方案的研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(4): 12 - 17.
- [11] Concordia C, Fink L H, Poullikkas G. Load Shedding on an Isolated System [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(3): 1467 - 1472.
- [12] 严伟, 陈俊, 沈全荣. 大型隐极发电机进相运行的探讨 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(2): 94 - 97.
- [13] 王正风. 无功功率与电力系统运行 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2009: 41 - 44.
- [14] 杨传箭. 电力系统运行 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1995: 26 - 36.
- [15] 鞠平, 代飞. 电力系统广域测量技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 102 - 109.
- (收稿日期: 2014-11-10)

基于改进细菌群体 趋药性算法的风-蓄-火联合调度的研究

付 伟

(国网四川省电力公司, 四川 成都 610041)

摘 要: 由于风电功率波动性大, 直接接入电网会给电网安全运行带来很大的风险。针对风电出力的随机性, 在风电预测的基础上, 结合抽水蓄能削峰填谷的特点, 提出了风-蓄-火联合系统日前和时前调度策略, 日前调度阶段以风-蓄-火联合调度获取最大经济效益为目标函数, 采用改进的细菌群体趋药性算法进行优化, 得到风、蓄、火的日前出力计划。时前调度阶段对日前阶段的机组出力进行修正, 首先在满足抽水蓄能、满足约束条件的情况下, 修正抽水蓄能的出力, 再修正火电机组的出力, 修正目标是以火电机组的运行成本最小。最后, 以含风电场的算例对该模型进行了验证, 仿真结果表明了所提出的调度策略具有一定的可行性。

关键词: 风电; 火电机组; 抽水蓄能; 联合调度; 细菌群体趋药算法

Abstract: Because the wind power has a severe fluctuation, and it can bring great risk to the safety of power grid if it is directly connected to power grid. According to the randomness of wind power, based on the wind power prediction and combined with the characteristics of the pumped storage, a two-stage coordinated joint dispatch strategy for wind farm and pumped-storage power station is proposed, which is consisted of day-ahead dispatch and hour-ahead dispatch. The day-ahead dispatching model takes the maximum economic benefits of the wind-storage-thermal joint operation as the objective, and it is optimized by the improved bacterial colony chemotaxis algorithm, so the day-ahead output of wind-storage-thermal is known. In hour-ahead dispatch stage, according to the results of short-term wind power prediction the planning power is constantly revised. Firstly, based on the satisfied constraint condition of pumped-storage unit, the output of pumped-storage unit is revised. Secondly, the output of thermoelectric generating set is revised. The objective is to make the cost of the operation of thermoelectric generating set minimum. Finally, the model is verified by an example containing wind farms, and the simulation results show that the proposed dispatching strategy is feasible.

Key words: wind power; thermoelectric generating set; pumped-storage; joint dispatch; bacterial colony chemotaxis algorithm

中图分类号: TM74 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2015)01-0071-06

0 引 言

风能是一种清洁、可再生能源, 在国内外都得到了发展。但是由于风电具有随机性、波动性、间歇性等特点, 很难准确地估计出风电的出力, 因此限制了风电的广泛应用。抽水蓄能是比较成熟的储能方式之一, 将风电场和抽水蓄能联合运行为解决风电出力的不确定性提供了有效的途径。抽水蓄能在负荷低谷时通过风电抽水存储电能, 负荷高峰时, 通过放水发电为负荷提供电能, 与风电联合应用平滑了风电出力的波动, 使得风电具有一定的可调度性^[1-3]。

文献[4]将风电的运行可靠性考虑到调度模型中, 并用 MIP 模型进行优化求解, 提高了系统运行的可靠性。文献[5]基于机会约束规划建立了风电短期协调经济调度优化模型, 该模型包含了日前调度模型和时前滚动调度。文献[6]以节能、经济、环保为三大原则, 建立了电力系统多目标优化调度模型, 引入多目标粒子群算法对模型进行优化求解。文献[7-8]考虑了抽水蓄能的启停成本和运行工况, 建立了风电-抽水蓄能联合运行以效益最大为目标的模型。文献[9]计及风电预测误差带的调度计划渐进优化模型, 提出了风电的日前和日内两阶段调度, 具有很好的启发意义。下面建立了以风-蓄-火联合调度以联合运行经济效益最大为目标函

数的调度模型,采用改进的细菌群体趋药性算法对调度模型进行求解,最后,应用算例来验证了该调度策略的合理性。

1 风-蓄-火联合调度优化模型

1.1 日前调度模型

日前调度模型是根据次日负荷预测信息,风-蓄联合系统根据自身的风电预测、抽水蓄能的配置、对弃风的惩罚等因素,配置好风-蓄联合系统的联合出力,再安排火电机组的出力,以满足当日的负荷需求。

为了兼顾风电机组、抽水蓄能和火电机组联合经济调度,其目标函数具体包括混合系统的售电收益、抽水蓄能处于抽水状态时的费用、考虑对弃风量的惩罚等因素,在满足各个约束条件的情况下获取最大的经济效益,综上所述,其具体的目标函数如式(1)所示。

$$E = \max \left(\sum_{t=1}^{NT} \sum_{g=1}^{NG} (CP_g^t u_g^t - F_{Cg}) + \sum_{t=1}^{NT} CP_w^t + \sum_t CP_h^t - \sum_{t=1}^{NT} C_p P_p^t - \sum_{t=1}^{NT} C_{dro} P_{dro}^t \right) \quad (1)$$

式中, E 为风电、抽水蓄能和火电机组一起调度所获取的经济效益; u_g^t 表示火电机组的启停状态; NT 表示时间段,这里为 24 小时; P_g^t 为火电机组 g 在 t 时段内的出力; P_w^t 为风电机组在 t 时段内的出力; P_{dro}^t 表示 t 时段弃风量; P_h^t 表示 t 时段抽水蓄能机组的出力; P_p^t 表示抽水蓄能机组 t 时段的抽水功率; C 表示售电单价; C_p 表示抽水费用; C_{dro} 表示对弃风的惩罚费用。

考虑“阀点效应”^[1]的火电机组燃料成本如式(2)所示。

$$F_{Cg} = a_g + b_g P_g^t + c_g (P_g^t)^2 + d_g |\sin [e_g (P_g^t - P_{g \cdot \min})]| \quad (2)$$

式中, a_g 、 b_g 、 c_g 、 d_g 、 e_g 为发电机组 g 的燃料系数; $P_{g \cdot \min}$ 为火电机组 g 的最小输出功率。

1.2 约束条件

1) 系统有功功率平衡等式约束

$$\sum_{g=1}^{NG} P_g^t + P_w^t + P_h^t = P_L^t + P_p^t \quad (3)$$

式中, P_L^t 表示在 t 时段内的负荷。

2) 火电机组的有功出力约束条件

$$P_{g \cdot \min} \leq P_g^t \leq P_{g \cdot \max} \quad (4)$$

式中, $P_{g \cdot \min}$ 、 $P_{g \cdot \max}$ 分别为火电机组 g 的最小输出功率、最大输出功率。

3) 火电机组的爬坡率约束

$$\begin{aligned} P_g^t - P_g^{t-1} &\leq UR_g \\ P_g^{t-1} - P_g^t &\leq DR_g \end{aligned} \quad (5)$$

式中, P_g^t 、 P_g^{t-1} 分别为 t 时段和 $t-1$ 时段火电机组 g 的发电功率; UR_g 、 DR_g 为火电机组 g 在时段 $t-1$ 至时段 t 的最大上升和下降功率限制。

4) 抽水蓄能出力约束

$$P_{h \cdot \min} \leq P_h^t \leq P_{h \cdot \max} \quad (6)$$

式中, $P_{h \cdot \min}$ 、 $P_{h \cdot \max}$ 分别表示抽水蓄能机组的最小出力和最大出力。

5) 抽水蓄能抽水约束

$$P_{p \cdot \min} \leq P_p^t \leq P_{p \cdot \max}$$

6) 抽水蓄能的水电转换关系

$$P_h^t = A \eta_h Q_h^t h_t \quad (7)$$

式中, A 为水电转换系数,一般为 9.81; η_h 为抽水蓄能的水电转换效率; h_t 为水库在 t 时刻的水头高度。

7) 水量和库容约束

$$W_u^t = W_u^{t-1} - P_h^t \gamma_h \quad (8)$$

$$W_l^t = W_l^{t-1} + P_p^t \gamma_p \quad (9)$$

$$W_{u \cdot \min} \leq W_u^t \leq W_{u \cdot \max} \quad (10)$$

$$W_{l \cdot \min} \leq W_l^t \leq W_{l \cdot \max} \quad (11)$$

式中, W_u^t 为 t 时刻上水库容量; W_l^t 为 t 时刻下水库容量; γ_h 、 γ_p 为发电和抽水转换系数。

8) 抽水发电工况的等式约束

$$P_p^t \cdot P_h^t = 0 \quad (12)$$

式(12)表示抽水蓄能的抽水功率和发电功率具有互斥性,两者不能同时进行。

9) 系统旋转备用约束

$$\sum_g u_g^t (P_{g \cdot \max} - P_g^t) + P_{h \cdot \max} - P_h^t \geq k_l P_L^t + k_w P_w^t \quad (13)$$

式中, k_l 为负荷的波动系数,这里取 10%; k_w 为风电的波动系数,这里取 15%。

1.3 时前调度模型

由于风电功率的日前预测误差比较大,所以引入时前调度模型。时前调度是指在第 t 时段预测剩余时段的风电出力,并在日前调度相应时段调度的基础上,修正各机组出力,修正抽水蓄能的计划出力和火电机组的出力。在满足各个约束条件的基础上修正的目标是以火电机组的燃料成本低加上对火电

机组出力波动的惩罚为数学模型。具体目标函数为

$$\min F = \sum_{t=1}^{NT} \sum_{g=1}^{NG} u_g^t [a_g + b_g P_g^t + c_g (P_g^t)^2 + d_g |\sin [e_g (P_g^t - P_{g,\min})]|] + f_g |P_g^t - P_g^{t-1}| \quad (14)$$

式中,前一部分代表火电机组的燃料成本,最后一部分调度对火电机组出力波动的惩罚,以保证火电机组平稳运行。 f_g 表示对火电机组 g 的出力惩罚成本。本阶段调度的约束条件与日前调度的约束条件相同,此处不再阐述。

2 改进的细菌群体趋药性算法

2.1 细菌群体趋药性算法的改进

BCC算法的基本原理见文献[1-13],传统的算法细菌的移动表现出趋同性,容易陷入局部最优解。在原有的基础上作了如下几个改进。

1) 移动速度上的改进

BCC算法中细菌的移动速度是一个常数,这样容易使细菌陷入局部最优,从而使算法收敛于局部最优解。这里提出时变加速度思想,速度更新公式如下所示。

$$v_i(t+1) = wV_i(t) + c_1 r_1 [x_{pBi} - x_i(t)] + c_2 r_2 [x_{gB} - x_i(t)] \quad (15)$$

$$x_{i(t+1)} = x_i(t) + v_i(t+1) \quad (16)$$

式中, c_1 和 c_2 为加速度; w 为惯性权因子; x_{pBi} 为细菌自身的最佳位置; x_{gB} 为菌群的最佳位置; r_1 和 r_2 为服从均匀分布于 $[0,1]$ 间的随机数。 c_1 和 c_2 由式(17)决定。

$$c_1 = (c_{1f} - c_{1i}) N_c / N_{\max} + c_{1i} \\ c_2 = (c_{2f} - c_{2i}) N_c / N_{\max} + c_{2i} \quad (17)$$

式中, C_{1f} 、 C_{2f} 、 C_{1i} 、 C_{2i} 为常数,取 C_{1f} 、 C_{2i} 为2.5, C_{2f} 、 C_{1i} 为0.5。

2) 混沌模型的引入

在细菌群体趋药性算法中引入混沌模型,将代替细菌的随机迁徙,这是因为混沌运动可以使混沌变量在一定的范围内按自身规律不重复遍历所有状态。

Logistic映射就是一个典型混沌系统,其具体模型如式(18)所示。

$$x_{k+1} = \mu x_k (1 - x_k) \quad (18)$$

式中, $\mu = 4$ 。

当某个细菌连续 m 次迭代中移动距离差的绝对值小于预先设定的固定值时,则细菌以当前点为中心,按照式(18)进行混沌搜索,使其跳出重叠区域,再重新计算该细菌的适应度值,如果其适应度值优于先前的适应度值,则更新该细菌的位置,退出混沌搜索,若差于先前的适应度值,则搜索一定步数后停止,当前细菌位置为最优位置。

2.2 模型求解

求解日前调度模型时将风-蓄-火日前联合调度所获取的经济效益最大作为该算法的适应度函数,日前联合调度的控制变量个数作为算法中细菌的寻优维度,具体求解步骤如下所示。

1) 初始化参数:设置细菌个体数 N ,维度 n ,精度参数 ε ,迭代次数 m 等。

2) 初始化细菌群体的位置:为了使机组的初始出力均满足上述约束条件,采取式(19)和式(20)的方法对细菌的位置进行初始化。

$$P_g^0 = P_{g,\min} + \mu_g (P_{g,\max} - P_{g,\min}) \quad (19)$$

随机生成一个 $[0,1]$ 之间的数 α ,若 $\alpha < 0.5$,则抽水蓄能处于发电状态,否则,处于抽水状态。

$$P_h^0 = P_{h,\min} + \mu_h (P_{h,\max} - P_{h,\min}), \alpha < 0.5$$

$$P_p^0 = P_{p,\min} + \mu_p (P_{p,\max} - P_{p,\min}), \alpha \geq 0.5 \quad (20)$$

μ_g 、 μ_h 、 μ_p 均是 $[0,1]$ 之间的随机数。

3) 在满足上述的各种约束条件下,选择较合理的调度方案。并计算每个细菌的适应度。

4) 细菌位置的更新:确定第 i 个细菌 $m+1$ 代的待选位置以及计算相应的适应度值。

若 $P_{gm}^t > P_{g,\max}$,则 $P_{gm}^t = P_{g,\max}$

若 $0 < P_{gm}^t < P_{g,\min}$,则随机取 $P_{gm}^t = P_{g,\min}$ 或 $P_{gm}^t = 0$ 。

P_{gm}^t 代表火电机组 g 在 m 次迭代中 t 时段的出力,同理,抽水蓄能的出力或抽水功率时,其取值方式与机组出力取值方式相同。

5) 判断连续 m 步目标函数值之差是否小于10倍精度,若是,则进行混沌搜索,以当前点为中心进行全局混沌搜索,寻找新的位置和目标函数值,如果找到最优值,则更新并记录最优值,如果未找到,判断是否达到移动步数,如果达到了,就更新并记录最优值,否则,重新进行混沌搜索;如果大于10倍精度值,则更新并记录最优值。

6) 判断是否达到最终精度,若是,则结束,反之,更新参数,重复上述步骤。

表 1 火电机组参数

机组	1	2	3	4	5	6
有功下限/p. u.	0.5	0.25	0.25	0.2	0.1	0.1
有功上限/p. u.	2	1	0.6	0.8	0.4	0.4
ag/(\$ /h)	786.798 8	945.633 2	1 049.997 7	1 243.531 1	1 658.569 6	1 356.659 2
bg/(\$ /MW·h)	38.539 7	46.159 1	40.396 5	38.305 5	36.327 8	38.270 4
cg/(\$ /(MW) ² ·h)	0.154 2	0.105 8	0.028	0.035 4	0.021 1	0.017 9
dg/(\$ /h)	450	600	320	260	280	210
eg/(rad/MW)	0.041	0.036	0.028	0.052	0.063	0.048
DRg/(p. u. /h)	-0.5	-0.3	-0.15	-0.2	-0.15	-0.15
URg/(p. u. /h)	0.5	0.3	0.15	0.2	0.15	0.15

时前调度模型是根据超短期的风电预测、日前抽水蓄能的计划出力和日前火电机组的出力来修正抽水蓄能和火电机组的出力,修正步骤如下。

- 1) 判断超短期风电预测与日前预测结果的误差,让抽水蓄能和火电机组来承担这部分波动。
- 2) 在原来抽水蓄能出力的基础上,修正抽水蓄能的出力,原则是在满足抽水蓄能机组约束条件的情况下,改变抽水蓄能的出力,使得净负荷波动尽量小。
- 3) 应用改进的细菌群体趋药性算法求解时前调度模型的最优解,得到火电机组的时前计划出力。

3 算例分析

以某个地区的风电、抽水蓄能、火电机组联合调度为例来验证所提出的模型和算法的正确性。该地区配有容量为 30 MW 的风电场^[4],6 台火电机组,具体的参数如表 1 所示^[5]。抽水蓄能机组的额定抽发容量为 40 MW,其利用效率为 0.9。抽水蓄能机组的抽水费用取 0.075 元/kWh,弃风的惩罚费用取 0.05 元/kWh,对火电机组出力波动的惩罚费用取 0.03 元/kWh。假设售电价格是随时间变化的,变化情况如图 1 中所示。

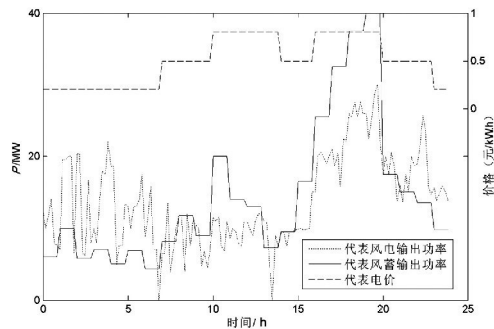


图 1 风功率预测和风蓄日前计划出力的对比

基于所建立的数学模型,应用改进的细菌群体趋药性算法进行模型求解,利用 Matlab 编写算法程序,求解出日前机组计划出力和时前机组计划出力,所获经济收益为 9.213×10^6 元。这里的细菌个数为 100,最大迭代次数为 100 次。图 2 给出了算法与传统的 BCC 算法进行比较,其收敛速度明显优于传统的算法。

图 1 给出了风-蓄联合出力和风电输出功率的对比,从图中可以看出,由于风速的随机性导致风电输出功率波动比较大,而风-蓄联合系统的输出功率明显比风电输出功率的波动小,有效降低了风电功率波动性,增加了风电并网对系统的安全性,由于风-蓄日前计划出力又考虑了售电价格的变化等因素,因此在前几个小时售电价格比较低时,抽水蓄能处于抽水状态,将多余的风电存储起来在售电价格高时售电以获得更高的经济效益。日前调度阶段火电机组的出力情况见表 2 所示,其功率的基准值为 100 MW。

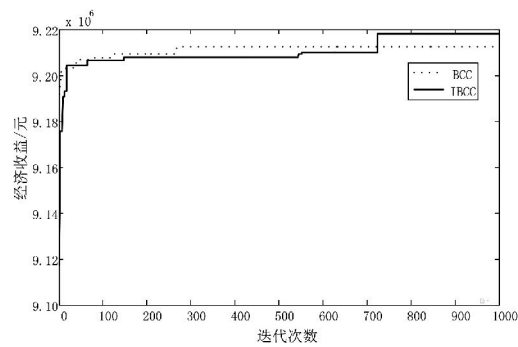


图 2 改进 BCC 与 BCC 算法的收敛图

图 3 给出了日前计划出力和时前计划出力的对比,从中可以看出,在某些时段,特别是 19 点至 20 点时间段内,风-蓄时前计划出力满足不了日前计划出力,主要有两方面的原因,一是提前几小时的风

电预测精度比提前一天的预测高;二是抽水蓄能的容量有限,不能补偿风电的不足,从而达不到日前计划出力的要求。

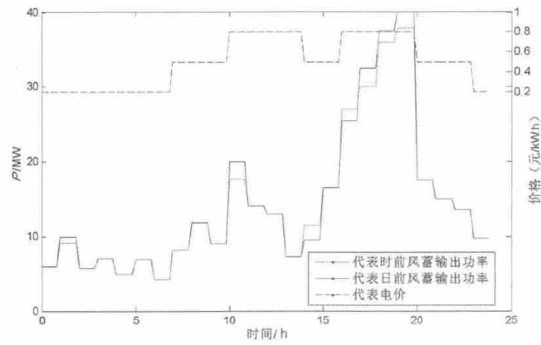


图 3 风蓄联合系统日前计划出力与时前计划出力
表 2 日前火电机组计划出力

时段	火电机组输出功率					
	G1	G2	G3	G4	G5	G6
1	0.631	0.552	0.183	0.318	0	0
2	0.652	0.531	0.214	0.204	0	0
3	0.582	0.431	0.221	0.270	0	0
4	0.523	0.482	0.176	0.290	0	0
5	0.523	0.482	0.176	0.290	0	0
6	0.652	0.521	0.168	0.206	0	0
7	0.932	0.428	0.241	0.292	0	0
8	0.998	0.581	0.301	0.345	0	0
9	1.203	0.475	0.242	0.384	0.198	0
10	1.346	0.394	0.211	0.231	0.204	0.117
11	1.396	0.349	0.287	0.225	0.152	0.123
12	1.358	0.365	0.223	0.252	0.157	0.144
13	1.116	0.451	0.275	0.354	0.189	0.112
14	1.168	0.431	0.241	0.275	0.192	0.159
15	1.352	0.326	0.182	0.214	0.151	0.208
16	1.349	0.382	0.185	0.210	0.145	0.183
17	1.431	0.397	0.231	0.258	0.157	0.114
18	1.452	0.457	0.254	0.241	0.168	0
19	1.467	0.515	0.236	0.253	0.172	0
20	1.254	0.482	0.187	0.264	0.137	0
21	1.223	0.532	0.204	0.346	0.124	0
22	1.115	0.502	0.216	0.210	0.122	0
23	1.073	0.325	0.196	0.202	0.107	0
24	0.786	0.332	0.261	0.218	0	0

图 4 给出了时前调度阶段风-蓄联合系统的时前计划出力和实际出力的对比,从图中可以看出风-蓄联合系统计划出力和实际出力基本一致,这主要是因为时前风电预测的精度有所提高,风电出力的波动

基本可以用抽水蓄能来满足计划出力。由于限制了抽水蓄能机组的出力和上下库水的容量,某些点不能满足时前计划出力。时前火电机组计划出力见表 2 所示,其功率的基准值为 100 MW。对比日前火电机组计划(表 2)出力和时前火电机组计划出力(表 3)可以看出,火电机组出力波动比较小,这主要是在时前调度模型中,惩罚了火电机组的出力波动。

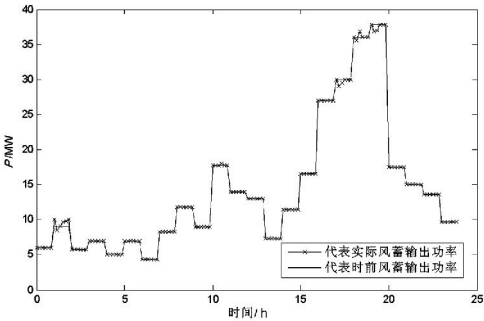


图 4 时前风蓄计划出力与实际出力的对比
表 3 时前火电机组计划出力

时段	火电机组输出功率					
	G1	G2	G3	G4	G5	G6
1	0.631	0.552	0.183	0.318	0	0
2	0.652	0.529	0.213	0.204	0	0
3	0.583	0.431	0.221	0.270	0	0
4	0.541	0.482	0.176	0.290	0	0
5	0.537	0.482	0.176	0.290	0	0
6	0.652	0.521	0.168	0.206	0	0
7	0.932	0.431	0.247	0.295	0	0
8	0.998	0.581	0.301	0.343	0	0
9	1.205	0.478	0.244	0.385	0.198	0
10	1.346	0.394	0.211	0.229	0.204	0.117
11	1.394	0.349	0.287	0.225	0.152	0.123
12	1.358	0.365	0.225	0.255	0.157	0.144
13	1.116	0.451	0.275	0.354	0.189	0.112
14	1.168	0.434	0.242	0.275	0.192	0.159
15	1.355	0.326	0.184	0.214	0.151	0.208
16	1.346	0.380	0.184	0.210	0.145	0.183
17	1.433	0.404	0.237	0.260	0.157	0.114
18	1.452	0.457	0.254	0.241	0.168	0
19	1.467	0.515	0.258	0.258	0.172	0
20	1.277	0.482	0.187	0.264	0.137	0
21	1.229	0.532	0.204	0.346	0.124	0
22	1.117	0.502	0.216	0.210	0.122	0
23	1.080	0.325	0.196	0.202	0.107	0
24	0.792	0.332	0.261	0.218	0	0

4 结 论

建立了风-蓄-火的联合调度模型,应用改进的细菌群体趋药性算法对模型进行优化求解,制定了日前调度计划和时前调度计划,为风-蓄-火联合运行系统的调度提供了有效的参考信息。具体内容如下。

1) 针对日前调度阶段,建立以经济效益最大为目标的模型,最后提供了提前一天每小时机组的计划出力,时前调度阶段,建立了以火电机组运行成本最低为目标的模型,提供了提前几小时机组的计划出力。

2) 仿真结果表明,时前对风电功率的预测精度更加精确,可对机组进行比较准确的调度。

参考文献

- [1] 卢锦玲,苗雨阳,张成相,等. 基于改进多目标粒子群算法的含风电场电力系统优化调度[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(17):25-31.
- [2] 杨媛媛,杨京燕,夏天,等. 基于改进差分进化算法的风电并网系统多目标动态经济调度[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(23):24-29.
- [3] 张鹏,刘继春,吕林,等. 基于风蓄协调的节能调度方法[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(2):29-24.
- [4] 胡国伟,别朝红,王锡凡. 考虑运行可靠性的含风电电力系统优化调度[J]. 电工技术学报,2013,28(5):58-65.
- [5] Lou Suhua, Wang Zhilei, Wu Yaowu, et al. Coordinated Economic Dispatch for Power System with Significant Wind Power Generation Based on Chance-constrained Programming[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(10): 337-345.

=====

(上接第21页)

成相应的铝合金时,可以大幅提升金属铝的发热、耐热性能^[1],以满足更高的负荷电流并提升材料的耐热性能。

(3) 经对发热检修处理的经验,对故障引流部件电流进行分流或加装辅助引流线,也能有效解决发热缺陷,达到降低引流板温度的目的。

参考文献

- [1] 北京电力工业局. 电力设备过电压保护设计技术规程 SDJ7-76: 试行修订说明[M]. 北京: 水利电力出版社, 1977.
- [2] DL/T 71-2001, 架空送电线路运行规程[J].

- [6] 郑晓,张静,马韬韬,等. 基于改进决策方法的电力系统多目标优化调度[J]. 电工技术学报, 2010(9): 151-156.
- [7] 胡泽春,丁华杰,孔涛. 风电-抽水蓄能联合日运行优化调度模型[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(2): 36-41.
- [8] Abreu L V L, Khodayar M E, Shahidehpour M, et al. Risk-constrained coordination of Cascaded Hydro Units With Variable Wind Power Generation[J]. Sustainable Energy, IEEE Transactions on, 2012, 3(3): 359-368.
- [9] 王洪涛,何成明,房光华,等. 计及风电预测误差带的调度计划渐进优化模型[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 131-135.
- [10] 刘静,罗先觉. 处理梯级水电站复杂约束的短期水火电系统环境经济优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(014): 27-35.
- [11] 陈继明,王元元,高艳亮. 基于改进细菌群体趋药性算法的配电网无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(14): 98-102.
- [12] 黄伟,张建华,张聪,等. 基于细菌群体趋药性算法的电力系统无功优化[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(7): 29-33.
- [13] 李秀卿,孙守鑫,张超,等. 基于改进细菌群体趋药性算法的无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(8): 56-59.
- [14] Dicorato M, Forte G, Pisani M, et al. Planning and Operating Combined Wind-storage System in Electricity Market[J]. Sustainable Energy, IEEE Transactions on, 2012, 3(2): 209-217.
- [15] 孙元章,吴俊,李国杰,等. 基于风速预测和随机规划的含风电场电力系统动态经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(4): 41-47.

作者简介:

付伟(1981),工程师,研究方向为电网规划。

(收稿日期:2014-10-14)

- [6] Holm R. Electrical Contacts[M]. New York: Springer, 1979.
- [7] 葛猛,姜大宇,梁之林. 架空地线耐张线夹过热原因分析[J]. 电力安全技术, 2005, 7(4): 17, 22.
- [8] 郭晓飞,李拥春,赵元林. 耐张引流发热的分析与处理[J]. 电气技术, 2010(8): 136-139.
- [9] 孟波. 电气静态接触发热的原因及处理方法[J]. 电气开关, 2008, 46(4): 58-59.
- [10] 李雪. 耐热导线耐张线夹发热问题解决方案研究[J]. 保定: 华北电力大学, 2010.

作者简介:

敬兴东(1989),硕士,研究方向为电气工程。

(收稿时间:2014-09-22)

新疆电网区域稳控系统标准化讨论

负 剑¹, 常喜强², 阿地利·巴拉提¹, 梁 静¹

(1. 新疆电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011;

2. 新疆电力公司调度控制中心, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘 要: 安全稳定控制系统(以下简称“稳控系统”)作为电力系统安全稳定运行的第二、三道防线,其地位和作用日益重要。随着新疆电网规模的不断扩大,新疆电网安全稳定控制装置(以下简称“稳控装置”)的配置已超过全国其他省份,位居第一,稳控装置的配置越来越广泛,随之产生的诸多问题也日益突显:装置类型、型号众多造成专业管理和运行管理难度大,装置控制逻辑和功能复杂,缺乏统一明确的要求等等。主要结合新疆电网区域稳控系统的特点,通过分析稳控系统及应用情况和存在问题,从稳控装置的设计、单体调试、联合调试、区域稳控系统的策略编制、后台管理、运行管理6个方面讨论新疆电网区域稳控系统标准化工作。

关键词: 新疆电网; 安全稳定控制; 标准化

Abstract: As the second and third defense line of power grid, the security and stability control system becomes more and more important in daily grid production. With the development of Xinjiang power grid, the allocation of security and stability control devices has become more and more widely and its number has surpassed the other provinces in China. But the consequent problems also appear: the difficult management of numerous type and model, the complicated programmed logic and functions, and the lack of united and specific requirements etc. Based on its characteristics, practical application and existing problems of security and stability control system and device in Xinjiang, the standardization of the regional security and stability control system is mainly discussed from six parts such as design, individual substation commissioning, joint substation commissioning, control strategy compilation, backstage administration and operation management.

Key words: Xinjiang power grid; security and stability control; standardization

中图分类号: TM74 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2015)01-0077-06

0 引 言

标准化工作是现代社会一项重要的基础工作。电力行业标准化工作规范着电力行业的技术行为,保证电力系统的安全经济运行,推动电力行业技术的进步和发展,并促进技术交流,保护环境,维护市场竞争的公平、公正和有序。

电力系统是一个分布地域广、包含元件多、结构复杂和动态响应快的大系统,系统中某个元件如果发生扰动就可能迅速波及到整个系统。近年来,全球出现过多次大范围停电事故,对国民经济和社会生活带来了极大的影响。目前,新疆电网面临较多严重的安全稳定问题,如远距离大容量输电的稳定问题,长距离弱联系串联系统及高低压等级电磁环网问题,日益严重的系统低频振荡和电压稳定性问

题,厂网分开带来新的系统安全问题及机与网不协调问题等。因此,如何保持电力系统安全稳定运行已受到各有关方面的高度重视。配置稳控装置和系统是提高电力系统稳定性、防范电网稳定事故、防止发生大面积停电事故的有效措施。随着新疆稳控系统规模的日益扩大,积极开展稳控系统的标准化工作,确保稳控系统及应用的安全可靠性,加强和完善稳控系统的建设和运行管理,才能解决新疆电网的安全稳定问题。

1 稳控系统及应用情况的存在问题

与常规的分散式安全自动控制装置不同,稳控系统解决的是一个系统(或区域)内的稳定问题,根据系统的运行方式、故障元件及故障类型做出决策,在多个厂站协调配合,站间实现数据传输及命令传

送。如果稳控系统误动或拒动,均可能引起大规模停电,甚至造成全网失稳,因此须加强完善稳控系统的建设和运行管理。

稳控系统在技术上比较复杂,难度较高,需要计算机、通信、继电保护、系统多个专业的配合才能完成,对于专业管理、调度运行和现场运行维护人员也有较高的要求。目前稳控系统及应用情况和存在问题主要如下。

(1) 稳控系统布点广泛、规模庞大。目前新疆电网已建成覆盖全疆电网的大型区域稳控系统,共计 70 多个厂站,90 多套装置。新疆电网稳控装置配置已超过全国其他省市位居第一,随着新疆电网及电源的建设,稳控系统规模必将进一步扩大。

(2) 稳控装置种类较多、型号复杂。目前国内主要的稳控装置生产厂家和科研单位有 6~7 家,新疆电网区域稳控系统中存在 2 个厂家的装置连接配合,不同厂家装置之间通信连接的正确性及运行维护人员对不同型号装置原理的了解、掌握情况均对稳控系统安全可靠运行有着相当重要的意义。

(3) 稳控系统对通信通道要求高。不同的稳控系统之间需要连接通信,同一稳控系统内控制主站、控制子站、切机切负荷执行站之间的多层连接通信,系统间、装置间的数据传输和命令传送均依赖通信通道的质量好坏和安全可靠运行。

(4) 稳控系统控制策略和功能较为复杂。稳控系统的建设基本上都是各省根据各自系统存在的问题,有针对性地建设稳控系统和制定稳控策略。新疆电网稳控系统主要是解决短路故障、 $N-1$ 故障、部分主变压器或线路跳闸等故障引起的电网稳定破坏或设备过载问题,一般主要采取切机、切负荷或解列等安全稳定控制措施,不同的稳控系统功能配置和采取措施均不相同。

(5) 稳控系统适应性要求高,建设紧迫性强。

稳控系统及装置的功能设置受电网网架结构影响很大,网架结构若有变化就可能需要调整稳控装置功能设置和稳控系统控制策略,特别是对电网结构变化较为频繁的系统要求有较高的适应性。稳控系统作为确保电力系统安全稳定运行的技术手段和措施,建设紧迫性强,但目前稳控系统一般不能完全与一次系统同步建设,即使作为紧急的过渡措施,大都存在滞后建设的情况,因此使得稳控装置生产设计、施工调试的工期很紧,试运行时间较短,且后续完善工作量较大。

(6) 稳控系统可靠性要求非常高。稳控系统装置在该动作时必须正确动作,在该动作时不应动作。该动作时不动作为拒动,不该动作时动作为误动。误动会造成局部系统负荷损失或电厂机组损失,拒动将造成系统稳定破坏、事故扩大甚至系统崩溃,拒动的后果更为严重。

2 稳控系统的标准化工作

稳控系统的标准化工作大体包括规划配置标准化,设计原则标准化,技术要求标准化,控制原则和策略标准化,硬件、软件功能及接口标准化,出厂验收和现场调试标准化和管理制度标准化 7 个部分。具体划分如图 1。

2.1 规划配置标准化

稳控系统的配置原则上满足《电力系统安全稳定控制技术导则》(GB/T 26399-2011)的要求,但由于在具体执行中出现较多问题,需要进一步制订或完善便于操作的规定和标准,明确系统的安全要求和规范稳控系统的配置,做好稳控系统的同步规划、同步设计、同步建设,研究和解决如何协调和加强电力系统安全运行的三道防线建设,综合考虑加强一次系统建设、采取紧急控制措施以及合理配置第三道防线。

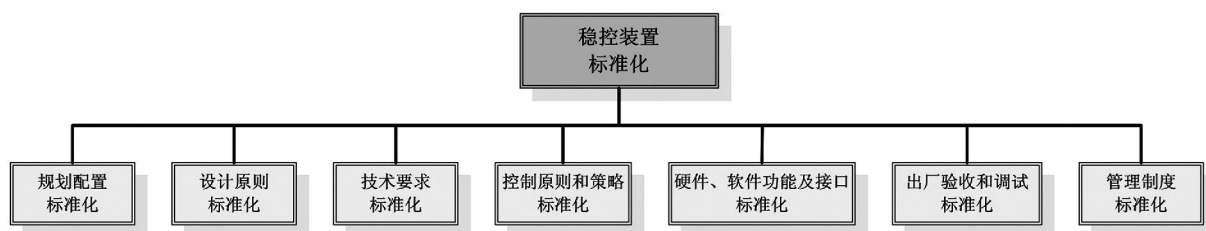


图 1 稳控系统标准化工作框架

稳控系统应以稳控装置不同功能(控制主站、控制子站、执行站)进行分层配置,以其所控制的电力系统自然网架(系统)结构或计算所确定的控制断面为界进行分区,通过装置间的协调动作实现分层、分区控制。随着电力系统的快速发展,对于主网和区域稳定问题严重的电力系统,220 kV 变电站作为主要区域供电电源,建议应按控制子站(或主站)配置,主要实现主网控制功能和区域控制功能;并相应地配置 110 kV 变电站和电厂作为执行站。

2.2 设计原则标准化

稳控系统的设计计算主要在于系统模型(网架)的建立、运行方式的确定、机组出力和负荷水平安排、故障类型(特别是多重复杂故障类型)的选定、故障切除时间的确定等,尤其是对于上述问题观点、看法不一致的时候,不但使计算工作返工多、工作量大,更严重的是可能使设计配置的稳控装置功能烦琐而又不符合系统的实际要求。为此,必须根据《电力系统安全稳定控制技术导则》(GB/T 26399-2011)和《电力系统安全自动装置设计技术规定》(DL/T 5147-2001)进一步明确稳控系统的设计计算校核原则、控制原则和控制措施优化组合等。

稳控系统对通信通道的要求较高,且目前仅有微波通道、光纤通道可供选择;每套稳控系统的通道设计应尽量按两路安全可靠的通道考虑,尽可能采用不同的通道方式或路由。稳控系统的设计接入与厂站的二次设备,如电流互感器和电压互感器、断路器控制回路、继电保护回路等,需要有各种联系回路。为使这些回路互相协调配合,并保证可靠性,应在厂站二次回路规划和设计时予以全面考虑,并应总结经验教训,结合技术要求、有关规定,制订和完善稳控系统装置的设计标准。

2.3 技术要求标准化

稳控系统是维持电力系统稳定运行的一种安全自动装置,且侧重于电力系统的暂态稳定控制。首先应满足可靠性、有效性、选择性和适应性的基本要求,并满足有关入网管理规定和运行规定的具体技术要求。建议根据国内外有关标准和规定,结合现有稳控系统建设和运行中的经验和教训,进一步明确和完善稳控系统的技术要求和技术规范,并推广使用这些经验,提高稳控系统的技术水平。

稳控系统应以实用、可靠、简单、就地和分散为原则,技术方案和功能要求应以有效解决系统运行

的突出问题为重点,尽量避免不必要的复杂化。

采用复杂的集中式区域稳控系统,研制周期长、环节多、控制功能复杂、整定计算复杂,过多依赖通信通道和站间数据传送,往往增加了实现难度和装置出错概率,降低了对网架变化的适应性,并且使得运行管理工作复杂,现场运行维护人员难以掌握和熟悉稳控系统的动作特性和条件。

2.4 控制原则和策略标准化

控制原则应根据《电力系统安全稳定导则》(DL 755-2001)的要求,结合系统的实际情况,校核系统在发生不同故障情况下的稳定水平,并给出相应的控制措施。

对同一系统,在不同接线方式和潮流方式下抵御扰动故障的能力是不同的,控制原则和策略的内容也应根据不同稳定水平而区分对待。对于正常接线方式和正常潮流方式,应校核系统发生第Ⅱ级(单一严重故障)和第Ⅲ级(多重故障)扰动下的稳定水平;对于正常接线方式和极限潮流方式,为提高系统特殊情况下的输送能力,应校核系统发生第Ⅰ级(单一轻微故障)和第Ⅱ级(单一严重故障)扰动下的稳定水平;对于检修接线方式,断面至少有一个元件在停运状态,一般情况下该断面的稳定功率传输极限明显减少,应校核系统发生第Ⅰ级(单一轻微故障)和第Ⅱ级(单一严重故障)扰动下的稳定水平。

稳控系统的控制策略主要是解决主网严重故障、部分主变压器跳闸等第Ⅱ级严重故障情况下引起的系统稳定破坏或设备过载问题,通过采取切机、切负荷或解列等控制措施,避免主网失稳、瓦解和大面积停电事故以及重大设备损坏事故的发生,实现电力系统的第二道防线。控制策略和控制措施应尽量简化和优化,减少对通道的依赖,优先采取切机、切负荷措施,其次是解列,采取的稳定控制措施应能兼顾事故后的运行方式,且任何单一稳控装置发生误动不会导致重大电网事故发生。

2.5 硬件、软件功能及接口标准化

稳控装置的一个突出问题就是很难定型,不同的电网、不同的厂站要求均不同。为了适应不同电力系统的要求及其可能出现的变化,以及缩短稳控装置开发生产周期,目前国内主要稳控装置生产厂家大都实现了硬件和软件功能的标准化和模块化,通过采用有长期运行经验、成熟的采样与计算模块、方式识别和故障判据、控制策略表编制软件以及成

熟的通信技术,可以快速灵活地组成合乎要求的装置和系统,同时也保证了产品的质量和性能。远方信号传送设备和通信通道仍是稳控系统中较薄弱的环节,还需进一步加强和完善,提高硬件质量和防误性能。同时,应加强软件逻辑功能编写标准化和模块化,加强具有一定通用性判据的测试研究和适应性分析,研究解决目前存在于策略可修改性、可扩展性和软件稳定性方面的问题,完善装置防误程序的标准化,完善装置调试和策略检查的应用软件标准化,加强装置与外部联系、不同厂家装置接口程序的标准化等。

2.6 出厂验收和现场调试标准化

稳控系统及装置的出厂验收和现场调试是检查稳控系统(装置)之间命令传递和数据传递正确性的不可缺少的重要环节,是为了及时发现和解决稳控装置可能存在的问题并最终验证整个稳控系统的安全性、可靠性和正确性,其中包括稳控装置软硬件、逻辑控制功能的安全性、可靠性和正确性,重点是策略表执行的正确性,防误措施的安全性,以及各站间数据和命令传输的可靠性、正确性。稳控系统一般都含启动装置和控制措施两部分,启动装置已基本实现模块化和标准化,是定型化产品;而控制措施则需要根据不同电力系统现有条件和控制要求加以利用或专门配置,随电网结构和控制标准而不同。

因此,必须做好稳控系统及装置的出厂验收和现场调试工作的规范化和标准化,根据设备硬件性能、软件逻辑功能、控制策略要求和防误要求等具体要求,编制和完善规范的出厂验收方案和现场调试方案,细化测试内容和要求,及时解决稳控系统及装置可能存在的问题,严格把好设备验收关。

2.7 管理制度标准化

稳控系统技术是一项复杂的、跨专业的综合技术,随着稳控系统在电力系统的大规模应用和系统安全稳定对其依赖性增强,必须重视管理制度标准化,及时完善安稳入网管理规定、稳控系统运行管理规定等,加强管理规定的宣传和执行力度。

1) 完善和规范稳控系统装置的开发生产,提高质量和性能,确保硬件、软件及外部设备的可靠性;加强现场施工安装和调试工作,做好稳控系统投运管理工作,按规定进行挂网试运行,验证装置的安全可靠性,及时处理装置存在的缺陷和问题。

2) 加强运行管理工作,做好稳控系统装置的运

行定值整定、运行维护管理、反措执行、检验管理、故障处理及动作报告管理等工作,进一步加强运行定值的及时校核和稳控系统的日常运行维护,研究和编制不同类型稳控装置定值的整定标准、管理规范。

3) 做好现场图纸资料和软件版本管理的规范化、标准化,编制和及时完善现场运行规程、完善竣工图纸和技术说明资料,加强现场装置的硬件改造和软件版本更新管理等工作。加强运行管理人员的技术培训,使其掌握和熟悉稳控系统装置的功能原理、异常处理和日常投退操作,提高运行管理水平。

3 新疆区域稳控系统标准化工作思路

根据新疆电网及新疆区域稳控系统的特点,新疆区域稳控系统标准化工作大体包括稳控装置设计规范、稳控装置调试规范、区域稳控系统管理制度规范和区域稳控系统策略制定规范等几个不同方面的规范,而稳控装置调试规范可细分为稳控装置单体调试规范和联合调试规范,区域稳控系统管理制度规范可细分为区域稳控系统运行管理规范和后台建设管理规范,具体如图2所示。推行稳控装置和区域稳控系统一系列的标准化工作,对于提升电网稳定控制技术水平,提高稳控系统可靠性,规范稳控装置及区域稳控系统调试验收流程,方便区域稳控系统日常运行维护,有着非常重要的意义,是一项长期而艰巨的基础性工作。

3.1 新疆区域稳控装置设计规范

新疆区域稳控装置设计规范需要满足《电力系统安全稳定控制技术导则》(GB/T 26399-2011)的相关要求,在稳控装置设计中要贯彻国家技术经济政策,保证稳控装置的设计达到安全可靠、技术先进和经济合理等要求,更需要结合新疆电网自身特征、特色,使稳控装置设计做到有章可循,独具一格。

新疆区域稳控装置设计规范可以以《电力系统安全稳定控制技术导则》(GB/T 26399-2011)为蓝本,对新疆区域稳控装置的配置及功能加以规范,做到统一考虑,分层分区,局部电网服从全网,低压电网服从高压电网等原则。稳控系统的配置应向“区域化、小型化”的方向发展,应分散设置稳控装置尤其是重点稳控主站、子站的控制量,以避免单一装置误动引发重大电网事故。

稳控装置的设计规范要根据新疆电网及新疆地

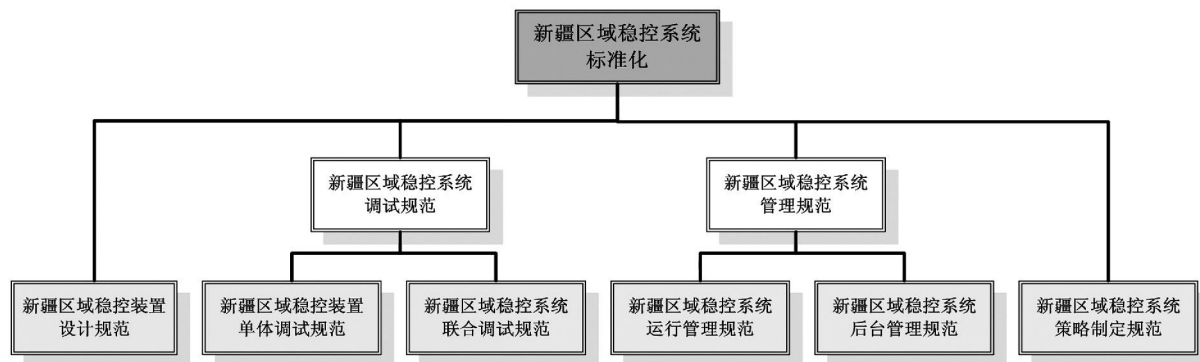


图 2 新疆区域稳控系统标准化工作框架

域特征,可以从屏柜、端子排和压板,稳控装置技术性能指标,外回路,通信接口等不同方面详加说明,既要保证稳控装置的安全可靠性,同时又要兼顾经济性。

3.2 新疆区域稳控装置单体调试规范

稳控装置是保证电力系统安全稳定运行的重要设备,为使稳控装置的现场调试有章可循,安全风险评估和过程控制规范化,试验方法和内容明细化、具体化,保证现场调试工作全过程的安全和质量,同时为了提高现场技术人员的专业素质和技术水平,需要制定现场调试规范,为稳控装置的现场调试提供依据。

稳控装置现场单体调试规范要根据新疆区域稳控装置自身功能及特点,以《电力系统安全稳定控制系统检验规范》(GB/T 22384-2008)为蓝本,可以分为检验分类和周期、调试前应具备条件、稳控装置检验项目、稳控装置本体功能检验 4 个部分,稳控装置检验项目又可以细分为稳控装置开箱前检验、装置外部检验、绝缘耐压检验、逆变电源检验、接入回路检验、直流电源检验等几个项目。稳控装置本体功能检验除装置本身一般性功能外,还需对不同电网的特有功能进行检验。

3.3 新疆区域稳控系统联合调试规范

稳控系统联合调试是建立在稳控装置单体调试完成的基础上,稳控装置联合调试是为了验证稳控装置策略表执行的正确性,稳控装置间通信的正确性和可靠性,装置防误闭锁措施的正确性以及各个系统之间接口的正确性,联合调试是稳控系统正确工作的基础。

联合调试规范需要涉及稳控系统联合调试全过程,可以分为联合调试目的、必备条件和准备工作、组织结构及人员、联合调试试验工作流程、危险点分

析和安全预控措施、试验项目及内容等几个方面。试验项目需根据新疆电网区域稳控系统自身特点以及策略做适当的调整,项目不固定。

3.4 新疆区域稳控系统运行管理规范

新疆电网区域稳控系统是新疆电网安全稳定运行的一项重要保障措施,新疆电网稳控装置配置规模已超过全国其他省市,为适应新疆电网的不断发展,需要进一步加强稳控系统运行管理,提高装置运行维护水平,以确保电网稳定运行。

新疆电网区域稳控系统运行管理规范需要结合新疆电网实际情况,实行统一调度,分级管理,下级调度服从上级调度的原则,明确调管范围,明细责任义务,使稳控系统运行、维护、调管有章可循。

运行管理规范的制定需要对新疆电网区域稳控系统构成及功能加以简述,在此基础上需要明确稳控装置的调管范围和调度命名,然后可以从区域稳控装置运行操作规定、区域稳控系统投运后注意事项、区域稳控系统的运行管理、检修试验相关规定、区域稳控系统异常处理、信息通报制度等几个方面对稳控系统的运行管理加以说明。其中区域稳控装置运行操作规定需要根据新疆电网区域稳控装置特点,从特殊压板投退操作、稳控装置投退操作、旁路代路操作等特殊操作进行详细的说明。

3.5 新疆区域稳控系统后台管理规范

新疆稳控后台是新疆区域稳控系统的特色工作,新疆区域稳控系统后台应以新疆地图为背景,在地图上可直观显示全省安稳装置的分布情况,显示各个厂站图元,能够直接进入各厂站安稳装置的监视界面。应具备全省电网地理接线图、全省稳控系统监视画面、各区域稳控系统监视画面、各厂站安稳装置监视画面、断面潮流管理界面、装置综合数据管

理界面、实施告警界面、录波显示界面、稳控电气量曲线查询界面等。新疆区域稳控系统后台管理规范可以从以上界面入手,逐一对各界面的功能、运行及维护等加以规范。

3.6 新疆区域稳控系统策略制定规范

稳控系统按照离线制定的策略表进行控制,能适应系统方式的变化,通过紧急控制策略,可有效避免大面积停电事故的发生,保障电网的稳定运行,同时一定程度上提高了电网的输送能力。稳控系统策略的正确制定对保障电网稳定运行具有重要意义,社会效益和经济效益十分显著。

新疆区域稳控系统策略表的制定规范需要根据新疆电网运行方式以及电网潮流负荷特征。在策略制定规范中无法做到统一策略,但从运行方式、稳定控制措施、定值制定依据、定值计算方法、增加辅助判据、检修注意事项、方式压板说明、特殊压板说明、切机切负荷原则、切机切负荷范围等方面逐一加以规范,因为电网网架结构的不同,稳控系统策略制定虽无法做到统一策略,但通过相关规范的制定可以使稳控系统策略制定做到有理可依。

4 结 语

标准化工作是一项长期性的、基础性的、艰巨性的工作。一方面,技术标准本身是科技进步的结晶,是科技成果转化成为现实生产力的桥梁;另一方面,从科技发展的历史来看,每一次技术进步都会伴随着标准的更新和升级,而每一次标准的升级又会促进另一次技术进步的孕育和催生。标准化活动从本质上说是一项科技活动,在促进电网技术进步与技术创新方面,标准化工作将发挥越来越重要的作用。

从稳控系统的规划配置、设计原则、技术要求、控制原则和策略、硬件软件功能及接口、出厂验收和现场调试、管理制度等几个方面提出了开展稳控系统标准化工作的讨论。同时,又从新疆区域稳控系统标准设计、单体调试、联合调试、运行管理、后台管理、策略制定6个方面讨论了新疆电网区域稳控系统标准化工作的开展。以期加快稳控系统的建设速度,全面提升新疆电网稳定技术水平。

参考文献

- [1] GB/T 26399-2011,电力系统安全稳定控制技术导则 [S].
- [2] GB/T 50703-2011,电力系统安全自动装置设计规范 [S].
- [3] GB/T 22384-2008,电力系统安全稳定控制系统检验规范 [S].
- [4] DL/T 995-2006,继电保护和电网安全自动装置检验规程 [S].
- [5] DL/T 1092-2008,电力系统安全稳定控制系统通用技术条件 [S].
- [6] 吴烈鑫,吴国丙,张荫群,等. 电网安全稳定控制系统标准化工作探讨 [J]. 南方电网技术研究,2007,3(2): 42-45.
- [7] 常喜强,孙谊嫔,姚秀萍,等. 西北新疆交流联网后新疆电网控制模式变化机理及对策研究 [J]. 四川电力技术,2011,34(5): 50-55.
- [8] 刘武顺. 安全稳定控制系统与攀枝花电网的稳定 [J]. 四川电力技术,2006,29(5): 30-34.
- [9] 常喜强,张娟,黄净,等. 新疆电网采取集中切负荷出现的特殊问题的思考 [J]. 四川电力技术,2010,32(2): 45-48.
- [10] 张玉琼,王新宝,程林,等. 新疆-西北联网后新疆电网稳定特性及应对措施 [J]. 中国电力,2012,45(4): 1-4.
- [11] 雷为民. 电力市场环境下华北电网稳定问题研究 [J]. 现代电力,2004,21(3): 60-64.
- [12] 陈兴华,吴国炳,张荫群,等. 电网安全稳定控制装置标准化设计 [J]. 南方电网技术,2010,4(1): 39-42.
- [13] 宋锦海,李雪明,姬长安,等. 安全稳定控制装置的发展现状及展望 [J]. 电力系统自动化,2005,29(23): 91-96.
- [14] 滕夏晨,王少雄,张靠社. 电力系统稳定控制方法综述 [J]. 电网与清洁能源,2009,25(3): 21-25.

作者简介:

袁 剑(1989),助理工程师,从事继电保护方面的研究;

常喜强(1976),硕士,高级工程师,从事电力系统稳定与控制、电力系统调度运行与控制方面的研究;

阿地利·巴拉提(1973),工程师,从事继电保护方面的研究;

梁 静(1960),高级工程师,从事继电保护方面的研究。

(收稿日期:2014-11-14)

铝合金芯铝绞线载流量简化计算的研究

叶 芳

(天津市电力公司电力科学研究院, 天津 300384)

摘要: 针对铝合金芯铝绞线载流量计算复杂的特点, 提出了一种铝合金芯铝绞线载流量的简化算法。首先研究了计算导线载流量的理论方法, 根据钢芯铝绞线和铝合金芯铝绞线的特点分析两者在载流量计算中的差异, 提出铝合金芯铝绞线载流量的简化算法, 并使用该简化算法计算了某种铝合金芯铝绞线在不同环境温度下的载流量值。然后对该种导线进行载流量试验记录载流量实测值, 对比载流量计算值与实测值, 分析简化算法产生误差的原因。试验结果表明, 该简化算法计算量小且计算精度满足工程要求, 为铝合金芯铝绞线载流量的分析提供参考。

关键词: 铝合金芯铝绞线; 钢芯铝绞线; 载流量; Morgan 公式

Key words: Aiming at the complicated calculation of the current - carrying capacity of aluminum conductor alloy reinforced, a simplified method for calculating its current - carrying capacity is proposed. Firstly, the theoretical method for calculating the current - carrying capacity is studied, and the differences in current - carrying calculation are analyzed according to characteristics of aluminum conductor steel reinforced and aluminum conductor alloy reinforced. Then the simplified calculation method is proposed for the current - carrying capacity of aluminum conductor alloy reinforced, and the carrying - current capacity of an aluminum conductor alloy reinforced in different ambient temperature is calculated by the proposed simplified method. The test values are recorded and compared with the calculated values, and the reasons for the errors of simplified calculation method are analyzed. The test results show that the simplified method has small calculating work and the satisfied calculation accuracy for the engineering, which provides a reference for the current - carrying capacity analysis of aluminum conductor alloy reinforced.

Abstract: aluminum conductor alloy reinforced; aluminum conductor steel - reinforced; current - carrying capacity; Morgan formula

中图分类号: TM714 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2015) 01 - 0083 - 04

0 引言

铝合金芯铝绞线采用 53% IACS 的高强度铝镁硅铝合金替代普通钢芯铝绞线中的钢芯和部分铝线, 导线外部铝线与普通钢芯铝绞线的铝线相同。铝合金芯铝绞线因为具有电阻损耗低、弧垂性能好、无磁滞损耗、过载性能好、机械性能稳定等特点在近年来得到大规模推广运用^[1], 但其载流量计算一直是工程难点。

载流量计算是确定架空线路输送容量的理论基础, 传统计算载流量的方法复杂, 不利于工程实际, 因此一般钢芯铝绞线的载流量是通过试验获得的交直流电阻等参数再根据导线服役的环境参数进行计算, 针对不同型号不同环境温度下的钢芯铝绞线载流量均有参考值, 方便工程应用。但是对于铝合金

芯铝绞线来说, 其载流量计算没有交直流电阻等试验参数和参考载流量表, 而且传统载流量计算方法计算复杂, 因此下面利用导体的稳态热平衡方程和 Morgan 公式^[2]推导铝合金芯铝绞线载流量与钢芯铝绞线载流量的关系, 通过钢芯铝绞线现有的载流量数据计算铝合金芯铝绞线的载流量。

1 导线载流量计算方法

影响导线实际载流量的因素主要有两个方面: 外界环境条件(如风速、环境温度、环境湿度、日照强度等)、导线性能和尺寸(如导线的吸热系数、辐射系数、导线允许温度、导线直径等)。

架空导线载流量的计算是由导线的发热和散热的热平衡推导出来的, 即导线中没有通过电流时, 其温度于周围介质温度相等; 当通过电流时, 其内部产

生的热量一部分使导体本身的温度升高,另一部分散失到周围介质中,他们之间呈动态分配,直至导体发热过渡到稳态^[3]。

导体的稳态热平衡方程如下。

$$P_c + P_r = P_s + I^2 R_T \quad (1)$$

对已知环境温度和给定的导体工作温度下的最大稳态电流 I , 即导体载流量计算公式如式(1)所示,载流量取决于导体类型、电阻、允许最高工作温度和环境参数(如环境温度等)^[4]。

$$I = \sqrt{\frac{P_r + P_c - P_s}{R_T}} \quad (2)$$

式中, P_r 为辐射热损耗, W/m; P_c 为对流散热损耗, W/m; P_s 为太阳辐射热, W/m; R_T 为工作温度下的导体单位长度交流电阻, Ω/m 。

(1) 辐射热参数的计算

导体表面向周围空间辐射热损耗由式(3)计算。

$$P_r = s \times \pi \times D \times k_e (T_c^4 - T_o^4) \quad (3)$$

由于自然风的存在,强迫对流散发出的热损耗由式(4)可知。

$$P_c = \lambda \times N_u \times D \times \pi (T_c - T_o) \quad (4)$$

导体吸收的太阳辐射热由式(5)计算。

$$P_s = \lambda \cdot D \cdot S_i \quad (5)$$

(2) 交流电阻的计算

交流电阻 R_l 总是以直流电阻 R_d 乘以交直流电阻比 β 表示,即

$$R_l = \beta \cdot R_d \quad (6)$$

①直流电阻: 计算直流电阻时忽略铝合金芯和钢芯的导电性,则铝导体 20℃ 的直流电阻计算式如式(7)。

$$R_{20} = \frac{4\rho_{20} \cdot \lambda_{am}}{\pi \cdot d^2 \cdot N} \quad (7)$$

工作温度下导体的直流电阻如式(8)所示。

$$R_d = R_{20} \cdot [1 + \alpha \cdot (T_c - 20)] \quad (8)$$

式中, d 为铝单线直径, mm; ρ_{20} 为铝单线的电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$; N 为铝线总根数; α 为温度系数, $1/^\circ\text{C}$; λ_{am} 为铝线平均绞入率,按各层铝线平均节距比计算。

②交直流电阻比: 直流电阻与其总增量(由涡流和磁滞损耗引起的电阻增量和由集肤效应引起的电阻增量之和)之和相对于直流电阻之比率即交直流电阻比,采用 Morgan 公式计算,如式(9)所示。

$$\beta = 1 + \frac{\Delta R_1}{R_d} + \frac{\Delta R_2}{R_d} \quad (9)$$

式中, ΔR_1 是涡流和磁滞引起的电阻增量,由式(10)计算^[5]。

$$\Delta R_1 = \frac{8\pi^2 a \cdot f \left(\sum_{m=1}^m \frac{n_m}{l_m} \right)^2 \times 10^{-7}}{N^2} \cdot \mu \cdot \tan \delta \quad (10)$$

式中, a 为钢芯截面, mm^2 ; m 为铝线层数; n_m 为第 m 层铝线根数; l_m 为第 m 层铝线节距长, mm; N 为导线中铝线总根数; μ 为钢芯复合导磁率; $\tan \delta$ 为磁损耗角正切。

ΔR_2 是集肤和邻近效应引起的电阻增量。由于导线的集肤效应,将铝合金芯和钢芯导电性近似为零,集肤和邻近效应引起的相对电阻增量由式(11)计算。

$$\frac{\Delta R_2}{R_d} = Y_s \cdot (1 - \phi)^{-1/2} - 1 \quad (11)$$

式中, Y_s 为由集肤效应引起的相对电阻增量,见式(12)。

$$Y_s = 1 + a(z) \cdot \left[1 - \frac{\beta}{2} - \beta^2 b(z) \right] \quad (12)$$

ϕ 为由邻近效应引起的相对电阻增量,如式(13)~式(21)所示。

$$\phi = \lambda \cdot \gamma^2 \left[\frac{z^2 (2 - \beta)^2}{z^2 (2 - \beta)^2 + 16\beta^2} \right] \quad (13)$$

$$\lambda = 1 - \beta \left(1 + \frac{z^2}{4} \right)^{-1/4} + \frac{10\beta^2}{20 + z^2} \quad (14)$$

$$a(z) = \frac{7z^2}{(315 + 3z^2)} \quad (0 < z < 5) \quad (15)$$

$$b(z) = \frac{56}{(211 + z^2)} \quad (0 < z < 5) \quad (16)$$

$$z = 8\pi^2 \left[\frac{D - d_s}{2} \right]^2 f \cdot r \quad (17)$$

$$\beta = \frac{(D - d_s)}{D} \quad (18)$$

$$\gamma = \frac{D}{s} \quad (19)$$

$$r = \frac{1}{(A \cdot R \times 10^9)} \quad (20)$$

$$A = \pi \frac{D^2 - d_s^2}{4} \quad (21)$$

其中, D 为导线直径, mm; d_s 为铝合金芯或钢芯直径, mm; s 为导线之间距离, mm。

表 1 导线主要技术参数对比

导线型号	外径 D/mm	铝单线直径 $/\text{mm}$	铝线总根数	各层铝线 平均节径比	铝合金芯、钢芯直径 $/\text{mm}$
铝合金芯铝绞线 JL/LHA1 - 465/210 - 42/19	33.75	3.75	2	12.1	16.15
铝合金芯铝绞线 JL/G1A - 450/60 - 54/7	29.3	3.26	4	16.5	9.77

2 铝合金芯铝绞线载流量的简化计算

导线载流量计算方法复杂,在工程中不利于操作,但钢芯铝绞线载流量计算已经很成熟,针对不同截面、不同工作温度的钢芯铝绞线均有载流量表作为参考。下面从载流量计算方法上寻找铝合金芯铝绞线与钢芯铝绞线的差别,以期通过钢芯铝绞线载流量推算出铝合金芯铝绞线载流量数值。以铝合金芯铝绞线 JL/LHA1 - 465/210 - 42/19 和钢芯铝绞线 JL/G1A - 450/60 - 54/7 为例进行计算,先将两种导线主要计算参数列于表 1。

由公式(3)~公式(5)可以看出,热损耗部分与导体直径和环境参数有关,相同环境条件下的铝合金芯铝绞线与钢芯铝绞线环境参数均相同,因此,根据公式(3)~公式(5)可知,两者的辐射热参数之比即两者外径比如下。

$$\frac{P_{LH}}{P_G} = \frac{D_{LH}}{D_G} \quad (22)$$

$$\text{即 } P_{LH} = 1.152P_G \quad (23)$$

根据公式(7)、公式(8)可知,铝合金芯铝绞线 JL/LHA1 - 465/210 - 42/19 和钢芯铝绞线 JL/G1A - 450/60 - 54/7 的直流电阻比为

$$\frac{R_{dLH}}{R_{dG}} = \frac{\lambda_{amLH}}{d_{LH}^2 N_{LH}} \cdot \frac{d_G^2 N_G}{\lambda_{amG}} \quad (24)$$

$$\text{即 } R_{dLH} = 0.73R_{dG} \quad (25)$$

铝合金芯铝绞线是铝基体材质^[8],可避免由于涡流、磁滞损耗带来的电能损失,因此铝合金芯铝绞线 JL/LHA1 - 465/210 - 42/19 无涡流和磁滞引起的电阻增量 ΔR_1 。

由于铝合金芯铝绞线 JL/LHA1 - 465/210 - 42/19 和钢芯铝绞线 JL/G1A - 450/60 - 54/7 的导线间距离 S 相差不大可以忽略,仅将导线直径 D 、铝合金芯或钢芯直径代入公式(17)~公式(21)进行计算,得到以下数据。

$$A_{LH} = 1.151A_G \quad (26)$$

$$r_{LH} = 0.754r_G \quad (27)$$

$$y_{LH} = 1.152y_G \quad (28)$$

$$\beta_{LH} = 0.782\beta_G \quad (29)$$

$$z_{LH} = 0.6125z_G \quad (30)$$

将上述结论代入公式(12)~公式(16),将非线性部分进行线性拟合,推导出集肤和邻近效应引起的电阻增量,得出铝合金芯铝绞线和钢芯铝绞线交流电阻比的关系: $\beta_{LH} = 0.782\beta_G$,进而算出两导线交流电阻比的关系如下。

$$R_{TLH} = 0.571R_{TG} \quad (31)$$

将式(23)、式(31)代入公式(2)中,得到

$$I_{LH} = 1.42I_G \quad (32)$$

因为钢芯铝绞线 JL/G1A - 450/60 - 54/7 载流量已知,从而铝合金芯铝绞线 JL/LHA1 - 465/210 - 42/19 载流量可由钢芯铝绞线 JL/G1A - 450/60 - 54/7 载流量和式(32)计算出,计算结果如表 2 所示。

表 2 铝合金芯铝绞线 JL/LHA1 - 465/210 - 42/19
载流量计算结果

导线型号	工作温度 $/^{\circ}\text{C}$			
	60	70	80	90
铝合金芯铝绞线 JL/LHA1 - 465/210 - 42/19	552	869	1 083	1 250
钢芯铝绞线 JL/G1A - 450/60 - 54/7	389	612	763	880

3 实验验证

对铝合金芯铝绞线 JL/LHA1 - 465/210 - 42/19 进行试验,测量其载流量值,以此验证表 2 中计算结果。

采用环境参数值为^[7,8]: 风速 $v = 0.5$ (m/s); 日照强度 $S_i = 1\,000$ (W/m²); 吸热系数 $r = 0.45$; 黑体辐射系数 $K_e = 0.45$; 导体温度 θ_c 在 $60^{\circ}\text{C} \sim 90^{\circ}\text{C}$; 环境温度 $\theta_0 = 45^{\circ}\text{C}$ 。

利用实验测得铝合金芯铝绞线 JL/LHA1 - 465/210 - 42/19 的载流量数值列于表 3。

表 3 铝合金芯铝绞线 JL/LHA1-465/210-42/19
载流量试验值结果

导线型号	工作温度 /℃			
	60	70	80	90
铝合金芯铝绞线 JL/LHA1-465/210-42/19	567	879	1 085	1 246

将表 2、表 3 中的数据作对比,如图 1 所示。

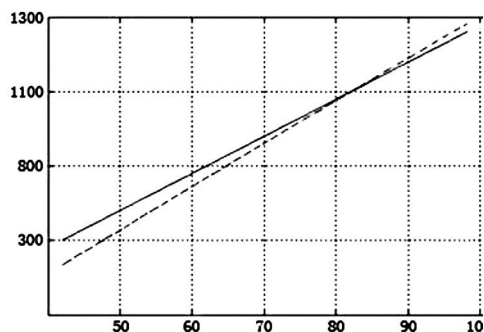


图 1 铝合金芯铝绞线 JL/LHA1-465/210-42/19
载流量计算值与试验值的对比

图 1 中虚线表示铝合金芯铝绞线 JL/LHA1-465/210-42/19 载流量的试验结果,实线表示该导线载流量的计算结果。可以看出,当工作温度高载流量大时,计算结果与试验结果很接近,误差较小,而工作温度较低载流量小时,计算结果与试验结果偏差增大。产生此现象的原因是由于 Morgan 公式不是纯线性公式,而在计算过程中为了简化计算,使相应型号的铝合金芯铝绞线载流量和钢芯铝绞线载流量关系直观明了,利用了线性拟合,因此舍去的非线性部分造成了误差出现。该舍去部分在载流量大时所占比很小,误差不明显,但是随着载流量的减小,误差逐渐增大;但是通过上述结论可知,利用载流量简化计算方法造成的误差最大仅为 2.6%,可以满足工程需要,而且大大缩短了计算时间。

(上接第 46 页)

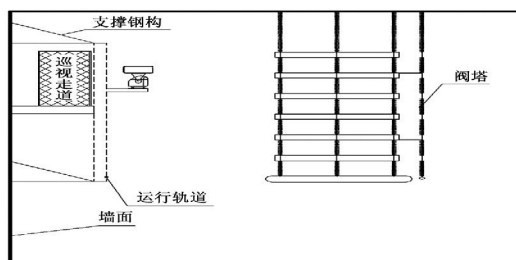


图 5 阀厅轨道式监测仪采集点立面布置

参考文献

- 王志滨,张望平.高压直流输电换流站晶闸管阀冷却系统阀厅温度控制探究[J].2011年中国电机工程学

4 结 论

利用理论公式推导了铝合金芯铝绞线载流量与钢芯铝绞线载流量的关系,通过钢芯铝绞线现有的载流量数据计算出铝合金芯铝绞线的载流量,并通过实际条件下的试验对该方法进行了验证,验证结果表明该简化方法数据可靠,计算简单,可以运用到工程实践中,其计算的快捷有效性保证了在输电线路安全可靠运行条件下最大限度地提高线路的输送容量。

参考文献

- 张瑞永,赵新宇,李明,等.输电线路新型节能导线的推广应用[J].电力建设,2012,33(6):89-92.
- 马国栋.电线电缆载流量[M].北京:中国电力出版社,2003.
- 张辉,韩学山,王艳玲.架空输电线路运行载流量分析[J].电网技术,2008,32(14):31-35.
- 陆鑫森,曾奕,盛戈峰,等.基于导线温度模型的线路动态容量误差分析[J].华东电力,2007,35(12):47-49.
- 韩晓燕,黄新波,赵小惠,等.输电线路摩尔根载流量简化公式的初步研究[J].电力系统及其自动化学报,2009,21(5):92-96.
- 韩晓燕,张虹.架空导线摩尔根载流量简化公式的初步研究[J].河南电力,2010,1:33-49.
- 韩芳,徐青松,侯炜,等.架空导线动态载流量计算方法的应用[J].电力建设,2008,29(1):39-43.
- 林玉章.高压架空输电线路载流量和温度计算[J].南方电网技术,2012,6(4):23-27.

作者简介:

叶芳(1986),助理工程师,硕士研究生,从事线路运行分析及故障研究。

(收稿日期:2014-08-04)

会年会议文集,2011.

- 王晓文,赵宗贵,汤磊.一种新的红外与可见光图像融合评价方法[J].系统工程与电子技术,2012,34(5):871-875.
- 许峰,于春雨,徐放.视频烟雾火灾探测技术研究趋势[J].消防科学与技术,2012,31(11):1185-1188.
- 律方成,戴日俊,金虎,等.特高压输变电系统绝缘子紫外放电数据管理及故障诊断系统设计[J].高压技术,2012,38(2):273-279.

作者简介:

丁志林(1978),工学学士,工程师,从事高压直流输电系统工程与研究;

王超(1976),工学硕士,高级工程师,从事电力系统自动化装备、高压直流输电系统工程与研究。

(收稿日期:2014-11-17)

电网建设工程和技术改造工程计价依据差异化研究

董媛媛¹, 廖磊², 佟如意³

(1. 国网绵阳供电公司, 四川 绵阳 621000; 2. 四川电力设计咨询公司, 四川 成都 610041;

3. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041)

摘要: 通过对电网建设工程与技术改造工程计价依据适用范围和基本情况的阐述, 对其在预算定额和费用计算标准开展差异化分析, 进而探析在执行过程中的计价依据的适用性、科学性和合理性。

关键词: 电网建设; 技术改造; 计价依据; 差异化

Abstract: The application scope and basic situation of pricing basis for power grid construction project and technical transformation project are described, and the differences between budget quota and calculation standards are analyzed. Furthermore, the applicability, scientificity and rationality for the pricing basis in the process of execution are discussed and analyzed.

Key words: power grid construction; technical transformation; pricing basis; differentiation

中图分类号: F407.6 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)01-0087-05

1 现行电网工程计价依据基本情况的差异

现行电网建设工程计价依据——2013版电力建设工程定额和费用计算规定, 是从2014年1月1日起开始执行的。主要包括《电力建设工程预算定额》(2013年版) [1-3]、《电力工程建设预算编制与计算规定》[4]、《电力建设工程概算定额》(2013版), 以及配套的《装置性材料预算价格》和《装置性材料综合预算价格》等主要内容。适用于35~1 000 kV交流输变电(串联补偿)工程、±800 kV及以下直流输电工程、换流站工程, 以及系统通信工程, 并适用于各种投资渠道投资建设的上述范围的新建、扩建和改建工程。

现行电网技术改造工程计价依据——2010版技术改造工程定额和费用计算标准, 是从2010年10月1日起开始执行的。主要包括《电网技术改造工程预算定额》(电气、送电线路、通信、调试) [5-7]、《电网技术改造工程预算编制与计算标准》[8]。适用于全额使用技术改造资金、不改变原有工艺系统规模(容量)等级的电网技术改造工程。同时该计价依据适用于以市场手段确定技术改造施工单位的电网技术改造工程, 由生产运行企业内部班组按照工作指令开展的技术改造工作可参考使用。

电网建设工程计价依据较技术改造工程计价依据包括的内容更全面(电网建设工程具备“概算”定额的内容), 涵盖的专业更齐全(电网建设工程涵盖“建筑”专业)。电网建设工程计价依据中还包括“装材预算价”和“装材综合预算价”的内容, 而电网技术改造工程的主要材料与预算价格则是借用电网建设工程装材价格或市场定价。电网建设工程和技术改造工程计价依据适用的范围差异在于电网建设工程计价依据适用于输变电新建、扩建和改建工程。而技术改造工程计价依据适用于电网生产运营工艺系统技术改造工程, 对于非工艺系统的技术改造工程应按其他相关规定执行。准确界定计价依据的适用范围对不同建设性质的电网工程合理准确定价有重要作用。

2 现行电网工程计价依据价格水平的差异

通过分析电网工程计价依据的价格水平可以从整体上把握社会平均生产力水平, 为更合理地确定工程造价奠定基础。

2013版电力建设工程定额的人工价格水平为: 建筑普工34元/工日、建筑技工48元/工日, 安装普工34元/工日, 安装技工53元/工日, 输电普工34元/工日、输电技工55元/工日, 调试技工工资75

元/工日。2013 版电力建设工程预算定额《电气设备安装工程》分册的子目与概算子目的口径保持一致,即安装定额中包含了单体调试费用。《调试工程》分册只包含分系统调试、整套启动调试、特殊调试项目等,且《调试定额》也按完成规定计量单位子目工程所需人、材、机的消耗量标准计列,并参与各项取费。人工费调差按照最近文件定额 [2004] 1 号文分不同省份或地区、不同专业进行调整。比如:四川省建筑 5.74%、安装 5.2%。材机费调差按照不同省份或地区、不同专业、不同电压等级分别调整。

由于 2010 版技术改造工程定额不够完善,未包括《建筑工程》分册,其人工不分专业,价格水平一律为:普工单价 34 元/工日,技工单价 53 元/工日。人工费调差按照最近文件定额 [2004] 6 号文分不同省份或地区进行调整,比如:四川省 22.98%。材机费调差按照不同省份或地区、不同专业、不同电压等

级分别调整。

2.1 以安装调试一台变压器的安装工程费为例分析价格水平差异

按照四川地区(甘孜、阿坝州除外),安装调试一台 110 kV 三绕组变压器(容量 63 000 kVA)用 2013 版电网建设工程计价依据计算安装工程费 152 831 元,2010 版电网技改工程计价依据计算安装工程费 172 070 元(见表 1)。

经过比较不难看出,安装调试一台 110 kV 三绕组变压器用 2013 版电网工程计价依据和技术改造工程计价依据不论套用的定额,还是费用的组成、取费基数、费率都有很大不同。而用 2013 版电网工程计价依据计算的工程安装费较技改工程计价依据计算的结果下降 12.6%,不计装置性材料工程安装费下降 30.6%。

表 1 安装调试一台 110 kV 三绕组变压器(容量 63 000 kVA)费用比较表

序号	取费项目名称	2013 版电网建设工程计价依据	2010 版电网技改工程计价依据
		YD2-24 110 kV 三绕组变压器安装 (容量 63 000 kVA 以下) YS5-6* 1.2 三相变压器分系统调试 (容量 63 000 kVA 以下) YS6-2* 0.5 变电站试运 110 kV	JD1-24 110 kV 三绕组变压器安装 (容量 63 000 kVA 以下) JS1-6* 1.2 三相变压器单体调试 (容量 63 000 kVA 以下) JS2-6* 1.2 三相变压器分系统调试 (容量 63 000 kVA 以下) JS3-2* 1.2 110 kV 变压器试运
	装置性材料	按 5 t 绝缘油 90 000 元计	按 5 t 绝缘油 90 000 元计
1	直接费	122 206	136 160
1.1	直接工程费	113 031	126 156
1.2	措施费	9 175	10 004
2	间接费	16 178	18 809
2.1	规费	7 715	8 483
2.2	企业管理费	7 742	10 326
2.3	施工企业配合调试费	721	0
3	利润	8 303	2 892
4	编制基准期价差	1 105	8 534
4.1	人工价差	545	2 916
4.2	材机价差	560	5 618
5	税金	5 040	5 674
6	合计	152 831	172 070
	备注:	编制基准期价差执行定额 [2014] 1 号文,税金执行川建造价发 [2011] 123 号文,按工程在县城时 3.41% 计取。	人工价差、材机价差调整执行定额 [2014] 6 号文,税金执行川建造价发 [2011] 123 号文,按工程在县城时 3.41% 计取。

表 2 组立塔高 18 m、塔重 6 t 的 110 kV 输电线路角钢直线塔费用比较表

序号	取费项目名称	2013 版电网建设工程计价依据	2010 版电网技改工程计价依据
	使用定额	YX4-44 角钢塔 塔高 20 m 以内 每米塔重 400 kg 以内	JX4-40 每基重量 7 t 以内
	装置性材料	按 6 t 塔材 48 000 元计	按 6 t 塔材 48 000 元计
1	直接费	53 502	51 231
1.1	直接工程费	50 760	50 555
1.2	措施费	2 742	676
2	间接费	2 395	2 164
2.1	规费	1 212	1 317
2.2	企业管理费	1 054	847
2.3	施工企业配合调试费	128	0
3	利润	2 795	204
4	编制基准期价差	149	595
4.1	人工价差	120	453
4.2	材机价差	29	142
5	税金	2 006	1 848
6	合计	60 847	56 042
备注:	编制基准期价差执行定额 [2014] 1 号文,税金执行川建造价发 [2011] 123 号文,按工程在县城时 3.41% 计取。		人工价差、材机价差调整执行定额 [2014] 6 号文,税金执行川建造价发 [2011] 123 号文,按工程在县城时 3.41% 计取。

2.2 以组立一基铁塔的安装工程费为例分析价格水平差异

按照四川地区(甘孜、阿坝州除外)组立塔高 18 m、塔重 6 t 的 110 kV 输电线路角钢直线塔安装工程费用为例。用 2013 版电网建设工程计价依据计算的安装工程费 60 847 元,2010 版电网技改工程计价依据计算安装工程费 56 042 元(见表 2)。

经过比较,组立一基 110 kV 铁塔用 2013 版电网建设工程计价依据和技术改造工程计价依据不论定额步距、计价单位,还是费用的组成、取费基数、费率都发生了变化。且 2013 版电网建设工程计价依据计算出的输电线路安装工程费价格水平较技术改造工程计价结果要高,增加 8.6%,不计装置性材料增加 59.7%。

由此可以分析出 2013 版电网建设工程计价依据下调了调试定额的基价,而增加了输电线路定额的基价。这主要是由于调试采用先进的试验设备、先进的管理模式等节省了调试人工工日,输电线路安装人工费的增长这两方面原因产生的结果。

但根据四川省统计局 2014 年 5 月 27 日发布的《2013 就业人员年平均工资》报告显示,国有企业就业人员年平均工资为 538 96 元,电力、燃气、水的生产和供应业就业人员年平均工资 58 181 元。按照全年 251 个工作日计算人工工资为:232 元/工日,

企业按照人工工资需缴纳的社会保险费 32.6%、住房公积金 12%、福利费 14%、工会经费 2%、教育经费 2.5%、管理费 3%、税金 3.41% 进行测算,得出工日综合单价为 $232 \times (1 + 32.6\% + 12\% + 14\% + 2\% + 2.5\% + 3\%) \times (1 + 3.41\%) = 398$ 元/工日。根据 2013 版电网建设工程计价依据安装调试一台 110 kV 三绕组变压器(容量 63 000 kVA)消耗的人工工日为 184.39 工日,安装工程费用 = 人工费 + 材料费 + 机械费 = $184.39 \times 398 + 90\,000 + 12\,559 = 175\,945$ 元。此计算结果高出 2013 版电网建设工程计价依据计算结果 15.1%,不计装置性材料高出 36.8%,但接近 2006 版电网建设工程计价依据和技术改造工程计价依据的计算结果。考虑中国近年经济增长速度,CPI 指数上升幅度以及人工成本的逐年递增,调试定额基价下降是否合理还值得进一步探究。

3 现行电网工程计价依据计价方式的差异

以《调试定额》为分析对象,比较电网建设工程和技术改造工程计价依据的差异。

2013 版电力建设工程定额《调试定额》分册包含分系统调试和整套启动调试以及特殊调试项目,其调试费是由各调试子目人、材、机消耗量组成定额

基价,再根据《电力工程建设预算编制与计算规定》计取相应的费用纳入安装工程中确定的。用工类别为调试技术工,单价为75元/工日。较2006版电力建设工程定额,单体调试计入本体部分,分系统调试、整套启动调试、特殊调试项目计入其他费用部分,这一计价方式有重大变化。

2010版技术改造工程定额《调试定额》分册包含单体调试、分系统调试、整套启动调试以及特殊调试项目,其调试费是由各调试子目人、材、机消耗量组成定额基价,再根据《电网技术改造工程预算编制与计算标准》计取相应的费用纳入安装工程中确定的。用工类别为技术工,单价为53元/工日。

经过仔细分析2013版电网建设工程调试定额和2010版技术改造工程调试定额,其主要差异有以下3点:①2013版电力建设工程定额的单体调试项目和内容已包含在相应的安装定额中,《调试定额》不对单体调试独立成章,而是包含在相应的安装定额子目中,这与概算定额的口径一致,有利于进行概预算的造价分析。这也是2013版《调试定额》与2010版《调试定额》最大的差异。②2013版《调试定额》子目中新增了网络报文监视系统调试、智能辅助系统调试、状态检测系统调试、信息一体化平台调试等子目,这些都是基于现今智能化变电站建设应用的新技术、新设备而新增的调试项目。2010版《调试定额》则是基于数字化变电站的改造设置“数字化变电站网络报文监视系统调试”子目。由此可以看出2013版《调试定额》在定额子目的设置上密切结合了电网建设工程技术的快速发展和“三新”的广泛应用,为智能化变电站建设工程合理准确计价提供了必要依据。③2013版《调试定额》中整套启动调试子目“变电站试运”按一期工程配置一台变压器考虑。按“站”计列。扩建变压器或其他高压间隔时,分别乘以相应系数;2010版《调试定额》整套启动调试子目则分别设置“变压器试运”和“高压间隔设备试运”,单位分别是“系统”和“间隔”。“高压间隔设备试运”还分为断路器、TA、TV单独试运,定额乘以系数0.3;二次系统或送配电保护单独试运,定额乘以系数0.6;隔离开关等其他设备单独试运,定额乘以系数0.1。相比之下,2010版《调试定额》整套启动调试子目的设置更加具体、详细。这种定额子目设置上的差异是与电网建设工程和技术改造工程的建设性质和建设内容不同相适应的。

4 现行电网工程计价依据其他费用设置的差异

根据2013版《电力工程建设预算编制与计算规定》和2010版《电网技术改造工程预算编制与计算标准》其他费计算标准分析电网工程计价依据中其他费用项目设置的合理性、计算标准的科学性。

2013版电网建设工程计价依据中其他费用设置为5大类,包括:建设场地征用及清理费、项目建设管理费、项目建设技术服务费、生产准备费、大件运输费。建设场地征用及清理费中的“余物清理费”在2013版《电力工程建设预算编制与计算规定》明确只包含清理发生的费用,不包括拆除费用,拆除费套用2010版《电网拆除工程预算定额》计算。项目建设管理费中增加了“工程结算审核费”,这适应了近年来电网建设结算审核工作中引进工程造价咨询机构这一现象,并为其发生的费用计取提供了必要依据。项目建设技术服务费中的“项目前期工作费”是以建安工程费为取费基数,并分工程专业类别按一定费率计算。而2006版《预规》^[8]中“项目前期工作费”是以勘察费与基本设计费之和为取费基数,并分工程专业类别按一定费率计算。比如:采用2006版电网建设工程计价依据计算的110 kV安雅线改造工程本体费用466万元,项目前期工作费32 736元,若采用2013版电网建设工程计价依据计算项目前期工作费 $=466 \times 3.07\% = 143\ 062$ 元。由此可知这一重大变化,直接导致线路工程的前期工作费剧增。2013版“预规”分系统及整套启动试运费包含在主要生产工作中,施工企业配合调试费包含在间接费中,都计入建安工程费,作为相关其他费用的取费基数。而2006版“预规”将分系统及整套启动试运费、施工企业配合调试费列入其他费用,不再参与取费。

2010版电网技术改造工程计价依据中其他费用设置为5大类,包括:场地清理及赔偿费、新技术应用研究测试费、项目管理费、项目技术服务费、基本预备费。场地清理及赔偿费中的“场地租用及清理费”按照现场实际情况和需要清理的障碍物的数量计算,拆除费用另计。新技术应用研究测试费是根据电网技术改造工程为提高生产性能、增加其稳定性、安全性和可靠性而应用在产品设备上的技术

革新,因而设置的此项费用。项目技术服务费中的前期工作费以建安工程费为取费基数,与 2013 版“预规”中前期工程费取费基数一致,但费率不分专业,统一为 2.75%。

2013 版《预规》其他费用比 2010 版技改《预规》在其他费用的设置上增加生产准备费、大件运输费,但不包括新技术应用研究测试费。这种设置是与两种计价定额适用的工程建设性质相配套的。但 2013 版《预规》将基本预备费从其他费用中独立出来,形成单独的项目。2013 版《预规》项目建设管理费比 2010 版技改《预规》中增加了“工程结算审核费”,这适应了近年来电网工程结算审核工作中引进工程造价咨询机构这一现象,并为其发生的费用计取提供了必要依据。电网技术改造工程在此方面也可借鉴电网建设管理中的先进经验,引入工程造价咨询机构,为技术改造工程合理准确定价提供有力保证。

5 结 语

通过上述分析,归结出电网建设工程和技术改造工程计价依据呈现出以下 3 方面的差异化:①不同时期编制的计价定额造成的价格水平差异;②新技术、新设备、新工艺的运用造成的定额子目差异;

③不同建设性质造成的其他费用计取差异。虽然两种计价依据存在一定程度的差异,但作为电网建设工程计价依据,在分析比较电网建设项目造价水平合理性和科学性等方面仍有其重要的参考价值和值得分析探讨之处。

参考文献

(上接第 28 页)

- [1] 曹晓斌,马御棠,吴广宁,等. 利用地形参数计算超高压输电线路绕击跳闸率[J]. 高电压技术, 2010, 36(5): 1178-1183.
- [2] 何俊佳,姚帅,贺恒鑫,等. 复杂地形下 500 kV 超高压输电线路的绕击耐雷性能[J]. 高电压技术, 2010, 36(8): 1877-1883.
- [3] 姚陈果,王婷婷,杨庆,等. 特高压交流输电线路绕击耐雷性能仿真分析[J]. 高电压技术, 2013, 39(3): 526-533.
- [4] 杜颖. 超(特)高压输电线路耐雷性能计算方法综述[J]. 广东电力, 2010, 23(9): 15-20.
- [5] 郝俊琦,李琳,王平. 基于蒙特卡罗法的超高压输电线路绕击跳闸率的计算[J]. 华北电力大学学报, 2012, 39(5): 35-41.
- [6] 赵立进,袁明仁,谭进,等. 高原山地 500kV 输电线路雷电屏蔽特性试验研究[J]. 高电压技术, 2011, 37(7): 1663-1669.
- [7] 王兰义,赵冬一,胡淑慧,等. 线路避雷器的研究进展[J]. 电瓷避雷器, 2011(1): 26-34.

- [8] 国家能源局. 电力建设工程预算定额(第三册) 电气设备安装工程(2013 年版)[M]. 北京:中国电力出版社,2013.
- [9] 国家能源局. 电力建设工程预算定额(第四册) 输电线路工程(2013 年版)[M]. 北京:中国电力出版社,2013.
- [10] 国家能源局. 电力建设工程预算定额(第五册) 调试工程(2013 年版)[M]. 北京:中国电力出版社,2013.
- [11] 国家能源局. 电网工程建设预算编制与计算规定(2013 年版)[M]. 北京:中国电力出版社,2013.
- [12] 国家能源局. 电力技术改造工程预算定额(第一册) 电气工程(试行)[M]. 北京:中国电力出版社,2010.
- [13] 国家能源局. 电力技术改造工程预算定额(第二册) 送电线路工程(试行)[M]. 北京:中国电力出版社,2010.
- [14] 国家能源局. 电力技术改造工程预算定额(第三册) 调试工程(试行)[M]. 北京:中国电力出版社,2010.
- [15] 国家能源局. 电网技术改造工程预算编制与计算标准(试行)[M]. 北京:中国电力出版社,2010.
- [16] 电力工程造价与定额管理总站. 电网工程建设预算编制与计算标准[M]. 北京:中国电力出版社,2007.

(收稿日期:2014-10-22)

- [17] 马春华. 线路避雷器和绝缘子串的伏秒特性配合问题研究[J]. 高压电器, 2007, 43(1): 68-70.
- [18] 胡中. 500 kV 线路型不带支撑件串联间隙 MOA[J]. 武汉:武汉大学, 2003.
- [19] 张益民,申萌,罗六寿,等. 带外串联间隙线路避雷器续流切断试验探讨[J]. 电瓷避雷器, 2012(6): 91-96.
- [20] 郭清滔,廖福旺,黄海鲲. 220 kV 棉紫线线路避雷器安装方案研究[J]. 电瓷避雷器, 2011(6): 89-95.
- [21] 吴广宁,熊万亮,曹晓斌,等. 输电线路绕击特性的三维分析方法[J]. 高电压技术, 2013, 39(2): 374-382.
- [22] 袁海燕,傅正财,魏本刚,等. 综合考虑风偏、地形和工作电压的特高压交流线路雷电绕击性能[J]. 电工技术学报, 2009, 24(5): 148-153.
- [23] 陈冬,刘建华,贾晨曦. 基于 ATP-EMTP 的耐雷水平研究[J]. 电瓷避雷器, 2011(5): 8-12.
- [24] 马御棠,吴广宁,曹晓斌,等. 微地形下输电线路绕击闪络率的计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(22): 135-141.

(收稿日期:2014-10-14)

330 MW 循环流化床锅炉启动节油优化探讨

丁 芸¹, 王金鑫¹, 彭北松²

(1. 京海煤矸石发电有限责任公司, 内蒙古 京海 016000;

2. 东方锅炉股份有限公司, 四川 德阳 611731)

摘 要: 对 1 177 t/h 循环流化床冷态启动油耗偏高存在的问题进行了分析和探讨, 提出了解决办法, 实践证明是行之有效的。

关键词: 循环流化床; 锅炉; 启动; 节油

Abstract: A higher fuel consumption existing during the cold start-up of 1 177 t/h circulating fluidized bed is analyzed and discussed, the solving methods aiming at this problem are proposed, which is proved to be effective through the practice.

Key words: circulating fluidized bed; boiler; start-up; fuel consumption optimization

中图分类号: TK229.6+6 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)01-0092-03

0 引 言

内蒙古京海煤矸石发电厂 2 × 330 MW 循环流化床直接空冷汽轮发电机组分别于 2010 年 8 月、10 月投产发电, 机组投产以来实现安全稳定运行, 锅炉蒸发量、蒸汽参数、性能指标均能达到设计要求; 在投运的几年时间里, 机组一直存在着启动油耗偏高、锅炉受热面易超温等问题, 对存在的问题进行了原因分析, 并提出解决措施, 取得了明显效果。

1 锅炉简介

锅炉系东方锅炉股份有限公司设计制造的 1 177 t/h 循环流化床锅炉。亚临界参数、单炉膛、一次中间再热自然循环汽包炉、紧身封闭、平衡通风、固态排渣、全钢架悬吊结构。配备 330 MW 亚临界中间再热单轴双缸双排汽、直接空冷汽轮发电机组。锅炉设计参数见表 1 和表 2。

2 启动节油介绍

2.1 机组启动未进行优化时存在的问题

大型循环流化床机组启动过程是一个复杂的不稳定的过程, 自投产以来机组未进行优化时, 冷态启动一次燃油消耗一直维持在 40 ~ 60 t/次; 锅炉升温

升压、汽轮机暖缸、暖机全部需要一定的时间, 检修后的机组冷态启动过程中, 发电机或汽轮机需要做多项试验, 锅炉只能维持在低参数状态下运行, 需要消耗大量燃油; 随着燃油价格不断的上涨, 使得发电企业锅炉启动用油成本越来越高, 为了降低机组启动消耗, 进行了相应优化, 取得了较好的效果。

表 1 锅炉主要参数

主要参数	数据(B - MCR)	数据(BRL)
过热蒸汽流量 (t · h ⁻¹)	1 177	1 120
过热蒸汽压力 /MPa	17.4	17.4
过热蒸汽温度/℃	540	540
给水温度/℃	282.8	279.4
再热蒸汽进/出口温度 /℃	335.5/540	330.1/540
总给煤量/(t · h ⁻¹)	278	266.5

2.2 采取的节油措施

针对启动油耗偏高等问题, 从以下几个方面采取措施完善启动程序。

2.2.1 准备好合适的床料

床料粒径筛分过宽、床料量过多, 都会提高临界流化风量, 增加燃油消耗。床料量过少则会导致点火期间床压因床料的消耗会持续降低, 导致投煤以后床料过少而影响燃烧稳定性, 从而间接会增加油耗, 如果控制不当将导致锅炉结焦的严重后果。所

表 2 设计和校核煤质元素分析

项目	设计煤种	校核煤种一	校核煤种二
元素分析	收到基碳 Car/%	33.11	39.45
	收到基氢 Har/%	2.72	3.09
	收到基氧 Oar/%	7.68	7.90
	收到基氮 Nar/%	0.68	0.51
	全硫 Sar/%	1.20	0.55
收到基灰分 Aar/%	53.51	46.90	36.19
全水分 Mt/%	1.10	1.60	1.0
干燥无灰基挥发分 Vdaf/%	37.57	36.62	31.62
收到基低位发热量 Qnet, ar/(kcal · kg ⁻¹)	2 990	3 636	4 579

以点火前一般将经过筛分,粒径为 0 ~ 3 mm 床料加至床压 5 ~ 5.5 kPa,对应的静止床料在 500 ~ 600 mm 之间,机组点火后再将剩余的床料加入,这样一可节约点火油耗,二可节约部分厂用电量。

2.2.2 准备合适的启动用煤

机组启动前向原煤仓添加挥发分较高的燃煤,这有利于控制燃烧的稳定性,可以有效减少煤、油混燃时间,增加机组启动的安全性,也可节省启动燃油。

2.2.3 优化启动配风

控制好一、二次风量,降低烟风热损失,启动初期维持一次风量略低于临界流化风量,采用微流化状态点火,因热一次风流速低,增加了流体的换热时间,床料可以充分吸收热量,减少热量的损失;下二次风量的开度以维持下二次风管不被堵塞为原则,可以保证床料升温稳定,有效控制启动时间。

2.2.4 优化升温速率及投煤

严格按照升温、升压曲线要求的时间节点进行投煤、切油。点火过程中保证油枪雾化良好,火焰感觉到刺眼,无暗红,无点滴状火焰,喷出火焰必须是柱状形且均匀向前推动;选择好投煤点温度非常关键,投煤点前墙相邻三点床温尽量高,投煤后观察床温和氧量变化,此给煤点正常着火后,投入相邻给煤机,直至其余给煤机的投入;规程规定冷态启动床温变化率为小于 100 ℃/h,因此从点火到投煤的时间约为 4 h 左右,投煤正常后可根据床温上升情况,加煤减油,并结合高低旁路系统维持锅炉输入、输出的热量匹配,待床温稳定达 700 ℃左右可以完全退出油枪。锅炉点火前及停油后的床温测点趋势图见图 1。

2.2.5 优化给煤逻辑,均匀给煤

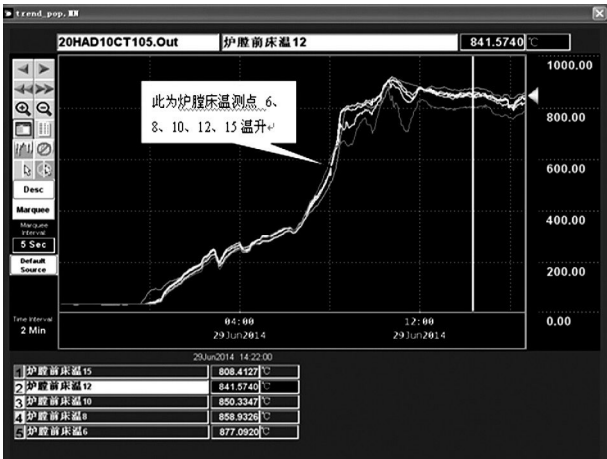


图 1 锅炉点火前及停油后的床温测点趋势图

给煤机原来最低给煤量为 6 t/h,点火初期,单点投入过量的煤将导致床温不易控制,且偏差大,投煤过程中使得床温大幅波动,运行人员反复调整,间接延长了启动时间,导致燃油消耗增加,经逻辑优化将给煤机最小煤量调整至 4 t/h,利于多点均匀给煤,既能控制床温平稳、稳定,保证床料加热均匀,还有利于控制升温时间,减少启动油耗。

给煤机逻辑未经优化前投煤,因单点煤量偏大,造成炉内局部热负荷过大,对应屏过热器、屏再热器受热面在启动初期因没有足够的冷却介质,使得受热面金属壁温超温频繁、严重,运行中存在爆管的危险,机组安全运行得不到有效保障;给煤机逻辑优化后至今,两台机组共启动 7 次,受热面金属壁温超温现象基本杜绝。

2.2.6 优化点火期间油枪容量

将两侧风道燃烧器的油枪出力由设计的 1 900 kg/h 大油枪,换成 1 200 kg/h 出力油枪,并在点火过程中控制好油枪的进油手动角阀,利于控制升温

速率。

2.2.7 优化汽机运行操作

按照机组升温、升压曲线,适时投入汽缸倒暖、夹层加热,合理选择抽真空、投轴封时机,保证暖缸、暖机充分,有效保证汽轮机膨胀及胀差在规定范围内,控制机组启动时间,降低锅炉启动油耗。

3 结 语

在实施启动点火优化措施后,点火油耗由以前的 40 ~ 60 t/次,降为现在的 15 ~ 20 t/次,各金属受热面也未有超温现象;每次节约点火油耗 50% 以上,取得了显著的经济效益,同时保证了机组启动的安全,为同类机组提供借鉴。机组启动过程部分参数趋势见图 2。

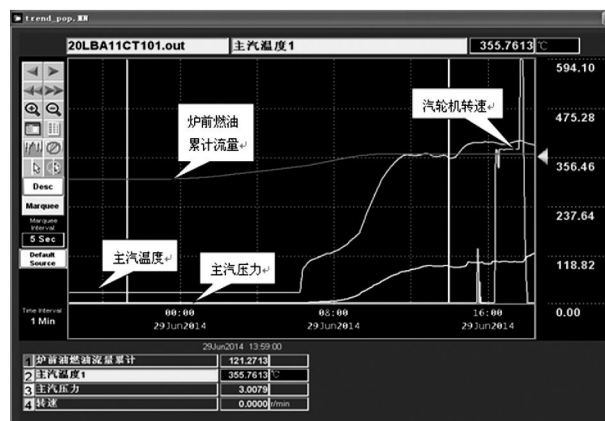


图 2 燃油流量、汽轮机转速、主汽温度、主汽压力
点火前及冲转时的趋势图

作者简介:

丁芸(1968),从事循环流化床机组调试、运行优化及生产技术管理工作。

(收稿日期:2014-11-05)

(上接第 39 页)

时监测并存储影像数据。在此基础上,可实现如下功能。

①全方位、多角度对柜内情况进行可视化视频监控,使得运行期间封闭的开关柜内部情况对于电网运维人员而言不再是“盲点”。

②对开关柜内隔离开关和接地开关进行专门监控,对隔离开关和接地开关的位置状态进行自动识别、判断,在隔离开关和接地开关动作时进行事件记录并录像,在隔离开关和接地开关位置状态出现异常时进行告警并录像。相比现有的利用隔离开关分/合闸状态指示装置指示隔离开关位置状态和在柜体开观察窗直接观察隔离开关位置状态的方法,本项目研究的方法能更安全、更可靠地监测柜内隔离开关位置状态,提示存在的异常情况,若与五防闭锁装置相结合,作为隔离开关位置状态的判据之一,可有效降低因传动系统异常导致五防闭锁装置失效引发设备误操作的概率。

③实时视频监控,再结合相应部位安装的示温蜡片,有助于发现开关柜载流故障隐患。相比现有的开关柜在线测温技术,本项目研究的方法在监测期间不会影响开关柜各项性能,对设备更加安全,避免了因测温装置安装给设备可靠运行带来隐患。

④本项目研制的系统可存储大量高清晰度视频影像资料,因此,过去很长一段时间的开关柜内部影

像被完整保存并可由电网运维人员从本地或客户端按时间、关联事件、日志、告警等多种方式检索,在开关柜遭遇故障后,故障前柜内录像内容可用于分析故障位置和故障原因,为开关柜故障诊断提供新的技术手段。

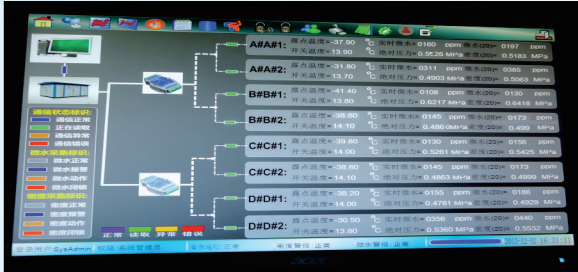
参考文献

- 苑舜. 高压开关设备状态监测与诊断技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- 侯静. 基于光纤测温的高压开关柜温度故障预警 [M]. 济南: 山东大学, 2009.
- Sergheie Vlase, Marian Duta, Sebastian Popescu, et al. Local Monitoring System of the Permissible Temperature for the Medium Voltage Metal - enclosed Switchgear and Control Gear [C]. Proceedings of the 3th International Symposium on Electrical and Engineering (ISEEE), Galati, 2010: 311 - 313.
- 郭钢, 李进. 光纤在开关柜触头温度监测中的应用 [J]. 高压电器, 2006, 32(2): 122.
- 韩玉兰, 芦兴, 路灿, 等. 高压开关柜隔离触头温度红外检测系统的研制 [J]. 高压电器, 2008, 44(6): 578 - 581.
- 许一声, 顾霓鸿. 高压开关柜触头温度在线检测仪 [J]. 高压电器, 2005, 41(2): 139 - 140.
- 李洛, 张剑. 基于整数变换的 H. 264 标准量化过程 [J]. 计算机应用研究, 2006(5): 31 - 33.

(收稿日期:2014-08-06)

RDWS100系列SF₆气体密度和微水在线监测系统

能够在线监测SF₆电气设备的SF₆气体密度和SF₆气体微水，因而能对SF₆电气设备做出在线监测与故障诊断，可在线显示SF₆电气设备的SF₆气体密度，当SF₆电气设备发生漏气时能够及时报警及闭锁；可在线显示SF₆电气设备内部SF₆气体微水，当SF₆电气设备的SF₆气体微水超标时能够及时报警。利用标准化的压力计算检测出是否存在突发的和微小的泄露，而在线露点测量为操作人员随时警示水分状态，保证电网安全运行。



系统主要特点：

- 1、不但可以测量露点，同时还能测量压力和温度，进而计算出包括SF₆密度在内的其他四个参量，对评估SF₆绝缘状态提供了很好的依据。
- 2、采用乐研独创的专利技术，真实反映SF₆电气设备内部的微水。
- 3、采用标准的通讯方式，符合IEC61850通讯要求。
- 4、具备自动校准功能，自动纠正零点偏差，以保证测量的准确性。

主要技术指标：

- 1、压力测量：0.00 MPa~1.000 MPa，优于±0.5%FS
- 2、密度测量：0.00 MPa~1.000 MPa，优于±1.5%FS
- 3、露点测量：-80℃~20℃，±2℃
- 4、湿度测量：10~10,000 PPMv，优于±5%FS
- 5、温度测量：-40~80℃，±1℃
- 6、微水报警：软件中可以任意设置；密度报警闭锁：软件中可以任意设置
- 7、密封性能：漏气率≤1×10⁻⁸ mbar.l/s (氦气检漏)，定量检漏年泄露率<0.5%
- 8、通讯方式：RS485接口，MODBUS通讯协议，通过IED可以实现IEC61850
- 9、监测点数：不限
- 10、抗电强度外壳与电源间：>2 000 V
- 11、电磁兼容特性：快速瞬变脉冲群GB/T17626.4-1999 3级
- 12、雷击(浪涌)：GB/T17626.5-1999 3级

成功案例有：德阳、银川、乌鲁木齐、长春、荆州……等多家供电公司。

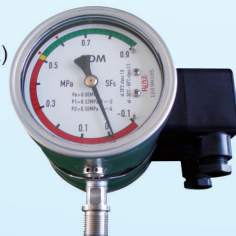
RDM型远传式SF₆气体密度继电器

RDM系列远传式SF₆气体密度继电器是机械与电子的完美有机结合，机械部分实现密度显示、报警、闭锁功能；电子部分可将密度、压力、温度等信息实时采集、远距离传输。采用最新的微机技术及精确的SF₆气体压力和温度之间关系的数学模型，选用高性能的数字智能式压力、温度传感器，使电网实现在线监测SF₆电气设备的密度，实现设备状态检修，确保SF₆电气设备的安全运行，满足国家智能化电网建设要求。

主要技术性能

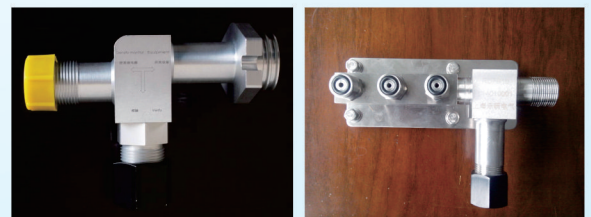
- 精度等级：机械部分为：2.5级（-40℃~60℃）
电子部分为：1.5级（-40℃~60℃）
测量范围：-0.1~0.9 MPa
工作电源：10 V~30 V (DC24 V时2 mA电流)
抗振性能：200 m/s²
抗冲击性能：500 m/s²
外壳防护等级：IP65
密封性能：5.0×10⁻⁹ mbar.l/s
触点容量：AC/DC 250 V 1 000 VA/500 W
环境温度：-40℃~+60℃

通信方式：RS485、4~20 mA、CAN、HART协议等。配合我公司集线器，符合IEC61850通讯要求



RDF系列SF₆气体密度继电器自动校验装配接头

一款非常经典的专利产品，会改变人们的工作方式



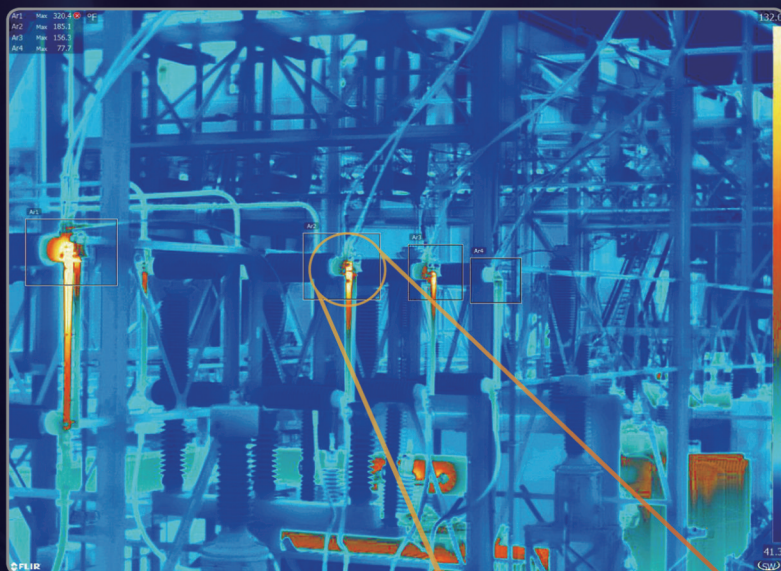
- 符合国网公司新十八项反措要求
全国5 000多套的成功运行经验
自动校验，具有防止校验误操作的功能
密封性能：≤1×10⁻⁸ mbar.l/s (氦气检验)
抗振性能：30 m/s²
抗冲击性能：100 g
工作环境：温度为-60℃~+80℃
相对湿度≤95%RH
外壳防护等级：IP65

乐研电气——拥有100多项专利技术，引领创新，创造卓越！出口欧美，多家国际电力巨头供应商。

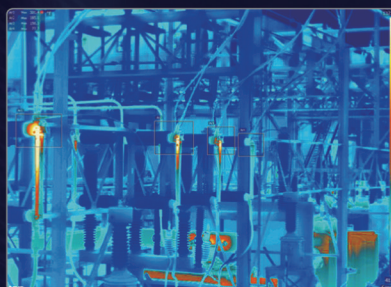
FLIR专门面向最新T系列产品推出的全新功能—— ULTRAMAX™[超级放大]

UltraMax[超级放大]功能是一种独特的图像处理技术, 有助于生成带图像的报
告, 其图像像素是普通热图像的4倍之
多, 且图像噪点降低50%, 因此您将能够
前所未有地放大并更精确地测量更小的
目标。

带有UltraMax[超级放大]功能的最新
T系列产品有: T420, T440, T460, T610,
T620, T640, T660。



采用ULTRAMAX™功能拍摄的热图像



未采用ULTRAMAX™功能拍摄的热图像



采用ULTRAMAX™功能
8倍变焦拍摄的热图像



全新T460红外热像仪



全新T660红外热像仪

FLIR 中国公司总部:

前视红外光电科技(上海)有限公司
全国咨询热线: 400-683-1958
邮箱: info@flir.cn
WWW.FLIR.COM



世界第六感