

★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



ISSN 1003-6954



9 771003 695159

四川省电机工程学会 四川电力科学研究院

Vol.38
2015
No.3

国网宜宾供电公司

精益检修谱新篇，圆满完成宜宾电网史上最大检修工程

安全生产夯基础，公司荣获省公司“安全生产先进单位”

国网宜宾供电公司成立于1978年，是国网四川省电力公司下属的特二型供电企业，承担着两区八县的供电任务，供电面积 $1.3 \times 10^4 \text{ km}^2$ ，总营业户数64万余户。“十二五”以来，公司投入建设改造资金13.28亿元，新建变电站8座，新增输配电线路524 km、变电容量173.2亿kVA，为宜宾社会发展提供了可靠的电力保障。

公司以“奉献清洁能源、电亮万家灯火”为己任，紧扣“依法治企、科学治企，风清气正、人企共进”的工作基调，坚持履职尽责，切实转变作风，持续强化生产经营管理，不断推进“五个发展”，坚持“两手抓”，硬件抓电网建设和企业发展，软件抓文明传承和素质提升，履行服务承诺，勇担社会责任，全力做到让政府放心、企业受益、群众满意，促进了企业科学发展，带动了城市文明进程。2015年，公司被授予“全国文明单位”荣誉称号。



真心服务架心桥，共产党员服务队被宜宾市委指定为全市践行党的群众路线教育实践活动的学习示范点，2014年4月被授予“全国工人先锋号”



群众路线接地气，百名干部走基层，听民音，有效解决联系服务群众“最后一公里”问题



精心打造爱之家，公司工会获得“全国电网企业最具创新精神工会”荣誉称号

国网四川雅安电力 (集团) 股份有限公司



雅电集团电网暖冬行动，
为灾区群众送去光明



举行防灾减灾应急演练



2014年建成投运的雅安首个A类供电服务营业厅



4.20芦山抗震救灾，电力冲锋在前，当晚恢复芦山县城供电，为灾区抢救伤员和开展抗震救灾工作赢得了先机(图为2013年4月20日21时，震后当晚，芦山县城重现光明)

国网四川雅安电力(集团)股份有限公司前身为西康康裕公司雅安水力发电厂，成立于1942年。2005年起，四川省电力公司与雅安市委市政府共同启动了雅安电力体制改革。2012年3月，四川雅安电力(集团)股份有限公司实现了对全市电网和县级公司的统一管理，真正成为一个完整、统一的市级电力集团公司。2013年7月更名为国网四川雅安电力(集团)股份有限公司。

2013年年底，公司已发展成为电网覆盖雅安市六县两区、拥有供电客户52.82万户的发、供电一体化企业。公司(国网雅安电力(集团)公司和国网雅安供电公司)固定资产总额近50亿元，所辖电网规模跻身全省第5位，企业规模跃居省电力公司特一型企业行列。

公司系统先后被全国总工会、国家体育总局、团中央、省委省政府、国家电网公司授予“全国‘安康杯’竞赛优胜单位”、“2009-2012年度全国群众体育先进单位”、“全国‘五四’红旗团支部”、“‘4·20’芦山强烈地震抗震救灾先进集体”、“‘4·20’芦山强烈地震抗震救灾先进基层党组织”、“四川省五一劳动奖状”、“芦山地震抗震救灾工人先锋号”等荣誉称号，全年共获得市级及以上集体奖项28个、个人奖项34人次。

展望“十二五”，公司将围绕雅安市委市政府提出的“后发追赶”战略，紧密结合省电力公司“安全发展、协调发展、绿色发展、创新发展、和谐发展”的总布局，以科学发展、加快发展为主题，全面推进公司“十二五”发展目标和“四化”发展战略，继续深化雅安电力体制改革，加快灾后恢复重建，奋力实现“两个转变”，为雅安经济社会健康持续发展做出新的更大贡献。



服务灾后重建，迁改电力线路



新建成投运的雅安电力调度控制中心

国网凉山供电公司

国网四川省电力公司凉山供电公司位于四川省凉山彝族自治州州府西昌市，始建于1974年，是国网四川省电力公司直属的特一型供电企业。公司承担着凉山州11县1市的工农业生产及人民群众生产生活用电任务，担负着西昌卫星发射中心、成昆电铁凉山段、国家重点工程——锦屏一、二级电站等的安全供电保障任务，在国家航空航天事业、四川电力发展和凉山经济社会发展中具有举足轻重的地位。公司年售电量逾7 000 GWh。



2014年3月18日至20日，国网四川省电力公司总经理王抒祥到公司调研



2014年9月6日，国网四川省电力公司党委书记刘勤到公司调研



国网甘洛县供电公司成立仪式



2014年11月19日，凉山州高度重视无电地区电力建设，召开凉山州无电地区电力建设项目推进工作电视电话会议



加强线路通道巡视，确保凉山富余水电外送



2014年12月2日，公司圆满完成“嫦娥三号”卫星发射保电工作



国网四川凉山共产党员服务队看望慰问无电地区彝族儿童

四川省电机工程学会

2015年秘书长工作会议纪要

四川省电机工程学会2015年秘书长工作会议于2015年5月15日在成都召开，各专工委、分会、编委会秘书长、副秘书长等24人参加了会议，理事长王平作会议总结发言。



王平理事长总结发言

袁邦亮副理事长兼秘书长主持会议并发表讲话，张治安副秘书长传达2015年中国电机工程学会有关工作会议精神，副秘书长田立峰传达四川省电机工程学会第七届五次常务理事会议精神。各专（工）委会、分会、编委会秘书长汇报了2015年工作安排情况，提出建议，交流工作经验。大家一致认为要认清学会发展的内外部环境，把握机遇，迎接挑战，加强学会的能力建设。



副理事长兼秘书长袁邦亮主持会议

王平理事长对会议进行了总结发言。他说，借助电机工程学会平台，2014年四川省电力公司与相关会员单位开展了广泛的合作，成效显著。2015年，随着国网西南分部的成立，大规模水电开发和外送工程建设，四川电网迎来了难得的机遇。新一轮能源变革的到来，与智能电网、能源互联网相关的新材料、新技术、新设备也为我们共同发展提供了很好的机会。要发挥学会整体优势，全面开展学术交流，这是学会生

存和发展的基础。坚持理论创新与实用技术相结合，既推进理论技术储备，跟上国际国内先进技术发展水平，又要推进解决实际的技术问题，提高学术交流的实效性和实用性。

围绕重要技术问题，积极开展调查研究。围绕电力建设、电网发展中存在的技术问题，特别是目前四川电网“强直弱交”、川藏联网系统稳定、水电多集群、远距离输送、风电、光伏发电快速增长等重大课题，发挥学会技术人才优势，组织专家、学者和电网运行管理者，进行深入的调查研究，提出有针对性的技术措施。

努力办好学会期刊，提高科普工作水平。期刊是学会发展的支柱。在交流技术、传播信息、支持学会发展等方面发挥了积极的作用。我们将坚持为会员、企业、行业服务的宗旨，努力提高办刊质量和水平，扩大影响力。科普工作是学会活动的重要组成部分。我们要积极参加各级科协科普工作活动，要借鉴有益的经验，制定长期科普工作规划，开展不同层次和各具特色的技术培训和科普教育，使科普工作有新的进步和新的成效。



会议现场

要发现人才，培养年轻骨干。他还特别强调各专工委要培养学会的年轻骨干，发现人才，积极向中国电机工程学会推荐年度杰出青年工程师。建立一支具有奉献精神 and 广泛团结协作能力的学会积极分子队伍，确保学会工作在深度和广度方面取得更大发展。

2015年5月15日



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 km 具有良好的交通运输条件。公司注册资金10 160万元,占地230亩(其中生产厂房建筑面积67 000 m²);现有员工500余人,40%员工具有大专以上文化程度。

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3期(总237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:cdsclj@163.com

印 刷:四川经纬印务有限公司

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*

2015-06

目 次

• 基金项目 •

基于 Spar 平台浮式海上风力机独立变桨距控制研究

..... 马君豪 刘江涛 王海云 罗建春 罗 庆(1)

变电站视频监控系统三维智能布点软件开发与应用

..... 谢晓娜 常政威 冯世林(8)

基于化学清洗剂与气动清洗机的绝缘子带电清扫技术的研究

..... 张 涛 毕睿华 张云翔 陈 昊 张 明 潘朝贤(12)

• 高压技术 •

超特高压输电线路绕击性能分析 刘 意 文 艺(15)

架空输电线路交叉跨越距离检查及计算方法探讨 李盛杰 王琼晶(23)

一起变压器局部放电交接试验中绝缘缺陷的发现及分析 吴 亮 武 坤(27)

山区架空输电线路设计风速计算分析 谢直卉(30)

• 电网技术 •

宜宾换流站电容器隐患分析与改进建议 禹 佳 孙 文 王 鑫(33)

换流变压器状态评价方法研究 肖 屏 王渝红 张 彪(37)

110 kV 线路变压器组接线电厂继电保护关键问题探讨 李津津(42)

电流互感器饱和对继电保护装置动作影响分析与对策

..... 何小飞 王 锐 李江陵 钟 斌 杨永忠(46)

指数函数膜计算模型的自动设计方法研究 赖正坤 孙 敏 杨昌东(50)

西藏中部电网安全稳定控制系统规划建设的几点思考

..... 王郑锋 董卫国 吴 冲(55)

浪涌保护器在变电站二次系统防雷保护中的应用

..... 王贺新 刘 念 刘航宇 蒲丽娟 李 娟(58)

GIS 坡度分级法在藏区大高差电力线路设计中的应用 余婧峰 余银普(62)

基于场景概率潮流的电力系统无功优化研究 熊 强 郑永康(68)

基于广义等效法的含大规模风电接入的发电系统可靠性评估

..... 张择策 沈天时(73)

固定电压法与改进电导增量法结合的光伏发电系统最大功率点跟踪

..... 崔东君 彭 宇 杨 进(78)

• 发电厂技术 •

300 MW 汽轮机节能降耗改造分析研究 魏志全 彭 林 袁 锋(82)

四川省光伏发电开发利用现状分析及发展 吴晓刚 黄 睿(85)

先进控制理论在同步发电机调速控制系统中的应用 黄乙晋 陈 钊(90)

CONTENTS

Research on Individual Blade Pitch Control of Spar – Buoy Floating Offshore Wind Turbine	Ma Junhao Liu Jiangtao Wang Haiyun Luo Jianchun Luo Qing(1)
Development and Application of Three – dimensional Intelligent Layout Software for Video Monitoring System in Substation	Xie Xiaona Chang Zhenwei Feng Shilin(8)
Research on Live Cleaning Technology for Suspension Insulator Based on Chemical Detergent and Pneumatic Motor	Zhang Tao BI Ruihua Zhang Yunxiang Chen Hao Zhang Ming Pan Chaoxian(12)
Analysis on Lightning Shielding Failure Performance for UHV/EHV Transmission Lines	Liu Yi Wen Yi(15)
Discussion on Crossed Crossing Distance Inspection of Overhead Transmission Line and Its Calculation Method	Li Shengjie Wang Qiongjing(23)
Discovery of Insulation Defect in Hand – over Test of Partial Discharge in Transformer and Its Analysis	Wu Lliang Wu Kun(27)
Calculation and Analysis on Design Wind Speed of Overhead Power Transmission Line in Mountainous Area	Xie Zhihui(30)
Risk Analysis and Suggestions for Improvement of Capacitor in Yibin Converter Station	Yu Jia Sun Wen Wang Xin(33)
Research on Condition Evaluation Method for Converter Transformer	Xiao Ping Wang Yuhong Zhang Biao(37)
Discussion on Key Points for Relay Protection in Power Plant with Connection of 100 kV Line – Transformer Group	Li Jingjing(42)
Analysis on Impact of Current Transformer Saturation on Relay Protection Action and Its Countermeasures	He Xiaofei Wang Rui Li Jiangling Zhong Bin Yang Yongzhong(46)
Research on Automatic Design Method for Membrane Computing Model of Exponential Function	Lai Zhengkun Sun Min Yang Changdong(50)
Reflections on Planning and Construction for Security and Stability Control System of Power Grid in Central Tibet	Wang Zhengfeng Dong Weiguo Wu Chong(55)
Application of Surge Protector to Lightning Protection of Secondary System in Substation	Wang Hexin Liu Nian Liu Hangyu Pu Lijuan Li Juan(58)
Application Of GIS Slope Classification Method to Transmission Line Design At large Elevation Difference Area	Yu Jingfeng Yu Yinpu(62)
Research on Reactive Power Optimization Based on Scenario Probabilistic Load Flow	Xiong Qiang Zheng Yongkang(68)
Reliability Assessment of Power System Considering Large – scale? Wind Power Integration Based on Generalized Equivalent Approach	Zhang Zece Shen Tianshi(73)
Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic Generation System Combined Constant Voltage Method with Improved Conductance Increment Method	Cui Dongjun Peng Yu Yang Jin(78)
Analysis and Research on Reconstruction of Energy Saving and Consumption Reducing for 300 MW Steam Turbine	Wei Zhiquan Peng Lin Yuan Feng(82)
Analysis on Status of Development and Utilization of Photovoltaic Power Generation and Its Expansion in Sichuan	Wu Xiaogang Huang Rui(85)
Application of Advanced Control Theory to Governor Control System of Synchronous Generator	Huang Yijin Chen Zhao(90)

SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY

2015 Vol. 38 No. 3

(Scr. No. 237)

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

基于 Spar 平台浮式海上风力机独立变桨距控制研究

马君豪¹, 刘江涛², 王海云³, 罗建春², 罗庆⁴

(1. 昌吉回族自治州锅炉水处理技术服务部, 新疆 昌吉 831100;

2. 国网重庆武隆县供电有限责任公司, 重庆 408500; 3. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830008;

4. 国网新疆电力公司电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要: Spar 平台深吃水导致平台俯仰和滚转固有频率较低, 因此采用了引入纵荡、横荡自由度的线性状态空间模型的控制设计。为了有效减少风机载荷及更好调节风机出力, 提出了基于 Spar 平台浮式海上风力机独立变桨距控制 (IBP) 的线性多目标状态反馈控制器模型。同时为了能够较好验证该模型的有效性, 对基于基本控制器、扰动干扰控制器以及状态反馈控制器的 3 种独立变桨距控制进行对比。仿真结果表明: 相对于基于可变增益比例积分控制器的统一变桨距控制, 基于多目标状态反馈控制器的独立变桨距控制能将塔架前后及侧向弯曲疲劳载荷平均减少 9%。

关键词: 多目标状态反馈; 浮式; 独立变桨; 海上; Spar 平台; 风力机

Abstract: The deep draft of spar-buoy results in the low platform pitch and roll natural frequencies. Therefore, the control design of linear state-space model which includes the surge and sway degrees of freedom is adopted. In order to effectively reduce the loads and adjust the output power of wind turbine, the state feedback controller model of linear multi-objective based on individual variable pitch control of floating offshore wind turbine in the Spar platform is proposed. And in order to verify the validity of the proposed model, three kinds of individual pitch controls based on the basic controller, disturbance-accommodating controller and a state feedback controller are compared. Simulation results show that compared to collective pitch control based on a gain-scheduled proportional-integral controller, individual variable pitch control based on a multi-objective state feedback controller is able to reduce the tower FA (fore-aft) and side-side bending fatigue loads by an average of 9%.

Key words: multi-objective state feedback; floating; individual blade pitch (IBP); offshore; Spar-buoy; wind turbine.

中图分类号: TM763 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2015)03-0001-07

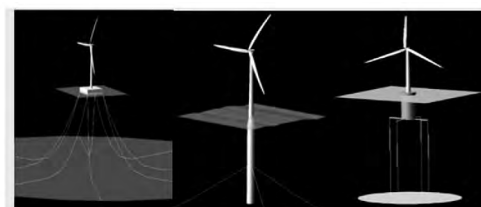
DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.03.001

0 引言

浮动式风力机为海上深水发电(深度大于 60 m)提供了切实可行的解决办法^[1-2]。但是, 浮动式平台的采用相应地引入了其他运动, 它们可能对风力机载荷及电能的产生带来负面影响。因此, 减少这些运动以便更好调节风力机出力及减少风力机载荷的控制系统变得尤为重要。

目前主要有 3 种形式的浮动式风力机概念。图 1 给出了这 3 种概念的浮动式风力机平台: 驳船式 (Barge)、拉力腿式 (TLP)、桅杆式 (Spar-Buoy)。

基金项目: 教育部创新团队项目 (IRT1285); 国家自然科学基金项目 (51267017); 自治区重大攻关项目 (201230115)



1) 驳船式 2) 桅杆式 3) 拉力腿式

图 1 3 种浮动式风力机

显然, 每种概念都有其优缺点。国内外众多学者早期通常采用排除控制系统影响的简单动态或静态模型来比较这 3 种平台^[1,3,4]。

目前有对桅杆式风力机有功控制系统进行动态分析的文章。但是, 这些研究主要是利用统一变桨距手段, 通过单一目标控制器对转速进行调节。

Jonkman 与 Matha^[8,10] 采用可变增益的比例积分控制器针对这 3 种平台进行了大量的分析,结果表明驳船式平台需要的塔架最高,风机叶片承受载荷最大,并且其支撑风力机的平台运动最大,桅杆式(Spar-Buoy)平台的载荷比驳船式平台的小,并且其平台运动相对稳定,而拉力腿式(TLP)平台是最好的。

Nielsen^[9] 等人提出了一种主动控制策略来避免平台结构性共振。为了避免风机变桨距运动产生谐振运动并提高风机疲劳寿命,尼尔森等人又提出一个基于估计器的控制器。实验结果表明该控制器虽能提高塔架和叶片的疲劳寿命,但却减少了风力机的出力。

Larsen 和 Hansen^[11] 采用与文献[1,11]中相同的桅杆式平台,由于浮动结构过低固有频率引起的平台俯仰运动的负阻尼效应,因此采用了 PI 转矩控制器和可变增益比例积分(GSPI)桨距角控制器限制变桨距的使用提高平台阻尼。该控制器提高了阻尼但却加剧了转速与功率变化,即使在使用了恒转矩算法之后。

文献[2]对采用基于线性状态反馈与扰动调节(DAC)的多目标控制器的驳船式、拉力腿式平台进行了分析研究。多目标控制器利用独立变桨距建立必要的转子对称和不对称气动恢复力。该控制器也称之为基本控制器,相对于 GSPI 控制器,这种组合显然提高了风力机性能。

这里采用文献[2]中的多目标控制器,提出了基于 Spar 平台浮式海上风力机独立变桨距控制(IBP)的线性多目标状态反馈控制器模型。同时为了能够较好验证该模型的有效性,对基于基本控制器、扰动干扰控制器以及状态反馈控制器的 3 种独立变桨距控制进行对比。根据 IEC-61400-3 标准的设计载荷工况 1.2 对 Spar 平台疲劳载荷在正常运行条件下进行了测试。仿真结果表明:相对于基于可变增益比例积分控制器的统一变桨距控制,基于多目标状态反馈控制器的独立变桨距控制能将塔架前后及侧向弯曲疲劳载荷平均减少 9%。

1 建立桅杆式(Spar-Buoy)平台模型

桅杆式(Spar-Buoy)平台采用深吃水的压载物来维持其静力稳度,悬链系泊绳索来定位。这里采

用的桅杆式(Spar-Buoy)平台模型是为人们所熟知的“OC3-Hywind”桅杆式,它是基于 Hywind 桅杆式模型。表 1 列出了 OC3-Hywind 桅杆式模型性能参数。

表 1 桅杆式平台主要参数

名 称	参 数
锥形圆台上直径/m	6.5
锥形圆台下直径/m	9.4
干舷/m	10
吃水深度/m	120
布锚深度/m	320
平台质量/kg	7 466 330

这里采用单台 5 MW 风力发电机,该风机是一个上风式风力机,其主要参数见表 2。

表 2 NREL 5-MW 风力机主要参数

名 称	参 数
额定功率/MW	5
转子转动方向	上风向、顺时针
控制方式	变速、变桨、主动偏航
风轮、轮毂直径/m	126,3
轮毂高度/m	90
额定转速、发电机转速/($r \cdot \min^{-1}$)	12.1, 1 173.7
最大变桨距速度/($\deg \cdot s^{-1}$)	8
变桨操作方式	俯仰到顺桨
发电机额定转矩/Nm	43,093
发电机最大转矩/Nm	47,402

2 仿真条件

采用 FAST 仿真代码仿真浮动式风力机的响应,并采用 MATLAB 中动态仿真模块 Simulink 设计控制策略,最后与 FAST 软件配合实现整个过程的仿真。

2.1 仿真条件

仿真的实现参照 IEC 61400-3 标准中 DLC(设计载荷工况) 1.2,即疲劳载荷在正常运行条件下,并在表 3 中给出了仿真条件。由于迄今为止还没有统一的浮动式风力机标准,因此下面将采用 DLC1.2 标准实现仿真。

由于研究的是超过额定风速的区域,因此 DLC

表 3 设计载荷工况 1.2 参照条件

DLC 1.2	参照条件
风况	正常湍流模型 $V_{in} < V_{hub} < V_{out}$
波况	正常海况
风波方向	平行, 多向
海流	无

其中, V_{in} 为切入风速; V_{hub} 为轮毂风速; V_{out} 为切出风速。

分析的范围限定在风速段为 15 ~ 24 m/s 的风速之间, 并以 1 m/s 的速度递增。根据 IEC 标准要求, 对每个风速段采用不同的随机种子产生 6 个 600 s 的干扰风速谱及不规则的波浪谱。基于相同参考地点选择位于苏格兰的东北部波浪条件^[8], 该地点针对相对应平均风速产生单一有效波高及一系列的波周期。采用 TurbSim^[24] 子程序产生全区域的随机风速谱, 并采用 FAST 软件产生随机波浪谱。为了考察不同平台的动力学响应, 在同一工况中, 所有平台所施加的风速谱、波浪谱均相同, 分析时间都为 600 s。

表 4 观测性能趋势类型

短名称	描 述
定常型	所有风速段中性能水平相对稳定的, 表明当风机运行远离线性化点时, 控制器的鲁棒性对可调增益基本控制器维持相对一样性能的作用。
递增型	随着风速的增大呈一种向上倾斜或者正比例的趋势。把风速为 18 m/s 时的性能作为起始点, 也是判断能否很好调节较低风速的依据。
递减型	随着风速的增大呈一种向下倾斜或者反比例的趋势。把风速为 18 m/s 时的性能作为起始点, 也是判断能否很好调节较高风速的依据。
抛物线型	抛物线型函数的最小值位于线性化点的附近。抛物线型趋势表明其是判断能很好的调节附近的线性化点还是使它们偏离到其它方向。

每个控制器通过所有 60 次 600 s 仿真得到仿真结果。仿真模型将通过 FAST 软件实现, 该模型含有 22 个自由度, 并能够使用干扰风速谱、随机波浪谱。当平均风向保持不变时, 风力机的偏航自由度(DOF) 也保持锁定状态, 因为此时不需要主动偏航控制。下面将采用功率的均方根(RMS)、转速误差、风力机关键部件在选择参考频率为 1 Hz 时的疲劳损害等效载荷(DEL) 以及平台旋转矢量的均方根等指标评估控制器的性能。

将它们相应的风速段仿真结果的性能指标进行平均。但是, 实际的风力机不可能在每个风速段花

费等量的时间。因此, 将对总体平均性能指标采用加权平均的方法, 其中加权平均是采用威布尔分布计算权重或者比例因子。另外, 还对风速段的平均归一化性能指标趋势进行了讨论。表 4 中列出了观测趋势的类型。

3 控制器的实现

3.1 基本控制器

在超过额定风速的区域, 基本控制器将由 2 个单独的控制回路组成, 图 2 给出了该回路。其中 u_d 作为扰动输入矢量; η 为风力发电机的效率。第 1 个控制回路是一个统一变桨距的 GSPI 控制, 主要是为了调节转速达到额定转速。增益调节作为变桨距的函数是为了说明不同风速时风机灵敏度的变化。

另一个控制回路采用了 2 种发电机转矩可能配置中的一种。

1) 恒功率算法: 为了尽可能降低发电机转矩对功率的影响, 需要改变风机转速与发电机转矩成反比例的关系;

2) 恒转矩算法: 保持发电机转矩的恒定, 可以改善转速的调节并可减少风机载荷对功率的影响。

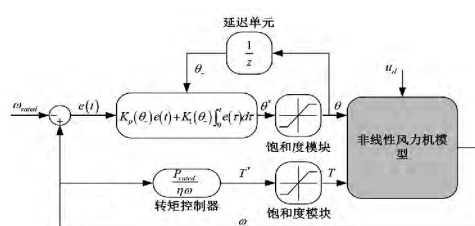


图 2 在超过额定风速区域对转矩控制器采用恒功率算法的基本控制器的框图

该控制器将作为基本控制器与新控制器的性能进行比较。

3.2 状态反馈控制器

在处理多目标的多输入输出系统时, 线性状态反馈控制器往往作为首选的控制器类型之一。这种方法通常要求一个非线性浮动系统的线性状态空间模型。因此, 系统状态 x , 扰动 Δx 以及被选择的操作点 x_{op} 之间满足: $x = \Delta x + x_{op}$ 。状态反馈控制规律, 即: $\Delta u = -K\Delta x$, 式中, K 为状态反馈控制增益矩阵。图 3 给出了该控制器实现的逻辑框图。

文献 [26] 为了解决风机的周期性问题的采用了多桨叶协调(MBC) 转换。多桨叶协调转换允许在

转换后的非旋转参考系进行线性时不变设计。独立变桨距允许控制器在转子上建立不对称的气动载荷以外并通过统一变桨距建立对称的气动载荷。对于转速与平台俯仰调节来说,不对称载荷的实用性有效的解决了变桨距指令不一致的问题^[13]。

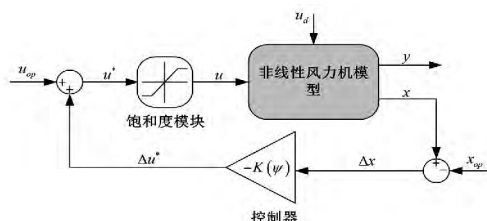


图 3 独立变桨状态空间控制器实现框图

控制规律要求所有状态信息都能够通过测量或者估计得到。采用全状态反馈(FSFB)来实现状态空间控制器,即可以直接测量所有状态。对于所设计的所有状态空间控制器而言,所选的设计状态可以很容易通过现有传感器来测量。减少所需传感器以实现一个状态估计器在实际中是可取的,但是只做一个探索性的描述。

3.3 扰动调节控制器

扰动调节控制是用来减少或消除持久干扰效果对动态系统的影响,例如风速的波动。在大多数情况下,直接对干扰进行测量是不可能的,这就需要一个扰动估计器来对系统的实际扰动进行估计^[27-29]。干扰控制由 $\Delta u_{NR} = -K_{NR} \Delta x_{NR} + G_{d,NR} z$ 给出,其中 z 为扰动状态向量估计,下标 NR 表示非旋转参考系,干扰最小化增益 $G_{d,NR}$ 的计算完全基于线性系统属性及假定波形,因此不能调整^[25,28]。图 4 给出了干扰调节后多桨叶协调转换与全状态反馈配合实现对状态调节部分进行控制的框图。图 4 中, Δu^* 作为控制执行器的输入向量。如图所示,多桨叶协调转换通过变换相应的输入从非旋转参考系中得到矩阵 $T_c(\psi)$ 、 $T_c^{-1}(\psi)$ 以及 $T_s^{-1}(\psi)$ 。

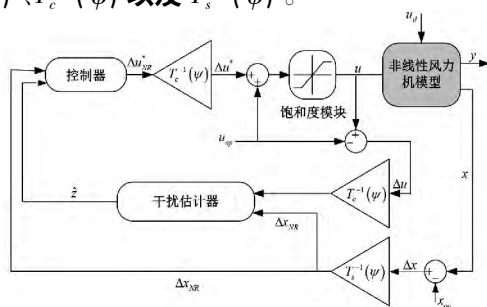


图 4 浮式风力机采用全状态反馈的扰动调节控制器的实现框图

4 仿真结果及其讨论

通过对状态反馈控制器与扰动调节控制器的对比得出设计载荷工况性能分析结果,并对基于基本控制器的桅杆式平台进行了归一化处理。

4.1 平均归一化结果

图 5 给出了所有的平均与归一化结果。状态反馈控制器能使得塔架疲劳损害等效载荷减小 9%。除了均方根误差、变桨速度、低速轴扭曲疲劳损害等效载荷以外,其他所有指标仍然接近于不变。虽然其转速调节性能本质上类似于基本控制器,但是功率误差却大幅减少 64%,主要是由于状态反馈控制器对转矩操作点采用了恒功率算法。气动转矩加剧波动使得变桨距速度相应地大幅增大并因此影响了轴转矩,所以变桨距速度的增大对低速轴疲劳载荷产生了负面影响。相对于从驳船式平台相同类型的控制器获得的相关性能指标都有大幅减少^[4],而大多数状态反馈控制器的相关性能指标却接近不变,主要有以下两个原因: 1) 与驳船式平台不同,所采用的基本控制器的性能很好,转速受到严密的调控,并且平台俯仰运动的角度始终低于 5°; 2) 由于独立变桨距的有效性是受限的,因此控制器需要驱动桨叶获得所需的驱动力。但是,由于现存驱动器饱和,基于状态反馈控制器的独立变桨距控制仅能有限的影响浮动式风力机。因此,相对于基本控制器而言,状态反馈控制器仅能有限的改善桅杆式平台。

扰动调节控制器能通过减少风速扰动的影响或者增加变桨距的使用来改善转速调节,并最终达到改善功率调节的效果;然而,增加变桨距驱动会对平台的滚转及偏航运动产生负面影响,因此塔架侧向载荷平均增加了 9%。

扰动调节控制器前馈项的运行要远离线性化点;远离线性化点的风机运行,并进一步驱动桨叶。系统的非线性化意味着扰动调节控制器为了将风速扰动远离线性化点的影响最小化,对桨叶要么过驱动要么驱动不足。为了能够利用扰动调节控制器对风速扰动的抑制作用,扰动调节控制器需要进一步缓解转速调节达到对状态反馈控制器调节的预期影响。

根据既定风速段仿真的性能趋势,表 6 根据表 4 中定义的 4 种类型趋势对状态反馈控制器与扰动调节控制器的趋势进行了总结。有趣的是,对于桅

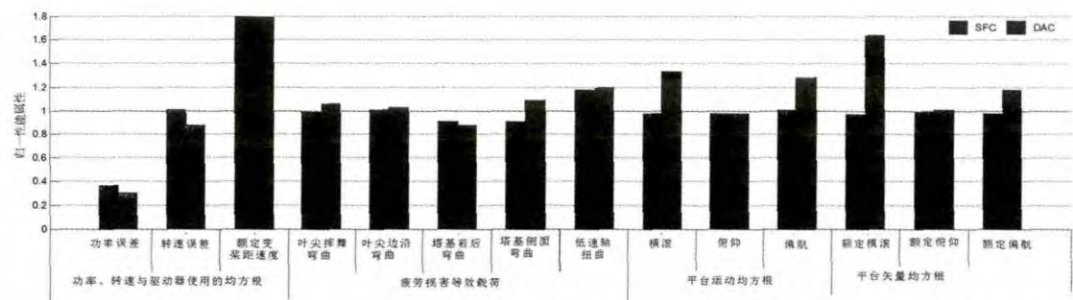


图 5 相对于桅杆式平台的基本控制器对桅杆式平台设计载荷工况进行平均归一化的结果

表 6 桅杆式平台控制器随平均风速增加时的性能趋势

趋势	SFC	DAC
定常型	叶尖边沿疲劳损害等效载荷 塔架前后及侧向疲劳损害等效载荷 平台矢量	塔架前后疲劳损害等效载荷 低速轴疲劳损害等效载荷 平台俯仰、偏航矢量
递增型	叶尖挥舞疲劳损害等效载荷 平台运动	平台横滚及平台运动 平台横滚矢量
递减型	转速误差 低速轴疲劳损害等效载荷	转速误差 低速轴疲劳损害等效载荷 叶尖边沿疲劳损害等效载荷
抛物线型	功率误差	功率误差 平台偏航 叶尖挥舞疲劳损害等效载荷

杆式平台的 2 种控制器的某些性能指标来说,它们表现出了随风速增大渐增的趋势。由此表明驱动器的受限影响了这些控制目标。这种限制可能是由于独立变桨距的有效性受限引起的;从增大增益的角度看,现存驱动器饱和也限制了控制器的设计。

状态控制器(图 6(a))与扰动调节控制器(图 6(b))的抛物线型功率误差趋势也许看起来不合常

理,随着风速的增大转速误差随之改善,功率误差也理应如此变化。但是,由于 2 种控制器都采用了相对宽松的转速控制,并通过增加发电机转矩来补偿,因此达到了各自最大饱和度限制。随着风速增大转速波动也随之加剧。这样反而增大了发电机转矩饱和的周期,进而导致了功率调节比在低风速时更加差强人意。

表 5 中并未把塔架侧向弯曲疲劳损害等效载荷包括在扰动调节控制器趋势中,因为它并不属于 4 种趋势类型中的任何一种。如图 7 所示,平台的滚转运动引起了指标的大幅波动。

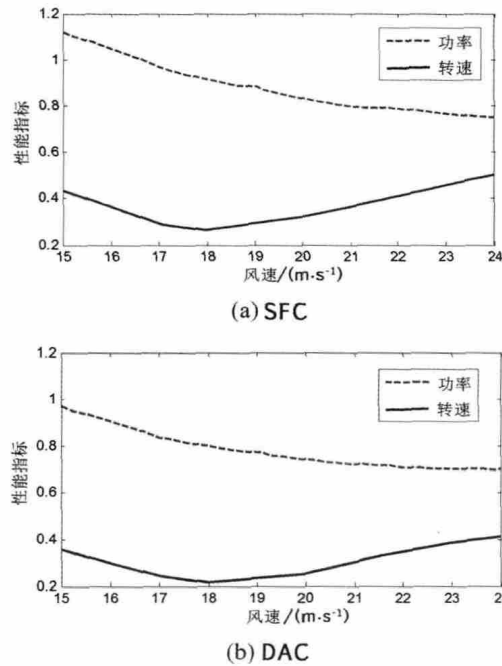


图 6 随着平均风速增大转速与功率调节误差的趋势

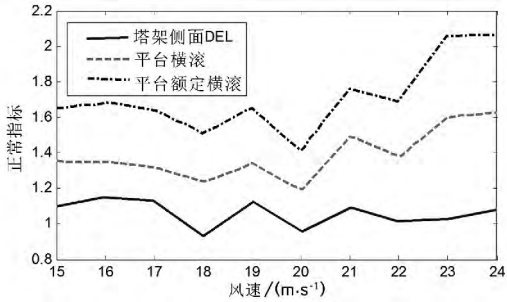


图 7 平台滚转运动对塔架侧向弯曲趋势的影响

因为状态反馈控制器性能普遍优于扰动调节控制器,考虑到现有驱动器的限制,认为状态反馈控制器更适合桅杆式平台独立变桨距控制。

4.2 采样时序结果

图8给出了基本控制器与状态反馈控制器的独立变桨距控制采样时序响应。由于2种控制器的转速调节性能几乎一致,因此给出了发电机输出功率的对比。从图中可以看出状态反馈控制器的功率调节明显优于基本控制器,这是因为状态反馈控制器对转矩操作点采用了恒功率算法。图8中塔架前后及侧向弯曲力矩的高频频谱为塔架前后及侧向第1个弯曲模式下的固有频率。塔架力矩的低频变化是由平台俯仰和滚转运动引起塔架前后及侧向载荷变化所致。

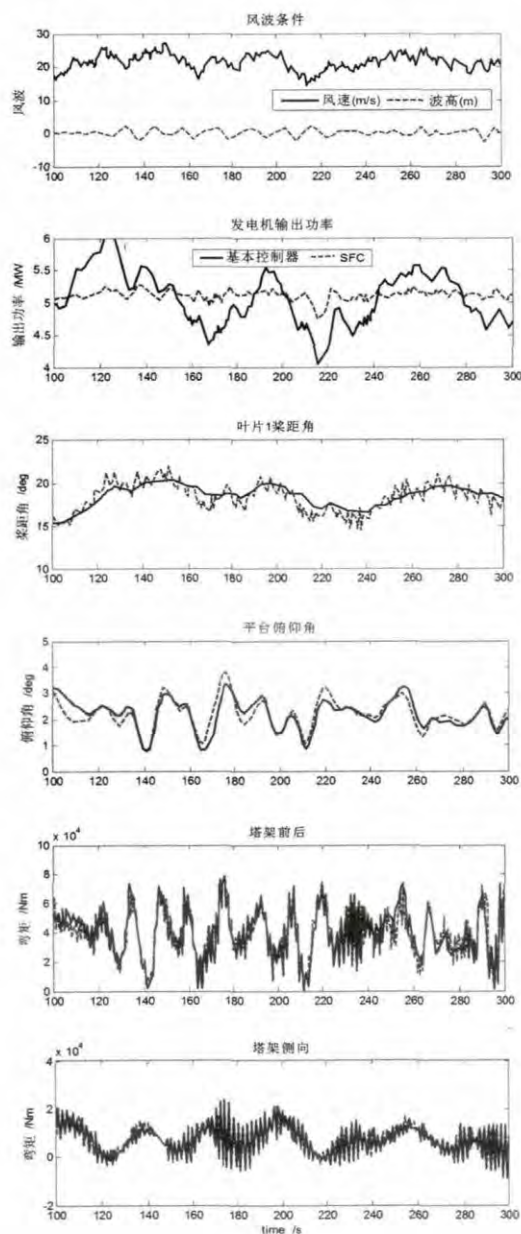


图8 桅杆式平台上基本控制器与SFC采样时序响应

从图8中可以清楚地看到塔架前后及侧向底部载荷在减小。从图8中可以看出状态反馈控制器的

叶片1桨距角的变化趋势紧随基本控制器的统一变桨距的桨距角轨迹。既然2种控制器都有着相似转速调节性能,这就表明基于状态反馈控制器的大多数改进能够实现平台的独立变桨控制,尽管其在高频部分的效力有限。图9(a)给出了在特定频率下塔架前后底部弯曲载荷减小的曲线,特别是在平台俯仰运动固有频率为0.03 Hz时。然而,从图9(b)中可以看出,在平台滚转固有频率为0.03 Hz时,塔架侧向底部力矩却出现一定的增长。这种由平台滚转谐振频率改变引起的增长是因为将平台横荡排除在了基于相同原理的线性模型之外。由于变桨距驱动器的效力已经达到极限,因此平台横荡自由度未包含到控制设计中。另外,塔架侧向载荷的减小应归功于包含了平台横荡自由度的设计并未改变整个桅杆式平台的可行性。

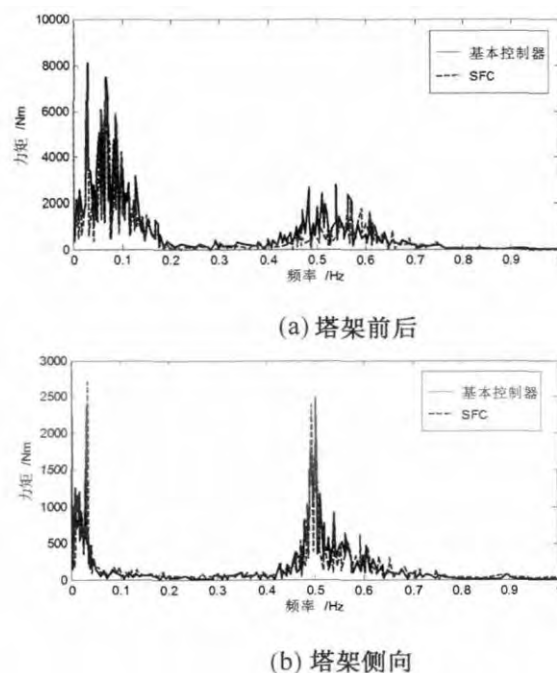


图9 塔基力矩的频谱图

5 结 论

桅杆式平台采用系有深吃水压载物的悬链系泊缆绳定位,有效地实现了静力稳度。桅杆式的深吃水明显增加了平台的滚转与俯仰惯性,因此减小了它们各自的固有频率。这种设计特性使得平台的滚转与俯仰频率低于大多数海况下波浪的激发频率。

1) 平台较低的俯仰频率影响了状态反馈控制器的控制设计选择何种自由度。增加平台纵荡自由

度与第一个塔架前后弯曲模式到线性模型以获取平台俯仰运动动力学所需必要技术特征。

2) 平台较低的俯仰频率的另一个影响是限制了独立变桨距对调节平台俯仰运动的作用。较低的固有频率相对于其他的浮动式平台意味着高频变桨距输入在进一步衰减。在高频的要求下,控制器可以增加驱动得到相同效果,因此,桅杆式平台独立变桨距并不比其他平台更加有效。但是,变桨距驱动饱和度限制对控制器增益强加了一个上限,因此降低了独立变桨在桅杆式平台的有效性。

3) 状态反馈控制器与扰动调节控制器都对转矩控制采用了恒功率算法,与采用恒转矩算法的基本控制器相比,它们明显改善了功率调节。相对于基本控制器,状态反馈控制器能够将塔架疲劳损害等效载荷平均减小9%。除了低速轴扭曲损害等效载荷平均增大18%之外,其他所有指标仍然接近不变。这种增长是由于变桨距驱动相对显著增长的结果。

4) 扰动调节控制器能够通过增加变桨距驱动抑制风速扰动来改善转速调节进而改善功率调节。但基于扰动调节控制器的变桨距驱动的明显增长给平台俯仰与偏航运动带来了负面影响。考虑到现有驱动器的限制,认为状态反馈控制器更适合桅杆式平台的独立变桨距控制。

参考文献

- [1] F. G. Nielsen, T. D. Hanson, and B. Skaare. Integrated Dynamic Analysis of Floating Offshore Wind Turbines [C]. in Proc. 25th Int. Conf. Offshore Mech. Arctic Eng., 2006: 671 – 679.
- [2] W. Musial, S. Butterfield, and B. Ram. Energy from Offshore Wind [C]. in Proc. Offshore Technol. Conf., Houston, TX, USA, 2006: 1888 – 1898.
- [3] B. Bulder, J. Peeringa, J. Pierik, et al. Floating Offshore Wind Turbines for Shallow Waters [C]. in Proc. Eur. Wind Energy Conf., 2003.
- [4] W. Musial, S. Butterfield, A. Boone. Feasibility of Floating Platform Systems for Wind Turbines [C]. in Proc. 23rd ASME Wind Energy Symp, 2004: 1 – 11.
- [5] I. Ushiyama, K. Seki, H. Miura. A Feasibility Study for Floating Offshore Wind Farms in Japanese Waters [J]. Wind Eng., 2004, 28(4): 383 – 397.
- [6] S. Butterfield, W. Musial, J. Jonkman, et al. Engineering Challenges for Floating Offshore Wind Turbines [C]. in Proc. Copenhagen Offshore Wind Conf. Expedit., 2005: 1 – 10.
- [7] D. Biester. (2009, Jul. 3). Hywind: Siemens and StatoilHydro Install First Floating Wind Turbine [Online]. Available: http://www.siemens.com/press/pool/de/pressemitteilungen/2009/renewable_energy/ERE200906064e.pdf.
- [8] J. M. Jonkman. Dynamics Modeling and Loads Analysis of an Offshore Floating Wind Turbine [D]. Ph. D. Dissertation Depart, Aerosp, Eng. Sci. Univ. Colorado, Boulder, CO, USA, 2007.
- [9] D. Matha. Modeling and Loads & Stability Analysis of a Floating Offshore Tension Leg Platform Wind Turbine [C]. M. S. thesis, National Renewable Energy Lab's National Wind Turbine Center, Stuttgart, Germany, 2009.
- [10] J. Jonkman, D. Matha. A Quantitative Comparison of the Responses of Three Floating Platforms [C]. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA, Tech. Rep. NREL/CP-46726, 2010.
- [11] B. Skaare, T. D. Hanson, F. G. Nielsen. Importance of Control Strategies on Fatigue Life of Floating Wind Turbines [C]. in Proc. 26th Int. Conf. Offshore Mech. Arctic Eng., San Diego, CA, USA, 2007: 493 – 500.
- [12] T. J. Larsen, T. D. Hanson. A Method to Avoid Negative Damped Low Frequent Tower Vibrations for a Floating, Pitch Controlled Wind Turbine [C]. J. Phys., Conf, Ser., 2007, 75(1): 012073.

(收稿日期: 2015-04-07)

欢迎订阅《四川电力技术》

变电站视频监控系统 三维智能布点软件开发与应用

谢晓娜¹, 常政威², 冯世林²

(1. 成都信息工程学院控制工程学院, 四川 成都 610225;

2. 国网四川省电力公司科学研究院, 四川 成都 610072)

摘要: 为了解决变电站摄像机的数量和安装位置不合理、监控效果差等问题, 基于三维虚拟建模技术, 开发了变电站视频监控系统三维辅助布点软件。介绍了软件的关键技术、接口和系统功能, 将其应用于 220 kV 茨巫智能变电站, 验证了系统的有效性。

关键词: 变电站; 视频监控; 三维; 布点

Abstract: In order to solve such problems as unreasonable number or installation of cameras, and poor monitored effect of video monitoring system in substations, a three-dimensional layout design software is developed. The key techniques, interface and functions of the proposed design software are introduced. The application to 220 kV Ciwu smart substation verifies that the design is effective and reasonable.

Key words: substation; video monitoring; three-dimensional; layout

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2015)03-0008-04

DOI: 10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.03.002

0 引言

国网四川省电力公司已建设省、地市、县(仅成都市范围内)三级变电站视频监控主站平台, 覆盖了所有 35 kV 电压等级以上的变电站, 建设规模在国内各省级电网公司中处于领先地位。变电站视频监控系统在安全防卫、远程巡视、在线监测、应急指挥等方面发挥了重要作用, 随着变电站无人值守模式的推广, 将在设备监控中发挥更大的作用^[1-2]。

但现有变电站视频监控系统通常存在以下主要问题^[3-4]: 1) 摄像机安装数量偏少, 制约了系统的功能; 2) 变电站视频监控系统中的摄像机布点不尽合理, 部分重要场地、设备未覆盖; 3) 在设计阶段缺乏有效的摄像机布点手段。

为此, 若在变电站中安装摄像机等设备之前, 制定好一个可行的布点方案, 正确评估变电站中摄像头的安装数量、安装位置、摄像头摄像死角, 并在计算机上进行模拟显示和修正, 具有十分重要的意义。针对以上问题, 开发了三维辅助布点软件, 并应于新

基金项目: 国网四川省电力公司研究开发项目
(52199713506H)

建的智能变电站中。

1 三维智能布点软件

对于新建的智能变电站、已有的变电站视频监控系统改造, 可通过土建、一次设备、二次屏柜的设计图纸, 建立全站的三维场景模型, 结合选用的摄像机类型参数, 在布点软件中呈现摄像机的虚拟安装效果。

本软件基于三维仿真的摄像机智能布点技术, 选用 Unity3D 与 Qt 结合作为研发工具, 选用 AutoCAD 2014 作为三维建模软件。根据现有平面 CAD 图, 采用三维技术对变电站内所有建筑物、一次设备等场景进行建模, 为三维虚拟布点提供基础。

1.1 设计与实现

如图 1 所示, 变电站视频监控系统三维智能布点软件在设计和实现时分为 6 个模块, 下面逐一进行介绍。

1.1.1 模型导入

本软件的输入是变电站的精确比例三维场景模型, 可采用以下几种方式:

1) 对于采用三维数字化设计技术的新建变电

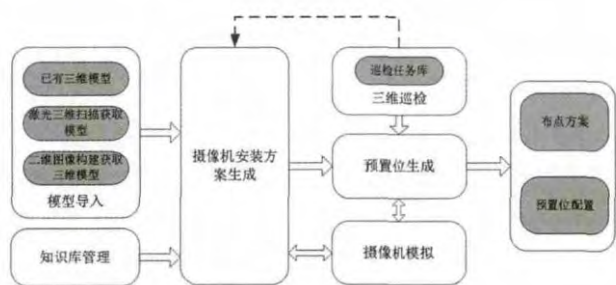


图 1 系统总体结构

站,在电气、结构、建筑等设计完成后,已得到全站精确的三维仿真模型;

2) 对于基于传统二维平面设计的新建或在运变电站,可以利用二维 CAD 图,合成三维 CAD 模型,从而得到其三维场景模型;

3) 针对在运变电站,只有纸质的设计图纸,或多次扩、改建后设计图等信息不完整,可以利用现有三维扫描技术等技术对整个变电站进行整体扫描,得到相应的三维模型。

1.1.2 知识库管理

根据无人值守变电站摄像机布点规则,在设计系统中建立、维护知识库,指导、辅助设计人员及现场人员进行摄像机的虚拟安装。知识库通过指定布点优先级、实施优先级的范围和各监控区域的摄像机数量和摄像机类型,为自动生成摄像机安装方案提供依据。

知识库首先包含了一次设备、二次设备和大门、围墙等附属建筑物的布点优先级和实施优先级。布点优先级从低到高分 1、2、3、4、5 共 5 级。在生成摄像机安装位置时,优先生成监控优先级高的设备的摄像机。实施优先级控制摄像机的预置位的转动,从低到高分 1、2、3、4、5 共 5 级。当同一个摄像机的多个预置位的监控设备同时要求调用预置位时,优先转到实施优先级高的监控设备的预置位。

1.1.3 摄像机安装方案生成

根据已有的规则知识库定义,针对当前导入变电站模型场景,对于指定的监控设备进行监控方案的生成。在生成过程中,约束条件有摄像机数量和摄像机类型,摄像机类型主要指是枪机和球机。比如针对大门和围墙,在考虑到监控对象的特性,一般使用不可旋转镜头的枪机来监控,而对于像变压器这种有改变监控视角的设备,则使用球机来监控。

根据现场实际需求,可以根据分辨率来选择特定的摄像机,比如针对需要查看设备细节(变压器

油温表) 的,考虑到节约成本,以及重复利用现有设备的目的,可以选择高清的球机来进行监控,这样既可以满足观察变压器全景的需求,又可以满足旋转和拉近镜头来观察油温表的需求。

在三维场景中,由于各个对象模型是和现实场景中的真实设备保持 1:1 的尺寸比例,并且相对位置与实际保持一致,所以在计算摄像机的安装位置时,可以根据所监控一次设备的三维空间位置及其空间大小,同时通过计算摄像机视锥体的方式得到数个最佳监控点。在视锥体计算中,如果是相距很近的多个一次设备,则在计算时,在考虑摄像头的焦距等条件下,尽可能的使用少的摄像头,通过光线投影的方式,计算监控覆盖尽可能多的一次设备;如果是孤立的一次设备,则在计算时,考虑使用尽可能靠近监控设备的方式,来满足观察需求。

当确定了摄像机安装位置后,根据待监控目标的位置及其监控区域,计算摄像机相对于监控目标在三维坐标系中的二维水平旋转角度和二维垂直旋转角度。主要计算思路是:获取待监控目标的三维模型,通过该模型在三维场景中的位置以及模型自身体积,计算模型的球型中心,以该球型中心与摄像机镜头在三维空间中连线,形成该三维空间中的空间矢量,该空间矢量为从摄像机镜头中心朝向模型的球型中心,最后通过计算空间矢量与变电站水平平面垂线的夹角,则可以得到相关摄像机的初始转向参数。

图 2 为根据选择的规则库自动生成的摄像头观察窗口。在三维场景中,以绿色高亮形象的显示了监控摄像机覆盖范围,对比实际中,安装摄像头时无法直接判定摄像机监控范围,这种在三维场景中的展现效果,更加直观方便地对摄像机进行微调。



图 2 摄像机安装方案实景展示图

切换到二维平面显示监控摄像头安装方案中摄像机的安装位置,即各个摄像机的名称、距离地面的高度,同时可以导出该二维平面图,如图 3 所示。

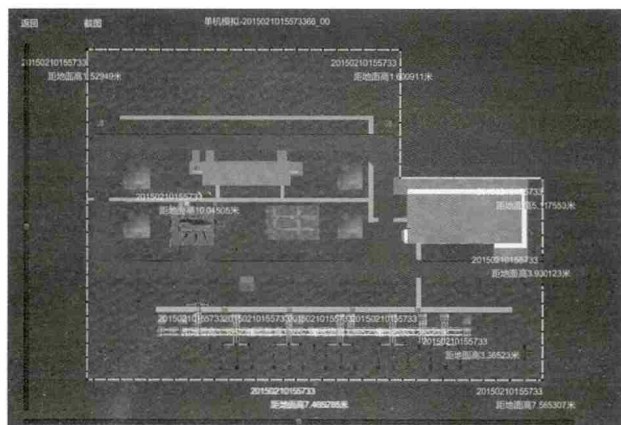


图 3 导出二维安装方案图

1.1.4 预置位生成

为了能够显示监控目标,并根据监控目标的位置自动生成摄像机预置位,使摄像机能够快速、准确地转到预置位,系统设计了预置位根据精确的三维空间信息自动生成功能。由此,可改进目前摄像机的布局都是先根据二维图纸安装,安装好后再根据肉眼识别调整摄像机的预置位存在的灵活性差、准确性低、精度低等不足。

得到了摄像机的预置位角度、焦距之后。通过坐标转换得到 ONVIF 协议坐标,可以批量导入到视频监控平台,实现预置位的同步。

ONVIF 协议规定绝对坐标 X 值、 Y 值范围为 -1 到 1 之间,分别代表摄像机的水平和垂直旋转参数,而球机水平旋转角度范围和垂直旋转角度范围分别为 0° 到 360° 和 -5° 到 185° ,由此可以确定单位角度 X 参数的变化值为 $2/360^\circ$,单位角度 Y 参数的变化值为 $2/190^\circ$ 。ONVIF 协议中对变焦参数 Z 的取值范围规定为 $[0, 1]$,与摄像机的焦距有关。例如,摄像机的预置位水平、垂直旋转角度分别为 264° 和 78° ,焦距为 3.8 。转换为 ONVIF 协议坐标为 $(0.82, 0.37, 0.003)$ 。

1.1.5 摄像机模拟

根据摄像机相关参数(感光器尺寸、焦距范围等),在三维场景中对摄像机的监控范围进行模拟。支持手动部署摄像机安装位置,模拟参数包括焦距、变倍、分辨率、旋转角度、照度等。通过光学原理和摄像机参数分析并呈现虚拟摄像机照射范围及摄像

机监控范围的示意图,并可以进行虚拟云台控制、添加预置位。

摄像机模拟通过在三维场景中对真实摄像机进行模拟,通过变倍、PTZ 调整等操作,可以得到最佳的摄像机监控角度。

1.1.6 三维仿真巡检

根据现场实际需求,在知识库中选择不同的规则,生成摄像机安装布点方案后,所展现的是以摄像机为主体,调整新增预置点,这样虽然能全面的展现出当前方案下所有摄像机的观察情况,但是针对某一个重点监控对象却无法做到全方位的观察,不能直观的检测到该监控对象是否满足监控需求。

为此,引入三维仿真巡检,以巡检人员的巡查习惯来检测摄像机安装布点方案是否合理,同时可以根据需要重点监控的对象,形成新的一套巡检线路,对重点监控对象形成全方位的监控展现效果。

通过三维仿真巡检,可以辅助弥补自动生成方案的不足,使方案对变电站的监控更加的合理、全面。同时,使用本高级功能,也可用于设计机器人巡检的最佳巡视位置和其摄像机设置。

1.2 接口方案

摄像机位置是三维智能布点软件最重要的成果,现场安装调试人员可根据导出摄像机位置进行实际摄像机的安装部署,也可将摄像机位置导入其它系统进行处理和展示。

摄像机位置导出分为两个部分,一是相对于变电站大门中心点的坐标位置和摄像机的安装角度,二是摄像机自身所在平面的图片文件。

摄像机位置导出接口包括 ID、摄像机编码、摄像机型号、 X 轴坐标、 Y 轴坐标、 Z 轴坐标、水平角度、垂直角度和图片文件名称。 X 、 Y 、 Z 坐标位于以大门中心为坐标原点,以大门水平垂直方向为 X 轴,与地面垂直方向为 Y 轴,与大门水平平行方向为 Z 轴的空间坐标系中。

1.3 系统功能

三维智能布点软件具有以下功能:

1) 按现实世界中的真实场景,建立目标变电站内的各种工作场所及周边环境、生产运行及辅助设备等三维模型;

2) 实现在三维场景及设备 3D 导航表中向用户

实时展示设备关键运行状态、运行数据及告警信息，同时用户可以使用系统提供的设备控制面板对当前选择设备进行远程控制；

3) 建立一套基于设备优先级的布点知识库，布点知识库包含了摄像机焦距与视角的关系、焦距与可视距离的关系等相关规则。通过布点知识库，系统可以根据监控对象自动计算出摄像机的安装位置、焦距等信息，并可以生成预置点。

2 实验结果

本软件已应用于“电力天路”工程 220 kV 茨巫智能变电站。茨巫变电站为 GIS 站，变压器 1 个，220 kV 设备区域共 12 个 GIS 间隔。

如表 1 所示，根据茨巫变电站视频监控设备型号和数量，将摄像机详细参数录入布点软件，设置知识库优先级。

表 1 摄像机类型、参数分类表

序号	摄像机详细信息	数量
1	室外高清数字快球、三星 SNP - 5300HP, CMOS、720P、20 倍光学变焦、360 度旋转、255 预置位	2
2	室外标清数字快球、三星 SNP - 3302HP, CCD、D1/4CIF、30 倍光学变焦、255 预置位、30x (3.5 - 105.3 mm) 光学变焦, 16x 数字变焦	6
3	室内数字中速球、三星 SNP - 3302P, CCD、D1/4CIF、30 倍光学变焦、255 预置位	6
4	固定数字摄像机、三星 SNB - 3002P, CCD、D1/4CIF、彩转黑	7

茨巫站围墙周长大约为 414 m，而镜头为 1/3 CCD 的枪机的镜头最远照射范围为 70 m 左右。

根据已设定规则及现场实际情况，系统生成布点方案。在摄像机安装之前，根据无人值守变电站的视频监控需求，采用本布点软件进行了虚拟布点，指导了摄像机安装位置的比较和选择。

经过系统比对，本系统生成的安装方案只需要 2 个摄像头就能完成全景监控，为原方案节约了成本。系统生成的方案，可随意根据预置位调整摄像

机的安装位置。

应用本布点软件，达到了如下效果：

1) 利用该系统安装设备，可以大大缩短施工时间，跟以往安装进度比较，可缩短 50% 的时间；

2) 布点方案经过该系统优化以后，比以往经验安装节约成本，就本次安装情况而言，比原计划少安装 1 个高清摄像头；

3) 布点方案在同等监控设备的情况下，给出的方案监控范围有明显提高；

4) 布点位置符合国网四川省电力公司现有布点技术规范，满足了无人值守变电站巡视需求，特别有利于培养视频监控系统设计、安装、运维新人。

3 结束语

针对变电站视频监控摄像机存在数量和安装位置不合理、监控效果差的问题，开发了三维智能布点软件，并应用于 220 kV 茨巫变电站。

应用结果表明，布点软件提高了变电站视频监控系统设计、安装的效率及准确性，并保障了系统的建设质量，对无人值守变电站的远程监控提供了有效的手段。

下一步，将研究如何针对变电站智能辅助控制系统的动力环境、安防等子系统进行三维辅助设计。

参考文献

- [1] 赵乐. 关于变电站视频监控系统若干问题的探讨 [J]. 中国电力教育, 2011(24): 148 - 149.
- [2] Z. W. Chang, D. S. Cai, W. Zhen and Q. Huang. Design and Implementation of a Measurement System for Power Station Video and Environment Surveillance System [J]. International Journal of Smart Grid and Clean Energy, 2014, 2(4): 221 - 227.
- [3] 赵贵中, 王克英. 电力系统远程无线视频监控系统设计 [J]. 工矿自动化, 2007(4): 56 - 58.
- [4] 孙凤杰, 崔维新, 张晋保. 远程数字视频监控与图象识别技术在电力系统中的应用 [J]. 电网技术, 2005, 29(5): 81 - 84.

(收稿日期: 2015 - 03 - 31)

基于化学清洗剂与气动清洗机的绝缘子带电 清扫技术的研究

张 涛¹, 毕睿华^{2,3}, 张云翔¹, 陈 昊¹, 张 明¹, 潘朝贤²

(1. 国网江苏省电力公司检修分公司, 江苏 南京 210019;

2. 淮安市宇阳电力科技有限公司, 江苏 淮安 223001;

3. 南京工程学院电力工程学院, 江苏 南京 211167)

摘 要: 介绍一种适用于 220 kV 及以下的广自由度手持式带电清扫绝缘子的综合机械的研制。该装置集气动传动与流体传动优势于一体, 克服目前绝缘子清扫技术存在的不足, 对处于悬式绝缘子进行无死角清洗, 使电气设备的绝缘水平控制在安全范围之内, 试验结果表明了该方法的有效性。

关键词: 悬式绝缘子; 带电清扫; 污闪; 气动泵; 化学清洗剂

Abstract: The research on handheld live cleaning device with wide degree of freedom for 220 kV insulator and lower level is introduced, which has the advantages of both pneumatic and fluid drives. It overcomes the shortcomings of current insulator cleaning technology in power industry and can realize the complete cleaning to ensure the insulation security of electrical equipment. The test results verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: suspension insulator; live cleaning; pollution flashover; pneumatic pump; chemical detergent

中图分类号: TM855 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2015)03-0012-03

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.03.003

0 引 言

20 世纪 80 年代以来,随着工业生产飞速发展,中国大气环境污染日趋严重,引起电网设备污闪事故随之突增,严重影响电力系统安全运行。1989 年 1 月 6 日和 12 月 5 日,华东电网 220~500 kV 线路多座变电站污闪,造成华东、上海 500 kV 主网长时间停电;1990 年 2 月 10 日—28 日京津唐电网及河北南网、河南西部与北部电网发生大面积污闪停电;此后,1996 年末、1997 年初、1998 年初、2000 年初全国电网均出现过较大范围的污闪事故^[1]。

变电所绝缘子表面受到固体、液体和气体的导电物质的污染,使绝缘层表面电导增大,泄漏电流增加,产生局部放电,在运行电压下绝缘件表面的局部放电发展成为电弧闪络。污闪时电力系统的重合闸成功率降低,容易造成较大面积停电;另外,污闪中伴随的强力电弧极易损坏电气设备,所以,在国家电网新发布的十八项反措^[2]中,设备防污闪是重要的

措施之一。

绝缘带电清扫提供了一种非常好的设备防污闪的手段。

1 绝缘子防污闪的措施对比

现阶段中国广泛使用的电力设备外绝缘维护技术还是“爬、扫、涂”的方式。“爬”指调节电力设备外绝缘爬电距离“扫”主要包括停电清扫和带电清扫,其中带电清扫有带电水清洗、带电气吹清扫、带电干清扫和近年来新发展的带电化学剂清扫等;“涂”主要指在绝缘子表面涂敷 RTV 防污材料。

调整爬电距离的一般是将普通绝缘子更换为合成绝缘子或防污型绝缘子,或适当增加绝缘子片数,对于无法更换的设备,加装用硅橡胶制作的增爬裙,弥补爬电比距之不足。这种方法一次性投入成本非常高,另外,绝缘子表面污闪的耐压水平与爬电距离之间具有的“饱和效应”会给线路的架设带来困难。

而在绝缘子表面涂抹 RTV 涂料的方法也只能提高绝缘子防污能力 6—7 年。RTV 涂料呈现出优异的憎水性和憎水迁移性,在绝缘子表面染污后,

科技项目: 国家电网江苏省电力公司科技创新项目(JSDL-XLFW-DJX-2014-06-5B14)

RTV 将憎水性传递给表面的污层,使污层表面也呈现憎水性。污层表面不会形成水膜,水滴在重力下掉落从而有效地防止沿面闪络。如果 RTV 表面污层过厚或者长时间处于潮湿条件下,会使憎水性难以迁移至污层表面,从而导致绝缘子的外绝缘性能大大降低。尤其在 RTV 丧失绝缘性能后,很难从外绝缘表面上清除下来,涂料的氧化起皮,同样会降低绝缘子的外绝缘性能。

停电清扫是工作人员用抹布或刷子等简易工具在停电设备上进行的清扫,这种清扫只能降低绝缘子表面 10% ~ 30% 的盐密度和 20% 的泄漏电流。而且对于停电机数越来越少的超高压变电设备,停电清扫成为难以实现的措施。

近些年,根据输变电设备绝缘的具体污染情况,定期或不定期地进行带电绝缘清扫,成为设备绝缘防污闪高效、可靠、简便的重要措施。而传统的带电清扫方式都存在一定的缺陷,具体表现如下:

1) 带电水清扫的限制条件较多,如: 清扫前,应掌握绝缘子的脏污情况,当盐密值大于临界盐密值的规定时,不宜带电水清扫; 避雷器及密封不良的设备,不宜带电水清扫; 在潮湿环境下,容易造成人身伤害; 清扫路线要格外注意,一旦在绝缘子表面形成污水线,将会引起绝缘闪络。

2) 带电气吹清扫难以达到理想的去污效果,而且由于灰尘或锯末会到处飘落,会形成对绝缘的二次污染。

3) 带电干清扫只能清扫粘结不牢固的浮尘,清扫效果不彻底,同样也会形成二次污染。

4) 带电机械驱动化学剂清扫的方式是目前研究较多的方式。但该种方式由于采用操作杆头部的机械马达驱动毛刷转盘,因此,其持举的清扫机较重(达到 10 kg 左右),导致作业不灵活,容易产生清扫死角; 而对于不是对地垂直悬挂的一部分悬式绝缘子,该清扫机将无能为力。另外,该清扫机作业时电动马达靠近高压设备,将会影响高压设备的安全净距,带来一定的安全隐患。对于设备上一些顽固的油污,如果采用清洗剂大力冲洗,容易造成电气设备部件脱落的危险。

江苏省电力公司检修分公司和淮安宇阳电力科技有限公司联合研制的采用专利清洗剂浸湿污秽,并用气动马达驱动毛刷旋转的清扫方式很好地解决了上述缺点,具有可靠性高、操作方便、清扫效果好

的特点。

2 绝缘清洗剂的技术特点

论文 [8]、[10] 对不同地区的绝缘子污秽成分进行研究,结果表明污秽主要成分为 CaSO_4 、 SiO_2 、 Al_2O_3 。其中沿海地区污秽中可溶性成份是以 NaCl 为主,而内陆主要成份是以 CaSO_4 为主。论文 [9] 指出绝缘子表面污秽由杂乱排列的结晶状物质紧密堆积,有空隙存在。论文 [11] 指出污秽与 RTV 涂料结合紧密,仅靠水洗或者人工擦洗很难将其彻底清洗干净,绝缘清洗剂对绝缘子(16KNM - E) 表面污秽有较好的清洗作用,但是清洗剂喷洒到绝缘子表面后,需要借助外力擦拭才能将污秽彻底清洗掉。

绝缘清洗剂的主要成分为助洗剂和表面活性剂,助洗剂的沸点较低(48 ~ 50 $^{\circ}\text{C}$),约占带电清洗剂的 80%; 带电清洗剂中的表面活性剂为非离子表面活性剂,沸点较高,颜色为淡黄色,占 10%。绝缘清洗剂的优点如表 1; 绝缘的化学清洗剂的相关技术特性如表 2 所示。

表 1 绝缘清洗剂的技术优点

序号	特点	作用
1	无毒性	不会伤及人体健康,不会污染环境。
2	不易燃	不会由于接触放电而引起火灾事故。
3	易挥发	沸点低,1 min 内挥发,不会形成挂淋而导致绝缘击穿问题,
4	绝缘强度高	平板电极下 1 min 击穿电压达到 70 kV 以上,不会引起击穿。
5	表面张力小	清洗剂能在绝缘子表面自发浸湿和铺展,使污秽从表面脱离。
6	无腐蚀	不会引起金属、橡胶、陶瓷等导体和绝缘体的化学损坏。

该种绝缘清洗剂与传统的清洗介质(如蒸馏水、水蒸汽、其他化学清洗剂) 相比,具有适用电压等级高、安全性高、高绝缘、无闪点、不燃烧、易挥发、除污能力强、环保等特点,同时清洗后会在设备表面形成保护膜,具有憎水、防霉、提高绝缘值、抗氧化等保护作用,可有效提高系统设备运行安全性和使用寿命。

3 绝缘气动清扫机的技术特点

所提出的绝缘子自动清扫机由落地式动力源和

表 2 绝缘清洗剂的技术特性

技术参数	数 值
沸点	50 ~ 75
密度/ $\text{g} \cdot (\text{cm}^3 \cdot 25\text{ }^\circ\text{C})^{-1}$	1.45 ~ 1.65
pH 值	6.9 ~ 7.1(中性)
燃点 / $^\circ\text{C}$	大于 630
闪点 / $^\circ\text{C}$	大于 72,带电清洗电力设备无火花或电弧
蒸汽可燃温度 / $^\circ\text{C}$	无
ODP 值 (臭氧消耗指数)	0
击穿电压/kV	> 70(平板电极)
绝缘性 (绝缘电阻) /G Ω	2.5
蒸发速度 及腐蚀性	在 1 min 内挥发,并将污秽充分溶解、剥离,并形成粉尘状腐蚀性对铜、锌、铝、铁等均无腐蚀;对聚酯、橡胶、塑料、玻璃、陶瓷、合成绝缘子等材料无腐蚀;对 RTV 涂料无腐蚀

手持清扫器两部分组成,利用空压机作为动力源。清扫器有高绝缘的操作杆、气管、气动马达和毛刷组成。气管内置于绝缘操作杆的手持的那一节中,而其余几节绝缘杆上,气管则是螺旋状缠绕在绝缘杆表面。气管的末端接入固定于绝缘杆端部的气动马达上。马达头部装有圆形旋转毛刷。绝缘杆和气动马达之间通过聚丙烯材料制成的接头连接,接头可以做到上下 270 $^\circ$ 旋转,从而可以调整毛刷与绝缘子的接触角,做到清扫无死角。绝缘杆手持部分末端装有限位套,并连接有接地线,充分考虑操作人员的安全。

清扫机的接头是个多功能接头,除了可以固定气动马达外,也可以固定用来喷洒绝缘清洗剂的喷壶,喷壶可以根据绝缘的污秽程度来调节喷洒的剂量,见图 1。绝缘气动清扫机的主要技术参数见表 3。



图 1 绝缘气动清扫机

表 3 绝缘清扫机的主要技术参数

技术项目	技术参数
电压等级/kV	22
结构高度/m	3.6
主绝缘杆长度/m	2.3
绝缘操作杆 试验绝缘长度/m	1.8
耐受水平 试验电压/kV	440 耐受 1 min
绝缘操作杆电阻值/G Ω	1
气管绝缘电阻值/G Ω	1
毛刷数量/个	下层硬毛,上层软毛刷头 2 个;软毛刷头 3 个
空压机输出压力/MPa	无油、无水的空气 8
空压机的工作电压/kV	交流 220
气动马达转速/($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	$\geq 1\,400$
手持清扫器部件重量/kg	4
使用环境温度与使用海拔高度/ $^\circ\text{C}$	-20 ~ 60 2 000 m 及以下

气动绝缘清扫机工作原理如下:

- 第 1 步: 空压机对空气处理后,将无油无水的高压空气通过绝缘气管驱动气动马达,由气动马达带动清扫刷进行高速清扫,通过干扫可以一定程度地提高绝缘子的绝缘性能;
- 第 2 步: 然后利用气动喷壶将绝缘清洗剂形成雾状均匀喷射于待清扫设备上,使污秽湿润而不形成挂淋(污水流),充分溶解污秽积垢,清洗剂将在 1 min 内挥发干燥,并将污秽积垢转化为粉尘;
- 第 3 步: 用气动马达带动清扫刷对设备进行清扫,可以做到绝缘清扫后绝缘清洁如新。

4 试验验证

装置试制成功后在南京地区某 220 kV 的变电站进行现场模拟带电清扫作业试验。清扫对象为某型 220 kV 变电所的支柱绝缘子,并进行清扫前后绝缘子上的盐密、灰密试验,以供比对。其中 A 相绝缘子的试验结果如表 4 所示。

表 4 绝缘清扫试验记录

A 相 绝缘子	电导率 /($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$)	盐密 /($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$)	灰密 /($\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2}$)
清扫前	752	0.156	1.023
清扫后	22.3	0.004	0.002

(下转第 22 页)

- [0] 刘洪建,和伟,徐八林,等. 导线电压对其雷电绕击耐雷性能的影响 [J]. 南方电网技术, 2011, 5(2): 72 - 75.
- [1] 王志勇,余占清,李雨,等. 减小地线保护角对改善线路防雷性能的效果 [J]. 高电压技术, 2011, 37(3): 622 - 628.
- [2] 王茂成,张治取,滕杰,等. 1 000 kV 单回特高压交流输电线路的绕击防雷保护 [J]. 电网技术, 2007, 32(1): 155 - 159.
- [3] IEEE Std 1410 - 2004, IEEE Guide for Improving the

Lightning Performance of Electrical Power Overhead Distribution Lines [S].

- [4] 陈国庆. 交流输电线路绕击仿真模型及同杆双回耐雷性能的研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2003.

作者简介:

刘 意(1982), 工学硕士, 工程师, 研究方向为高压输电线路运行状态监测与安全评价;

文 艺(1988), 男, 工学硕士, 研究方向为输变电设备状态监测与故障诊断。

(收稿日期: 2015 - 03 - 19)

(上接第14页)

现场试验结果表明,该装置在清扫速度、清扫质量、安全性能等方面表现出显著的效果。



图2 220 kV 变电站试验

5 结 论

这套基于气动原理和化学绝缘清洗剂的多自由度绝缘清扫机具有下列优点: 1) 绝缘性能优良, 抗潮性能强, 确保带电作业人员的安全; 2) 机具重量轻, 减轻带电作业人员的劳动强度; 3) 刷头可以 270° 旋转, 配合绝缘操作杆与绝缘子的相对位置, 完全做到清扫不留死角; 4) 清洗剂呈雾状喷洒, 充分湿润污垢而不挂淋; 5) 易损零部件少, 维护方便, 使用寿命长。

这套装置研制成功后已经在 35 kV、110 kV、220 kV 的变电站多次进行现场清扫作业。装置在清扫速度、清扫质量、安全性能等方面表现出显著的效果, 既节约人力、物力、时间, 又减少了设备因停电清扫带来的经济损失, 具有广泛的应用前景。

参考文献

- [1] 徐文澄, 喻华玉. BRQ 便携式软轴连接高压带电清扫器研制 [J]. 中国电力, 2001, 34(12): 75 - 78.
- [2] 李小永. “十八项反措”意义试析及实施浅议 [J]. 电力系统通信, 2007(S1): 4 - 6.
- [3] 王瑜, 张平安. 500 kV 高压带电绝缘清洗 [J]. 清洗世界, 2013, 29(10): 22 - 26.
- [4] 张晋, 汲胜昌, 曹涛, 等. 电力设备带电清扫技术的现状及展望 [J]. 绝缘材料, 2009, 42(2): 63 - 66.
- [5] 向平, 向鹏, 周敏, 等. 车载式电力绝缘子清洗装置的设计及特点分析 [J]. 重庆电力高等专科学校学报, 2012, 17(4): 89 - 94.
- [6] 孙阳盛, 华月申. 高分子带电清洗技术在 220 kV 变电站中的应用 [J]. 华东电力, 2013, 41(1): 238 - 240.
- [7] 黄燕. 电气设备清洗剂的研制 [J]. 化工技术与开发, 2010, 39(11): 23 - 25.
- [8] 刘凯, 朱天容. 绝缘子污秽成分分析与清洗剂去污机理研究 [J]. 高电压技术, 2012, 38(4): 892 - 898.
- [9] 朱正国, 钟建灵. 变电站绝缘子清洗试验数据分析 [J]. 高压电器, 2008, 44(5): 472 - 473.
- [10] 李恒真, 叶晓君. 广州地区输电线路沿线绝缘子自然污秽化学成分的来源分析 [J]. 高电压技术, 2011, 37(8): 1937 - 1943.
- [11] 王彬, 梁曦东, 张轶博, 等. 交、直流电压下复合绝缘子和瓷绝缘子的自然积污试验 [J]. 高电压技术, 2009, 35(9): 2322 - 2328.
- [12] 荣小平. 高压电路防污闪带电清洗维护技术可行性研究 [J]. 清洗世界, 2005, 21(9): 13 - 17.
- [13] 陈昊. 负荷时间序列 GARCH—GED 模型厚尾动态结构研究 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(增): 378 - 381.
- [14] 陈昊. 基于非高斯分布 GARCH 模型的负荷预测. 电力自动化设备 [J]. 2008, 28(7): 65 - 68.

作者简介:

张 涛(1979), 硕士, 工程师, 从事输变电运检管理和高压绝缘技术的研究。

(收稿日期: 2015 - 01 - 10)

超特高压输电线路绕击性能分析

刘意, 文艺

(国网四川检修公司, 四川 成都 610072)

摘要: 运用电气几何模型(EGM)的方法来分析超/特高压交流输电线路的绕击耐雷性能,并给出了计及导线工作电压的绕击耐雷水平和绕击跳闸率计算式。然后,再对影响超/特高压输电线路绕击耐雷特性的雷电流幅值、杆塔高度、线路绝缘水平,线路所经过的地形、保护角、工频瞬时电压、地面植被等主要因素做了分析研究。

关键词: 超特高压; 输电线路; 耐雷性能; 电气几何模型; 绕击跳闸率

Abstract: Electro-geometric model (EGM) is used to analyze the lightning protection performance of shielding failure for UHV/EHV transmission lines, and the formula for calculating the lightning shielding failure withstand level and the shielding failure trip-out rate is given which considers the effects of conductor operation voltage. Then, the main factors which would impact the lightning shielding failure performance for UHV/EHV transmission lines are analyzed and studied, such as lightning current amplitude, tower height, insulation level of lines, landforms along the transmission line corridor, the protection angle of tower, power-frequency voltage and ground vegetation.

Key words: EHV/UHV; transmission line; lightning protection performance; electro-geometric model; shielding failure trip-out rate

中图分类号: TM863 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2015)03-0015-08

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.03.004

0 前言

经验表明,不同电压等级的输电线路雷击跳闸的主要原因不同。500 kV及以上超/特高压输电线路,绕击占绝大部分^[1]。分析超/特高压交流输电线路的耐雷性能,就要对其绕击耐雷性能展开分析。

超/特高压线路输送距离远,线路走廊所经区域地形复杂,大多穿越中国多雷区域,因此,需要综合考虑多方面因素对超/特高压线路绕击性能的影响。

1 雷电绕击分析方法

中国现今常用的输电线路绕击耐雷性能的分析方法有:规程法、电气几何模型(electric geometric model, EGM)、改进型电气几何模型、先导发展模型(leader progression model, LPM)等。目前广泛使用的EGM仍然有不足,这里提出了一种新的改进型EGM来分析超/特高压输电线路的绕击特性。

2 超/特高压输电线路 EGM

在超/特高压交流输电线路的雷击跳闸事故中,

绕击引起的雷击故障是主要因素。在运用EGM对输电线路绕击耐雷性能进行分析时,由于超/特高压杆塔很高,当较小的雷电流绕击导线时,大地雷电捕捉面离地高度低于导线在杆塔的悬挂高度,因此,绕击弧需要画到导线所在水平面以下。文献[2]还表明导线击距与雷电流、导线平均高度和导线工作电压有关。

在已有EGM基础上,给出了一个垂直地面落雷的杆塔线路EGM(水平地面),如图1所示。图中, α 为地线保护角;以过地线的垂线为基准逆时针为正,顺时针为负; θ_1 、 θ_2 以水平线为基准,逆时针划过为正,顺时针划过为负; W 为边相导线到杆塔中垂线的水平距离; h_g 、 h_c 分别为地线和导线的平均对地高度; h_s 为大地雷电捕捉面离地高度; R_g 、 R_c 为地线和导线的击距。图2所示EGM的基本原理与经典EGM类似,只不过这里考虑了导、地线以及大地对雷电先导吸引能力的区别,在分析导线上的击距时,还考虑了导线上的工作电压的影响。地线击距公式、大地雷电捕捉面离地高度公式如下。

地线击距^[3]为

$$R_g = 0.67 h_g^{0.67} I^{0.65} \quad (1)$$

大地雷电捕捉面离地高度为^[4]

$$h_s = 5.5 I^{0.65} \quad (2)$$

式中, I 为雷电流幅值。

考虑导线工作电压时, 按以下方法确定其击距计算式。长空气间隙的负极性放电电压跟不考虑工作电压时导线击距的关系如下^[5]。

$$R_{c0} = 1.63 U_0^{1.125} \quad (3)$$

式中, R_{c0} 为不考虑工作电压导线的击距; U_0 为雷电先导头部电压 MV。

根据式(1)和式(3)可得

$$U_0 = 0.454 h_c^{0.596} I^{0.578} \quad (4)$$

雷电对导线的击距公式如下:

$$R_c = 1.63 (0.454 h_c^{0.596} I^{0.578} - U_{PH})^{1.125} \quad (5)$$

式中, U_{PH} 为导线上工作电压的瞬时值, MV。

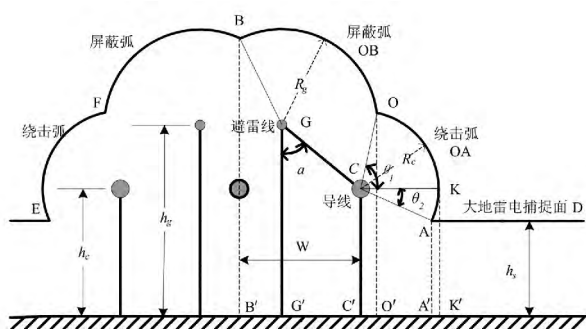


图 1 完整杆塔线路的电气几何模型

由图 1 所示 EGM 可以看出, 当雷电先导进入弧 OB 或弧 FB 上, 雷电放电将击向地线, 这样导线就被保护起来了, 故称弧 OB 和弧 FB 为屏蔽弧; 当雷电先导进入弧 OA 或弧 FE 上, 则雷击击中导线, 地线未起到应有的屏蔽作用, 即发生了绕击现象, 弧 OA 和弧 FE 称作绕击弧; 若雷电先导落地大地雷电捕捉面上, 那么雷电将对大地放电。

3 各因素对超/特高压输电线路绕击的影响

中国的防雷体系对线路走廊的雷电活动特征掌握不够全面, 线路结构及地形地貌特征等还未能全面考虑, 使得目前的防雷设计和措施改造还处于简单、粗放的状态, 缺乏针对性^[6]。因此, 应该充分考虑线路工作电压、走廊雷电活动、线路绝缘配置、线路杆塔结构特性以及地形地貌等因素的影响, 对输电线路的防雷进行综合评估^[6]。

3.1 导线工频电压对绕击的影响

3.1.1 导线工频电压对绕击耐雷水平的影响

计及导线工频电压的绕击等效电路见图 2。图中虚线右侧 $U_{PH} = U_{PHm} \cos(wt + \varphi_0)$ 为从雷击点 A 看向被击交流线路的瞬时工作电压, $Z/2$ 为被击线路的等值波阻抗, Z 为线路波阻抗; 虚线左侧为从雷击点 A 看向雷电通道的电压源等效电路, U_0 分别代表沿雷电通道传播而来的电压波; Z_0 代表的是雷电通道的等值波阻抗。

从图 2 易得, 雷击点 A 的电压表达式如式(6):

$$U_A = \frac{(2U_0 \frac{Z}{2} + Z_0 U_{PH})}{Z_0 + \frac{Z}{2}} \quad (6)$$

在粗略计算式, 近似有 $Z_0 \approx Z/2$ 成立。式(6)可简化为

$$U_A = U_0 + \frac{U_{PH}}{2} \quad (7)$$

绕击导线时, 整个雷电放电过程的时间相对于工频电压变化的时间非常短, 可认为雷击过程工作电压瞬时值不变, 当雷击发生在工频电压位于任意初始相位 φ_0 时, 即存在

$$U_A = U_0 + \frac{U_{PHm} \cos(wt + \varphi_0)}{2} = I_0 \frac{Z}{2} + \frac{U_{PHm} \cos \varphi_0}{2} \quad (8)$$

令 $Z = 400 \Omega$, $U_A = U_{50\%}$, 其中 $U_{50\%}$ 为绝缘子串 50% 冲击放电电压。则计及导线工作电压时绕击耐雷水平^[7]公式为

$$I \approx 2 \left(\frac{U_A - \frac{U_{PHm} \cos \varphi_0}{2}}{200} \right) = \frac{U_{50\%} - \frac{U_{PHm} \cos \varphi_0}{2}}{100} \quad (9)$$

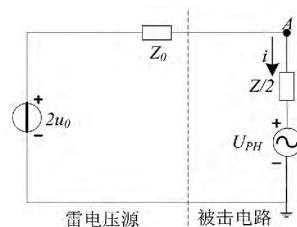


图 2 线路绕击等效计算电路

3.1.2 导线工频电压对绕击跳闸率的影响

绕击要造成跳闸事故须满足两个条件, 当绕击雷电流幅值 I 大于线路耐雷水平 I_{min} 时才会发生绝缘闪络现象, 但绝缘闪络并不一定会造成跳闸, 只有在冲击闪络转化为稳定的工频电弧才会引起线路跳闸。其中冲击闪络转化为稳定的工频电弧的概率称为建弧率 η ^[8]。建弧率可由式(10)获得:

$$\eta = (4.5E^{0.75} - 14) \times 10^{-2} \quad (10)$$

式中, E 为绝缘子串的平均电场强度, 可由式(11)求得:

$$E = \frac{U_n}{\sqrt{3}l} \quad (11)$$

式中, U_n 为线路运行额定电压; l 为绝缘子串长度。

由图2中几何关系不难得出

$$\theta_1 = \frac{\pi}{2} + \alpha - \arccos\left(\frac{R_c^2 + GC^2 - R_g^2}{2R_c GC}\right) \quad (12)$$

$$\theta_2 = \arcsin\left(\frac{h_s - h_c}{R_c}\right) \quad (13)$$

式中, $\overline{GC}$ 是地线到导线的距离。

那么, 雷电流幅值 I 绕击概率 P_α 为

$$P_\alpha = \frac{\overline{OK'} + \overline{AK'}}{\overline{BK'} + \overline{AK'}} = \frac{R_c(2 - \cos\theta_2 - \cos\theta_1)}{R_c(2 - \cos\theta_2) + W}$$

式中, $\overline{OK'}$ 和 $\overline{BK'}$ 分别是绕击弧 OA 在水平地面的投影和屏蔽弧 OB 跟绕击弧 OA 在水平地面的投影之和; $\overline{AK'}$ 为低于导线水平面的部分绕击弧在地面的投影。

雷电流幅值概率是表征雷电活动频度, 计算绕击跳闸率的另一重要参数。西南交通大学结合中国雷电流幅值概率分布, 提出了一种适合中国实际情况的雷电流概率密度计算公式^[9]。该雷电流概率密度 P_I 的计算为

$$P_I = \frac{I^{1.58}}{\left[1 + \left(\frac{I}{22.78}\right)^{258}\right]^2} \times 0.81 \times 10^{-3} \quad (15)$$

由式(15)和式(16), 可得绕击闪络率 P_f 为

$$P_f = \int_{I_{\min}}^{I_{\max}} P_\alpha P_I dI \quad (16)$$

因为雷电流幅值为 $I_{\max}$ 时, 绕击弧变为0, $\theta_1 = \theta_2$, 联立式(12)和式(13), 并带入导、地线击距和大地雷电捕捉面高度可求得 $I_{\max}$ 。

绕击跳闸率 n (次/km·a) 的计算式如式(17)。

$$n = NP_f \eta \quad (17)$$

式中, N 为分析线路的年落雷次数。

3.2 雷电流对绕击的影响

雷电流有两方面含义: 一是雷电流幅值的大小; 二是雷电流幅值概率, 其取值精确性直接关系到跳闸率的计算精度, 进而也会对耐雷性能的分析产生影响。

3.2.1 雷电流幅值对绕击的影响

图3为雷击线路的EGM。较大幅值的雷电流

对应较大的击距, 一系列逐渐变大的雷电流形成了逐渐向外的一系列定位曲面, 图中阴影部分为各雷电流情况下的绕击区, 绕击弧随着雷电流幅值的增大而逐渐减小。当雷电流幅值超过该线路的绕击耐雷水平 $I_{\min}$ 时, 线路就会发生绕击闪络; 当雷电流增大到 $I_{\max}$ 时绕击弧长变为0, 此时雷电不是击中地线, 就是击中大地, 而不会再发生绕击。此时的雷电流幅值 $I_{\max}$ 称为该线路的最大临界绕击电流, 对应的击距则是最大击距 R_{cm} ^[10]。最大击距 R_{cm} 与杆塔上导、地线的平均高度、塔头结构以及地形等有关。考虑击距系数 β 时, 水平地面的最大击距计算公式为

$$R_{cm} = \frac{\beta(h_g + h_c) + \sin\alpha \sqrt{(h_g + h_c)^2 - G}}{2F} \quad (18)$$

式中, $F = \beta^2 - \sin^2\alpha$; $G = F[h_g - h_c]/\cos\alpha^2$ 。

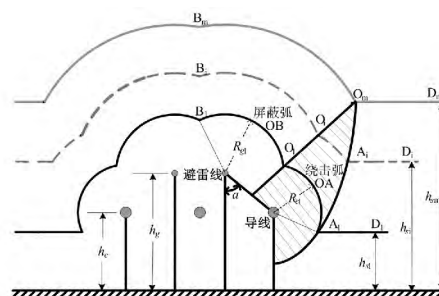


图3 雷击线路的电气几何模型

3.2.2 雷电流幅值概率对绕击的影响

每次雷击的雷电流幅值呈随机概率分布, 通过分析大量实测的雷电流幅值, 可得到雷电流的幅值概率分布曲线。数据表明: 雷电流幅值概率分布具有很强的地域性, 它主要和该地区的纬度、地形地貌、雷暴强度等因素有关。

国网武汉高压研究院对1000 kV特高压交流输变电示范工程沿线雷电分布特征和易闪络段开展了全面的分析得到了如图4所示的沿线路走廊雷电流幅值累积概率分布曲线和图5所示的雷电流自然分布概率曲线。

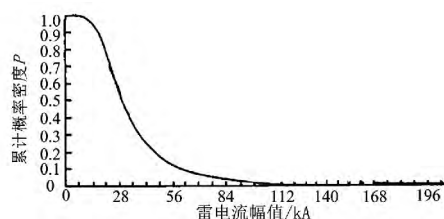


图4 雷电流幅值累积概率分布曲线

以“晋东南—南阳—荆门”1000 kV特高压交流输变电示范工程ZBS2杆塔为例, 由式(9)可得计

及导线工作电压时的最小耐雷水平 $I_{\min} \approx 35.51 \text{ kA}$,

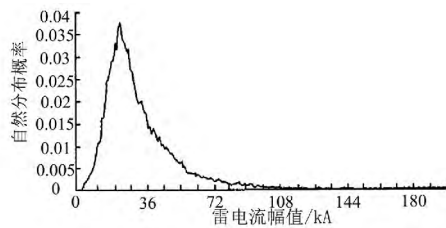


图5 雷电流自然分布概率曲线

雷电流概率密度 $P_I \approx 32\%$, 即幅值超过绕击最小闪络电流 35.51 kA 的雷电流概率约为 32% 。

3.3 线路绝缘水平对绕击的影响

超/特高压输电线路的绝缘有两类: 一类是导线与杆塔之间的绝缘子串; 另一类则是导线跟杆塔之间或大地之间的空气间隙 [14]。

输电线路的绝缘水平主要取决于线路和杆塔间绝缘子串的放电特性。一般来说, 当绝缘子串长一定, 绝缘子串片数越多, 线路绝缘水平就越强, 绝缘子串 50% 冲击放电电压 $U_{50\%}$ 就越高, 线路的绕击跳闸率就越低, 线路的耐雷水平就越高。为使线路保持一定的绝缘水平, 在设计杆塔和导线布置形式时, 应合理设置导线与杆塔或大地的空气间隙。

3.4 线路走廊地形对绕击的影响

从4种不同类型的地形状况, 考虑超/特高压交流输电线路的绕击耐雷性能。平原下的绕击状况已在3.1节中做过相应分析, 这里主要研究山坡、山顶、峡谷3种地形对绕击的影响。

3.4.1 山坡上输电线路绕击分析

山坡线路的绕击 EGM 如图6。 θ 为山坡的倾角。

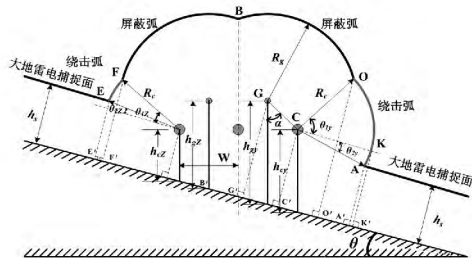


图6 山坡线路 EGM

绕击弧在山坡地面的投影长度计算式如式 (19)。

$$\begin{cases} \overline{OK'} + \overline{AK'} = R_c (2 - \cos\theta_{2y} - \cos\theta_{1y}) \\ \overline{FE'} = R_c (\cos\theta_{2z} - \cos\theta_{1z}) \end{cases} \quad (19)$$

式中, θ_{1y} 、 θ_{1z} 、 θ_2 都是倾角 θ 的函数。由图6可得

$$\begin{cases} \theta_{1y} = \frac{\pi}{2} (\alpha + \theta) - \arccos \left(\frac{R_c^2 + \overline{GC}^2 - R_g^2}{2R_c \overline{GC}} \right) \\ \theta_{1z} = \frac{\pi}{2} + (\alpha - \theta) - \arccos \left(\frac{R_c^2 + \overline{GC}^2 - R_g^2}{2R_c \overline{GC}} \right) \\ \theta_{2y} = \arcsin \left(\frac{\cos\theta h_{cy} - h_s}{R_c} \right) \\ \theta_{2z} = \arcsin \left(\frac{h_s - \cos\theta h_{cz}}{R_c} \right) \end{cases} \quad (20)$$

位于山坡的输电线路绕击率计算式为

$$P_\alpha = \frac{\overline{FE'} + \overline{OK'} + \overline{AK'}}{\overline{EK'} + \overline{AK'}} = \frac{R_c (2 - \cos\theta_{2y} + \cos\theta_{2z} - \cos\theta_{1y} - \cos\theta_{1z})}{R_c (2 - \cos\theta_{2y} + \cos\theta_{2z}) + 2W \cos\theta} \quad (21)$$

位于山坡的右侧和左侧输电线路的最大击距

R_{my} 和 R_{mz} 的计算式如式 (22)。

$$\begin{cases} R_{my} = \beta (h_{gy} + h_{cy}) + \sin(\alpha + \theta) \cdot \sqrt{(h_{gy} + h_{cy})^2 - G_y} \cos\theta / (2F_y) \\ R_{mz} = \beta (h_{gz} + h_{cz}) + \sin(\alpha - \theta) \cdot \sqrt{(h_{gz} + h_{cz})^2 - G_z} \cos\theta / (2F_z) \end{cases} \quad (22)$$

式中,

$$\begin{cases} F_y = \beta^2 - \sin^2(\alpha + \theta) \\ F_z = \beta^2 - \sin^2(\alpha - \theta) \end{cases} \quad (23)$$

$$\begin{cases} G_y = F_y [(h_{gy} - h_{cy}) / (\cos\alpha \cos\theta)]^2 \\ G_z = F_z [(h_{gz} - h_{cz}) / (\cos\alpha \cos\theta)]^2 \end{cases} \quad (24)$$

由3.1节所述方法可以得到 $I_{\max y}$ 、 $I_{\max z}$ 。然后, 可计算输电线路的右侧和左侧的绕击闪络率 P_{fy} 和 P_{fz} 以及总的绕击闪络率 P_f 。

$$P_{fy} = \int_{I_{\min}}^{I_{\max y}} P_\alpha P_I dI \quad (25)$$

$$P_{fz} = \int_{I_{\min}}^{I_{\max z}} P_\alpha P_I dI$$

$$P_f = P_{fy} + P_{fz} \quad (26)$$

其中, P_I 为雷电流概率密度; $I_{\min}$ 为绕击闪络的临界电流, kA。

3.4.2 山顶上输电线路绕击分析

山顶线路的绕击 EGM 如图7。其中 θ_y 、 θ_z 分别为山体右侧和左侧的地面倾角。

绕击弧在山坡地面的投影长度计算式如式 (27)。

$$\begin{cases} \overline{OK'} + \overline{AK'} = R_c (2 - \cos\theta_{2y} - \cos\theta_{1y}) \\ \overline{FM'} + \overline{EM'} = R_c (2 - \cos\theta_{2z} - \cos\theta_{1z}) \end{cases} \quad (27)$$

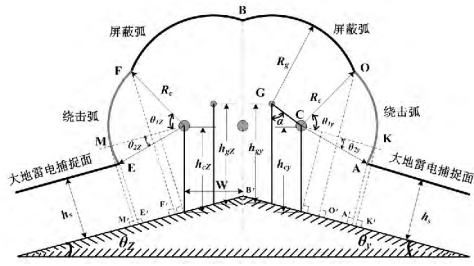


图 7 山顶线路 EGM

θ_{2z} 位于山顶的输电线路,其 EGM 中 θ_{1y} 、 θ_{1z} 、 θ_{2y} 、都是山体倾角 θ_y 或 θ_z 的函数,由图 8 可得

$$\begin{cases} \theta_{1y} = \frac{\pi}{2} + (\alpha + \theta_y) - \arccos\left(\frac{R_c^2 + \overline{GC}^2 - R_g^2}{2R_c \overline{GC}}\right) \\ \theta_{1z} = \frac{\pi}{2} + (\alpha + \theta_z) - \arccos\left(\frac{R_c^2 + \overline{GC}^2 - R_g^2}{2R_c \overline{GC}}\right) \\ \theta_{2y} = \arcsin\left(\frac{h_{cy}\cos\theta_y - h_s}{R_c}\right) \\ \theta_{2z} = \arcsin\left(\frac{h_{cz}\cos\theta_z - h_s}{R_c}\right) \end{cases} \quad (28)$$

山顶输电线路绕击率计算式为

$$P_\alpha = \frac{\overline{O'K'} + \overline{A'K'} + \overline{F'M'} + \overline{E'M'}}{\overline{B'M'} + \overline{B'K'} + \overline{E'M'} + \overline{A'K'}} = \frac{R_c(4 - \cos\theta_{2y} - \cos\theta_{2z} - \cos\theta_{1y} - \cos\theta_{1z})}{R_c(4 - \cos\theta_{2y} - \cos\theta_{2z}) + \frac{W}{\cos\theta_y} + \frac{W}{\cos\theta_z} - h_{cy}\sin\theta_y - h_{cz}\sin\theta_z} \quad (29)$$

位于山顶的输电线路右侧与左侧最大击距 R_{my} 和 R_{mz} 的计算公式为

$$\begin{cases} R_{my} = [\beta(h_{gy} + h_{cy}) + \sin(\alpha + \theta_y)] \cdot \sqrt{(h_{gy} + h_{cy})^2 - G_y} \cos\theta_y / (2F_y) \\ R_{mz} = [\beta(h_{gz} + h_{cz}) + \sin(\alpha + \theta_z)] \cdot \sqrt{(h_{gz} + h_{cz})^2 - G_z} \cos\theta_z / (2F_z) \end{cases} \quad (30)$$

式中,

$$\begin{cases} F_y = \beta^2 - \sin^2(\alpha + \theta_y) \\ F_z = \beta^2 - \sin^2(\alpha + \theta_z) \end{cases} \quad (31)$$

$$\begin{cases} G_y = F_y [(h_{gy} - h_{cy}) / (\cos\alpha\cos\theta_y)]^2 \\ G_z = F_z [(h_{gz} - h_{cz}) / (\cos\alpha\cos\theta_z)]^2 \end{cases} \quad (32)$$

求得输电线路右(左)侧最大绕击雷电流 I_{maxy} (I_{maxz}),再根据式(25)和式(26)就可得到通过山顶的输电线路的绕击闪络率。

3.4.3 峡谷上输电线路绕击分析

穿过峡谷输电线路的绕击 EGM 分析如图 8 所示。 θ_y 、 θ_z 分别为峡谷右侧和左侧的地面倾角。

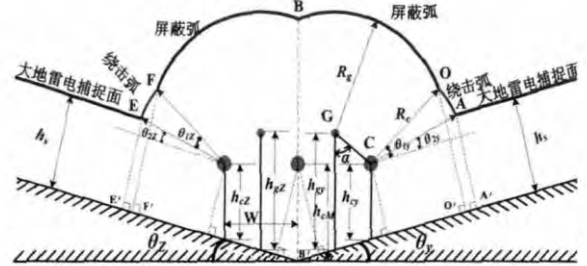


图 8 峡谷线路 EGM

与位于山坡、山顶的输电线路情况一样,位于峡谷输电线路绕击弧与 θ_{1y} 、 θ_{2y} 、 θ_{1z} 、 θ_{2z} 有关。其绕击弧在地面投影长度计算式如式(33)。

$$\begin{cases} \overline{O'A'} = R_c(\cos\theta_{2y} - \cos\theta_{1y}) \\ \overline{F'E'} = R_c(\cos\theta_{2z} - \cos\theta_{1z}) \end{cases} \quad (33)$$

式中, θ_{1y} 、 θ_{1z} 、 θ_{2y} 、 θ_{2z} 也都是山体倾角 θ_y 或 θ_z 的函数,其中 θ_{2y} 、 θ_{2z} 的计算式与式(28)中的计算式一样。由图 8 中几何关系有

$$\begin{cases} \theta_{1y} = \frac{\pi}{2} + (\alpha - \theta_y) - \arccos\left(\frac{R_c^2 + \overline{GC}^2 - R_g^2}{2R_c \overline{GC}}\right) \\ \theta_{1z} = \frac{\pi}{2} + (\alpha - \theta_z) - \arccos\left(\frac{R_c^2 + \overline{GC}^2 - R_g^2}{2R_c \overline{GC}}\right) \\ \theta_{2y} = \arcsin\left(\frac{h_s - h_{cy}\cos\theta_y}{R_c}\right) \\ \theta_{2z} = \arcsin\left(\frac{h_s - h_{cz}\cos\theta_z}{R_c}\right) \end{cases} \quad (34)$$

峡谷输电线路绕击率计算式为

$$P_\alpha = \frac{\overline{F'E'} + \overline{O'A'}}{\overline{E'B'} + \overline{B'A'}} = \frac{R_c(\cos\theta_{2y} + \cos\theta_{2z} - \cos\theta_{1y} - \cos\theta_{1z})}{R_c(\cos\theta_{2y} + \cos\theta_{2z}) + W(\cos\theta_y + \cos\theta_z) + h_{cm}(\sin\theta_z + \sin\theta_y)} \quad (35)$$

穿越峡谷的输电线路右侧与左侧最大击距 R_{my}

和 R_{mz} 的计算公式为

$$\begin{cases} R_{my} = [\beta(h_{gy} + h_{cy}) + \sin(\alpha - \theta_y)] \cdot \sqrt{(h_{gy} + h_{cy})^2 - G_y} \cos\theta_y / (2F_y) \\ R_{mz} = [\beta(h_{gz} + h_{cz}) + \sin(\alpha - \theta_z)] \cdot \sqrt{(h_{gz} + h_{cz})^2 - G_z} \cos\theta_z / (2F_z) \end{cases} \quad (36)$$

式中, F_y 、 F_z 的计算式如式(37), G_y 、 G_z 的计算式与式(32)一致。

$$\begin{cases} F_y = \beta^2 - \sin^2(\alpha - \theta_y) \\ F_z = \beta^2 - \sin^2(\alpha - \theta_z) \end{cases} \quad (37)$$

求得右侧和左侧最大绕击雷电流 I_{maxy} 、 I_{maxz} ,再

根据式(25)和式(26)就可得到通过山顶的输电线路的绕击闪络率。

3.5 保护角对绕击的影响

线路保护角对输电线路绕击耐雷性能也有较大影响。当输电线路的保护角变小时,导线受到地线更强的屏蔽作用,输电线路的绕击跳闸率会降低^[1]。固定塔型上的输电线路,由于导线的弧垂大于地线的弧垂,故输电线路在两基杆塔档距中央处有最小保护角,在塔头处有最大保护角,所以在评价保护角对超/特高压输电线路绕击特性的影响时,应选择塔头处的保护角来进行分析^[12]。以特高压 ZBS2 线路杆塔为研究对象,分析同一雷电流幅值不同线路保护角下平原地区塔头处输电线路绕击 EGM。

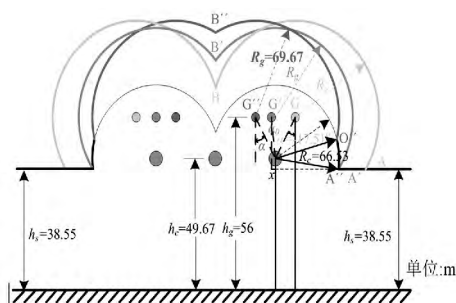


图 9 不同保护角下酒杯塔线路 EGM

图 9 为 20 kA 雷电流下不同保护角时水平地面 ZBS2 塔型输电线路绕击 EGM。通过逐渐缩短两根避雷线之间的距离以逐渐增大线路保护角 α , 对不同保护角下输电线路绕击跳闸率做定性分析。

结果显示:在 20 kA 雷电流幅值作用前提下,地线位置从 G 移动到 G' 的过程中,当地线位于 G 处时,保护角 α 为负,导线不会发生导线绕击的情况;当地线位于 G' 处时,保护角 α 为正,这时可能会发生绕击导线的情况;当地线位于 G' 处时,并且当大于此保护角时,导线不再得到地线的有效屏蔽保护,小于此保护角时导线始终处于地线的有效保护下。称地线位于 G' 处的保护角 α_0 为 20 kA 雷电流幅值作用时的临界保护角,由图 9 得

$$x \approx \sqrt{R_g^2 - (h_g - h_c)^2} - R_c \quad (38)$$

临界保护角计算式为

$$\alpha_0 \approx \arctan\left(\frac{x}{h_g - h_c}\right) \quad (39)$$

3.6 地面植被对绕击的影响

国内关于地面植被对输电线路绕击跳闸率的影响的研究还很少,IEEE 工作组在 IEEE Std 1410 -

2004 中给出了树木对线路绕击跳闸率影响的标准,认为地面植被对线路的屏蔽作用随着树木高度以及树木与导线之间的水平距离的不同而存在较大差异^[13]。地面植被影响下输电线路绕击跳闸率计算式为

$$N = n(1 - S_f) \quad (40)$$

式中, N 为考虑植被屏蔽后线路的绕击跳闸率; n 为没有植被屏蔽作用的空旷地域中线路的绕击跳闸率; S_f 为树木的屏蔽因素。

屏蔽因素 S_f 指线路周围的树木对单位线路绕击的屏蔽作用^[14]。 S_f 值的确定现在还没有固定的公式,IEEE Std 1410 - 2004 给出了 S_f 随树木高度以及树木与导线间的水平距离而变化的曲线图 10。

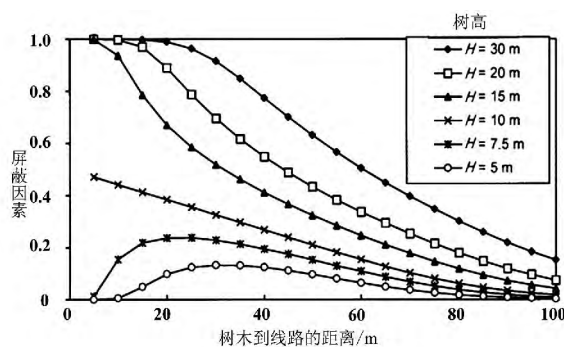


图 10 不同树高、线路到树水平距离时的屏蔽因素

线路周围树木对线路绕击跳闸率的影响很大,在导线平均高度、树木与导线间水平距离不变的情况下,树木对线路的屏蔽作用随着树木高度的增加而增强,树木高度越高绕击跳闸率越小;在树高不变,树木与导线间水平距离不变的情况下,树木对线路的屏蔽作用随导线平均高度的增大而变小;高度大于 10 m 的树木,对线路的屏蔽作用随与输电线路水平距离变近而越强。

4 计算分析

这里以 500 kV ZB1 型酒杯塔为例,杆塔几何尺寸如图 11 所示。导线弧垂为 12 m,避雷线弧垂为 9.5 m,绝缘子串长度为 5 m,四川地区落雷密度取 5 次/km²·a,绕击耐雷水平为 17 kA。

地面倾角 $\theta = 0^\circ$,导线工频电压相角 $\varphi = 0^\circ$,忽略地面植被影响时,不同绝缘子片数下线路的绕击跳闸率如图 12(a);地面倾角 $\theta = 0^\circ$,导线工频电压相角 $\varphi = 0^\circ$,绝缘子串片数为 28 片,忽略地面植被影响时,不同线路保护角下线路绕击跳闸率如图 12

(b); 导线工频电压相角 $\varphi = 0^\circ$, 绝缘子串片数为 28 片, 忽略地面植被影响时, 不同地面倾角下线路绕击跳闸率如图 12(c); 导线工频电压相角 $\varphi = 0^\circ$, 绝缘子串片数为 28 片, 不同地面倾角线路绕击跳闸率加权平均值下, 不同树高、不同线树距离下线路绕击跳闸率如图 12(d)。

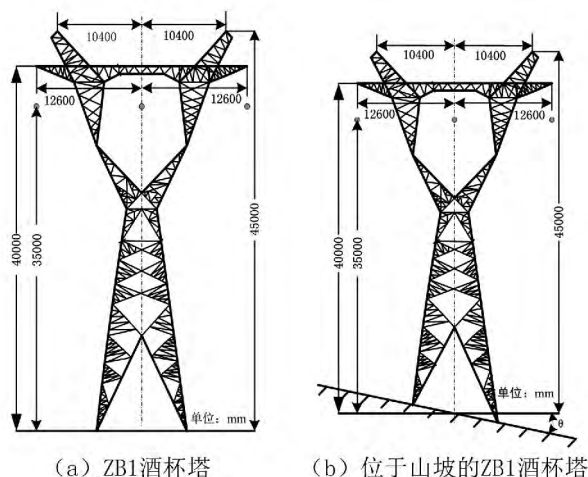


图 11 500 kV 单回线路杆塔结构几何尺寸

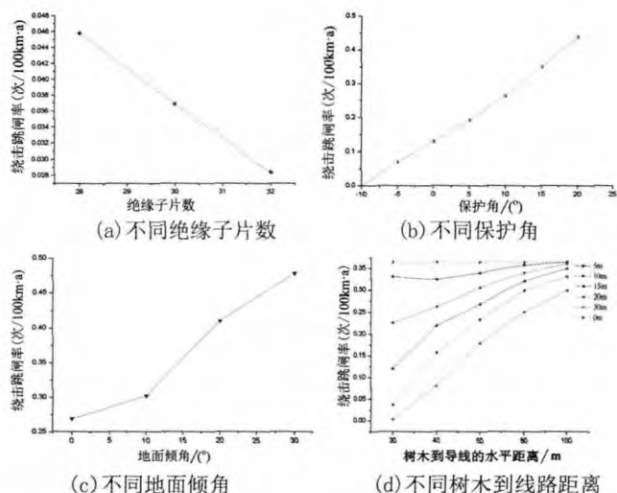


图 12 不同影响因素对 500 kV 单回线路绕击跳闸率的影响

图 12 是根据上述绕击跳闸率计算式所得 500 kV ZB1 型酒杯塔在不同影响条件下的绕击跳闸率。从图中可以看出: 随着绝缘子串片数的增加线路绕击跳闸率降低; 绕击跳闸率值随着保护角的增加逐渐增大, 当保护角超过 10° 时, 绕击跳闸率值增加幅度变大; 线路绕击跳闸率随着地面坡度的增大呈非线性上升趋势; 在导线平均高度、树到导线水平距离不变的情况下, 树木越高, 树线路绕击跳闸率越小, 且树木与输电线路的水平距离越近时, 线路绕击跳闸率越小。

5 总结及建议

运用 EGM 分析了垂直地面落雷条件下超/特高压交流输电线路的绕击性能, 通过对影响其绕击性能的几个主要因素的分析, 结果表明如下:

- 1) 只有在绕击导线的雷电流幅值 I 满足: $I_{\min} < I < I_{\max}$ 时, 被击输电线路才会发生有危害的绕击;
- 2) 决定线路绝缘水平的绝缘子片数足够多、导线与杆塔间或大地间的空气间隙足够长时, 不会发生因线路绝缘而产生的绕击故障;
- 3) 线路经过山顶时, 绕击跳闸率最大; 经过山坡时次之; 位于峡谷的线路绕击跳闸率最低; 平原地区的线路绕击跳闸率也很低;
- 4) 减小地线保护角, 绕击跳闸率将明显降低;
- 5) 地面植被对超/特高压输电线路绕击耐雷水平的影响, 与树高以及树木到线路的水平距离等有关。

上述各绕击影响因素的分析结果是在仅考虑某一个变量条件下得到的, 而实际运行线路中, 各类影响因素需综合考虑, 才能准确评价线路的绕击特性。

参考文献

- [1] 李景禄等. 现代防雷技术 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [2] 何金良, 赵杰, NAYEL M, 等. 导线电压对电气几何模型的雷电击距的影响 [J]. 南方电网技术, 2007, 1(1): 14-19.
- [3] Eriksson A. J. An Improved Electrogeometric Model for Transmission Line Shielding Analysis [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1987, 2(3): 871-88.
- [4] IEEE Std 1243-1997, IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines [S].
- [5] 刘振亚. 特高压电网 [M]. 北京: 中国经济出版社, 2005.
- [6] 陈家宏, 吕军, 钱之银, 等. 输电线路差异化防雷技术与策略 [J]. 高电压技术, 2009, 35(12): 2891-2902.
- [7] 贾磊, 舒亮, 郑士普, 等. 计及工频电压的输电线路耐雷水平的研究 [J]. 高电压技术, 2006, 32(11): 111-114.
- [8] 赵智大. 高电压技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [9] 李瑞芳, 吴广宁, 曹晓斌, 等. 雷电流幅值概率计算公式 [J]. 电工技术学报, 2011, 26(4): 161-167.

- [10] 刘洪建, 和伟, 徐八林, 等. 导线电压对其雷电绕击耐雷性能的影响 [J]. 南方电网技术, 2011, 5(2): 72 - 75.
- [11] 王志勇, 余占清, 李雨, 等. 减小地线保护角对改善线路防雷性能的效果 [J]. 高电压技术, 2011, 37(3): 622 - 628.
- [12] 王茂成, 张治取, 滕杰, 等. 1 000 kV 单回特高压交流输电线路的绕击防雷保护 [J]. 电网技术, 2007, 32(1): 155 - 159.
- [13] IEEE Std 1410 - 2004, IEEE Guide for Improving the

Lightning Performance of Electrical Power Overhead Distribution Lines [S].

- [14] 陈国庆. 交流输电线路绕击仿真模型及同杆双回耐雷性能的研究 [D]. 重庆: 重庆大学, 2003.

作者简介:

刘 意(1982), 工学硕士, 工程师, 研究方向为高压输电线路运行状态监测与安全评价;

文 艺(1988), 男, 工学硕士, 研究方向为输变电设备状态监测与故障诊断。

(收稿日期: 2015 - 03 - 19)

(上接第14页)

现场试验结果表明, 该装置在清扫速度、清扫质量、安全性能等方面表现出显著的效果。



图2 220 kV 变电站试验

参考文献

- [1] 徐文澄, 喻华玉. BRQ 便携式软轴连接高压带电清扫器研制 [J]. 中国电力, 2001, 34(12): 75 - 78.
- [2] 李小永. “十八项反措”意义试析及实施浅议 [J]. 电力系统通信, 2007(51): 4 - 6.
- [3] 王瑜, 张平安. 500 kV 高压带电绝缘清洗 [J]. 清洗世界, 2013, 29(10): 22 - 26.
- [4] 张晋, 汲胜昌, 曹涛, 等. 电力设备带电清扫技术的现状及展望 [J]. 绝缘材料, 2009, 42(2): 63 - 66.
- [5] 向平, 向鹏, 周敏, 等. 车载式电力绝缘子清洗装置的设计及特点分析 [J]. 重庆电力高等专科学校学报, 2012, 17(4): 89 - 94.
- [6] 孙阳盛, 华月申. 高分子带电清洗技术在 220 kV 变电站中的应用 [J]. 华东电力, 2013, 41(1): 238 - 240.
- [7] 黄燕. 电气设备清洗剂的研制 [J]. 化工技术与开发, 2010, 39(11): 23 - 25.
- [8] 刘凯, 朱天容. 绝缘子污秽成分分析与清洗剂去污机理研究 [J]. 高电压技术, 2012, 38(4): 892 - 898.
- [9] 朱正国, 钟建灵. 变电站绝缘子清洗试验数据分析 [J]. 高压电器, 2008, 44(5): 472 - 473.
- [10] 李恒真, 叶晓君. 广州地区输电线路沿线绝缘子自然污秽化学成分的来源分析 [J]. 高电压技术, 2011, 37(8): 1937 - 1943.
- [11] 王彬, 梁曦东, 张轶博, 等. 交、直流电压下复合绝缘子和瓷绝缘子的自然积污试验 [J]. 高电压技术, 2009, 35(9): 2322 - 2328.
- [12] 荣小平. 高压电路防污闪带电清洗维护技术可行性研究 [J]. 清洗世界, 2005, 21(9): 13 - 17.
- [13] 陈昊. 负荷时间序列 GARCH—GED 模型厚尾动态结构研究 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(增): 378 - 381.
- [14] 陈昊. 基于非高斯分布 GARCH 模型的负荷预测. 电力自动化设备 [J]. 2008, 28(7): 65 - 68.

作者简介:

张 涛(1979), 硕士, 工程师, 从事输变电运检管理和高压绝缘技术的研究。

(收稿日期: 2015 - 01 - 10)

5 结 论

这套基于气动原理和化学绝缘清洗剂的自由度绝缘清扫机具有下列优点: 1) 绝缘性能优良, 抗潮性能强, 确保带电作业人员的安全; 2) 机具重量轻, 减轻带电作业人员的劳动强度; 3) 刷头可以 270° 旋转, 配合绝缘操作杆与绝缘子的相对位置, 完全做到清扫不留死角; 4) 清洗剂呈雾状喷洒, 充分湿润污垢而不挂淋; 5) 易损零部件少, 维护方便, 使用寿命长。

这套装置研制成功后已经在 35 kV、110 kV、220 kV 的变电站多次进行现场清扫作业。装置在清扫速度、清扫质量、安全性能等方面表现出显著的效果, 既节约人力、物力、时间, 又减少了设备因停电清扫带来的经济损失, 具有广泛的应用前景。

架空输电线路交叉跨越距离检查及计算方法探讨

李盛杰, 王琼晶

(国网泸州供电公司, 四川 泸州 646000)

摘要: 气温的升降引起架空线的热胀冷缩, 使弧垂、应力发生相应的变化。采用状态方程式进行在输电线路弧垂计算、判定运行最大弧垂, 可使计算结果更为准确, 且能计算出不同气象条件下的架空线弧垂, 对交叉跨越距离测量有着重要的意义。

关键词: 弧垂检查; 最大弧垂计算; 悬高测量

Abstract: The rise and decrease of temperature cause the thermal expansion and contraction of overhead line, which makes the sag and stress have a corresponding change. Using the equation of state to calculate the sag of the running transmission line and to determine the maximum sag during operation can make the calculation result be more accurate, and can calculate the sag of overhead line under different meteorological conditions, which is of important significance for the crossed crossing distance measurement.

Key words: sag inspection; maximum sag calculation; unsupported distance measurement

中图分类号: TM726.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2015)03-0023-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.03.005

0 引言

线路运行人员测量架空线路与交叉跨越物的距离常用方法是用测距杆测距或使用经纬仪、全站仪进行悬高测量, 得出距离后结合运行经验或查看架线弧垂表估算弧垂变化量判定架空线对交叉跨越物的距离是否满足要求。此类方法简单、易操作但却缺乏准确度, 且不能计算出架空线在不同气象条件时对跨越物的距离, 合理地选择弧垂检查方法和准确地计算线路运行最大弧垂对从事线路运行维护的人员至关重要。结合某供电企业 110 kV 林赤线的弧垂检查实例对架空线与交叉跨越的距离测量方法进行一次探讨。

1 案例简介

2010年5月, 110 kV 林赤线 77 号塔至 78 号塔下修建高速公路, 施工单位采取人工取土的方式平整场地, 无安全隐患。但由于高速公路基面高度将增加 3 m, 高速公路修好后对地距离可能不满足规范要求, 需进行距离测量。110 kV 林赤线 77 号至 78 号三相导线之中 C 相导线与高速公路基面的垂

直距离最近, 77 号至 78 号处于 75 至 80 号这一耐张段之中, 两基铁塔均为直线猫头塔。通过查取设计图纸查得 77 号呼称高为 19.5 m, 78 号呼称高为 21 m, 绝缘子串长均为 1.5 m, 两基铁塔导线悬挂点高差为 7 m, 77 至 78 档距 l 为 425 m, 代表档距 l_{ab} 为 378 m, 最高温为 t_2 为 40 °C, 最大覆冰厚度 b 为 10 mm, 温度 t_3 为 -5 °C, 导线型号为 LGJ-185。导线物理参数如表 1。

表 1 导线物理参数

单位长度质量 ρ / (kg · m ⁻¹)	弹性系数 E / MPa	温胀系数 α / 1 · °C	计算截面 A / mm ²			直径 d / mm
			铝	钢	总计	
0.774	78 400	18.8×10^{-6}	182.4	34.4	216.8	19.02

2 弧垂测量

弧垂测量方法有等长法、异长法和档端角度法 3 种, 输电线路弧垂测量应根据实际情况选择合理、适当的方法进行弧垂测量。

1) 等长法(如图 1), 又称平行四边形法。观测人员在观测档两侧的杆塔上绑上弧垂板, 利用三点一线的原理观测弧垂。操作步骤如下: ①计算观测档弧垂理论值 f 。②测点工作人员在距架空线悬挂点 C 垂直距离为理论弧垂值 f 的点 B 悬挂弧垂板,

另一侧杆塔上的视点观测人员在距架空线悬挂点D垂直距离为 f 的点A观测对侧的弧垂板悬挂点B。视线与架空线相切,则该档的弧垂即为理论弧垂值;视线与架空线交叉,则理论弧垂偏小;视线上无架空线,则理论弧垂值偏大。③根据观测情况,同时调整观测人员以及弧垂板与架空线悬挂点的垂直距离并保持大小一致,视线与架空线相切后记录观测人员与架空线悬挂点的垂直距离即为此时的弧垂。采用等长法检查弧垂,架空线悬点高差应小于20%档距,最大弧垂应比杆塔呼称高小2 m以上。

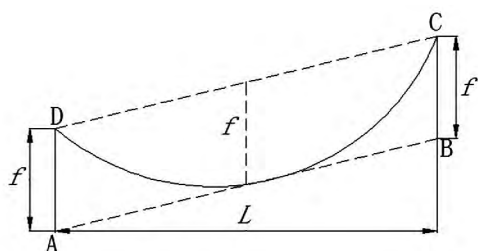


图1 等长法

2) 异长法(如图2),其计算公式为: $f = (\frac{\sqrt{a} + \sqrt{b}}{2})^2$,该公式是弧垂观测的经验公式,在输电线路弧垂观测中广泛使用。异长法检查弧垂操作步骤如下:①选择一个 a 值,测点工作人员登上一侧杆塔在距离导线悬挂点C垂直距离为 a 的D点悬挂弧垂板;②视点弧垂观测人员在另一侧的杆塔上看对侧杆塔上的弧垂板悬挂点B,寻找视线与架空线相切的位置点A,并在视点杆塔测出架空线悬挂点B的垂直距离 b ;③根据经验公式算出弧垂 f 。

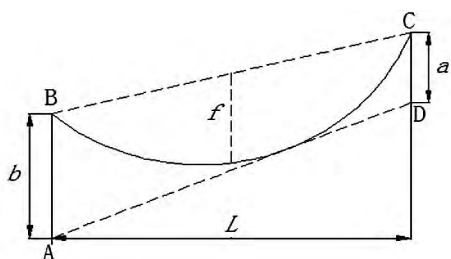


图2 异长法

3) 档端角度法(如图3),是一种适用、易操作的检查弧垂方法,该方法是将仪器支于档距距端点进行弧垂观测,观测人员使用全站仪、经纬仪等站在一档线路两侧杆塔的下方观测弧垂,视线与架空线相切便可记录相关数据。

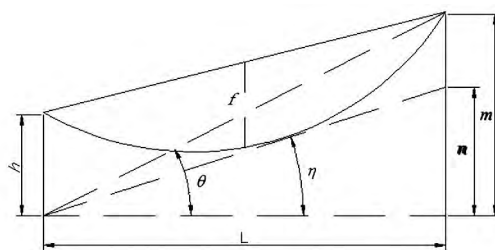


图3 档端角度法

档端角度法的计算公式为

$$f = \left(\frac{\sqrt{h} + \sqrt{\tan\theta L - \tan\eta L}}{2} \right)^2$$

式中, h 为观测点与架空线悬挂点的垂直距离; θ 为观测点与视点架空线悬挂点的竖直夹角; η 为观测点与架空线弧垂切点的竖直夹角; L 为观测档档距。

该方法检查架空线弧垂与异长法进行弧垂观测计算原理相同,档端角度法是一种特殊的异长法,其计算公式与异长法的经验公式相同,推证过程如下。

$$\begin{aligned} \left. \begin{aligned} n &= \tan\eta L \\ m &= \tan\theta L \end{aligned} \right\} \Rightarrow b = m - n = (\tan\theta L - \tan\eta L) \Rightarrow h = a \\ f = \left(\frac{\sqrt{a} + \sqrt{b}}{2} \right)^2 = \left(\frac{\sqrt{h} + \sqrt{\tan\theta L - \tan\eta L}}{2} \right)^2 \end{aligned}$$

根据110 kV林赤线的实际情况,3种方法都可进行弧垂检查。对比以上3种方法不难发现,等长法和异长法进行弧垂检查都存在以下2个缺点:①观测人员需登上杆塔作业,线路带电时需与带电体保持相应的安全距离,存在一定的安全隐患;②采用目测或借助望远镜观测,视距较小且准确度偏低。而选择角度法进行弧垂检查即可较少工作量,也能提高准确度,故选择档端角度法进行弧垂测量。

观测人员用在77号塔下架镜,用皮尺测得镜高1.5 m,铁塔基础相对地面向上0.3 m,用经纬仪测得距离高速公路垂直距离最小的C相导线弧垂切点的竖直角 $\eta = 1^\circ 2' 10''$,观测点与视点架空线悬挂点的竖直夹角 $\theta = 2^\circ 3' 50''$,检测时气温 t_1 为26℃。

$$h = 19.5 - 1.5 + 0.3 - 1.5 = 16.8 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} f_1 &= \left(\frac{\sqrt{16.8} + \sqrt{\tan 2^\circ 3' 50'' \times 425 - \tan 1^\circ 2' 10'' \times 425}}{2} \right)^2 \\ &= 11.77 \text{ m} \end{aligned}$$

3 运行最大弧垂计算

准确地判断架空线对跨越物的距离必须判定最

大弧垂,架空线的最大弧垂只发生在两种气象情况下,即覆冰无风或最高气温。状态方程式是线路设计阶段弧垂计算的公式,在输电线路的弧垂计算采用该公式进行相对其他弧垂换算公式更为准确、可信。判定最大弧垂应先算出当前应力,然后计算出最大弧垂气象条件下的应力(采用状态方程式进行),最后算出最大弧垂。

1) 应力计算。架空线的弧垂 f 与档距 l 、弧垂最低点应力 σ 、高差角 θ 的关系为: $\sigma = \frac{\gamma l^2}{8f \cos \theta}$ 。林赤线弧垂检测时导线无覆冰,无风,导线的比载只有自重比载,根据比载计算公式,算得

$$\gamma_1 = \frac{qg}{A} = \frac{0.774 \times 9.8}{216.8} = 34.99 \times 10^{-3} \text{ (MPa/m)}$$

式中, q 为单位长度质量; A 为导线截面积; g 为重力加速度。

$$\text{高差角 } \cos \theta = \frac{l}{\sqrt{l^2 + h_{\Delta}^2}} = \frac{425}{\sqrt{425^2 + 7^2}} \approx 1, \text{ 则此}$$

时弧垂最低点应力为

$$\sigma_1 = \frac{\gamma_1 l^2}{8f_1 \cos \theta} = \frac{34.99 \times 10^{-3} \times 425^2}{8 \times 11.77 \times 1} = 67.12 \text{ MPa}$$

2) 最大弧垂判定。不同气象条件下架空线的各参数存在一定的关系,揭示架空线从一种气象条件下(第I状态)改变到另一种气象条件(第II状态)下的各个参数之间的关系的方程称为架空线的状态方程式。同一耐张段同一气象条件下,各档导线的比载及弧垂最低点的应力相等,对于连续档,应力换算应选用代表档距 l_{db} 进行计算。

换算应力采用状态方程式进行,计算公式如下。

$$\sigma_2^3 - \left[\sigma_1 - \frac{E\gamma_1^2 l_{db}^2}{24\sigma_1^2} - \alpha E(t_2 - t_1) \right] \sigma_2^2 - \frac{E\gamma_2^2 l_{db}^2}{24} = 0$$

$$\text{若令 } A = \sigma_1 - \frac{E\gamma_1^2 l_{db}^2}{24\sigma_1^2} - \alpha E(t_2 - t_1), B = \frac{E\gamma_2^2 l_{db}^2}{24},$$

$$\text{则 } \sigma_2^3 - A\sigma_2^2 - B = 0.$$

式中, σ_1 为第I状态架空线弧垂最低的应力; γ_1 为第I状态架空线比载; t_1 为第I状态时的温度; α 为温度线膨胀系数; E 为架空线的弹性模量; l_{db} 为代表档距; σ_2 为第II状态架空线的应力; γ_2 为第II状态的导线比载; t_2 为第II状态时的温度。

利用状态方程式,可计算出林赤线77号至78号导线在各种气象条件下的应力。计算导线运行

最大弧垂有两种方法:一种方法是分别计算出导线在最高气温和覆冰无风时的应力后,根据应力、比载、档距计算出两种气象条件下的弧垂,较大的即为最大弧垂;另一种是计算出一种气象条件下的应力后采用临界气温法,判定最大弧垂发生的气象条件,从而计算出最大弧垂。林赤线77号至78号所处地区的最高气温为40℃,根据状态方程式,带入数据计算最高气温时的导线应力。

$$A = 67.12 - \frac{78400 \times (34.99 \times 10^{-3})^2 378^2}{24 \times 67.12^2}$$

$$- 78400 \times 18.8 \times 10^{-6} \times (40 - 26) = -80.35$$

$$B = \frac{78400 \times (34.99 \times 10^{-3})^2 378^2}{24} = 571447$$

$$\text{则 } \sigma_2^3 + 80.35\sigma_2^2 - 571447 = 0 \Rightarrow \sigma_2 = 63.113 \text{ MPa}$$

采用临界气温法判定林赤线的最大弧垂发生的气象条件,林赤线77号至78号段覆冰无风的气象参数为覆冰厚度10mm,气温-5℃,冰重比载为

$$\begin{aligned} \gamma_3 &= 27.728 \frac{b(b+d)}{A} \times 10^{-3} \\ &= 27.728 \times \frac{10 \times (19.02 + 10)}{216.8} \times 10^{-3} \\ &= 37.12 \times 10^{-3} \text{ MPa/m} \end{aligned}$$

式中, b 为冰厚; d 为导线直径; A 为导线总截面积。

$$\begin{aligned} \text{覆冰综合比载 } \gamma_4 &= \gamma_1 + \gamma_3 = 34.99 \times 10^{-3} + \\ &37.12 \times 10^{-3} = 72.11 \times 10^{-3} \text{ MPa/m} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{临界气温 } t_j &= t_b + \left(1 - \frac{\gamma_1}{\gamma_4}\right) \frac{\sigma_b}{\alpha E} = -5 + \\ &\left(1 - \frac{34.99 \times 10^{-3}}{72.11 \times 10^{-3}}\right) \times \frac{63.113}{18.8 \times 10^{-6} \times 78400} = 21 \text{ }^\circ\text{C} \end{aligned}$$

式中 t_j 为临界气温; t_b 为覆冰时的温度; α 为温胀系数, E 为弹性模量。

因为 $t_j < t_{\max} = 40 \text{ }^\circ\text{C}$,所以最大弧垂发生在最高气温气象条件下。

3) 运行最大弧垂值

$$f_{\max} = \frac{\gamma_1 l^2}{8\sigma \cos \theta} = \frac{34.99 \times 10^{-3} \times 425^2}{8 \times 63.113 \times 1} = 12.52 \text{ m}$$

4 任意点弧垂变化量计算

由前面的计算可知110kV林赤线77号至78

号弧垂变化量为

$$\Delta f = f_{\max} - f = 12.52 - 11.77 = 0.75 \text{ m}$$

任意点弧垂的计算公式为

$$f_r = f \times \frac{4x}{l} \times \left(1 - \frac{x}{l}\right) \quad [2]$$

式中, f_r 为任意点弧垂; x 为架空线上任意点至一侧杆塔的水平距离。

测量人员使用全站仪测出跨越点与林赤线 77 号塔的水平距离为 198 m, 带入数据算得跨越点的弧垂变化量为

$$\Delta f_r = \Delta f \times \frac{4x}{l} \times \left(1 - \frac{x}{l}\right) = 0.75 \times \frac{4 \times 198}{425} \times \left(1 - \frac{198}{425}\right) = 0.746 \text{ m}$$

5 悬高测量检测架空线对跨越物的垂直距离

全站仪和经纬仪是最为常用的测距仪器, 全站仪通过发射红外线光测出观测点与棱镜之间的距离并通过夹角测量可计算出架空线以及被跨越物对地的距离, 从而计算出两者之间的垂直距离。经纬仪自身不具备距离测量的功能, 但可准确地测出角度, 借助标杆辅助可测出距离, 经纬仪测量示意图如图 4。

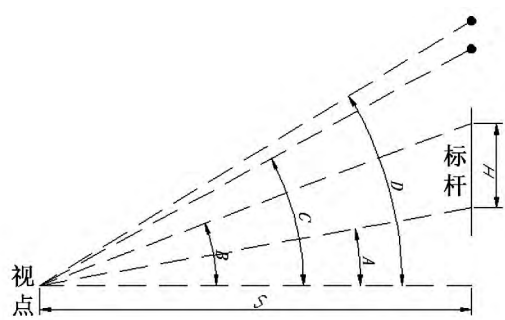


图4 经纬仪测量示意图

采用经纬仪检查时在视点架设经纬仪, 另一工作人员在架空线在跨越物的跨越点下方竖直放置一根有刻度的标杆, 视点检查人员测出视点与标杆上已知刻度点的夹角 A 和 B 后根据以下公式计算出标杆树立点与视点的水平距离为

$$S = \frac{H}{(\tan B - \tan A)}$$

式中, S 为视点架空线与跨越物下方的水平距离; H 为标杆视点高度。

架空线对交叉跨越物的计算公式为

$$h_1 = S(\tan D - \tan C)$$

式中, h_1 为架空线对跨越物的距离; S 为视点架空线与跨越物下方的水平距离。

110 kV 林赤线测量采用全站仪进行测量, 由于全站仪自带计算程序, 不需计算可直接测出导线对高速公路的垂直距离为 13.5 m。考虑高速公路基面还将上升 3 m, 以及导线弧垂将下降 0.746 m, 高速公路修好后对导线最近的距离应为 9.754 m, 查取运行规程可知满足要求。

6 结 语

随着电力工业的发展, 架空输电线路对弧垂的要求越来越高, 选择合理的弧垂检查方法、准确地计算线路弧垂对线路运行人员愈发重要。在输电线路的弧垂检查若进行登杆塔作业存在一定的安全隐患, 而采用全站仪、经纬仪进行检查既可保证安全, 也能提高检查精度。利用状态方程式进行弧垂推算, 能有效地提高弧垂计算的准确度, 为判定架空线路对跨越物的距离是否合格提供准确、可靠的依据。

参考文献

- [1] 孟遂民, 孔伟. 架空输电线路设计 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [2] 李光辉. 架空输电线路施工 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [3] 杨立华. 架空送电线路弛度测量的探讨 [J]. 电力勘测设计, 1995(1): 33-38.
- [4] 许海涛. 架空线弧垂优选检查方法 [J]. 湖北电力, 2010, 34(6): 18-19.
- [5] 张铁磊, 齐镇. 送电线路紧线施工中弧垂观测与调整方法的讨论 [J]. 中小企业管理与科技, 2011(3): 276-276.
- [6] 郑雄俊. 档内角度法检查弧垂和临档弧垂推算法检查弧垂 [J]. 中国电力教育, 2010(A01): 72-73.

作者简介:

李盛杰(1984), 工程师, 从事输电线路运行、检修管理工作 7 年。

(收稿日期: 2015-01-20)

一起变压器局部放电交接试验中绝缘缺陷的发现及分析

吴亮¹, 武坤²

(1. 广东电网公司汕头供电局, 广东 汕头 515041; 2. 国网河北省电力公司, 河北 石家庄 050021)

摘要: 大型电力变压器在投运前必须进行局部放电交接试验, 介绍了一起 220 kV 电力变压器局部放电交接试验中发现的 B 相中压局部放电量超标现象, 通过对放电图谱特征的分析, 结合技术定位和变压器历史信息, 判断出局部放电原因和位置, 经过吊罩检查找到了放电位置并对缺陷进行了消除。

关键词: 变压器; 局部放电; 交接试验; 引线

Abstract: The hand-over test of partial discharge should be done for large-scale power transformers before being put into operation. The phenomenon about excessive partial discharge found in phase B in hand-over test for a 220 kV power transformer is introduced. The discharge waveform is analyzed combined with technique location and historical information of the transformer. After the examination of the transformer, the insulation defect of partial discharge is located and eliminated.

Key words: transformer; partial discharge; hand-over test; leading wire

中图分类号: TM403.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2015)03-0027-03

DOI: 10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.03.006

0 引言

大型电力变压器出厂之前应进行严格的出厂试验考核, 但由于长距离运输中的振动或运行现场重新装配中工艺控制不良等原因, 安装完成后仍有可能存在内部缺陷, 因此技术人员应认真进行每一台变压器的交接试验, 确保变压器无缺陷投入运行。下面介绍了一起 220 kV 变压器在交接试验时发现的局部放电超标缺陷, 通过干扰排查、图谱特征判断、技术定位, 结合诊断设备测量和历史信息的排查分析, 最终判断出绝缘缺陷的原因和位置。

1 试验概况

该变压器为三相三绕组 220 kV 电力变压器, 型号为 SFPSZ9-180 000/220, 额定容量为 180 000/180 000/60 000 kVA, 额定电压为 $(220 \pm 8 \times 1.25\%) / 121 / 38.5$ kV, 联结组编号为 YNyn0d11。依据 GB 50150-2006《电力装置安装规程 电气设备交接试验标准》对该变压器进行局部放电检测, 以变频电源装置(400 kW, 频率范围 30~300 Hz)为试验电

源, 通过中间试验变压器对被试电力变压器低压绕组励磁, 中间变压器输出电压为 ± 35 kV, 试验采用低压双边加压方式对高中压绕组励磁, 并在高、中压套管末屏处监测局部放电信号。低压双边加压方式可以有效降低变压器低压套管承受的电压, 并且更好地模拟变压器的实际运行情况。试验接线见图 1。

2012 年 3 月 12 日进行局部放电交接试验时, 发现 B 相中压 $1.3 U_m / \sqrt{3}$ 下局部放电量为 1 000 pC (超过规程规定的不大于 300 pC), 高压局部放电量 170 pC。A、C 相高、中压局部放电量均不大于 100 pC, 符合要求。

2 试验分析

该变压器出厂试验时三相高、中压侧局部放电量均不大于 100 pC, 现场安装完成后其他交接试验项目均符合规程规定。为确认该变压器 B 相中压局部放电信号产生的原因和位置, 试验人员首先对放电图谱的特征进行了判断, 并结合试验环境对各种可能性的干扰信号进行了排查, 初步判断了局部放电产生的位置, 结合变压器在出厂试验结束后的

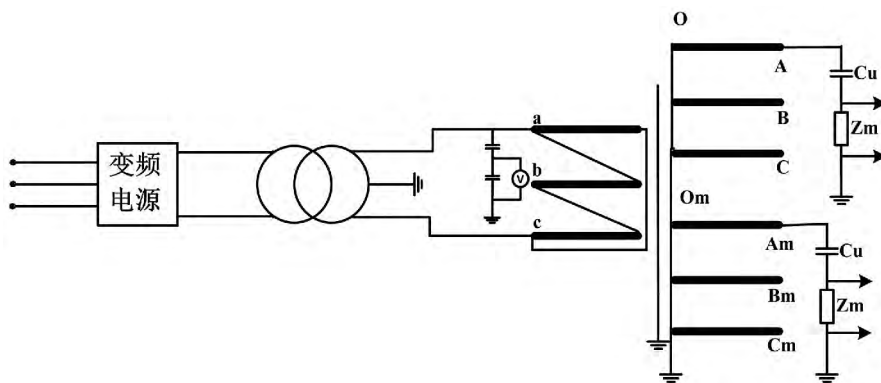


图1 变压器局部放电试验接线(以A相为例)

运输过程和重新装配过程中工作内容,找到了该局部放电信号的原因和位置。

2.1 干扰排查

在安装现场进行变压器局部放电试验时,经常会由于外界复杂环境引入各种类型的外界干扰,因此在检测到局部放电信号后,试验人员首先对各种可能存在的外部干扰进行了排查。

1) 通过对B相中压侧附近的所有金属体进行拆除、接地、清理,局部放电未消失,排除了套管附近环境可能带来的干扰;

2) 相同试验环境下,对B相与A、C两相试验结果进行对比测试,A、C两相局部放电量均小于100 pC,且未出现放电脉冲,仅B相出现局部放电脉冲信号,排除了试验电源和试验设备、试验接线不良等的干扰;

3) 更换均压环、检测阻抗、信号线等干扰排除措施后,局部放电未消失,排除了检测系统和空间信号可能带来的干扰。

2.2 局部放电图谱特征

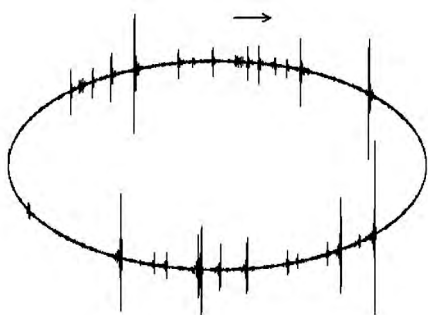


图2 B相中压局部放电图谱(箭头为旋转方向)

经过多次的升压和降压,并保持该 $1.3 U_m/\sqrt{3}$ 试验电压下对B相中压套管末屏处测量的局部放电信号进行监测,观察到的局部放电图谱(见图2)具有以下特征;

1) 放电信号在同一个周波内对称分布,具有典型的相位特征;

2) 该局部放电信号的起始电压初次为 $1.3 U_m/\sqrt{3}$ 、多次试验后为 $1.2 U_m/\sqrt{3}$;熄灭电压为 $1.1 U_m/\sqrt{3}$,起始电压略高于熄灭电压;

3) $1.3 U_m/\sqrt{3}$ 下,30 min 长时间加压过程中局部放电量维持于1 000 pC附近,仅有50~100 pC的逐渐衰减,下一次局部放电时依旧为1 000 pC,局部放电量幅值未见明显升高和降低。

与标准图谱相比,该局放特征可能为电极表面的气隙、介质内部气隙、悬浮电位放电等类型。由于该变压器出厂试验时和本次A、C相试验时均未检测到明显的局部放电,因此可以排除绝缘材料内部气隙引起放电的可能。同时加压过程中采用超高频局部放电测试仪和紫外测试仪对B相中压套管外部进行检测,未检测到放电信号,因此排除了B相中压套管外部的悬浮放电和尖端放电。可以初步判断局部放电应位于变压器的套管内部。

2.3 局部放电定位

为确认放电源的位置,改用非被试相短路接地的中性点支撑法对B相进行局部放电检测。采用中性点支撑法^[1],当被试相套管端部电压与中性点接地法一致时,绕组匝间电位差仅为中性点接地法时的2/3,通过对被试相套管端部施加相同的感应电压,对比放电量的起始熄灭电压和大小即可对脉冲放电发生的位置进行初步判断。如果两种方法下放电量一致,表明脉冲放电信号与绕组匝间电位差无关,脉冲放电发生位置可能为绕组引线至套管端部之间或套管外部。如果中性点支撑法时的放电量小于中性点接地法时,放电产生的部位就可能出现在变压器绕组中。该变压器在两种接线方式下的检

测结果表明,两种试验方法下局部放电信号的起始、熄灭电压及测量电压下的放电量均一致,因此判断放电位置应为B相中压绕组引线抽头至套管端部之间。

由于该套管为穿缆式结构,且出厂试验时为同一支套管,运输和安装过程中未受到撞击或损伤,因此排除套管本身的影响。结合重新安装套管工作流程,判断该局放可能原因有以下3种:

- 1) 穿缆时B相中压引线入套管时偏移、与附近距离不足;
- 2) 穿缆时由于卡涩等原因,安装人员拔引线过程中用力过大,造成B相中压引线外包绝缘破损;
- 3) 引线压装垫块受力发生位置偏移。

2.4 缺陷处理

2012年3月17日至3月18日,对该变压器进行了吊套管检查,检查内容主要为中压B相引线入套管位置是否出现偏离、表层绝缘及折弯处绝缘情况是否存在异常、压装垫块是否松动。发现以下两处问题:

- 1) B相中压引线入套管位置偏移,距离套管内部均压帽距离过近,该处由于高场强的存在可能引起局部放电;

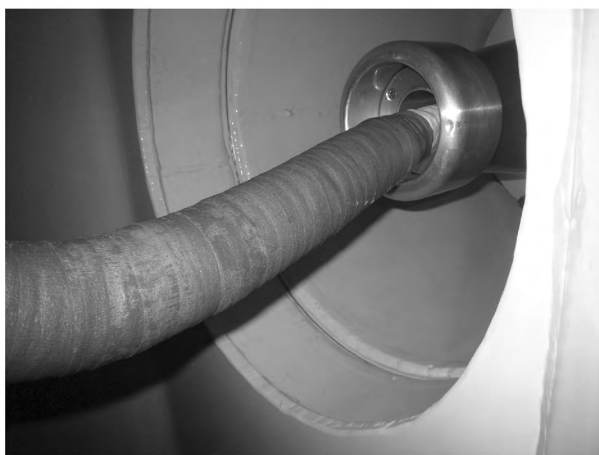


图3 B相中压引线入套管位置偏移

- 2) B相中压引线外包绝缘破损。B相中压引线外包绝缘存在3处明显的破损痕迹,可能在引线穿套管施工过程中造成,破损处若形成气隙,可能会造成电极表面气隙放电。

对两处绝缘缺陷进行处理,剥掉中压B相引线表层绝缘重新包扎并适当加厚2~3 mm,重新安装套管并检查引线入套管位置。处理完成后于3月20日重新进行该变压器局部放电试验,试验通过。

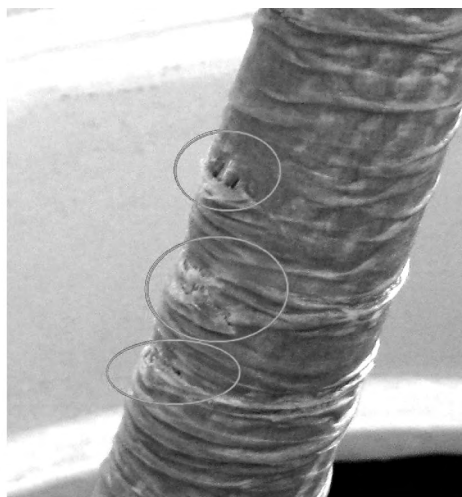


图4 B相中压引线外包绝缘层破损

3 小结

电力变压器由出厂到运行中需经历长途运输和重新装配,因此严格的现场交接试验是对设备是否可以无缺陷投运的重要保障;局部放电缺陷的分析不仅需要图谱特征,还应结合技术定位和历史信息,才能准确判断局部放电的原因和部位;变压器在设计中应加强引线绝缘的设计,并在现场装配过程中严格把控施工工艺,避免引线长度不当引起位置偏移、施工造成外绝缘破损等原因引起的绝缘缺陷。

参考文献

- [1] 胡后凡. 变压器试验技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [2] 邱昌荣. 高电压试验技术基础 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
- [3] 李云阁, 冯玉昌, 张祥全, 等. 750 kV 变压器现场工频感应耐压和局部放电试验 [J]. 电网技术, 2007, 31(10): 64-68.
- [4] 张广东, 吕景顺, 孙亚明, 等. 感应耐压接线方式对变压器线间电压的影响 [J]. 变压器, 2012, 49(8): 50-54.
- [5] 陈楚羽, 刘孝为, 高宏伟, 等. 变压器现场局部放电试验及其故障判断 [J]. 西北电力技术, 1998, 105(2): 9-14.
- [6] 张永跃. 变压器的现场局部放电试验 [J]. 电网技术, 1997, 21(3): 34-38.
- [7] 李中元. 大型变压器在现场的局部放电试验 [J]. 变压器, 1996(3): 35-38.
- [8] 王景林, 郑易谷. 青海变电站 220 kV 变压器局部放电试验 [J]. 云南电力技术, 1999(1): 34-35.
- [9] 张秀成. 110 kV 级壳式电炉变压器感应耐压试验方法 [J]. 变压器, 2009, 46(8): 36-38.

(收稿日期: 2015-02-11)

山区架空输电线路设计风速计算分析

谢直卉

(四川省电力设计院, 四川 成都 610072)

摘 要: 设计风速是架空输电线路设计中重要的气象要素之一, 设计风速的合理取值直接关系到工程的安全与经济。绝大多数地处山区的输电线路无专门的气象观测站, 在确定线路设计风速时, 可通过代表性气象参证站风速资料进行频率计算以及利用基本风压反算的方法先计算设计风速, 再将该设计风速按照调整公式计算出山区风速, 通过大风调查以及结合附近已有线路的运行经验, 综上对山区架空输电线路设计风速进行分析和取值。根据现行新的《建筑结构荷载规范》和《电力工程气象勘测技术规程》, 为山区架空输电线路设计风速的计算和确定提供了分析思路和方法。

关键词: 设计风速; 输电线路; 计算; 方法

Abstract: Design wind speed is one of the most important meteorological elements in the design of overhead transmission lines, and the reasonable value of design wind speed is directly related to the security and economy of the projects. There is no special meteorological observation station for transmission lines in most mountainous area. So when determining the design wind speed of those lines, the frequency calculation can be done by the wind speed data of representative meteorological station and the design wind speed can be calculated firstly using back calculation method with basic wind pressure. And then the design wind speed is adjusted according to the formula to calculate the wind speed in mountainous area. Through the wind investigation and combining with the experiences of the existing running lines nearby, the design wind speed of overhead transmission line in mountainous area is analyzed and set the values. According to the current "Load Code for the Design of Building Structures" and "Technical Code for Meteorological Survey in Electric Power Engineering", the proposed method provides the analyzing ideas and methods for the calculation and determination of design wind speed of overhead transmission line in mountainous areas.

Key words: design wind speed; transmission line; calculation; method

中图分类号: TM75 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2015)03-0030-03

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.03.007

0 引 言

山区架空输电线路由于受地形、地貌、下垫面因素以及收资条件的影响, 其设计风速的确定应综合分析各种影响因素。有资料条件的地区, 可利用附近气象参证站的风速资料进行选用、统计和数学分析, 资料条件差的地区, 可利用基本风压反算设计风速的方法。结合大风调查情况以及结合附近已有线路的运行经验, 确定出山区架空输电线路的设计风速, 为山区架空输电线路设计风速的计算和确定提供了分析思路和方法。

1 气象站设计风速计算

1.1 代表性气象站风速资料进行频率计算推求设计风速

该方法计算设计风速主要分为原始资料的收集与审查、风速的高度订正、次时换算、频率计算 4 个步骤。

首先选择代表性、距线路工程区域最近的气象站作为参证站, 历年观测的至少 25 年以上的最大风速资料作为样本, 资料年限不足的, 应选择邻近有长期资料观测站的资料进行插补延长资料系列, 对选择的风速样本进行“三性”(代表性、可靠性、一致性) 审查。若观测的风速仪高度与标准高度不一致时, 要将台站的风速记录统一换算为离地面 10 m 高处风速, 根据风速随高度变化的指数公式计算高度为 Z 处的风速为

$$V_z = V_1 \left(\frac{10}{Z_1} \right)^\alpha$$

式中,地面粗糙度系数 α 的取值根据以下类别进行选择。A 类区指近海海面、海岛、海岸及沙漠地区,取 $\alpha = 0.12$; B 类区指田野、乡村、丛林、丘陵及房屋比较稀疏的中小城镇和大城市郊区,取 $\alpha = 0.16$; C 类区指有密集建筑群的城市市区,取 $\alpha = 0.22$; D 类区指有密集建筑群且房屋较高的大城市市区,取 $\alpha = 0.30$ 。若气象站为定时观测 2 min 平均最大风速,应将其进行次数和时距的换算至自记 10 min 平均最大风速,换算公式为 $V_{10} = \alpha V_{2\min} + b$,系数 a 、 b 可通过搜集当地分析成果或根据资料计算确定。

最后,按上述风速资料进行均一化处理,换算成 10 m 高自记 10 min 平均最大风速资料后,进行频率计算,常采用的方法有 P-III 型曲线法和极值分布法(耿贝尔),其中 P-III 型曲线法在电力系统中应用较为广泛,应用时可根据各地不同情况采用不同的线型。

在计算设计风速时,根据《电力工程气象勘测技术规程》架空输电线路工程的设计标准要求,110~330 kV 架空输电线路工程的基本风速设计重现期为 30 年,500~750 kV、 ± 500 kV 输电线路工程的基本风速设计重现期为 50 年,1 000 kV、 ± 800 kV 输电线路工程的基本风速设计重现期为 100 年。

1.2 利用基本风压反算设计风速

GB 50009-2012《建筑结构荷载规范》规定,基本风压是 50 年重现期、离地 10 m 高、采用自记式风速仪记录的 10 min 平均年最大风速为标准、计算的风压,现行规范补充了全国各气象台站处 1995 年至 2008 年的年极值风速数据,重新进行了统计,并编制出全国各城市的风压表和全国基本风压分布图。当线路工程在当地无风速资料时,可根据附近地区的基本风压(风压表或基本风压图)近似确定。

在输电线路工程中,气象上要提供的是设计风速资料,这时就需利用基本风压反算出设计风速。按伯努利(Bernoulli)公式换算设计风速,公式如下。

$$V = \sqrt{W/K_v}$$

式中, V 为基本风速, m/s; W 为基本风压, kN/m²; K_v 为风压系数。其中,基本风速和基本风压的定义是:“根据当地气象台站历年来的最大风速记录,按基本风速的标准要求,将不同风速仪高度和时次时距的年最大风速,统一换算为离地 10 m 高,自记 10

min 平均年最大风速数据,经统计分析确定重现期为 50 年的最大风速,作为当地的基本风速 V'' 。风压系数 K_v 在标准状态下,纬度 45° 的海平面处、760 mmHg 标准大气压、气温为 15 °C 时的干空气应采用 1/1 600。在非标准状态下,风压系数的计算如下。

$$K_v = \rho/2$$

式中, ρ 为空气密度, t/m³。空气密度 ρ 可按下式计算。

$$\rho = \frac{0.001\ 276}{1 + 0.003\ 66\ t} \left(\frac{p - 0.378 p_{vap}}{100\ 000} \right)$$

式中, t 为空气温度, °C; p 为气压, Pa; p_{vap} 为水汽压, Pa。 t 、 p 、 p_{vap} 均为当地多年平均值。若缺乏平均气温资料时,空气密度 ρ 也可根据所在地的海拔高度 z (m) 按下式近似估算。

$$\rho = 0.001\ 25 e^{-0.0001z}$$

设计风速的计算根据输电线路设计标准要求,不同等级的输电线路设计风速采用不同的重现期,可按照伯努利公式反算出某一设计重现期离地 10 m 高自记 10 min 平均最大风速。

2 山区设计风速计算

由于受地形的影响,山区设计风速最行之有效的的方法是直接在工程地点建站观测,并与邻近气象站进行相关分析,生成输电线路的风速系列。华北电力设计院与中国气象科学研究院合作,采用 Tay-Lor-Lee 的风谱模型,结合华北地区的山峰风速的实测资料,对山顶与山下气象站的风速关系进行研究,但成果仍有一定的局限性,无普遍适用性。

当无实测资料时,山区架空输电线路设计风速应由参证站设计风速相应的风压值乘以调整系数后,再反算得出设计风速。山区风压调整系数,尽可能采用实测资料分析成果。

表 1 山区风压调整系数

山区地形条件	调整系数
山间盆地、谷地等闭塞地形	0.75 ~ 0.85
与大风方向一致的风口	1.20 ~ 1.50

3 山区大风调查

大风调查是对气象站风速资料的补充和完善,为分析确定设计风速提供参考。一般情况下,大风

调查在工程地点附近 3 ~ 5 km 范围进行,先搜集工程地点附近的风灾资料,根据灾情定出风力,可查阅风力等级表,换算成相应风速;还可搜集当地气象、工程建设部门对风速、风压知情人员进行调查。对调查大风资料进行可靠性和重现期分析,最后分析估算出设计风速范围。

山区输电线路大风调查中还应搜集微地形气候影响、山坡山麓风速变化特征及当地山区风速分析方法,并对附近山顶、山麓的站风速资料进行分析比较。

4 山区输电线路设计风速分析及取值

确定山区输电线路设计风速是一个综合分析的过程。通过工程地区大风调查和对比观测、分析移用参证站设计风速、风压反算设计风速,结合工程地点附近大风调查以及已有输电线路的设计风速及运行情况等因素综合分析确定山区架空输电线路设计风速值并划分风区。在此过程中,应将参证站设计风速计算成果与该地区基本风压等值线图或全国基本风压等值线图作对比分析,若计算出的设计风速值小于风压图上风速时,宜采用风压图的数值。当工程点当地没有风速资料时,可根据附近地区规定的基本风压或长期资料,应通过现场踏勘调查,结合地形、气象等条件的对比分析进行综合分析确定,从安全出发取较大值,提高其安全性。

风区划分以一个风区段内各点的设计风速基本相等;一个风区段内属同一气候区,形成大风的天气条件大体一致;一个风区段内地形条件类似,海拔相当等原则,根据沿线地形情况,概化为一个或几个设计风速区段。由于输电线路设计风荷载以一个耐张段为同一风区,为方便设计计算,故风区划分不宜多,距离不宜太短,风区级差一般在 2 ~ 5 m/s。

5 算例分析

某一 220 kV 送电线路工程地处云南省山区境内,地势高差突出,气候差异较大,立体气候特征明显,路径海拔一般在 820 ~ 1 210 m 之间,以中山、低山为主,属南亚热带低热丘陵气候,线路位于低纬度季风区,主导风向为西南风。工程路径地区无气象站风速实测资料,故可利用基本风压反算设计风速。

根据查全国基本风压图,当地地区基本风压为 0.3 kN/m²(按 50 年一遇风压考虑),通过乘以山区调整风压系数后,再反估算得出设计风速,计算得该区域 10 m 高 50 年一遇 10 min 平均最大风速为 24.17 m/s,10 m 高 30 年一遇 10 min 平均最大风速为 22.96 m/s。

根据现场大风调查及查阅当地有关史料,线路附近地区的历史大风情况如下:1977 年 6 月 1 日 14 时,该市营建路的大青树被大风吹断,该市坝部分甘蔗被吹断。1984 年 3 月 15 日 22 时,遮放糖厂遭大风袭击,吹倒临时工棚 56 间,清静煮炼车间屋顶上的“风帽”吹掉 4 个,厂区水泥电杆吹断一根,部分照明电线被吹断。

线路位于低纬度季风区,主导风向为西南风,年平均风速 0.9 m/s,属于微风区,但历年大于八级的大风最多年达 19 天,以 3 ~ 5 月出现为多,占全年大风日的 75%。

沿线附近地区已建有送电线路多条,附近芒东线、芒帕线等 110 kV 线路设计风速为 25 m/s,运行至今情况良好,无风害事故;芒盈线、芒潞线等 220 kV 线路设计风速为 30 m/s,建成至今无风害事故。

根据线路地区气象站设计风速计算结果、现场大风调查情况、沿线地形地貌特点、下垫面糙度等因素分析以及附近已建线路的设计运行情况综合分析,推荐本工程全线离地 15 m 高 30 年一遇 10 min 平均最大风速为 30.0 m/s。

6 结 语

1) 山区架空输电线路设计风速的计算可采用代表性气象站风速资料进行频率计算或者利用基本风压反算法,但必须考虑地形的影响。有条件时直接在工程地点建站观测,并与邻近气象站进行相关分析,生成输电线路的风速系列;有资料地区可建立风速数值模型;无资料地区可采用压调整系数法反算出设计风速。

2) 山区输电线路设计风速确定前,宜作工程点大风调查,为分析确定设计风速提供参考。在设计风速取值时应将参证站资料、大风调查情况以及现场踏勘调查作对比分析确定。

3) 气象站所观测风速资料作设计风速计算能
(下转第 89 页)

- Proceedings of the Power System Technology of IEEE, Aviva, 2010.
- [2] 王守相, 黄丽娟, 王成山, 等. 分布式发电系统的不平衡三相潮流计算 [J]. 电力自动化设备, 2007, 27(8): 11-15.
- [3] 梁双, 胡学浩, 张东霞, 等. 光伏发电置信容量的研究现状与发展趋势 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35(19): 101-107.
- [4] 汪海瑛, 白晓民. 并网光伏的短期运行备用评估 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(5): 55-60.
- [5] 李峰, 李威, 薛峰, 等. 规模化光伏电站与电网暂态交互影响定量分析 [J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(11): 50-56.
- [6] 龙源, 李国杰, 程林, 等. 利用光伏发电系统抑制电网功率振荡的研究 [J]. 电网技术, 2006, 30(24): 44-49.
- [7] 刘莉敏, 曹志峰, 许洪华. 50 kWp 并网光伏示范电站系统设计及运行数据分析 [J]. 太阳能学报, 2006, 27(2): 146-151.
- [8] 李斌, 袁越. 光伏并网发电对保护及重合闸的影响与对策 [J]. 电力自动化设备, 2013, 33(4): 12-17.
- [9] 杨国华, 姚琪. 光伏电源影响配电网线路保护的仿真研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(15): 75-79.
- [20] 黄伟, 雷金勇, 夏翔, 等. 分布式电源对配电网相间短路保护的影响 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(1): 93-97.
- [21] 丁明, 王伟胜, 王秀丽, 等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 1-14.
- [22] 孟祥林. 四川能源现状及其能源结构发展选择——从中国太阳能第一楼谈起 [J]. 西华大学学报: 社会科学版, 2006(5): 46-49.
- [23] 杜心远, 何荣华. 四川省新能源发展战略构想 [J]. 商场现代化, 2007(35): 216.
- [24] 四川省“十二五”能源发展规划 [EB/OL]. <http://wenku.baidu.com/view/9bfd69ec856a561252d36fe5.html>.
- [25] 陈国阶. 对四川发展若干战略问题的思考 [J]. 决策咨询通讯, 2010(1): 8-9, 72.
- (收稿日期: 2015-02-28)

(上接第32页)

做较为准确的计算,但对于山区架空输电线路的设计风速计算需考虑地形、下垫面等自然因素的复杂影响。在无建站条件和无资料地区,目前只有采用调整系数法进行估算;资料条件充足时可建立数值模型进行推算。当前国内外也开发了一些风能资源评估系统软件,可为计算山区架空输电线路设计风速提供一定的参考依据,由于目前的风能资源评估系统软件是平均风速的概念,尚缺乏一定的适用性,

(上接第45页)

次接线布置与继电保护配置都较为简单,然而与常规接线的厂站相比,其特殊性也是显而易见的。在保护设计、调试、整定等工作中应对以上列举的关键问题引起重视,根据需求和现场实际情况进行相应的取舍,力争实现方案的最优化。

参考文献

- [1] 刘文. 浅析发电机-变压器-线路组保护配置特点 [J]. 继电器, 2005, 33(15): 18-20.
- [2] 王晶晶. 发电机-变压器-线路组保护的配置特点及实例分析 [J]. 华北电力技术, 2007, 8: 37-52.
- [3] 郑太一, 马丽红, 王建勋, 等. 终端线路变压器组继电

推求山区架空输电线路设计风速还有待进行更进一步研究。

参考文献

- [1] GB 50009-2012, 建筑结构荷载规范 [S].
- [2] DL/T 5158-2012, 电力工程气象勘测技术规程 [S].
- 作者简介:
谢直卉(1982), 硕士, 工程师, 主要从事电力工程水文气象勘测工作。
- (收稿日期: 2014-12-29)

- 保护配置及变压器中性点接地方式研究 [J]. 吉林电力, 2009, 37(5): 5-7.
- [4] Q/CSG110039-2012, 南方电网继电保护配置技术规范 [S].
- [5] 国家电力调度通信中心. 国家电网公司继电保护培训教材 [J]. 2009.
- [6] 张鹏. 浅谈电流互感器二次绕组极性 [J]. 云南电力技术, 2013, 41(3): 61-63.
- [7] 王媛婷, 郭志彬. 变电站调度事故总信号改进方案 [J]. 电力与电工, 2012, 32(4): 86-88.

作者简介:

李津津(1988), 主要从事电网继电保护整定计算及运行管理工作。

(收稿日期: 2015-01-14)

宜宾换流站电容器隐患分析与改进建议

禹佳, 孙文, 王鑫

(国家电网公司运行分公司宜宾管理处, 四川 宜宾 644000)

摘要: 交流滤波器有滤除换流器产生的谐波和向换流器提供无功补偿两个任务, 电容器作为滤波器组内最重要的无功设备, 其运行情况直接关系着换流站的安全稳定运行。针对宜宾换流站电容器的实际情况, 结合其他已投运换流站的运行经验, 对宜宾换流站电容器存在的问题进行了全面、系统的分析, 对电容器的安全隐患提出了相应的改进措施, 对新建换流站提出建议。

关键词: 电容器; 隐患; 发热; 建议

Abstract: AC filters have two tasks in converter station which filter out harmonic and provide reactive power for converter. As the capacitor is the most important equipment of reactive group, it is directly related to the safe and stable operation of converter station. Aiming at the actual situation of capacitors in Yibin converter station, the existing problems are analyzed comprehensively and systematically along with the operation experiences of other running converter stations. And then, the improvement measures are proposed for the security risks of capacitors and the suggestions are put forward for the newly-built converter stations.

Key words: capacitor; risk; heating; suggestion

中图分类号: TM53 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2015)03-0033-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.03.008

0 引言

换流站电容器的故障率较高, 而电容器故障中由于电容器接头和引线导致的事故又占有相当大的比重。因此需要总结换流站电容器接头发热故障治理经验, 探讨解决办法^[1]。

宜宾换流站交流滤波器场电容器和噪声滤波器电容器全部采用国产设备, 电容器接头及引线的设计、工艺方面仍然存在问题, 这些问题如不及时解决, 将可能导致交流滤波器跳闸, 情况严重时可能导致系统降功率甚至引起直流停运, 其影响不容忽视。为防止由于电容器接头及引线等问题导致的跳闸事故的发生, 结合宜宾换流站现场的实际情况, 对电容器存在的安全隐患进行了分析研究^[2]。

2 电容器安全隐患问题分析

2.1 电容器接头隐患

2.1.1 导电夹板无内螺纹

电容器导电夹板的夹紧效果不好, 是导致运行

中电容器接头过热的主要原因。经初步分析, 夹紧效果不好的原因为导电夹板无内螺纹, 经改造采用带有内螺纹的导电夹板后, 发热情况明显减少, 且目前运行情况良好。对电容器导电夹板进行改造后, 下片夹板采用了带有内螺纹的结构。

若下夹板采用螺纹结构, 当紧固电容器接头引线时, 下夹板可以固定于电容器穿芯螺杆上, 这样上夹板的受力就可以完全作用于导线和下夹板上, 使导线能够被上、下两夹板可靠地夹紧, 且可减小电容器瓷套管的受力。而如果下夹板无内螺纹, 则当紧固电容器引线时, 下夹板会随之压在电容器瓷套管上, 若紧固力矩过大, 会损坏电容器穿心螺杆, 此时, 电容器引线的夹紧力大部分来自于上夹板的作用力, 而为了不损坏电容器的穿心螺杆, 电容器螺母的力矩不宜过大, 因此不能保证电容器引线被可靠夹紧, 长时间运行后, 容易造成接头引线松动, 导致电容器接头发热。

2.1.2 电容器接头无弹性垫片

宜宾换流站交流滤波器场电容器的上、下两片导电夹板各配有一个弹性垫片, 在热胀冷缩时很容易造成电容器接头松动而导致接点发热。实践证

明,当接头处的运行工作温度超过 80°C 时,接头金属将因过热而膨胀,使接触表面位置错开,形成微小空隙而氧化。当负荷电流减少温度降低回到原来接触位置时,由于接触面氧化膜的覆盖,不可能是原安装时金属间的直接接触。每次温度变化的循环所增加的接触电阻,将会使下一次循环的热量增加,所增加的较高温度又使接头的工作状况进一步变坏,因而形成恶性循环。

电容器接头下夹板的弹性垫片的另外一个作用,就是用于微调导电夹板的角度,使每个电容器夹板的接线孔能够与地面平行,避免由于接线孔角度不同造成接头引线弯曲。但由于安装工艺较差,导致部分电容器下夹板的弹性垫片并未压紧,容易造成接头松动。

正常情况下,电容器接头的电流方向为:电流自导线经过导电夹板下部,沿着端子螺纹向上,再经端子内部导线流向端子内部;而如果下夹板的弹性垫片未可靠压紧,那么将导致下夹板与端子帽接触不严密,其接触电阻将变大,电流大部分会从端子螺纹直接向上经过端子内部导线流向端子内部。考虑到螺杆和螺母的制作工艺的限制,螺纹之间必然存在一定的缝隙,下夹板与螺杆之间不能良好接触,从而导致其接触面积进一步减小,接触电阻进一步增大,长时间运行后,将可能导致电容器接头发热。

2.1.3 引线接头松动

交流滤波器场部分电容器的引线存在松动现象。通过分析,发现电容器接头引线直径相对导电夹板的夹线孔内径较小,当上、下两片导电夹板接触后,夹板的夹线孔与引线之间仍存在缝隙,且现场晃动引线时有明显的松动现象。而且当导线与夹板连接后,上、下夹板之间无缝隙,导致无法判断引线是否已被可靠夹紧。由于电容器引线采用的是多股软铜线,每股软铜线之间必然存在缝隙,若导电夹板与引线不能可靠夹紧,那么在风霜雨雪、日照、日夜温差以及自身磁场的共同作用下,则会加速各接触面的氧化和结垢程度而导致接头发热。通过对比,发现电容器引线与夹板连接后,上、下夹板之间有一定缝隙,容易判断引线是否已被可靠夹紧,且现场观察发现电容器引线连接无松动现象,导线与夹板之间连接效果较好。

2.1.4 防鸟帽问题

宜宾换流站电容器接头全部安装了防鸟帽,通

过分析和试验,发现防鸟帽安装后将存在较大的安全隐患。

电容器在日常维护过程中需要对其进行红外测温,而使用防鸟帽后将影响红外测温的效果。红外测温的原理是利用物体辐射出的红外线来测量物体表面的温度,红外线的波长在 $0.76 \sim 100 \mu\text{m}$ 之间,按波长的范围可分为近红外、中红外、远红外、极远红外4类,红外线辐射是自然界存在的一种最为广泛的电磁波辐射,温度在绝对零度以上的物体,都会因自身的分子运动而辐射出红外线。红外测温仪利用红外探测器、光学成像物镜和光机扫描系统接受被测目标表面的红外辐射能量分布图形反映到红外探测器的光敏元件上,对被测物体的表面红外热像进行扫描,并聚焦在单元或分光探测器上,由探测器将物体辐射的功率信号转换成电信号后,成像装置的输出信号就可以完全一一对应地模拟扫描物体表面温度的空间分布,经电子系统处理,传至显示屏上,得到与物体表面热分布相应的热像图^[9]。

通过试验,证实了红外测温仪只能测量防鸟帽外表面的温度,而无法测量到防鸟帽内部电容器接头的温度。只有当防鸟帽的温度与电容器接头温度相同时,红外测温仪才能如实地反映出电容器接头的实际温度。因此,红外测温仪也将无法准确地测量到电容器接头的实际温度,这将导致运行人员无法提前预判电容器接头的发热异常,只有等到设备损坏后才能发现故障,给系统的安全稳定运行带来了极大的隐患。

2.1.5 导电夹板歪斜

交流滤波器场电容器在安装过程中,导电夹板出现了歪斜现象,当紧固右侧电容器螺母时,由于紧固力矩为顺时针方向,导致电容器引线被严重拉伸。

导线热胀冷缩的伸缩量可由式(1)计算得出:

$$\Delta L = \Delta T \times L \times C \quad (1)$$

式中, ΔL 为导线长度的变化; L 为导线原来的长度; C 为热膨胀系数; ΔT 为系统温度变化。

由此可得出导线的长度变化与系统温度变化成正比,电容器温度变化越大,导线的伸缩量也越大。由于热胀冷缩的作用,电容器接头将承受更大的拉力,可能会对电容器瓷瓶两端的连接处造成隐形伤害,当电容器再次投入运行时,由于电容器油受热膨胀,将可能导致电容器漏油。

2.2 电容器引线隐患

2.2.1 毛刺现象

交流滤波器场电容器和噪声滤波器电容器的接头引线采用了带有绝缘皮的多股软铜线,在切割绝缘皮的过程中,由于用力过大,导致引线的最外层软铜线大部分被割断,产生了毛刺现象。如果毛刺过多或过长,将会产生电晕现象,为电容器带来较大的安全隐患。

电晕是高压带电体表面向空气游离放电的现象,在强电场的作用下导线周围的空气会产生电离现象,它的产生与导线本身和导线周围空气的条件有关。导线周围空气之所以会电离,是由于导线表面的电场强度超过了某一临界值,以致空气中原有离子具备了足够的动能,撞击其他不带电分子,使后者也离子化,最后形成空气的部分导电。电晕的产生是因为不平滑的导体产生不均匀的电场,在不均匀的电场周围曲率半径小的电极附近当电压升高到一定值时,由于空气游离就会发生放电,形成电晕。简单地说,曲率半径小的导体电极对空气放电,便产生了电晕^[4]。

电晕起始电压指开始发生电晕放电时的电压,也称临界电压,与之相应的场强称为电晕起始场强或临界场强,如式(2):

$$E_r = \frac{\lambda}{2\pi\xi_0 r} \quad (2)$$

式中, ξ_0 为真空中的介电系数, $\xi_0 = 8.85 \times 10^{-12}$, $\text{C}^2/\text{N} \cdot \text{m}^2$ 。

而任一点的场强等于该点的电位梯度的负值,如式(3):

$$E_r = -\frac{dV}{dr} \quad (3)$$

通过积分变换得

$$E_r = \frac{V}{r \ln(b/a)} \quad (4)$$

此时为任一点场强与电压的关系,式中, V 为电压; r 为距电晕线的距离; a 为导线毛刺半径; b 为导线半径。式(4)表明在电晕开始发生之前,任一点的场强 E_r 随距电晕线的距离的减小而增大。当 $r = a$ 在电晕线表面上时, E_r 达最大。

电晕开始发生所需的场强取决于几何因素及气体的性质。皮克(peek)通过大量实验研究,提出了计算在空气中电晕起始场强的经验公式。

$$E_r = \pm 3 \times 10^6 f \left(\frac{T_0 P}{TP_0} + 0.03 \sqrt{\frac{T_0 P}{TP_0 a}} \right) (\text{V/m}) \quad (5)$$

式中, P_0 、 T_0 为标况下的大气压和温度(298 K); T 、 P 为运行状况的温度和空气压力; f 为导线光滑修正系数,一般 $0.5 < f \leq 1$,清洁的光滑导线 $f = 1$,实际中所遇到的导线可取 $f = 0.6 \sim 0.7$;正负号视电晕极性而定,正电晕取正号,负电晕取负号。

当 $r = a$ 时,由式(4)得 $V = E_r a \ln(b/a)$ 代入式(5)得电晕起始电压计算式如式(6):

$$V = \pm 3 \times 10^6 f a \left(\frac{T_0 P}{TP_0} + 0.03 \sqrt{\frac{T_0 P}{TP_0 a}} \right) \ln(b/a) (\text{V}) \quad (6)$$

由式(6)可以得出,电晕起始电压随电极的几何形状而变化,线越细,即毛刺越尖锐,电晕的起始电压越低,越容易产生电晕现象。

由于电容器的运行电压较高,而且毛刺末端较尖锐,因此极易产生电晕。在正常运行过程中,电晕现象并不容易被发现,如遇雷雨天气或周围空气湿度较大时,由于电晕现象,将可能导致毛刺对其他电容器或构架放电,造成电容器短路击穿而导致电容器跳闸^[5]。

2.2.2 引线连接工艺问题

电容器采用单引线连接,导线材质为多股软铜线,在安装过程中,由于安装工艺问题,导致很多引线的连接出现了多股软铜线未夹在接线孔中的情况。若导线有1/2未夹入接线孔中,那么导线与夹板的面积将减小1/4。

$$R = \rho L / S \quad (7)$$

式中, R 为导线电阻; ρ 为电阻率; L 为导线长度; S 为导线横截面积。

由式(7)可得出,若导线的接触面积减小1/4,那么导线的接触电阻将增大4倍。由于电容器接头引线采用单引线连接,通流能力与双线连接的电容器相比已经有所下降,如果连接线有多股未能与导电夹板可靠连接,那么电流会经过夹在接线孔外部的软铜线直接进入电容器,导致通流能力大大降低,投运后将会导致电容器接头发热^[6]。

2.2.3 电容器引线绝缘问题

交流滤波器场电容器塔引出线采用软铜线连接,在雷雨或大风天气时,容易使连接线摆动或下垂,造成连接线与均压环的绝缘距离不足而导致闪络放电事故。由于导线与均压环的距离过近,导致导线与均压环闪络放电,造成4只电容器被击穿。

根据中华人民共和国电力行业标准 DL/T 620

—1997 中第 10.2.3 条规定,变电站导线对构架的空气间隙的计算,变电所导线对构架的受风偏及不受风偏影响的空气间隙应符合式(8)要求。

$$U_{i.s} \geq K_2 U_m / \sqrt{3} \quad (8)$$

式中, K_2 为线路空气间隙工频电压统计配合系数,对范围 II 取 1.40; U_m 为系统最高电压, kV; 对 110 kV 及 220 kV 取 1.35, 对 66 kV 及以下取 1.20。

在海拔不超过 1 000 m 的地区, 3 ~ 20 kV 高压配电装置的最小户外、户内空气间隙如表 1 所示。

表 1 3 ~ 20 kV 高压配电装置的空气间隙

系统标称电压 /kV	户外空气间隙 /cm	户内空气间隙 /cm
3	20	7.5
6	20	10
10	20	12.5
15	30	15
20	30	18

3 相应的改进措施

为确保直流系统投运后的安全稳定运行,提高电容器设备的可用率,结合宜宾换流站电容器存在的问题,与厂家进行了协商、探讨,最终针对以上问题提出了如下解决方案,希望能在系统投运前消除所有缺陷,努力实现电容器“零缺陷”投运的目标。

1) 对交流滤波器场电容器和噪声滤波器电容器的导电夹板和垫片进行全部更换,采用下片带有内螺纹的导电夹板。在夹板的选型时,要充分考虑夹板接线孔直径与电容器引线直径的关系,导电夹板接线孔的直径要略小于电容器引线的直径,保证电容器引线连接后,上、下两片导电夹板之间能够留有一定的缝隙,以便判断导线是否已被可靠夹紧^[7]。

2) 在交流滤波器场电容器和噪声滤波器电容器的上、下两片导电夹板上各配置一个弹性垫片,确保当环境温度变化时导电夹板与引线之间一直是紧固的。在选择弹性垫片时要使用横截面积较大的弹性垫片,并且在安装时尽量将弹性垫片压紧,保证下片夹板与电容器接头有较大的接触面积,避免由于接触面积减小,接触电阻增大而造成电容器接头发热。

3) 对电容器接头涂刷 RTV 涂料用以代替安装防鸟帽。红外测温是换流站重要的定期工作之一,红外测温的质量将对事故的提前预判起到至关重要

的作用,用 RTV 涂料代替防鸟帽,可以实时、准确地观察电容器的运行情况,避免由于无法准确测量电容器接头温度,导致延误检修时机而造成的事故。

4) 全面检查电容器导电夹板的位置,对所有歪斜的导电夹板进行校正,使其与地面方向垂直。检查所有引线的弯曲程度,对于已完全拉直的引线进行重新连接,并留有一定的裕度,避免由于热胀冷缩的原因使电容器接头承受过大的应力。

5) 对交流滤波器场电容器和噪声滤波器电容器存在毛刺现象的引线进行全部更换,防止电晕的产生。由于电晕现象在正常运行时很难被发现,因此,防止电晕现象的发生尤为重要,更换带有毛刺的导线可以有效地防止电晕的产生,避免由于电晕现象导致电容器放电或短路情况的发生。

6) 对电容器引线进行全面检查,对于未完全夹在夹线孔中的引线全部进行重新连接,将引线全部夹在夹线孔中,保证引线与导电夹板之间有最大的接触面积,避免由于通流能力不足而导致电容器接头发热。

7) 为防止由于引线摆动或下垂造成的闪络放电事故,将交流滤波器场电容器跨越均压环的引出线全部由软连接改为硬连接。考虑到热胀冷缩的影响,此硬铜导线可由 3 节组成,中间一节为软铜导线,在导线跨越构架或均压环时,中间一节软铜导线向上弯曲呈弧形,以满足绝缘距离的要求^[8]。

4 结 语

电容器是换流站的重要设备之一,它的运行情况对直流系统运行的可靠性至关重要。电容器在换流站中的数量众多,电容器故障在换流站日常缺陷中占有较大比重。因此,保证电容器的可靠运行对换流站的安全稳定运行意义十分重大。一方面从宜宾换流站电容器存在的安全隐患着手,分析了电容器接头、引线在设计、工艺及安装上存在的缺陷对电容器设备及系统运行的影响;另一方面对相应的安全隐患提出了改进措施及处理建议,为新建换流站提供参考。

参考文献

- [1] DL/T 620—1997, 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合 [S]. (下转第 72 页)

确定性潮流计算所得适应值作为目标函数,得到各场景下的最优无功控制策略。

由于在实际电网运行过程中,风电出力 and 负荷不可能固定不变,故将方法2所得到的最优控制策略代入方法1考虑随机因素的目标函数中,将所得各场景下的适应值与方法1的结果相对比。

表3为方法2各场景最优无功控制策略;表4为两种方法对比结果。

对比表3和表4可以看出:在最优控制策略下方法1和方法2在各场景中的加权目标函数值相差都很小,个别场景方法2甚至优于方法1。从表4可以看出,在考虑风电出力随机变化时,虽然两种方法都能较大程度上实现对系统的优化,但在方法1的最优控制策略下,系统的各项指标明显优于方法2,说明方法1能够考虑系统中存在的随机变量,得到更可靠的无功优化策略。

4 总 结

将场景概率潮流计算方法应用到电力系统无功优化研究中。充分考虑了系统中负荷、风电出力的随机性和相关性,从概率的角度得到了各场景下的最优无功控制策略。与传统的确定性无功优化方法相比,所提方法在含不确定性因素的系统中表现更优,所得到的无功配置方案能够适应随机因素的变化,为运行与规划人员提供更可靠、更全面、更经济的控制策略。

参考文献

[1] 潘雄,周明,孔晓民,等. 风速相关性对最优潮流的

(上接第36页)

- [2] 冯建清,唐明晓. 电容器发热问题分析及解决措施 [J]. 电力电子技术,2007,41(5):1-6.
- [3] DL/T 664-2008, 带电设备红外诊断应用规范 [S].
- [4] 李澍森,陈晓燕. 试验线段电晕测量技术及结果 [J]. 高电压技术,2006,12(7):32-36.
- [5] 徐玲玲,张国威,王世民,等. 直流输电换流站电容器运行情况分析 & 改进措施 [J]. 电力电容器,2007(1):11-16.
- [6] 孙翠平,关素娇,李晓军,等. 青藏换流站电容器成套装置外绝缘的设计总结 [J]. 2012 输变电年会论文集,2012.

影响 [J]. 电力系统自动化,2013(6):37-41.

- [7] 柳杰,刘志刚,孙婉璐,等. 含风电场电力系统电压稳定性概率评估及其在无功优化中的应用 [J]. 电网技术,2012(11):134-139.
- [8] 李鸿鑫. 考虑不确定性因素的电力系统电压稳定与无功优化问题研究 [D]. 武汉:华中科技大学,2013.
- [9] 朱星阳,刘文霞,张建华,等. 电力系统随机潮流及其安全评估应用研究综述 [J]. 电工技术学报,2013(10):257-270.
- [10] 陈雁,文劲宇,程时杰. 考虑输入变量相关性的概率潮流计算方法 [J]. 中国电机工程学报,2011(22):80-87.
- [11] Nelsen R B. An Introduction to Copulas [M]. Springer Science & Business Media,2007.
- [12] 黎静华,韦化. 基于内点法的机组组合模型 [J]. 电网技术,2007(24):28-34.
- [13] 秦志龙. 计及相关性的含风电场和光伏电站电力系统可靠性评估 [D]. 重庆:重庆大学,2013.
- [14] 梁艳春. 群智能优化算法理论与应用 [M]. 北京:科学出版社,2009.
- [15] 陈前宇,陈维荣,戴朝华,等. 基于改进 PSO 算法的电力系统无功优化 [J]. 电力系统及其自动化学报,2014,26(2):8-13.
- [16] Shi Y, Eberhart R. A Modified Particle Swarm Optimizer [J]. IEEE, World Congress on Computational Intelligence,1998.

作者简介:

熊 强(1989),硕士研究生,研究方向为电力系统及其自动化;

郑永康(1977),博士,高级工程师,主要研究方向为继电保护。

(收稿日期:2015-04-07)

- [17] 周承刚,赵宁. 换流站电容器组安装的施工方案及注意事项 [J]. 科学之友,2012(15):33-38.
- [18] 李靖翔. 宝安换流站低压电容器多起跳闸情况分析 [J]. 中国科技信息,2011,22(4):67-71.

作者简介:

禹 佳(1983),本科,工程师,研究方向为特高压直流输电技术;

孙 文(1981),本科,工程师,研究方向为特高压直流输电技术;

王 鑫(1987),研究生,工程师,研究方向为特高压直流输电技术。

(收稿日期:2015-01-06)

换流变压器状态评价方法研究

肖 屏,王渝红,张 彪

(四川大学电气信息学院,四川 成都 610065)

摘 要: 针对换流变压器结构复杂、难以对其进行精确状态评价的问题,提出了一种基于 DHGF 算法的换流变压器状态评价方法,建立了相应的评价指标集及对应的组合权重,给出了相关的白化权函数、权矩阵和评判矩阵,构建了完整的数学模型。运用 DHGF 算法对换流变压器的运行状态进行实例分析,得到了评估对象的状态等级和评分值。评价结果能较好地反映设备的实际状况,可为下一步的检修决策提供科学依据。

关键词: 换流变压器; 状态评价; DHGF 算法; 白化权函数; 状态等级

Abstract: Aiming at the problems that the condition of converter transformer is complex and difficult to be evaluated accurately, a condition evaluation method for converter transformer based on DHGF algorithm is proposed. The evaluation index sets and the corresponding weights for converter transformer are established. The whitening weight function, the weight matrix and the evaluation matrix are provided. The complete mathematical model is established too. The real condition of a converter transformer is analyzed by using DHGF method, the condition level and the exact score are obtained. The results can reflect the real condition of a converter transformer, which can provide scientific basis for the future maintenance strategy.

Key words: converter transformer; condition evaluation; DHGF algorithm; whitening weight function; condition level

中图分类号: TM732 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2015)03-0037-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.03.009

0 引 言

随着电网朝着大容量、特高压和跨区域方向发展,电网的规模不断地扩大,设备的数量也不断地增加^[1]。设备故障或盲目检修而引起的停运会给电力系统的安全可靠运行带来隐患,这就需要对电力设备的运行状况进行可靠评价。以设备的运行状况为基础的状态检修方式可以避免传统检修方式的某些不足。

换流变压器作为高压直流输电系统中重要电气设备,其运行可靠性与电力系统的安全稳定紧密相关。换流变压器的状态检修过程中,一个最为关键的环节就是对当前设备的运行状况进行综合评价,确定设备的状态水平,为设备进行检修决策提供依据^[2]。

目前,可用于换流变压器状态评价的方法很多,如模糊综合评价方法^[3-4]、人工智能方法^[5]、灰色关联分析法^[6-11]、熵权和多级物元分析法^[12]等。其中,文献[6-11]提出的模糊综合评价方法通过精确的数学方法能够对换流变压器进行科学、合理的量

化评价,但评价指标非全备时容易导致不相容的评价结果,且计算较复杂;文献[8-11]提出的灰色关联分析法较适用于“外延明确,内涵不明确”的小样本指标参数的设备状态评价,能够用较少的指标信息去反映设备真实的状态,是其他方法所不能比拟的;文献[12]提出的物元分析方法可有效地用于状态指标具有多样性的设备的状态评价,能够把“质”和“量”有效地结合,解决评价结果不相容问题,提高设备状态评价的精确性。

由于表征换流变压器状态的指标参数具有多层次、非全备性且存在不确定性的特点,单一采用上述的评价方法进行评价的结果不是很理想。综合前面所述方法的成功之处,提出了一种基于 DHGF 算法的状态评价方法。DHGF 算法是将改进的德尔斐法(Delphi)、层次分析法(analytic hierarchy process)、灰色聚类法(grey clustering method)、模糊综合评判法(fuzzy comprehensive judgment)集合而成的一种新的算法^[13]。它在航空航天、通信等领域得到了很好的应用,能够准确地评价设备的健康状况。

下面介绍了 DHGF 算法的基本理论,构建了换流变压器的 DHGF 数学模型,最后通过实例验证了

DHGF 评价方法可用于换流变压器的状态评价,且计算结果能够很好地反映设备的实际状态。

1 DHGF 算法理论

DHGF 算法的理论基础是美国控制论学者查德提出的模糊数学、邓聚龙教授提出的灰色理论、钱学森教授提出的从定性到定量的综合集成方法以及顾基发教授提出的物理 - 事理 - 人理 (WSR) 分析法^[4,15]。

德尔斐法是一种采用匿名方式进行对象分析的统计方法,它已经在预测领域以及各种评价指标体系的建立和具体指标的确定等得到了应用。层次分析法是应用系统理论和多目标综合评价方法而进行定性和定量分析的一种权重决策分析方法。灰色系统理论是从信息的非完备性出发研究和处理复杂系统的理论,在系统数据较少和条件不满足统计要求的情况下,更具有较强的适用性^[6]。模糊数学是一种处理和加工模糊信息的数学工具,它用数学的方法抽象描述模糊现象,揭示模糊现象的本质和规律^[7]。

利用德尔斐法、层次分析法、灰色理论分析法、模糊评判法集成的 DHGF 算法用于设备状态评价的流程图如图 1 所示。

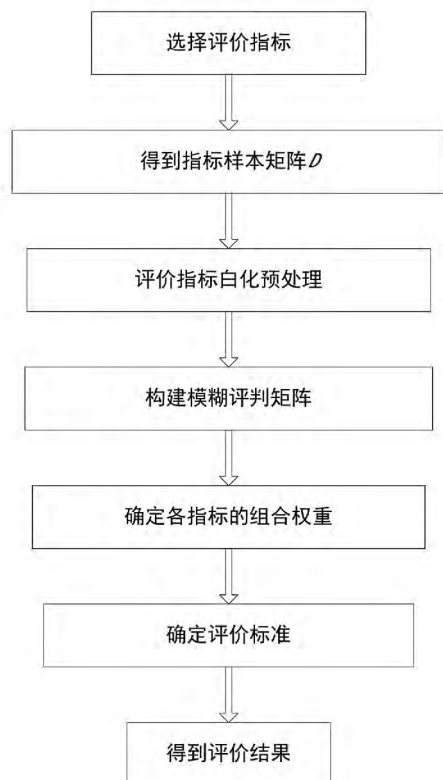


图 1 基于 DHGF 算法的评价流程图

2 换流变压器的 DHGF 数学模型

2.1 评价指标的选择

通过采用德尔斐法对换流变压器进行统计分析以及查询现行规程规定,分析专家的意见,归纳出反映换流变压器运行状况的可靠指标共有 15 个,如图 2 所示,主要分为家族缺陷 u_1 、试验项目 u_2 、检修记录 u_3 、运行工况 u_4 以及缺陷记录 u_5 等五大类。这些评价指标从设备本身、试验和运行等方面全面反映了换流变压器的绝缘寿命的老化情况、内部健康状况、电气或机械特性,并从纵向和横向分析其是否存在历史遗留问题及家族缺陷。由于反映换流变压器的状态的指标参数比较多,为了分析方便,采用塔式结构的层次指标体系,使得能够较容易地把握各指标间的关系。所建立的状态评价指标体系为一个 3 层的层次结构,包括 5 个一级评价指标,各个一级指标里面又包括若干个二级指标。

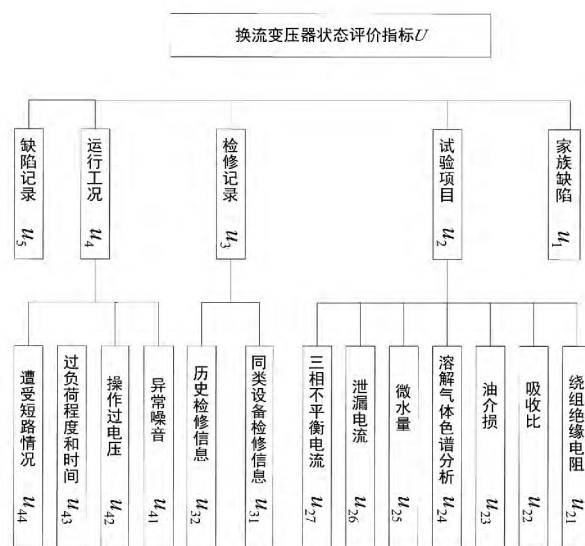


图 2 换流变压器状态评价的指标体系

结合检修过程中收集到关于换流变压器的评价指标的状态信息,邀请 m 位专家对换流变压器的 n 个评价指标进行评估,将全部专家对所评估对象的评价数据构成一个样本矩阵 D ,其中 d_{mn} 表示第 m 个专家对第 n 个评价指标给予的分值,即

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{m1} & d_{m2} & \cdots & d_{mn} \end{bmatrix}^T \quad (1)$$

2.2 评价指标的白化预处理

评价指标的白化预处理需要构建相应的白化权函数来定量的描述评估对象所属某个灰类的程度。依据灰色理论,确定白化权函数的同时需要确定评价灰类的等级数、灰类的灰数^[9]。根据换流变压器的劣化程度,这里设定评估灰类为4个等级,即正常、注意、异常、严重,灰类的灰数 $j=1,2,3,4$ 。设备的状态评价若以10分制评价级为标准,则可以得到相应的白化权函数。

第1灰类“正常”,灰类 $j=1$,灰数 $\oplus \in [0,9,+\infty]$,其相应的白化权函数为

$$f_1(d_{li}) = \begin{cases} \frac{d_{li}}{9} & d_{li} \in [0,9] \\ 1 & d_{li} \in [9,+\infty] \\ 0 & d_{li} \in [-\infty,0] \end{cases} \quad (2)$$

第2灰类“注意”,灰类 $j=2$,灰数 $\oplus \in [0,7,10]$,其相应的白化权函数为

$$f_2(d_{li}) = \begin{cases} \frac{d_{li}}{7} & d_{li} \in [0,7] \\ \frac{10-d_{li}}{3} & d_{li} \in [7,10] \\ 0 & d_{li} \notin [0,10] \end{cases} \quad (3)$$

第3灰类“异常”,灰类 $j=3$,灰数 $\oplus \in [0,5,10]$,其相应的白化权函数为

$$f_3(d_{li}) = \begin{cases} \frac{d_{li}}{5} & d_{li} \in [0,5] \\ \frac{10-d_{li}}{5} & d_{li} \in [5,10] \\ 0 & d_{li} \notin [0,10] \end{cases} \quad (4)$$

第4灰类“严重”,灰类 $j=4$,灰数 $\oplus \in [0,2,10]$,其相应的白化权函数为

$$f_4(d_{li}) = \begin{cases} 1 & d_{li} \in [0,2] \\ \frac{10-d_{li}}{8} & d_{li} \in [2,10] \\ 0 & d_{li} \notin [0,10] \end{cases} \quad (5)$$

2.3 构造模糊评价权矩阵

采用灰色统计法由确定的各评价指标的标准白化权函数,求出 d_{li} 属于 j 类评价标准的权 $f_j(d_{li})$,据此可以求出灰色统计数 N_{ij} 和总灰色统计数 N_i ^[9]。

$$\begin{cases} N_{ij} = \sum_{l=1}^m f_j(d_{li}) \\ N_i = \sum_{j=1}^4 N_{ij} \end{cases} \quad (i=1,2,\dots,n; j=1,2,3,4) \quad (6)$$

由式(6)确定出第 i 个评价指标属于第 j 种评

价灰类的灰色权值。

$$r_{ij} = \frac{N_{ij}}{N_i} \quad (7)$$

由此可以构造模糊评价权矩阵 R 。

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & r_{n3} & r_{n4} \end{bmatrix} \quad (8)$$

2.4 评价指标的组合权重

各评价指标在反映设备运行状况的程度不一样,所以需要对这些指标赋以相应的权重。这里采用文献[20]提出的层次分析法来确定各指标的组合权重。其具体操作为:邀请多位长期从事设备检修工作的专家,采用表1所示的9级标度法对已确定的评价指标的重要性进行判断,构造两两比较判断矩阵 X ,即

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

表1 9级标度法

指标比较	1~9 标度
i 与 j 同等重要	1
i 比 j 较为重要	3
i 比 j 更为重要	5
i 比 j 非常重要	7
i 比 j 极端重要	9
介于上述相邻两级之间 重要程度的比较	2、4、6、8
j 与 i 比较	上述各数的倒数

由式(9)中判断矩阵 X 计算出被比较指标的相对权重 w_i 得

$$w_i = \frac{\sqrt[n]{\prod_{j=1}^n x_{ij}}}{\sum_{k=1}^n \left(\sqrt[n]{\prod_{j=1}^n x_{kj}} \right)} \quad (i=1,2,\dots,n) \quad (10)$$

经一致性检验后可确定的各评价指标权重 W ,即

$$W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\} \text{ 且 } \sum_{i=1}^n w_i = 1, 0 < w_i < 1 \quad (11)$$

当一致性检验不通过时,则需要重新构造判断矩阵 X ,适当地对判断矩阵的元素进行调整使其具

有满意的一致性;再确定各评价指标权重 W 。

2.5 确定评价标准

基于 WSR 思想,参考相关项目对于电力设备状态评价分级状况,结合行业标准,可确定换流变压器状态评价标准集合 V 为

$V = \{v_1, v_2, v_3, v_4\} = \{\text{正常状态, 注意状态, 异常状态, 严重状态}\}$

设备的4种状态等级在进行量化计算时,每种状态具有相应范围,规定正常状态的范围为 $[6, 10]$, 注意状态的范围为 $[6, 8)$, 异常状态的范围 $[4, 6)$, 严重状态的范围 $[0, 4)$ 。

2.6 评价结果计算

由评价指标模糊评价权矩阵 R 、权重矩阵 W 以及评价等级矩阵 V ,可求出设备综合评价结果 Z 。

$$Z = (W \cdot R) \cdot V^T = (w_1, w_2, \dots, w_n) \cdot \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & r_{n3} & r_{n4} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中,模糊综合评判矩阵 $B = W \cdot R = (b_1, b_2, b_3, b_4)$; 且矩阵 B 的元素之间满足: $\sum_{k=1}^4 b_k = 1$ 。

3 实例与分析

以某 500 kV 换流站的换流变压器为例进行相关的分析。查阅历次检修记录发现换流变压器有过一次不严重的缺陷记录,未发现家族缺陷。在某次

预防性试验中,测得绕组的绝缘电阻与上次实验值相差不大且均大于 10 000 MΩ; 吸收比为 1.35; 气体的油色谱分析中氢气的含量 150.8 μL/L, 稍微大于正常范围但有恢复到正常范围的趋势, 乙炔的含量 3.5 μL/L, 总烃的含量 128.3 μL/L, 其他的气体含量均在正常的范围内; 油介损 $\tan\delta$ 为 0.153, 微水量为 12.385 mg/L, 泄漏电流以及三相不平衡电流的实验值均在正常的范围内; 巡视过程中未发现变压器异常发声、操作过电压; 短路冲击电流在允许短路电流的 50% ~ 70% 之间, 未出现严重的短路现象; 换流变压器出现过短时间不严重的过负荷。

1) 确立评价指标的权重

所提出的反映换流变压器运行状况的评价指标共有 15 个, 为尽量全面考虑所有的评价指标, 避免在计算过程中出现“大数吃小数”现象。因此, 对换流变压器进行分析计算时采用二级综合评价模型即状态评价采用分块、分级进行评价。采用文献 [20] 中的层次分析法计算得到的换流变压器状态评价指标 u_2, u_3, u_4 包括的二级指标的权重集 w_2, w_3, w_4 为

$$w_2 = (0.06, 0.09, 0.04, 0.5, 0.13, 0.14, 0.04)$$

$$w_3 = (0.45, 0.55)$$

$$w_4 = (0.04, 0.29, 0.33, 0.34)$$

综合评价指标体系 U 包括的一级指标的权重集 W 为

$$W = (0.1, 0.35, 0.25, 0.2, 0.1)$$

2) 邀请 5 位经验丰富且从事状态检修的专家对收集到的反映换流变压器健康状态的 15 个指标进行客观评价, 得到一个 5×15 的样本矩阵 D 。

$$D = \begin{bmatrix} 9.5 & 9.0 & 7.2 & 8.4 & 7.5 & 8.0 & 9.0 & 8.3 & 9.0 & 9.1 & 8.0 & 8.0 & 6.8 & 9.0 & 8.0 \\ 9.8 & 8.5 & 8.0 & 9.1 & 8.0 & 7.8 & 9.5 & 8.5 & 9.0 & 8.4 & 8.5 & 8.2 & 7.1 & 9.0 & 8.0 \\ 8.3 & 9.1 & 9.1 & 7.8 & 6.8 & 8.0 & 8.0 & 8.0 & 8.0 & 9.3 & 8.0 & 8.4 & 7.3 & 8.9 & 8.5 \\ 9.0 & 8.6 & 9.0 & 7.5 & 7.0 & 9.3 & 7.5 & 6.8 & 9.0 & 9.0 & 8.2 & 7.8 & 6.3 & 9.0 & 8.0 \\ 8.5 & 9.0 & 8.5 & 8.6 & 8.6 & 8.0 & 8.6 & 7.2 & 8.0 & 8.6 & 8.0 & 7.0 & 7.0 & 8.5 & 9.0 \end{bmatrix}^T$$

3) 通过 Matlab 编程, 结合上面的样本矩阵按式 (1) ~ 式 (8) 计算得到指标 $u_2 \sim u_4$ 包括的二级指标的模糊评价权矩阵。

u_2 包括的二级指标的模糊评价权矩阵 $R_{2\Omega}$ 为

$$R_{2\Omega} = \begin{bmatrix} 0.562 & 0.222 & 0.133 & 0.083 \\ 0.462 & 0.273 & 0.163 & 0.102 \\ 0.448 & 0.280 & 0.168 & 0.104 \\ 0.349 & 0.326 & 0.200 & 0.125 \\ 0.436 & 0.285 & 0.171 & 0.107 \\ 0.490 & 0.258 & 0.155 & 0.097 \\ 0.372 & 0.314 & 0.193 & 0.121 \end{bmatrix}$$

u_3 包括的二级指标的模糊评价权矩阵 $R_{3\Omega}$ 为

$$R_{3\Omega} = \begin{bmatrix} 0.510 & 0.247 & 0.150 & 0.093 \\ 0.570 & 0.218 & 0.131 & 0.081 \end{bmatrix}$$

u_4 包括的二级指标的模糊评价权矩阵 $R_{4\Omega}$ 为

$$R_{4\Omega} = \begin{bmatrix} 0.425 & 0.291 & 0.175 & 0.109 \\ 0.386 & 0.311 & 0.187 & 0.116 \\ 0.282 & 0.348 & 0.288 & 0.142 \\ 0.572 & 0.217 & 0.130 & 0.081 \end{bmatrix}$$

4) 由 $R_i = w_i \cdot R_{i\Omega}$ 得到一级指标 $u_1 \sim u_5$ 的模糊评价权矩阵分别为

$$R_1 = (0.601, 0.202, 0.121, 0.076)$$

$$R_2 = (0.4079, 0.2978, 0.1811, 0.1132)$$

$$R_3 = (0.5430, 0.2311, 0.1395, 0.0864)$$

$$R_4 = (0.4165, 0.2904, 0.2005, 0.1124)$$

$$R_5 = (0.452, 0.278, 0.166, 0.104)$$

最终得到的综合模糊评价权矩阵 R 为

$$R = (R_1, R_2, R_3, R_4, R_5)^T$$

$$= \begin{bmatrix} 0.6010 & 0.2020 & 0.1210 & 0.0760 \\ 0.4079 & 0.2978 & 0.1811 & 0.1132 \\ 0.5430 & 0.2311 & 0.1395 & 0.0864 \\ 0.4165 & 0.2904 & 0.2005 & 0.1124 \\ 0.4520 & 0.2780 & 0.1660 & 0.1040 \end{bmatrix}$$

5) 计算换流变压器的模糊评判矩阵 B 和状态评价结果 Z 。

由 $B = W \cdot R$ 得模糊评判矩阵 B 为

$$B = (b_1, b_2, b_3, b_4)$$

$$= (0.4671, 0.2681, 0.1671, 0.1017)$$

在定量计算时采用 10 分制进行评价,按灰水平将评价等级 V 的 4 种状态分别量化赋值为 9, 7, 5, 2。则换流变压器状态评价的结果 Z 为

$$Z = (W \cdot R) \cdot V^T = B \cdot V^T = 7.1195$$

从换流变压器状态评价的结果可以看出, Z 值的大小在换流变压器注意状态规定的范围 [6, 8) 内。故可以初步确定此换流变压器的状态为注意状态。另外,从实际收集到的关于换流变压器的状态数据信息也不难发现,其自身有过不严重的缺陷记录;绕组的绝缘电阻和油色谱分析中部分气体的含量等均出现过超过正常状态的范围;而且换流变压器在运行过程中出现过短时的过负荷。各状态量数据信息虽然没有严重地超过标准限值,但有劣化的趋势,其整体可靠性在下降,换流变压器在继续运行过程中需要加强监视,应密切注意其状态的变化趋势。

势。因此,可以确定此换流变压器的状态应属于注意状态。另外,该评价结果与国家电网公司试行的换流变压器评价导则分析得到的结果是基本相符合的。

4 结 论

1) 所提出的 DHGF 算法综合了 Delphi 法、层次分析法、灰色理论分析法、模糊综合评价法成功之处,实现了定性与定量的综合集成,较好地解决了由于指标信息的非完备性和不确定性而无法进行精确评价的问题。采用该方法构建了换流变压器的 DHGF 数学模型,主要包括评价指标的选择、评价指标的白化预处理、构造模糊评价权矩阵、确定评价指标的组合权重和评价标准以及评价结果计算等。该算法思路清晰,方法简单。

2) 实例分析表明,所建立的 DHGF 算法模型可以用于换流变压器的状态评价且能够准确地反映设备的实际状态,可为下一步的检修决策提供参考依据;当然,所建立的换流变压器 DHGF 算法模型还需要更多的实例去验证。

参考文献

- [1] 张怀宇,朱松林,张杨,等. 输变电设备状态检修技术体系研究与实施 [J]. 电网技术, 2009, 33(13): 70-73.
- [2] 李景禄,李青山,等. 电力系统状态检修技术 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011.
- [3] 满若岩,付忠广. 基于模糊综合评判的火电厂状态评估 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(5): 5-10.
- [4] 吴姜,蔡泽祥,胡春潮,等. 基于模糊正态分布隶属函数的继电保护装置状态评价 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(5): 48-52.
- [5] 刘卫华,廖瑞金,杨丽君. 基于点密度加权核模糊聚类的变压器故障诊断方法 [J]. 电力自动化设备, 2012, 32(6): 66-69.
- [6] 廖瑞金,王谦,骆思佳,等. 基于模糊综合评判的电力变压器运行状态评估模型 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(3): 70-75.
- [7] 乐淤,成永红,陈小林,等. 基于人工智能的大电机主绝缘老化状态评估软件 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(14): 78-82.
- [8] 雷刚,顾伟,袁晓东. 灰色理论在电能质量综合评估中的应用 [J]. 电力自动化设备, 2009, 29(11): 62-65.

(下转第 84 页)

变化(高压缸效率下降,中压缸效率上升);

2) 通过对系统阀门进行维修或更换,降低了系统的泄漏量,汽轮机蒸汽流量得到了有效降低;

3) 汽轮机修正后的热耗分别下降了 426.5 kJ/kWh、252.0 kJ/kWh 和 174.1 kJ/kWh;

4) 汽轮机节能改造后,较大幅度地降低了机组的热耗,取得了较为显著的节能效果;

5) 对机组经济性的影响(仅计算发电煤耗一项)发电煤耗按下式进行计算。

$$b_{fd} = HR / (\eta_{gl} \times \eta_{gd} \times 29.307)$$

式中, b_{fd} 为发电煤耗, g/kWh; HR 为汽机热耗率, kJ/kWh; η_{gl} 为锅炉效率设计值(BMCR 工况), %, ALS-TOM 提供的锅炉效率设计值为 91.9%; η_{gd} 为管道热耗率取 99%。

在 300 MW 负荷情况下发电煤耗的变化为

$$\begin{aligned} \Delta b_{fd} &= \Delta HR / (\eta_{gl} \times \eta_{gd} \times 29.307) \\ &= 174.1 / (0.919 \times 0.99 \times 29.307) \\ &= 6.53 \text{ (g/kWh)} \end{aligned}$$

以 31 号机年运行小时数 5 000 h 计算,年发电量 150 GWh,累计年节约煤量约为 9 796 t,以公司入

炉年均标煤单价 815 元/t 计算,年节约费用近 800 万元,如果机组平均负荷降低,热耗率还将进一步降低,考虑到影响机组发电煤耗的诸多因素如机组负荷率、厂用电率、环境温度、机组老化、排污等,节约费用只能是一个大概数字,但实际节约的费用仍相当可观。

由此可见,大修后的汽轮机在各项参数上都有了较高幅度的增长,但在提高缸效率方面仍具有很大的空间。汽轮机通流部分的改造是提高机组效率的有力措施。通过减少轴封、隔板汽封漏汽以及减少漏汽对下一级汽流流场的扰动来提高缸效率和整机效率。总体来看,整机改造后机组效率可提高,热耗率下降,出力增加,效果显著。

参考文献

- [1] 吴季兰. 汽轮机设备及系统 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [2] 景朝辉. 热工理论及应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.

(收稿日期: 2015-02-12)

(上接第 41 页)

- [1] 罗毅,周窗立,刘向杰. 多层次灰色关联分析法在火电机组运行评价中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(17): 97-103.
- [2] 熊浩,孙才新,张昀,等. 电力变压器运行状态的灰色层次评估模型 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(7): 55-59.
- [3] 戴婷,宋斌,彭正洪. 基于灰色层次分析法的变电站通信网路状态评价 [J]. 武汉大学学报: 工版, 2011, 44(4): 526-529.
- [4] 冯利法,杨新宇,朱誉,等. 基于熵权和多级物元分析的汽轮机 DEH 调节系统状态综合评价 [J]. 热能动力工程, 2009, 24(5): 583-587.
- [5] 张建,李铁骊. 基于 DHGF 法的船舶操纵性综合评价 [J]. 中国舰船研究, 2010, 5(6): 56-59.
- [6] 钱学森,于景元,戴汝为. 一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论 [J]. 自然杂志, 1990, 13(1): 3-10.
- [7] 顾基发,唐锡晋,朱正祥. 物理-事理-人理系统方法论综述 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2007, 7(6): 51-60.

- [6] 邓聚龙. 灰预测与灰决策 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
- [7] 谢季坚,刘承平. 模糊数学方法及其应用(第二版) [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2004.
- [8] Victor R L. A Novel Cryptosystem Based on Grey System Theory and Genetic Algorithm [J]. Applied Mathematics and Computation, 2005, 170(2): 1290-1302.
- [9] 陈士涛,杨建军,张志峰,等. 基于 DHGF 算法和三角模糊数的装备研制风险评价 [J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(8): 54-58.
- [10] 宾光富,李学军, DHILLON Balbir-S. 基于模糊层次分析法的设备状态系统化评价新方法 [J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(4): 744-749.

作者简介:

肖屏(1981), 硕士研究生, 主要研究方向为电力设备状态监测与故障诊断, 高压直流输电;

王渝红(1971), 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为电力设备状态监测与故障诊断、电力系统稳定与控制、高压直流输电。

(收稿日期: 2015-04-28)

110 kV 线路变压器组接线电厂继电保护关键问题探讨

李津津

(云南电网有限责任公司昆明供电局, 云南 昆明 650011)

摘要: 分析了 110 kV 线路变压器组接线电厂与常规接线厂站在继电保护功能配置及二次回路设计存在的不同之处, 对存在的关键问题、注意事项进行了梳理和总结, 提出了几种实用的方案, 为继电保护回路设计、施工调试、运行整定提供了借鉴。

关键词: 线变组; 电厂; 继电保护; 设计

Abstract: The differences between the power plant connected with 110 kV line – transformer group and the power plant with the conventional connection are analyzed in the function deployment of relay protection and the design of secondary circuit. The existing key problems and matters needing attention are summarized, and several practical solutions are proposed, which provides a reference for the design, construction and calculation of relay protection circuit.

Key words: line – transformer group; power plant; relay protection; design

中图分类号: TM773 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003 – 6954(2015) 03 – 0042 – 04

DOI: 10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.03.010

0 引言

随着电网的发展, 地区电网不断有电厂接入。为了节省投资, 越来越多的电厂采用线路变压器组的主接线方式。由于接线方式的特殊性, 其保护功能配置与二次回路设计与常规接线的厂站也不尽相同^[1-3], 而这些不同之处往往成为设计、施工、整定工作中容易忽略的关键因素, 稍不注意便有可能出错, 甚至运行中发生保护不正确动作事件。

1 电厂接线方式与保护配置

1.1 一次接线方式

如图 1 所示, 某电厂 110 kV 并网线路仅通过 1 台断路器与 110 kV 主变压器直接连接, 形成独立的接线单元, 线路与主变压器之间无 110 kV 母线及 110 kV 桥断路器连接; 10 kV 侧装有 1 段母线, 连接有发电机、TV 等元件。电厂一次接线的特殊之处在于: 110 kV 线路与主变压器共用 1 台断路器, 且 110 kV 侧仅有 1 组电压互感器。

1.2 保护配置

110 kV 并网线电厂侧为电源点, 故配置 1 套线路保护, 为了利于保护整定配合, 兼顾继电保护的灵

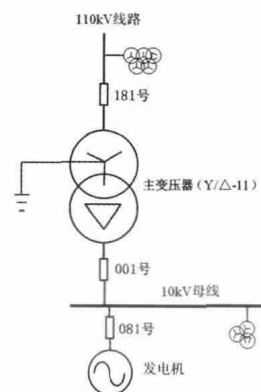


图 1 某 110 kV 电厂一次主接线图

敏性与选择性, 除距离、零序(方向)及自动重合闸外, 线路保护还集成了光纤电流差动功能, 此外操作箱插件也配置在线路保护装置中。主变压器配置差动、后备及非电量保护, 均按分箱配置; 主变压器各侧控制回路集成在同一台操作箱装置中, 与保护独立配置并组于同一面屏柜^[4]。

2 电流二次回路问题

2.1 TA 配置及绕组分配问题

由于电厂主变压器与 110 kV 线路均配置了能快速切除故障的差动保护, 为充分发挥保护的性能, 消除保护死区, 主变压器差动保护与线路保护范围应尽量交叉^[5]。考虑到高压侧断路器 TA 配置可能

有 1 台或 2 台,应分 2 种不同的方案进行考虑。

2.1.1 方案 1

如图 2(左)所示,高压侧断路器仅线路侧装设 1 台 TA,主变压器差动保护与线路保护均取自该 TA。为尽可能满足主保护范围交叉的原则,主变压器差动保护所用绕组 1LH 应位于 110 kV 线路保护所用绕组 2LH 靠外侧(线路侧),在 1LH 与 2LH 绕组之间发生短路时,主变压器差动保护与 110 kV 线路保护将同时动作,跳开主变压器两侧断路器与线路对侧断路器将故障快速切除。

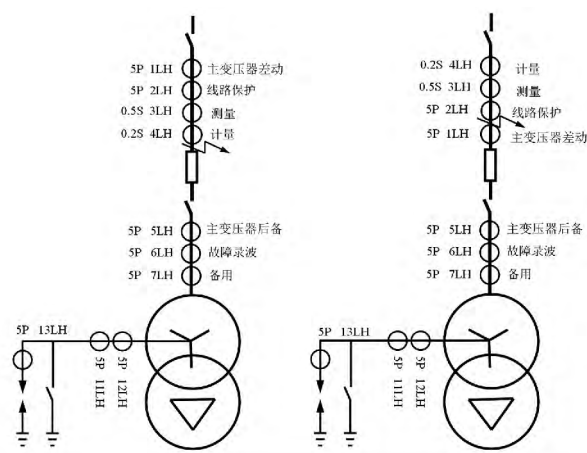


图 2 高压侧 TA 绕组分配方案 1

采用方案 1 时需要注意的事项如下:

1) 由于高压侧断路器仅有 1 台 TA,当 TA 最靠近断路器的绕组与断路器之间发生短路时,对于线路保护属于区外短路,主变压器差动保护动作跳开主变压器两侧断路器后,系统将继续向故障点输送短路电流,然后由 110 kV 线路对侧 II 段保护(如距离 II 段、零序 II 段)经短延时动作隔离故障;所以当断路器与 TA 之间短路时,故障无法实现快速切除。220 kV 及以上电压等级的线变组可采用主变压器保护出口时启动远跳的方法实现快切故障;110 kV 及以下线路无快切要求,主变压器保护动作无需启动远跳。

2) 当断路器 TA 在吊装时造成了一次侧反向(即 P1、P2 颠倒),则 1LH 将位于 2LH 靠主变压器侧,若一、二次绕组均不作调整,将导致 1LH 与 2LH 之间存在死区,如图 2(右)所示。故当 TA 吊装颠倒时,应将 1LH 用于线路保护,2LH 用于主变压器差动(此时二次侧应反向接线进行方向纠正),或将 TA 一次侧倒转方向后进行重新吊装,以解决 TA 一次侧反向带来的保护死区问题。

2.1.2 方案 2

如图 3 所示,高压侧断路器配置 2 台 TA,线路侧、主变压器侧各 1 台,主变压器保护取靠线路侧 TA,线路保护取靠主变压器侧 TA。此方案的好处在于,无论哪一侧 TA 与断路器之间(图中的 K1、K2 点)短路,或是任一侧 TA 吊装颠倒(二次侧反向接线进行方向纠正),线路与主变压器差动保护均会同时动作快速切除故障,实现了真正意义上的保护范围无死区。然而方案 2 的缺点在于多装设了 1 台 TA,不利于节省投资。

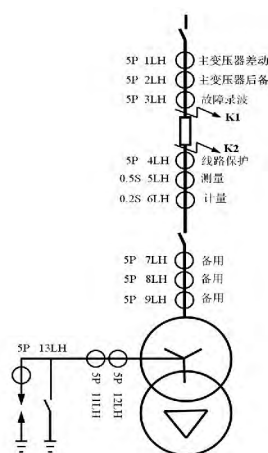


图 3 高压侧 TA 绕组分配方案 2

2.2 电流极性、方向问题

电流互感器一般按减极性原则设置,即一次侧从 P1 流入,P2 端流出,则二次侧从 S1 端流出。通常 TA 一次绕组 P1 端位于靠出线侧,P2 端位于靠母线侧,电流以流出母线为正方向^[4]。然而线变组接线电厂 110 kV 侧无母线,造成了该侧 TA 一次 P1、P2 朝向该如何布置没有明确的参照点。若 TA 二次侧 S1、S2 朝向与一次侧 P1、P2 朝向不对应导致电流极性接反,将存在以下风险:1) 110 kV 线路区外故障时,线路差动保护误动;110 kV 线路区内故障时,线路距离保护、带方向的零序保护拒动;2) 主变压器区外故障时,差动保护误动;主变压器后备保护所指向的正方向故障时,后备保护拒动;3) 110 kV 线路正方向故障时,故障录波测距将错误地认为是区外故障,导致正向故障时无录波测距信息;110 kV 线路反方向故障时,故障录波测距将错误地认为是区内故障。

以上所述表明,合理、正确地设置 TA 二次绕组接线的方向对于确保保护正确动作起到了极为关键的作用。仅以高压侧开关配置 1 组 TA 的情况为

例,TA 一、二次绕组布置有 2 种方案可供选择。

2.2.1 方案 1

如图 4 所示,TA 一次绕组 P1 位于线路侧,P2 位于主变压器侧。主变压器差动、后备保护以指向主变压器为正,故二次侧电流应从 S1 端流出;线路保护、故障录波以指向线路为正,故二次侧电流应从 S2 端流出。

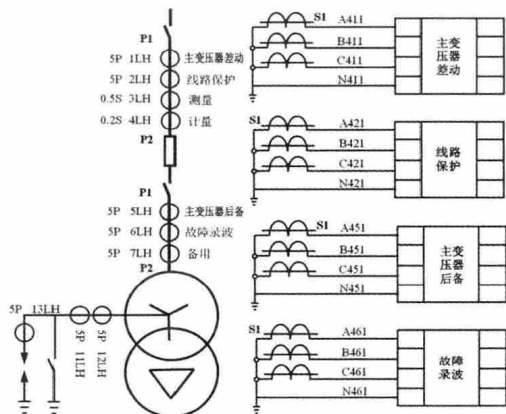


图 4 TA 极性设置方案 1

2.2.2 方案 2

如图 5 所示,TA 一次绕组 P1 位于主变压器侧,P2 位于线路侧。主变压器差动、后备保护二次电流从 S2 端流出;线路保护、故障录波二次侧电流从 S1 端流出。

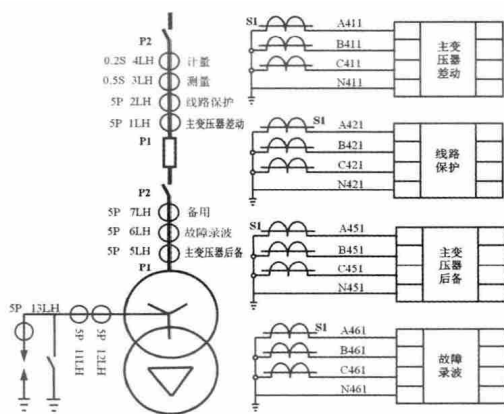


图 5 TA 极性设置方案 2

需要特别说明的是:1) 主变压器差动保护两侧的电流均应以流入主变压器为正,或均以流出主变压器为正。但为了规范统一和避免出错,建议采用前者。2) 主变压器后备保护电流原则上亦可按照以流出主变压器为正的颠倒布置,通过定值整定来明确保护的方向。但为了规范统一,防止整定人员因忽略此细节导致实际方向设置与定值单要求不一致,不建议采用此做法。

3 110 kV 并网线重合闸问题

3.1 重合闸方式选择

为缩短线路故障后恢复送电的操作步骤和时间,110 kV 并网线路的电厂侧可考虑投入自动重合闸。为防止非同期并列,110 kV 并网线路系统侧重重合闸应选择检线路无压方式,电厂 110 kV 线路重合闸可考虑 2 种方式:检同期方式和等待发电机解列后的检无压方式。由于升压站无 110 kV 母线,故仅在 110 kV 线路侧装设了 1 组 TV,无论重合闸采用检同期或检无压方式,唯一的选择是取 10 kV 母线某单相电压或相间电压作为抽取电压 U_x 。

3.1.1 检同期方式

电厂主变压器为 Y/Δ-11 接线方式,即低压侧电压超前高压侧电压 30° ,如图 6 所示。若在 110 kV 线路保护跳闸后启动重合闸时直接进行检同期比较,将存在以下风险:

- 1) 线路跳闸后若发电机与电网一次系统始终保持同期,则二次电压将存在一定的角度差,最终将导致重合闸检同期不成功而动作失败;
- 2) 线路跳闸后若发电机与电网一次系统始终不能保持同期但未解列,若在某一时刻低压侧一次电压滞后高压侧一次电压约 30° 时,二次电压恰好能满足同期条件,从而重合闸顺利地“检同期”成功而动作,将可能带来非同期并列的后果。

考虑到以上因素,在电压同期比较时可在微机保护程序中对同期电压 U_x 进行 -30° 的转角处理,使高压侧线路与低压侧母线一、二次电压相位差始终相等。

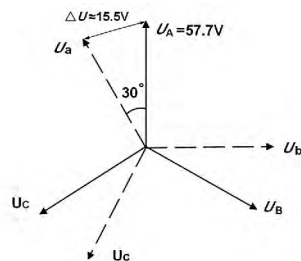


图 6 同期电压相角差与相位补偿

3.1.2 检无压方式

110 kV 线路跳闸,发电机解列后,若 10 kV 母线无压,则主变压器 110 kV 侧必然也满足无压,故可采用判断 110 kV 线路电压满足有压条件且 10 kV

- Proceedings of the Power System Technology of IEEE, Aviva, 2010.
- [2] 王守相, 黄丽娟, 王成山, 等. 分布式发电系统的不平衡三相潮流计算 [J]. 电力自动化设备, 2007, 27(8): 11-15.
- [3] 梁双, 胡学浩, 张东霞, 等. 光伏发电置信容量的研究现状与发展趋势 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35(19): 101-107.
- [4] 汪海瑛, 白晓民. 并网光伏的短期运行备用评估 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(5): 55-60.
- [5] 李峰, 李威, 薛峰, 等. 规模化光伏电站与电网暂态交互影响定量分析 [J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(11): 50-56.
- [6] 龙源, 李国杰, 程林, 等. 利用光伏发电系统抑制电网功率振荡的研究 [J]. 电网技术, 2006, 30(24): 44-49.
- [7] 刘莉敏, 曹志峰, 许洪华. 50 kWp 并网光伏示范电站系统设计及运行数据分析 [J]. 太阳能学报, 2006, 27(2): 146-151.
- [8] 李斌, 袁越. 光伏并网发电对保护及重合闸的影响与对策 [J]. 电力自动化设备, 2013, 33(4): 12-17.
- [9] 杨国华, 姚琪. 光伏电源影响配电网线路保护的仿真研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(15): 75-79.
- [20] 黄伟, 雷金勇, 夏翔, 等. 分布式电源对配电网相间短路保护的影响 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(1): 93-97.
- [21] 丁明, 王伟胜, 王秀丽, 等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 1-14.
- [22] 孟祥林. 四川能源现状及其能源结构发展选择——从中国太阳能第一楼谈起 [J]. 西华大学学报: 社会科学版, 2006(5): 46-49.
- [23] 杜心远, 何荣华. 四川省新能源发展战略构想 [J]. 商场现代化, 2007(35): 216.
- [24] 四川省“十二五”能源发展规划 [EB/OL]. <http://wenku.baidu.com/view/9bfd69ec856a561252d36fe5.html>.
- [25] 陈国阶. 对四川发展若干战略问题的思考 [J]. 决策咨询通讯, 2010(1): 8-9, 72.
- (收稿日期: 2015-02-28)

(上接第32页)

做较为准确的计算,但对于山区架空输电线路的设计风速计算需考虑地形、下垫面等自然因素的复杂影响。在无建站条件和无资料地区,目前只有采用调整系数法进行估算;资料条件充足时可建立数值模型进行推算。当前国内外也开发了一些风能资源评估系统软件,可为计算山区架空输电线路设计风速提供一定的参考依据,由于目前的风能资源评估系统软件是平均风速的概念,尚缺乏一定的适用性,

推求山区架空输电线路设计风速还有待进行更进一步研究。

参考文献

- [1] GB 50009-2012, 建筑结构荷载规范 [S].
- [2] DL/T 5158-2012, 电力工程气象勘测技术规程 [S].

作者简介:

谢直卉(1982), 硕士, 工程师, 主要从事电力工程水文气象勘测工作。

(收稿日期: 2014-12-29)

(上接第45页)

次接线布置与继电保护配置都较为简单,然而与常规接线的厂站相比,其特殊性也是显而易见的。在保护设计、调试、整定等工作中应对以上列举的关键问题引起重视,根据需求和现场实际情况进行相应的取舍,力争实现方案的最优化。

参考文献

- [1] 刘文. 浅析发电机-变压器-线路组保护配置特点 [J]. 继电器, 2005, 33(15): 18-20.
- [2] 王晶晶. 发电机-变压器-线路组保护的配置特点及实例分析 [J]. 华北电力技术, 2007, 8: 37-52.
- [3] 郑太一, 马丽红, 王建勋, 等. 终端线路变压器组继电

保护配置及变压器中性点接地方式研究 [J]. 吉林电力, 2009, 37(5): 5-7.

- [4] Q/CSG110039-2012, 南方电网继电保护配置技术规范 [S].
- [5] 国家电力调度通信中心. 国家电网公司继电保护培训教材 [J]. 2009.
- [6] 张鹏. 浅谈电流互感器二次绕组极性 [J]. 云南电力技术, 2013, 41(3): 61-63.
- [7] 王媛婷, 郭志彬. 变电站调度事故总信号改进方案 [J]. 电力与电工, 2012, 32(4): 86-88.

作者简介:

李津津(1988), 主要从事电网继电保护整定计算及运行管理工作。

(收稿日期: 2015-01-14)

电流互感器饱和对继电保护装置动作影响分析与对策

何小飞,王 锐,李江陵,钟 斌,杨永忠
(国网乐山供电公司,四川 乐山 614000)

摘要: 对电流互感器饱和对继电保护装置动作产生的影响进行了分析,介绍了电流互感器发生稳态和暂态保护现象的原理。并通过两个实际案例分别对两种饱和情况影响继电保护装置正确动作过程进行了深入研究。最后针对可能造成的影响分别从设备选型、电网运行方式调整、保护装置研发改进以及保护定值调整4个方面提出了详细的措施建议。事实证明,通过这些措施可以有效降低电流互感器饱和对于继电保护装置的影响。

关键词: 电流互感器; 饱和; 继电保护动作; 稳态、暂态分析

Abstract: The impact of current transformer saturation on the action of relay protection devices is analyzed, and the principle of steady-state and transient protection occurring in current transformer is introduced. The process of correct action of relay protection devices affected by two saturations is studied separately in two actual cases. Finally, the detailed measures and suggestions are proposed according to the possible impacts as viewed from the type selection of equipment, the adjustment of grid operation mode, the development and improvement of protection devices and the setting of protection respectively. The facts prove that through these measures it can effectively reduce the impact of current transformer saturation on relay protection devices.

Key words: current transformer; saturation; relay protection action; steady-state and transient analysis

中图分类号: TM734 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2015)03-0046-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.03.011

0 引言

电流互感器及其二次回路的可靠性和保护装置的正确动作密不可分,而事实上对保护定值的正确性、保护装置的可靠性很重视,但是对于继电保护装置所选用的电流互感器参数选择及实际特性校验重视度不够^[1],下面结合乐山公司发生的两起因TA饱和造成的保护装置拒动和误动事件进行分析,并结合实际情况对TA的参数选择和减小因TA饱和造成影响提出一些措施建议。

1 电流互感器的选型原则

目前保护用的电流互感器可分为两类:一类是P类电流互感器,包括PX、PR两类,该类电流互感器准确限值为稳态对称短路电流的复合误差或励磁特性拐点来确定的;另一类是TP类电流互感器,该类电流互感器的准确限值是考虑一次电流同时具有周期和非周期分量,并按照某种工作规定的暂态工

作的峰值误差来确定的。该类电流互感器适用于考虑短路电流中非周期分量暂态影响的情况^[2]。

由于220 kV及以下系统暂态饱和问题及其影响后果较轻,因此保护用的电流互感器一般按稳态条件选择,选用P类互感器。而对于330 kV及以上系统,由于一次时间常数较长,电流互感器暂态饱和影响较严重,由此造成保护误动和拒动后果严重,因此所选用的互感器应保证不能造成暂态饱和,宜选用TP类电流互感器^[3]。

2 电流互感器饱和理论分析

根据对电流互感器饱和现象的研究,电流互感器饱和现象分为两种:一种是大容量稳态短路电流引起的饱和(稳态饱和);另一种是由于短路电流中含有非周期分量和铁心存在剩磁而引起的饱和(暂态饱和)^[4]。在稳态对称短路电流(非周期分量)下,影响电流互感器的主要因素有:短路电流幅值、二次回路阻抗。在实际短路暂态规程中,短路电流可能存在非周期分量而严重偏移。这可能造成电流

互感器严重暂态饱和。

2.1 稳态电流饱和

稳态电流饱和是指当电流互感器通过稳态短路电流超过一定值时,互感器铁心将出现饱和。这种情况下二次电流出现波形畸变,呈脉冲波形,正负半波大体对称。对于反映电流值相关的保护,如过电流保护和阻抗保护,饱和将使灵敏度降低,甚至拒动。而对于差动保护,由于差电流取决于两侧互感器饱和特性差异,如果两侧互感器饱和特性差异较大,一侧饱另一侧不饱,则在区外故障时,差动保护可能误动,电流互感器发生稳态电流饱和时二次谐波中的谐波分量主要是三次谐波,二次谐波分量几乎没有或较好。

2.2 暂态电流饱和

短路电流中一般含有非周期分量,特别是在高压系统中,短路电流的非周期分量更加显著,这将使电流互感器的传变特性严重恶化,原因是电流互感器的励磁特性按照工频设计的,在传变等效频率很低的非周期分量时,铁心磁通(即励磁电流)需要大大增加,非周期分量导致互感器暂态饱和时二次电流是不对称的,波形会朝着一方整体上移^[4],如图1所示。这样就更加速了互感器的饱和。电流互感器发生暂态电流饱和时二次电流中谐波分量主要是二次谐波,三次谐波分量较少。

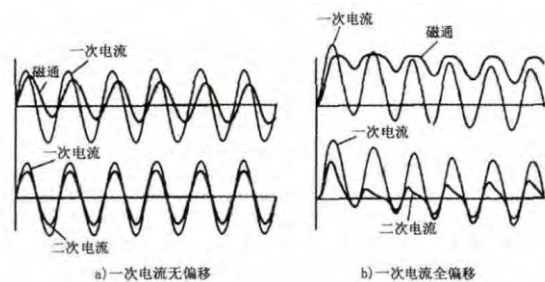


图1 TA饱和时一次侧有无非周期分量传变特性对比

3 实例分析

3.1 案例分析1

2014年11月17日0时26分,110 kV 斑竹湾站10 kV 斑肖线955开关柜出线电缆接头处短路故障,955开关保护拒动,1号主变压器低后备保护过流I段动作跳开930开关,2号主变压器低后备过流IV段动作跳开102、902开关,造成10 kV II段母线失电。

1) 故障分析

根据保护动作报文得知此次故障为三相短路,901和902开关TA变比3500/5,955开关TA变比200/5,由主变压器录波电流(901+902=20+16=36 A)换算出流经955开关TA的一次故障电流约为25 200 A(930跳开后降为14 000 A),二次故障电流630 A。955开关TA的精确级为5P10,即在额定电流10倍以内(准确度限值电流为 $200 \times 10 = 2\,000$ A),TA误差不大于 $\pm 5\%$,但实际的故障电流约为额定电流的126倍。由图3可看出,故障发生时,955开关TA已严重饱和,波形畸变严重,基波分量很小且含有大量谐波,造成线路保护拒动。

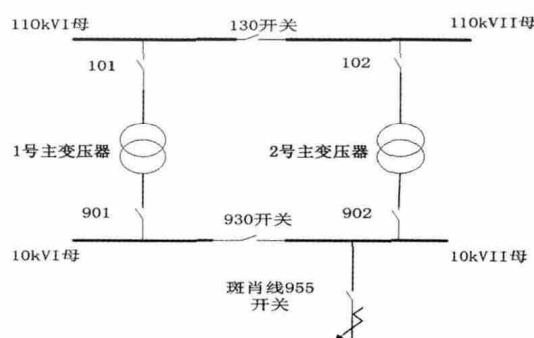


图2 110 kV 斑竹湾站主接线图



图3 斑肖线B、C相故障电流波形图

2) TA 热稳定校验

根据以上分析得知当时三相短路电流为25.2 kA,动稳定电流为 $2.55 \times 25.2 = 65.26$ kA。

斑肖线TA热稳定电流值为31.5 kA及以上,动稳定电流为80 kA及以上,而主变压器低后备保护切除本侧动作时间为1.7 s。

10 kV 母线短路热稳定值为 $25.2^2 \times 1 = 635$,TA的热稳定值为 $31.5^2 \times 1.7 = 1\,686 > 635$,因此热稳定满足要求。

3) TA 动稳定校验

母线短路动稳定值为65.26 kA,TA的动稳定值为80 kA >65.26 kA,因此动稳定满足要求。

4) 分析结论

从以上分析可知,是由于斑肖线TA的准确值

限数与TA变比组合不满足,使得当发生近区故障时,短路电流大于准确限值,造成TA严重饱和,传变性能下降,波形畸变,造成了线路过流保护采样装置无法采集到实时电流量造成保护拒动。

3.2 案例分析2

2011年10月23日19时31分,110kV黄土变电站1号主变压器区外发生故障,故障点在开关柜内部上方,故障类型为AC相短路。在此次故障中,1号主变压器的两套差动保护装置动作行为不一致,第1套保护动作报文显示:0000ms差动保护启动,0027ms差动保护出口,三相差流分别为: $I_{CDA} = 5.198\text{ A}$, $I_{CDB} = 0.155\text{ A}$, $I_{CDC} = 5.425\text{ A}$ 。第2套保护装置的动作为:0000ms差动保护启动,三相差流分别为: $I_{CDA} = 0.002\text{ A}$, $I_{CDB} = 0.002\text{ A}$, $I_{CDC} = 0.004\text{ A}$,由于是区外故障,可以基本断定1号主变压器第1套保护屏在此次故障属于误动作。

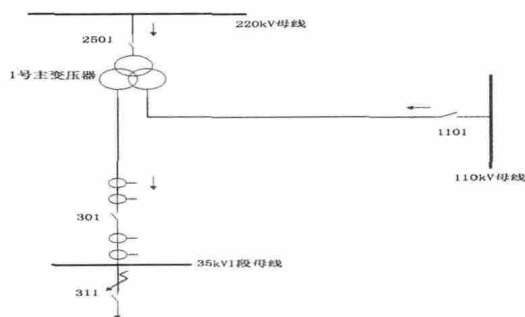


图4 110kV黄土变电站主接线图

1) 故障分析

对于1号主变压器差动保护来说,上述故障为区外故障,但从故障录波图中可看到,1号主变压器35kV侧二次电流发生严重畸变(A、C相)。其中1号主变压器差动保护动作报告中显示A相差流为5.198A,C相差流为5.425A,这说明故障发生时,A、C相TA发生饱和导致二次电流无法如实反映一次电流。A相二次谐波含量为0.805A,C相二次谐波含量为0.535A。

根据故障数据,绘制差动保护特性图得知,A、C相已落入比率制动差动保护动作区,因此符合动作条件;且A相电流中二次谐波含量为 $0.805/5.198 = 15.5\%$,C相电流中二次谐波含量为 $0.535/5.425 = 9.86\%$,故障谐波含量未达到保护定值整定的20%;因此差动保护动作开放。

2) TA稳态特性分析

通过故障录波图可得出35kV侧实际三相短路

电流, $I_{dA} = 11\,571.5\text{ A}$, $I_{dB} = 10\,946.9\text{ A}$, $I_{dC} = 11\,604.9\text{ A}$,由于35kV侧变比为2000/5,这说明,35kV侧A、C相TA在一次电流在不到额定电流的6倍时就开始饱和。

而35kV侧TA的准确值限数为10P20,随后对35kV侧TA进行伏安特性测试和10%误差测试。从试验结果看,35kV侧TA一次流过10倍额定稳态电流时,保护的二次绕组误差不会超过10%。

3) TA暂态特性分析

造成TA饱和的各种因素中,除了流过TA的故障短路大小外,一次电流的偏移程度同样是造成TA饱和的一个重要原因,这种偏移正是短路电流中含有大量的非周期分量。实际上由于短路电流非周期分量的影响,即使短路电流值不大,也可能产生严重暂态饱和而造成很大误差。

4) 分析结论

通过以上分析,可推断出本次差动保护误动是由于主变压器低压侧TA出现暂态饱和,造成差动保护感受到差流,落入保护动作区,二次谐波制动未达到闭锁值,最终造成区外故障时主变压器差动保护误动。

4 提高TA抗饱和能力的措施建议

1) 加强对TA选型工作。根据《电流互感器选用导则》,加大TA动热稳定参数、TA变比和准确值限数的校核选择。对于TA动热稳定校验,应按照各站最大运行方式下的最大短路电流值来核算^[3],使得TA的动热稳定值应大于这个短路电流值。在TA准确限值系数选择上,应按照TA一次额定电流 $\times$ TA准确值系数 $>$ 最大短路电流值,才能确保TA的误差在合格范围内。

需要注意的是在TA选型时,还需考虑TA的安装尺寸是否满足现场开关柜的相间以及相对高压开关柜柜体的安全净距。因为准确限值系数越高,TA的铁心越大,设计宽度也会越大,成本也会越高;而TA变比越大,测量误差也会越大,因此在TA选型时应结合实际情况综合考虑。

2) 开展变压器抗短路能力的校核工作,根据设备的实际情况有选择性的加装中性点小电抗、限流电抗器等,对不满足要求的变压器进行改造或更换。在核算时应特别注意主变压器并列数量对短路电流

表1 常用限制短路电流方法比较

方案	设备造价	施工周期	限制效果	易于实现程度	占地	自身安全性	运维
中性点电抗	较低	短	只对单相短路有效	容易	较小	好	简单
大容量高速开关限流	较低	短	较好	一般	较小	一般	动作后需更换部分元件
固定串抗	一般	短	一般	容易	较小	较好	简单
可控串抗	高	一般	好	较难	较小	一般	较难且成本高

的影响。计算表明,主变压器高、中压侧发生短路时短路电流与主变压器并列数量影响不大,而低压侧(中压侧没有电源情况下)发生短路时,流过主变压器的短路电流与并联数量有明显关系^[7]。数据显示,同一变电站内,并联变压器数量越多,低压侧短路电流值越大,即低压侧采用分列运行方式能减小短路电流值。

目前主要采用的限制短路电流的方法包括:改变中性点接地方式或加装小电抗抑制单相短路电流;大容量开关限流;出线加装固定串联电抗器;加装新型可控串联限抗;变压器分列运行,这些方法各种优劣。

除中性点加装小电抗为单一针对单相短路电流的限流措施,其他几种方法都是针对三相短路情况的。对于低压侧故障,则可采用低成本、技术成熟的出线加装固定电抗的方式^[8]。

3) 采用具有抗饱和能力的继电保护装置

目前中国各保护装置厂家都在研究继电保护装置的抗TA饱和能力,并已取得了一些成果,在220 kV及以上的主变压器差动和母线差动保护装置中,均设置有TA饱和检测元件,可以有效避免差动保护因TA饱和造成区外故障时误动。

目前TA饱和检测元件原理有两种:一种是采用自适应阻抗加权抗饱和方法,即利用电压工频变化量起动元件自适应开放加权算法^[9];另一种是目前常采用是谐波制动方法,利用TA饱和后,无论是稳态还是暂态分量都有大量二、三次谐波分量,通过检测电流中二、三次谐波含量作为判据。当与某相差动电流有关的电流满足整定定值时即认为此相差流为TA饱和引起,闭锁差动保护。该方法有效避免差动保护因TA保护造成区外故障误动,但无法在TA饱和时对电流类保护出现拒动及时发现采取措施^[10]。

4) 调整保护定值,缩短故障时间

从以上两个案例可知:当发生近区故障时,如果

TA饱和造成保护拒动,这时主变压器后备保护定值又整定不当,不能及时切除故障短路电流,将可能造成对主变压器的严重冲击,甚至对主变压器低压侧绕组造成损坏。因此针对主变压器近区短路这一情况,如果TA因现场实际无法满足相关要求,可考虑对线路保护以及主变压器后备保护定值进行调整,在确保不越级误动的情况下,尽量缩短故障时间,减少故障损失。

目前,乐山公司35 kV出线过流Ⅱ段最长时限整定为0.9 s;35 kV出线过流Ⅲ段最长时限为1.5 s;10 kV出线过流Ⅱ段最长时限为0.7 s;10 kV出现过流Ⅲ段最长时限为1.2 s。调整后:一是对于35 kV、10 kV侧后备保护跳相应侧分段时限,以较短时限跳相应分段开关,快速隔离故障。整定主变压器10 kV侧后备跳分段930开关时限统一按0.8 s整定;35 kV侧后备跳分段530开关时限统一按1.0 s整定(与相应出线最长时限有0.1 s级差,不致频繁动作);二是对于35 kV、10 kV侧后备保护跳本侧,与相应出线保护过流Ⅲ段完全配合,整定35 kV、10 kV侧出线过流Ⅲ段与相应电压等级主变压器后备跳本侧段电流定值有不小于1.1的配合系数,时限级差不小于0.3 s,通过调整保护定值,达到缩短故障切除时间目的。

5 结 论

对电流互感器饱和对继电保护装置动作影响进行介绍,结合乐山公司发生的两起事件分别进行了详细分析,并分别从互感器本身、电网运行方式、继电保护装置等方面提出了改进措施。事实上,电流互感器饱和一直是影响继电保护动作的一个重要因素,通过近些年的努力,也取得了很大进步,相信通过各方面的努力,电流互感器饱和对保护装置的影响将逐步消除。

(下转第77页)

bility Model of Large Wind Farms for Power System Adequacy Studies [J]. Energy Conversion, IEEE Transactions on, 2009, 24(3): 792–801.

- [6] Haghi, H. V., S. M. Hakimi, and S. M. M. Tafreshi. Optimal Sizing of a Hybrid Power System Considering Wind Power Uncertainty Using PSO – embedded Stochastic Simulation [J]. in Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), 2010 IEEE 11th International Conference on. 2010.

[7] 鲍晓慧, 侯慧. 电力系统可靠性评估述评 [J]. 武汉大学学报: 上海工学版, 2008(4): 96–101.

[8] 蒋小亮. 风电并网对电力系统可靠性和备用影响研究 [J]. 上海交通大学, 2011.

[9] 曲翀, 王晋丽, 谢绍宇, 等. 不同风速模型和可靠性指标对风电可信容量评估的影响 [J]. 电网技术, 2013

(10): 2896–2903.

[10] 石文辉, 别朝红, 王锡凡. 大型电力系统可靠性评估中的马尔可夫链蒙特卡洛方法 [J]. 中国电机工程学报, 2008(4): 9–15.

[11] 王学良. 风电场可靠性评估研究 [D]. 天津: 天津大学, 2009.

[12] Karki, R., H. Po, and R. Billinton. A Simplified Wind Power Generation Model for Reliability Evaluation [J]. Energy Conversion, IEEE Transactions on, 2006, 21(2): 533–540.

[13] Sulaeman, S., M. Benidris, and J. Mitra. A Method to Model the Output Power of Wind Farms in Composite System Reliability Assessment [J]. in North American Power Symposium (NAPS), 2014.

(收稿日期: 2015-02-12)

(上接第49页)

参考文献

[1] 梁国艳, 梁中华. 电流互感器饱和的检测方法及在微机母线保护中的应用 [J]. 东北电力技术, 2006(12): 66–70.

[2] 王燕. 电流互感器的误差及其对继电保护的影响 [J]. 东北电力技术, 2009(1): 66–70.

[3] 王优胤. 大型发电机变压器组差动保护用电流互感器选型 [J]. 东北电力技术, 2010(6): 25–28.

[4] 毕大强, 冯存亮, 葛宝明. 电流互感器局部暂态饱和识别的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2012(11): 24–27.

[5] 景敏慧, 孔萧迪. P类电流互感器饱和原因分析及对策 [J]. 电力系统自动化, 2007(11): 45–48.

[6] 任先文, 徐宏雷, 孙楷琪. 非周期分量对电流互感器饱和特性的影响的仿真 [J]. 电力系统保护与控制, 2009

(3): 30–33.

[7] 邓旭阳, 索南加乐, 李广. 基于参数识别的电流互感器的识别原理研究 [J]. 电力系统自动化, 2010(8): 42–45.

[8] 陈建玉, 孟宪民, 王志华. 电流互感器饱和对继电保护影响的分析及对策 [J]. 电力系统自动化, 2004(10): 32–35.

[9] 柳树. 电流互感器饱和过程分析及对策 [J]. 华北电力技术, 2009(3): 37–40.

[10] 陈羽名, 崔广泉, 刘长江. 电力电流互感器检测试验方法研究 [J]. 东北电力技术, 2009(11): 3–6.

作者简介:

何小飞(1986), 硕士, 工程师, 目前从事继电保护装置运维检修工作;

王锐(1975), 本科, 高级工程师, 主要从事变电检修技术工作.

(收稿日期: 2015-02-02)

(上接第57页)

参考文献

[1] 郭小江, 郑超, 尚慧玉, 等. 西藏中部同步电网安全稳定控制研究 [J]. 电网技术, 2010, 34(6): 87–92.

[2] 吕虎, 谢国平, 朱艺颖, 等. 青藏直流接入西藏电网数模混合仿真 [J]. 电网技术, 2013, 37(2): 455–459.

[3] 唐晓骏, 刘东冉, 陈麒麟, 等. 青藏直流接入后西藏地区电网电压/无功控制 [J]. 电网技术, 2010, 34(9): 94–99.

[4] 赵文强, 王杨正, 李林, 等. 青藏直流联网工程大负荷

试验策略研究 [J]. 电网技术, 2014, 38(11): 3052–3058.

[5] 吴冲, 刘汉伟, 董卫国, 等. 青藏直流联网后藏中电网安全稳定控制系统的重构 [J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(1): 54–57.

[6] 李惠军, 汤奕, 李雪明, 等. 电源送出安全稳定控制系统典型方案及装置主辅运设置原则分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(4): 141–145.

作者简介:

王郑锋(1982), 工程师, 主要研究领域为电网规划设计.

(收稿日期: 2015-02-28)

指数函数膜计算模型的自动设计方法研究

赖正坤, 孙 敏, 杨昌东

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘 要: 膜计算模型设计是当前膜计算方向非常活跃的一个研究方向。研究者们利用数学、形式语言等工具进行膜计算基础理论研究, 已经提出了各种膜计算模型, 并取得了许多研究成果。从最开始复杂的手工推导到近期的自动设计研究, 在膜计算模型自动设计方法变的日益成熟的过程中, 膜计算模型也能解决更多的问题。在前人的基础上将膜计算自动设计方法用于推广到指数函数的计算, 同时对设计方法进行了改进, 采用置换编码的方法, 结合遗传算法在 P-Lingua 仿真平台实现了 2^n 、 3^n 、 4^n 的计算, 验证此方法的有效性和可行性。

关键词: 膜计算; 指数函数; 自动设计; 置换编码

Abstract: The design of membrane computing model is the current research direction of membrane computing. Researchers use math, formal language and other tools to form the basis for the theory of membrane computing, they have proposed a variety of membrane computing models and have achieved many research results. From the complex manual automatic derivation to the recent research of automatic design in membrane computing model, the automatic design methods becomes increasingly sophisticated, and the membrane computing model also can solve more problems. On the basis of the former researches, the automatic design methods of membrane computing are applied to the calculation of exponential function, while the design method is improved. Using replacement encoding method and combined with genetic algorithm in P-Lingua simulation platform to achieve 2^n , 3^n , 4^n calculations, the validity and feasibility of the proposed method are verified.

Key words: membrane computing; exponential function; automatic design; replacement encoding

中图分类号: TM769 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2015)03-0050-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.03.012

0 引 言

膜计算(membrane computing, MC)作为自然计算的一个年轻分支,旨在从生命细胞的结构与功能中以及从组织和器官等细胞群的协作中抽象出计算模型^[1-3],其计算模型被称为膜系统或 P 系统。膜计算领域的一个热门研究方向就是如何根据特定的任务要求,设计出可以完成一定功能的膜系统计算模型。研究者在研究的过程中,采用数学、形式语言等工具来进行膜计算的理论分析,已经提出了许多不同的细胞型计算模型^[4-6]、组织型膜计算模型^[7-8]、脉冲型膜计算模型^[9]等。从最开始复杂的手工推导到近期的自动设计研究。随着对膜计算研究的不断深入,研究者们更多地把目光集中于对膜系统设计方法的研究。文献[10]第一次提出将遗传算法应用于膜系统的自动设计,在预先设计一个由 18 条规则组成的冗余规则集基础上,通过遗传算

法对冗余规则集中的规则进行寻优,实现膜系统的自动设计;文献[11]将量子进化算法与膜系统的设计结合起来,并首次通过 0、1 编码来表示冗余规则集规则的选取,其中“0”表示不选取该条规则,“1”表示选取该条规则。不仅实现了计算 4^2 的膜系统设计,更是将问题扩展到了 n^2 (n 为自然数)膜系统的自动设计,且成功率要优于文献[10];文献[12]首次提出了一种通过调整膜系统的膜结构、初始化对象集、进化规则集 3 个要素来实现完成特定计算任务的膜系统自动设计方法,并将该方法应用于 4^2 膜系统的自动设计中,实验表明,该方法能够成功设计出种类更多的膜系统;文献[13]在膜系统具有相同的初始化格局下,与量子进化算法相结合,分别实现了能够完成加、减、乘、除、加权 5 种算术运算膜系统的自动设计;文献[14]又提出了用膜系统自动设计来完成多项式的计算,能计算出最高次数为 4 次,最大项数为 4 项的多项式,同时改进了规则的设计,规则条数在预设最大数目内可以变化。

虽然上述文献成功地将进化算法和细胞型膜系统的设计结合起来,但是只能完成一些较为简单的任务,在计算复杂问题时成功率很低,因此在固定膜结构的前提下初始对象与规则通过自动设计来完成指数函数的计算,在推广膜计算的同时又能找到一些简单的P系统,同时最终用多个对象个数来表示结果,提高了试验的成功率,增加了膜系统的多样性和灵活性。

1 设计思想和设计方法

1.1 细胞型膜系统简介

细胞型膜系统是模仿细胞结构和功能的计算模型,一个细胞型膜系统主要由字母表、膜结构、初始化对象集、进化规则集、结果输出区域5个部分组成,如图1所示。其中,每一个组成元素均扮演着特定的角色,且能够与实际生物细胞中的组成要素相对应,对应关系及各自作用描述如下:

1) 字母表: 对应实际生物细胞中的物质,是组成初始化对象集和进化规则集的字符集;

2) 膜结构: 对应实际生物细胞的细胞膜及内膜之间组成的层次结构,用于划分不同对象的多重集所组成的区域。最外层膜被称为表层膜,膜内不包含其他膜的膜被称为基本膜。每个膜所围成的部分被称为区域,每个区域内包含着各自的规则与对象。

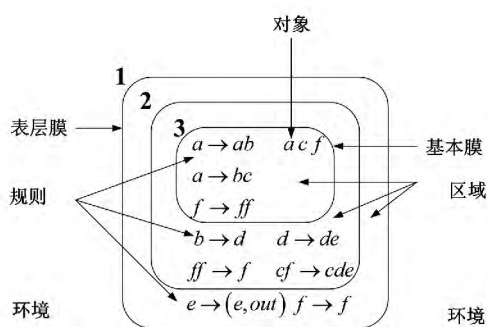


图1 膜系统示意图

3) 初始化对象集: 对应实际生物细胞中的反应物,由字母表中的字符表示;

4) 进化规则集: 犹如一个个的化学反应式,对应实际生物细胞膜中的化学反应。一条规则需要有一组输入物质,然后通过该条规则产生一组输出物质,每条规则能够确定被处理的对象以及具体进行的操作。规则间采用极大并行的方式执行,由字母表中的字符组成。

5) 结果输出区域: 对应实际生物细胞中的环境,随着规则的执行,会不断有物质传递到环境中,每一次格局转换完成后,环境中的物质可当作是计算的“结果”。

1.2 设计思路和方法

设计目标: 设计一个确定性的、非终止型的细胞型膜系统 $\Pi = (V, \mu, W, R, i_0)$, 使之能够用于求解简单的指数函数。

需要说明的是: 1) 由于给定的是确定性的目标,因此要设计的膜系统必须是确定性的膜系统,即在格局的变化中任何时刻每个对象只能触发执行一种规则; 2) 由于求解的目标是形如 2^n 的指数函数,这就需要保证设计出的膜系统可以随着式中变量 n 取值的变化而计算出相应的结果,因此该膜系统必须是非终止型的,即在仿真过程中不会进入停机状态的膜系统,随着格局的变化总有规则被对象触发执行。

设计目标中要求设计出的膜系统能够对指数函数进行求解,这里可以将问题转化为寻找一种膜系统,在格局的变化过程中某一对象或多个对象个数的变化与函数结果随值的变化一致。这样可以将膜系统的设计问题当作是一个优化问题来处理,借助遗传算法,对膜系统的要素进行优化搜索,并通过膜系统仿真软件 P-Lingua 来验证、评价获得的膜系统个体,最终得到满意的膜系统。

考虑一个膜系统种群 $\Pi, \Pi = \{\Pi_i\}_{i \in N}$ (N 为自然数集合), 则其中任意一个膜系统个体可定义为如下数学模型:

$$\Pi_i = (V, \mu, W, R, i_0) \quad (1)$$

1) V 是预先设计好的字母表,字母表中的元素称为对象,选自26个字母组成的英文字母表。设计时需根据初始化对象集中对象个数以及进化规则集中规则条数来合理确定字母表中对象的个数;

2) μ 是膜结构,一般来讲,复杂的膜结构更能够实现设计难度更大的问题。而这里主要是对膜系统设计方法的研究,因此,用最简单的单层膜结构 $\mu = I_1$ 反而更能证明所提方法的有效性;

3) 初始化对象集是 W 设计的目标,通过遗传算法对字母表寻优获得。设计时必须考虑初始化对象集中包含对象的最大个数;

4) 进化规则集 R 是设计的目标,通过遗传算法对字母表寻优获得;设计时必须考虑进化规则集中

包含规则的最大条数;

5) i_o 为输出结果区域,本方法中 $i_o = 1$,即最终结果保存到表层膜中。

1.3 膜系统的评价方法

适应度函数是膜系统设计中的关键,适应度函数设计的合理与否将直接关乎膜系统设计的成败。将多项式转化为与仿真步数 $step$ 相关的函数 $f(step)$,例如要设计一个求解 2^n 的细胞型膜系统,则可以首先将其转化为关于仿真步数的函数 $f(step)$, $f(step) = 2^{step}$;然后,以膜系统每一个格局的表层膜中某些对象的数量 $NumSomeObj$ 来代表实际的计算结果,则适应度函数 $fitness$ 可表示为

$$fitness = |NumSomeObj - f(step)| \quad (2)$$

$fitness$ 的值用于表征实际结果与期望结果之间的差距,显然, $fitness$ 的值越小越好。这里由于将函数中的变量 n 与仿真步数 $step$ 相关联,因此被求解式中 n 需为自然数。

1.3 膜系统设计实现算法

这里的膜系统自动设计方法均是基于遗传算法实现的,因为是着眼于如何提出指数函数膜系统的设计方法,而不是如何设计进化算法,故而选用了现已发展成熟且具备专用算法包 JGAP^[5] 的遗传算法来实现膜系统的自动设计,设计过程中只需考虑遗传操作算子的选择及遗传参数的设置问题。其中遗传算子采用精英选择算子、单点交叉算子、均匀变异算子,参数设置主要考虑以下一组参数。

$$set = \{P_m, P_c, N_p, IterNum\} \quad (3)$$

式中, N_p 是膜系统的种群规模; P_c 是交叉概率; P_m 是变异概率; $Iternum$ 是算法的最大迭代次数。

设计流程如图 2 所示。

步骤 1: 初始化膜系统种群 $\Pi = \{\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_{NP-1}, \Pi_{NP}\}$, 其中 NP 为种群规模;

步骤 2: 判断当前仿真是否达到终止条件,“是”,则转向步骤 6;“否”,则转向步骤 3;

步骤 3: 单步仿真当前膜系统,即对个体解码后,创建该多项式膜系统的 P-Lingua 文件,调用内核 P-LinguaCore 中的函数实现对膜系统的仿真,并读取仿真结果;

步骤 4: 单步评价当前膜系统,即评价该多项式膜系统是否满足确定性、非终止性,是否含有冗余对象、冗余规则,是否能够用于对求解目标的计算等,若不满足期望要求,则对适应度函数增加相应的惩罚值;

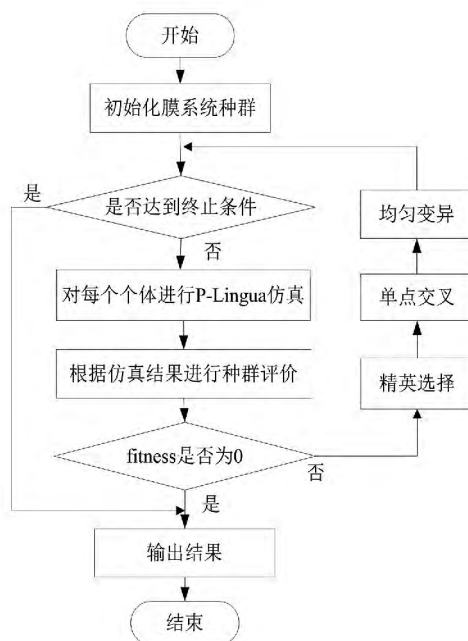


图 2 多项式膜系统自动设计流程

步骤 5: 经过评价后,若多项式膜系统最终的适应度函数值为 0,则转向步骤 6;若适应度函数值不为 0,则转向步骤 7;

步骤 6: 输出仿真结果,并转向步骤 8;

步骤 7: 对种群进行选择、交叉、变异等更新操作,并转向步骤 2;

步骤 8: 结束本次仿真。

2 膜系统三要素的置换编码

采用置换编码来编码膜系统。所谓置换编码就是采用字母表中每一个对象对应的实际位置来表示其编码。如字母表为 $V = \{s, a, b, c, x\}$,采用置换编码方案,则有以下给出的对应关系: $s \rightarrow 1, a \rightarrow 2, b \rightarrow 3, x \rightarrow 4, c \rightarrow 5$,且一个字母表中只需插入一个空字符 λ ,其对应的置换编码为 0,即 $\lambda \rightarrow 0$ 。那么选中字母表中每一个对象的概率为 $P(\lambda) = P(s) = P(a) = P(b) = P(x) = P(c) = 1/6$ 。而如果采用二进制编码方案,则需对字母表进行 $2^3 - 5 = 3$ 位补空操作,即 $V' = \{\lambda, \lambda, \lambda, s, a, b, c, x\}$,那么选中对象 s, a, b, c, x 的概率为 $P(s) = P(a) = P(b) = P(x) = P(c) = 1/8$,而选中空字符 λ 的概率为 $P(\lambda) = 3/8$ 。

可以看出,相比于传统二进制编码,置换编码的优势在于在遗传算法对字母表进行寻优的过程中保证了每一个对象都是被等概率选取的,而等概率选取的好处最终体现在遗传优化的过程中不会产生过

多无效的基因变化,如 $\lambda \rightarrow \lambda$ 。

由于已预先固定膜结构为单层膜结构 $\mu = \mathbf{I}_1$, 因此只需对膜系统的其余两要素初始化对象集 W 和进化规则集 R 进行编码,而 W 和 R 皆选自字母表 V 。

2.1 初始对象集 W 的置换编码

初始对象集表示为 $W = \{w_1\}$, 若已知 w_1 中对象的最大个数为 n , 则初始化对象集可以用 n 位置换编码来表示。如 w_1 中包含对象的最大个数为 4, 当 $w_1 = scax$ 时, 对应的 4 位置换编码为 1524; 当 $w_1 = ab$ 时, 对应的 4 位置换编码为 0023。

2.2 进化规则集 R 的置换编码

进化规则集表示为 $R = \{R_1\}$, 进化规则采用重写规则, 规则形式如下:

$$[\text{leftobj} \rightarrow \text{rightobj}]_1 \quad (4)$$

假设每一条规则的左侧 leftObjSet 和右侧 rightObjSet 中包含对象的最大个数分别为 n_{left} 和 n_{right} , 则可相应的采用 n_{left} 和 n_{right} 位置换编码来分别表示 leftObjSet 和 rightObjSet。那么 R_1 中任何一条规则的置换编码位数可用公式(5)来计算。

$$L_r = n_{\text{left}} + n_{\text{right}} \quad (5)$$

假设规则左侧最多包含 1 个对象, 规则右侧最多包含 5 个对象, 则每一条规则可以用 6 位置换编码来表示。如一条规则为 $r_1 = [\rightarrow assbc]_1$, 则对应的置换编码为 121135; 若一条规则为 $r_2 = [x \rightarrow abc]_1$, 则对应的置换编码为 400235。

设计过程中, 还需知道 R 中包含的规则条数 n_R , 即可用公式(6)来计算整个进化规则集的置换编码位数。

$$L_R = n_R L_r \quad (6)$$

膜系统 Π 的置换编码: 因为没有对膜结构进行编码, 因此膜系统的编码只有初始化对象集和进化规则集两部分, 编码的位数即为两部分编码位数之和, 计算公式如下:

$$L_{\Pi} = n + L_R \quad (7)$$

3 仿真实验及结果分析

3.1 仿真实验

实验目标: 设计一个能够用于求解 2^n 的膜系统, 其中 n 为自然数。这里将 2^n 中变量 n 转化为仿真步数(step), 即随着仿真步数的增加就能计算出 n 依次增加的一系列 2^n 的值。

实验条件: 实验所用计算机为 MD2. 3GHZ, 2GMB, 仿真平台是 Eclipse 3.5.0, JDK 版本为 1.7.1, 仿真膜系统的软件为 P - Lingua 2.1.0。

参数设置: 字母表 $V = \{s, a, b, x, c\}$; 膜结构 $\mu = \mathbf{I}_1$; 初始对象集 $W = \{w_1\}$, $n_{w_1} = 4$; 进化 $n_{R_1} = 3$ $n_{r_{\text{left}}} = 1$ $n_{r_{\text{right}}} = 4$ 规则集 $R = \{R_1\}$, 规则均采用重写规则, 计算结果以对象 c 的个数来表示; 惩罚因子 $\eta = 10\ 000$, 最大仿真步数 MaxSteps = 25。

遗传算法参数设置: 根据文献[4]中可以看出: 变异概率 $P_m = 0.1$ 时, 成功率达到最高, 平均进化代数最少; 交叉概率 $P_c = 0.75$ 时, 成功率和平均进化代数最为理想; 当种群规模大于等于 30 时, 成功率达到最大值, 最大迭代次数 Iternum = 300 时成功率最高, 且平均运行时间最少。综上, 可以得到一组最优的参数组合 $set_{\text{Best}} = \{0.1, 0.75, 30, 300\}$ 。

评价函数为 $fitness = |Numofc - 2^{\text{step}}|$, 即当 c 的个数满足 2^{step} (2^n) 时输出符合要求的膜系统。

3.2 仿真结果

在上述最优遗传参数组合的条件下, 独立运行 100 次, 其中有 49 次找到了成功的膜系统, 将 49 个膜系统用膜系统分析软件[4]进行统计排除相同的膜系统, 共得出 14 种不同的膜系统, 由于其他要素都相同, 所以下面只列出初始对象集和进化规则集, 如表 1 所示。

得到上述结果后, 采用 P - Lingua 软件中的膜系统仿真工具来展示膜系统每一步的格局变化, 以验证所得的膜系统是否满足设计要求。这里以表 1 中的第 5 种膜系统的设计结果为例。仿真过程如图 3 和表 2 所示, 图中则直观的展示了每一步规则执行完后各个对象的个数, 表中所示为每一步由对象触发的规则, 从膜系统的初始化格局开始, 随着仿真的进行, 规则被对象触发执行, 膜系统的格局不断发生着变化。下面只展示了前几步中每一格局对象个数的变化, 代表计算结果的对象 c 的个数也发生着变化, 其值依次为 2, 4, 8, 16, 32, 64。不难看出, 对象 c 的个数随仿真步数的变化规律与实验中所求的函数 2^n 随变量 n 值的变化 ($n = 1, n = 2, n = 3, n = 4, n = 5, n = 6$) 的取值一致, 也就证明了所设计的膜系统满足设计要求。

用同样的设计方法可以找到实现 $3^n, 4^n$ 的膜系统, 验证了所提出的指数函数的膜系统自动设计方法的正确性和有效性。

表1 指数函数膜系统的设计结果

序号	初始化对象集	进化规则集
1	$w_1 = (a, x)$	$R_1 = \left\{ \begin{array}{l} [x \rightarrow ax^2c]_1, [a \rightarrow ab^2]_1 \\ [b \rightarrow acbx]_1 \end{array} \right\}$
2	$w_1 = (s, x)$	$R_1 = \left\{ \begin{array}{l} [b \rightarrow ac^2]_1, [a \rightarrow bxa^2]_1 \\ [x \rightarrow xcba]_1 \end{array} \right\}$
3	$w_1 = (s, a)$	$R_1 = \left\{ \begin{array}{l} [s \rightarrow cbs^2]_1, [a \rightarrow csb]_1 \\ [b \rightarrow bs]_1 \end{array} \right\}$
4	$w_1 = (x, a)$	$R_1 = \left\{ \begin{array}{l} [x \rightarrow xba]_1, [a \rightarrow c^2]_1 \\ [b \rightarrow ax^2]_1 \end{array} \right\}$
5	$w_1 = (x, s)$	$R_1 = \left\{ \begin{array}{l} [x \rightarrow sca]_1, [a \rightarrow asx]_1 \\ [s \rightarrow cx]_1 \end{array} \right\}$
6	$w_1 = (a, x, b)$	$R_1 = \left\{ \begin{array}{l} [x \rightarrow ba]_1, [a \rightarrow ax]_1 \\ [b \rightarrow c^2xa]_1 \end{array} \right\}$
7	$w_1 = (x, b)$	$R_1 = \left\{ \begin{array}{l} [x \rightarrow x^2a]_1, [a \rightarrow ac]_1 \\ [b \rightarrow c^2a]_1 \end{array} \right\}$
8	$w_1 = (a^* 2)$	$R_1 = \left\{ \begin{array}{l} [s \rightarrow sbc]_1, [a \rightarrow sc]_1 \\ [b \rightarrow csb]_1 \end{array} \right\}$
9	$w_1 = (x)$	$R_1 = \left\{ \begin{array}{l} [s \rightarrow sb^2c]_1, [x \rightarrow sbc^2]_1 \\ [b \rightarrow cs]_1 \end{array} \right\}$
10	$w_1 = (a, x)$	$R_1 = \left\{ \begin{array}{l} [a \rightarrow ac]_1, [x \rightarrow bc]_1 \\ [b \rightarrow b^2ca]_1 \end{array} \right\}$
11	$w_1 = (s, a, x)$	$R_1 = \left\{ \begin{array}{l} [a \rightarrow xas]_1, [x \rightarrow ax]_1 \\ [s \rightarrow c^2]_1 \end{array} \right\}$
12	$w_1 = (b, a)$	$R_1 = \left\{ \begin{array}{l} [a \rightarrow c^2]_1, [b \rightarrow as^2]_1 \\ [s \rightarrow b^2a]_1 \end{array} \right\}$
13	$w_1 = (b, a, x)$	$R_1 = \left\{ \begin{array}{l} [x \rightarrow cab]_1, [b \rightarrow a^2c]_1 \\ [a \rightarrow ba]_1 \end{array} \right\}$
14	$w_1 = (a, s)$	$R_1 = \left\{ \begin{array}{l} [s \rightarrow c^2a]_1, [b \rightarrow ac]_1 \\ [a \rightarrow b^2a]_1 \end{array} \right\}$

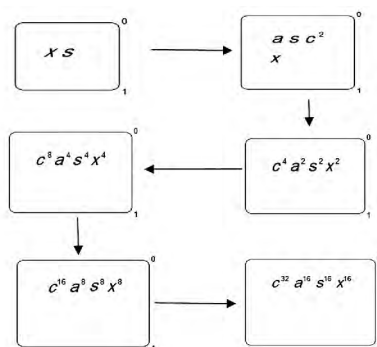


图3 膜系统格局转换示意图

表2 仿真中每一步运行的规则和结果中的对象

	执行的规则	各对象的个数
初始格局		x, s
第一步	$r_1 \equiv s \rightarrow xc, r_2 \equiv x \rightarrow sca$	$s, c^* 2, a, x$
第二步	$r_1 \equiv s \rightarrow xc, r_2 \equiv s \rightarrow sca$ $r_3 \equiv a \rightarrow axs$	$s^* 2, c^* 4, x^* 2, a^* 2$
第三步	$r_1 \equiv s \rightarrow xc, r_2 \equiv s \rightarrow sca$ $r_3 \equiv a \rightarrow axs$	$s^* 4, c^* 8, x^* 4, a^* 4$
第四步	$r_1 \equiv s \rightarrow xc, r_2 \equiv s \rightarrow sca$ $r_3 \equiv a \rightarrow axs$	$s^* 8, c^* 16, x^* 8, a^* 8$
⋮	⋮	⋮

参考文献

- [1] Paun Gh. Computing with Membranes [J]. Journal of Computer and System Sciences, 2000, 61(1): 108 - 143 (first circulated at TUCS Research Report No 208, November 1998).
- [2] Paun Gh. Membrane Computing: An Introduction [M]. Berlin: Springer, 2002.
- [3] 张葛祥, 潘林强. 自然计算的新分支——膜计算 [J]. 计算机学报, 2010, 2(33): 208 - 214.
- [4] Obtulowicz A, Paun Gh. (in search of) Probabilistic P Systems [J]. BioSystems, 2003, 70(2): 107 - 121.
- [5] Ferretia C, Mauria G, Paun Gh, et al. On Three Variants of Rewriting P Systems [J]. Theoretical Computer Science, 2003, 301(1-3): 201 - 215.
- [6] Mutyam M. Rewriting P Systems: Improved Hierarchies [J]. Theoretical Computer Science, 2005, 334(1-3): 161 - 175.
- [7] Freund R, Paun Gh. Tissue P Systems With Channel States [J]. Theoretical Computer Science, 2003, 296(2): 295 - 326.
- [8] Martin - Vide C, Paun Gh, Pazos J. Tissue P system [J]. Theoretical Computer Science, 2003, 296(2): 295 - 326.
- [9] 潘林强, 张兴义, 曾湘祥, 等. 脉冲神经膜计算系统的研究进展及展望 [J]. 计算机学报, 2008, 31(12): 2090 - 2096.
- [10] Escuela G, Gutiérrez M. An Application of Genetic Algorithms to Membrane Computing [C]. Proc. of. the Eighth Brainstorming Week on Membrane Computing, Esvilla. 2010: 101 - 108.
- [11] Huang X, Zhang G, Rong H. Evolutionary Design of a Simple Membrane System [C]. Lecture Notes in Computer Science. Berlin: Springer. 2012: 203 - 214.
- [12] Ou Z, Zhang G, Wang T. Automatic Design of Cell-like P Systems through Tuning Membrane Structures, Initial Objects and Evolution Rules [J]. International Journal of Unconventional Computing, 2013.
- [13] Chen Y, Zhang G, Wang T. Automatic Design of P Systems for Five Basic Arithmetic Operations within One Framework [J]. Chinese Journal of Electronics, 23(CJE - 2): 302 - 304.
- [14] 孟琪. 多项式膜计算模型的遗传优化设计方法 [D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [15] Meffert K, Rotstan N, Knowles C, et al. Jgap - java Genetic Algorithms and Genetic Programming Package. URL: http://jgap.sf.net, 2008.

作者简介:

赖正坤(1989), 硕士, 研究方向为自然计算分支膜计算。

(收稿日期: 2015 - 01 - 15)

西藏中部电网安全稳定 控制系统规划建设的几点思考

王郑锋¹, 董卫国¹, 吴冲²

(1. 西藏电力有限公司, 西藏 拉萨 850000;

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

摘要: 近年来, 西藏电网快速发展, 特别是青藏直流联网等工程的投产, 一方面缓解了西藏电网缺电的状况, 另一方面则给电网安全稳定运行带来了更大的挑战。实践经验表明, 西藏电网发生严重故障时, 必须依靠安全稳定控制系统正确动作, 才能够保证电网稳定运行。安全稳定控制系统是一套复杂系统, 涉及到从规划设计、设备采购、安装调试、策略制定、运行维护等多个环节。从规划设计、系统可靠性和大容量光伏电站带来的挑战等几个方面展开讨论。

关键词: 藏中电网; 安全稳定控制系统; 切负荷执行站; 光伏电站; 并列运行

Abstract: In recent years, the rapid development of Tibet power grid, especially the DC interconnection project from Qinghai to Tibet being put into operation, on one hand, to ease the power shortage in Tibet, but on the other hand, to bring the greater challenges to the safe and stable operation of the grid. The practical experiences show that during the catastrophic failure in Tibet power grid, it must rely on the correct operation of security and stability control system to ensure the stable operation of the grid. Security and stability control system is a complex system, involving the planning and design, equipment procurement, installation and commissioning, strategic planning, operation and maintenance etc. So the challenges brought by the planning and design, the system reliability and the photovoltaic power stations with high capacity are discussed.

Key words: power grid in central Tibet; security and stability control system; load-shedding station; photovoltaic power station; parallel operation

中图分类号: TM76 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2015)03-0055-03

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.03.013

0 引言

西藏中部电网由最初的以羊湖电站为源头、通过链式网架向拉萨地区供电的 110 kV 电网, 历经林芝与拉萨联网工程、西藏中部 220 kV 环网工程、青藏直流联网工程、旁多电站和藏木电站送出工程, 已经发展成为连接藏中 4 地市、以拉萨 220 kV 环网为核心的坚强网架。藏中电网装机容量尽管较小, 但其作为“强直弱交”的典型, 以及近年来光伏发电的快速发展, 其电网特性发生深刻变化。

林芝与拉萨联网后, 由于联网线路较长且林芝地区水电送出较多, 对其可能带来的弱阻尼问题进行了相关研究^[1]。青藏直流投运后, 直流输电与藏中电网的交互影响也得到了较多的研究^[2-4], 藏中电网安全稳定控制系统也发生了较大变化^[5]。

随着西南地区社会经济发展的需要和西部水电开发的深入发展, 国家电网公司提出了西南电网的构想。其中, 西藏电网是重要的一环, 藏中电网与内地电网的互联也是指日可待。藏中电网安全稳定控制系统如何适应电网发展的需要是值得思考的重要问题。受自然条件等因素影响, 藏中电网枯期缺电而丰期电力基本平衡或者略有富余, 在今后一段时间内仍将维持这一特点, 因此, 对现有系统的完善是首要任务。

1 110 kV 切负荷执行站的布局

藏中电网安全稳定控制系统的架构是随着一次网架的发展而不断完善的, 从初期的逐级切负荷链式结构, 发展到现在以切负荷为主要功能、分层分区的控制系统, 如图 1 所示。

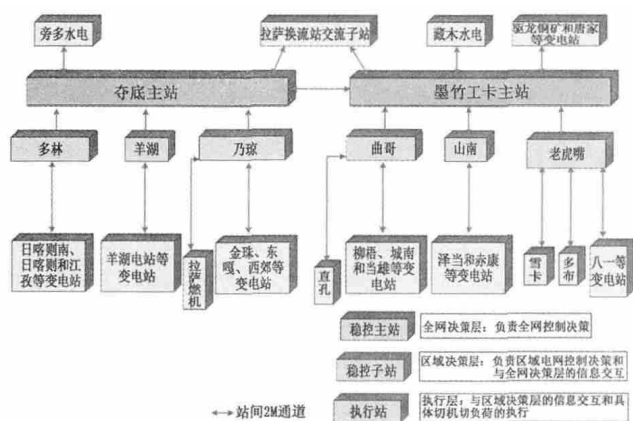


图 1 稳定控制系统架构图

藏中电网切负荷执行站的布点主要在 110 kV 变电站,部分在 220 kV 用户变电站,如驱龙多金属矿专用变电站;切负荷执行站的控制对象是站内的 35 kV 和 10 kV 馈线。随着西藏地区用电负荷的增加,尤其是藏区农网的延伸,未来将新增大量的 110 kV 变电站。如果在所有的新建 110 kV 变电站都配置远方切负荷执行装置,将使得切负荷执行站的规模过于庞大,设备管理愈加复杂,从工程经济性的角度来看也是不太合理的。

对于农网延伸工程而言,110 kV 网架普遍采用单射线链路结构。以藏北地区的当雄—纳木措—青龙—班戈 110 kV 线路为例,当雄变电站已经配置有 1 套安全自动装置,目前的控制策略是接收、执行和转发远方切负荷指令。新建的纳木措、青龙、班戈 110 kV 变电站,每个变电站的初期负荷都只有数百 kW 到数 MW 之间,与整个藏中电网数百 MW 的负荷量相比是非常少的。在这些站点全部都配置远方切负荷执行装置的性价比是很低的,并且 3 个站都距离城镇较远,交通不便,运行维护比较困难。当电网故障时,在当雄变电站采取直接切除当雄—纳木措 110 kV 线路的措施,可以直接甩掉该链路全部负荷。在当雄变电站现有安全自动装置增加这一控制策略是比较容易的。同时,该链路结构简单,故障后的恢复供电也比较方便。

诚然,这种粗线条的控制手段也可能带来一些问题。比如,在链路上有某些重要负荷也会一并被甩掉。针对这样的情况,应该要求重要负荷配备柴油发电设备或者在有重要负荷的站点配置远方切负荷执行装置,有选择地切除负荷。另一种情况是,该链路以前是某环网的一部分,后来该环网打开并且在某个 110 kV 变电站配置有备自投装置。一旦该

变电站失压,备自投装置将立即投入另一回备用电源,从而导致预想的切负荷控制失效。这些可能出现的问题,都需要结合具体情况进行具体分析。

总的来说,对于单射线式的负荷支路,建议只在起点变电站和有特殊供电要求的变电站(如有事关安全生产的保安负荷)配置远方切负荷执行装置。执行切负荷控制时,在起点变电站切除 110 kV 射线链路的出线开关。

2 安全稳定控制系统运行可靠性

电网安全稳定控制装置一般都考虑双套配置。一般安控系统的控制措施针对的不是单一元件,例如同时控制同一电厂的多台机组,为防止一些情况下双套装置决策差异导致实际控制效果失当,必须考虑同一厂站双套装置决策优先权问题^[4]。双套装置主辅运行就是基于上述考虑的结果,在一套装置动作后闭锁另一套装置,主辅运模式的主要问题是装置拒动的风险。

西藏电网安全自动装置的配置有以下几种模式:

- 1) 切负荷控制系统中,220 kV 控制主站是双套配置,主要是负责切负荷控制的决策,包括接收上一级主站发来的切负荷量和下一级执行站发来的可切负荷量,按照优先级顺序对可切负荷进行排序,当电网故障时,按照既定的负荷排序将切负荷指令发给执行站。(部分控制主站有切本地电抗器和本地馈线的功能);
- 2) 110 kV 切负荷执行站是单套装置、双通道配置,双通道分别与上一级主站的 A 套装置和 B 套装置通信;
- 3) 个别承载大工业负荷的 220 kV 切负荷执行站是双重化配置;
- 4) 切机执行站都是双套配置。

目前西藏电网双重化配置的安全自动装置,大部分采用主辅运模式,即一套装置为主运,另一套装置为辅运,当主运装置动作后,发一副接点闭锁辅运装置,实际上,只有一套装置动作出口。

在主站采用主辅运模式,如果实际出口的装置因为通信接口等原因拒动,造成措施量不够,极端情况下甚至造成整套稳控系统拒动,给系统稳定运行带来风险,因此,建议主站采用双主并列运行方式,

即,两套装置各自独立运行、独立决策、独立出口。双主并列运行需要解决的问题是,由于测量误差等因素带来的问题,两套装置的策略表可能不同,故障时的控制决策也不同,可能造成过切。解决方案之一,是两套装置统一出口策略,即,两套装置通过光纤直连,当装置动作出口时,两套装置交互控制策略,并按控制措施更严重的策略表来执行。

当切机执行站采用主、辅运相互闭锁模式,将可能造成双套稳控装置相互闭锁,从而导致双套稳控装置均无法出口。在辅运装置设置40~50 ms延时后,两套装置相互闭锁可能性很小。

3 大规模光伏发电并网的应对策略

西藏地区太阳能资源非常丰富,大容量兆瓦级并网太阳能光伏电站呈现快速发展的态势,截至2012年年底,西藏中部电网接入的太阳能光伏发电规模为80 MW,占电网总装机的8.7%。目前藏中电网峰值负荷约为500 MW,谷值负荷约为250 MW。从藏中电网的负荷特性来看,光伏电站出力的峰值时间大致对应电网腰值负荷出现的时间,此时光伏电站出力大概占到全网负荷的15%~20%,光伏的运行状态对藏中电网有较大影响,主要原因有以下两点:

1) 光伏发电作为无旋转惯量的电源方式,在其并网规模达到一定程度后,使得电网的稳定裕度减少。电网从自身安全运行的角度出发,要求并网光伏电站具备一定的电源特性,如规程规定光伏电站近区发生短路故障时,若其母线电压低于其低电压穿越能力的限值(规程规定为0.2 p.u.),光伏电站将会闭锁退出运行。目前,很多逆变产品都声称具备低电压穿越功能,但实际的光伏电站往往为保证逆变器安全而采取低电压切机。

2) 作为典型的可再生能源,由于受到环境温度、太阳光照强度以及天气条件的影响,太阳能光伏发电最大的特点就是随机波动性。西藏羊八井光伏电站在实际运行中有3 s内,出力降低50%~70%的记录。

因此,大容量光伏电站的接入带来的频率稳定问题是必须要考虑的。西藏电网光伏电站接入电网一般是光伏电池组件所发电力经汇流箱、直流配电柜接至逆变器,再经箱式变电站升压至35 kV后,经

过集电线路接入光伏项目35 kV汇集站。35 kV汇集站通过35 kV线路接入系统内35 kV变电站或是110 kV变电站的35 kV侧。对于太阳光照条件好且场地条件较好的项目,会有多个光伏汇集站接入同一个110 kV变电站,如山南地区的赤康110 kV变电站。近区电网发生短路故障可能导致几个光伏电站同时闭锁,或者是太阳光照条件发生变化导致该地区的几个光伏电站的出力同时发生快速降低,将可能导致藏中电网频率跌落至49 Hz以下,触发第三道防线低频切负荷动作,此时应该由第二道防线的安全自动装置自动检测出故障后采取就近切负荷措施。

检测光伏电站的出力降低有两种方式,一种是在每个35 kV光伏汇集站配置装置,装置检测电源出线的功率变化,将功率降低量发送给系统内的安全自动装置。当光伏出力的变化量达到动作值时,系统内的装置动作于切负荷。另一种是直接在汇集多个光伏电站的系统内110 kV变电站设置一套安全自动装置,该装置接入光伏进线的二次电流电压,计算得到功率,并通过功率间接判别光伏电站的出力变化,并采取相应的控制措施。

上述两种配置方案均能满足调度控制的需求,从简化安全自动装置管理运行和降低工程造价的角度出发,方案2只在汇集多个光伏电站的系统内变电站设置安全自动装置,更加实用和简化管理。

4 结论和建议

1) 西藏电网规模不断增大使得安全稳定控制系统的规模也在不断扩大。为了确保安控系统的可靠性,一方面需要对现有系统进行完善,在已有的重要厂站考虑双重化配置、双主并列运行;另一方面,要考虑控制安控系统的规模,优化布点。

2) 光伏电站出力对电网扰动引起的电压波动高度敏感,藏中电网进一步接纳光伏电站接入的同时,需要常规机组增加旋转备用容量以加强协作灵活性。

3) 随着电网规模越来越大,西藏电网的运行和管理要求将更高。需要研究和制定适合于西藏电网的安全稳定控制系统管理体系,对规划、设计和管理进行规范。

(下转第77页)

bility Model of Large Wind Farms for Power System Adequacy Studies [J]. Energy Conversion, IEEE Transactions on, 2009, 24(3): 792-801.

- [6] Haghi, H. V., S. M. Hakimi, and S. M. M. Tafreshi. Optimal Sizing of a Hybrid Power System Considering Wind Power Uncertainty Using PSO - embedded Stochastic Simulation [J]. in Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), 2010 IEEE 11th International Conference on. 2010.

[7] 鲍晓慧,侯慧. 电力系统可靠性评估述评 [J]. 武汉大学学报:上海工学版, 2008(4): 96-101.

[8] 蒋小亮. 风电并网对电力系统可靠性和备用影响研究 [J]. 上海交通大学, 2011.

[9] 曲翀,王晋丽,谢绍宇,等. 不同风速模型和可靠性指标对风电可信容量评估的影响 [J]. 电网技术, 2013

(10): 2896-2903.

[10] 石文辉,别朝红,王锡凡. 大型电力系统可靠性评估中的马尔可夫链蒙特卡洛方法 [J]. 中国电机工程学报, 2008(4): 9-15.

[11] 王学良. 风电场可靠性评估研究 [D]. 天津: 天津大学, 2009.

[12] Karki, R., H. Po, and R. Billinton. A Simplified Wind Power Generation Model for Reliability Evaluation [J]. Energy Conversion, IEEE Transactions on, 2006, 21(2): 533-540.

[13] Sulaeman, S., M. Benidris, and J. Mitra. A Method to Model the Output Power of Wind Farms in Composite System Reliability Assessment [J]. in North American Power Symposium (NAPS), 2014.

(收稿日期: 2015-02-12)

(上接第49页)

参考文献

[1] 梁国艳,梁中华. 电流互感器饱和的检测方法及在微机母线保护中的应用 [J]. 东北电力技术, 2006(12): 66-70.

[2] 王燕. 电流互感器的误差及其对继电保护的影响 [J]. 东北电力技术, 2009(1): 66-70.

[3] 王优胤. 大型发电机变压器组差动保护用电流互感器选型 [J]. 东北电力技术, 2010(6): 25-28.

[4] 毕大强,冯存亮,葛宝明. 电流互感器局部暂态饱和识别的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2012(11): 24-27.

[5] 景敏慧,孔萧迪. P类电流互感器饱和原因分析及对策 [J]. 电力系统自动化, 2007(11): 45-48.

[6] 任先文,徐宏雷,孙楷琪. 非周期分量对电流互感器饱和特性的影响的仿真 [J]. 电力系统保护与控制, 2009

(3): 30-33.

[7] 邓旭阳,索南加乐,李广. 基于参数识别的电流互感器的识别原理研究 [J]. 电力系统自动化, 2010(8): 42-45.

[8] 陈建玉,孟宪民,王志华. 电流互感器饱和对继电保护影响的分析及对策 [J]. 电力系统自动化, 2004(10): 32-35.

[9] 柳树. 电流互感器饱和过程分析及对策 [J]. 华北电力技术, 2009(3): 37-40.

[10] 陈羽名,崔广泉,刘长江. 电力电流互感器检测试验方法研究 [J]. 东北电力技术, 2009(11): 3-6.

作者简介:

何小飞(1986), 硕士, 工程师, 目前从事继电保护装置运维检修工作;

王锐(1975), 本科, 高级工程师, 主要从事变电检修技术工作.

(收稿日期: 2015-02-02)

(上接第57页)

参考文献

[1] 郭小江,郑超,尚慧玉,等. 西藏中部同步电网安全稳定控制研究 [J]. 电网技术, 2010, 34(6): 87-92.

[2] 吕虎,谢国平,朱艺颖,等. 青藏直流接入西藏电网数模混合仿真 [J]. 电网技术, 2013, 37(2): 455-459.

[3] 唐晓骏,刘东冉,陈麒麟,等. 青藏直流接入后西藏地区电网电压/无功控制 [J]. 电网技术, 2010, 34(9): 94-99.

[4] 赵文强,王杨正,李林,等. 青藏直流联网工程大负荷

试验策略研究 [J]. 电网技术, 2014, 38(11): 3052-3058.

[5] 吴冲,刘汉伟,董卫国,等. 青藏直流联网后藏中电网安全稳定控制系统的重构 [J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(1): 54-57.

[6] 李惠军,汤奕,李雪明,等. 电源送出安全稳定控制系统典型方案及装置主辅运设置原则分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(4): 141-145.

作者简介:

王郑锋(1982), 工程师, 主要研究领域为电网规划设计.

(收稿日期: 2015-02-28)

浪涌保护器在变电站二次系统防雷保护中的应用

王贺新, 刘念, 刘航宇, 蒲丽娟, 李娟
(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 随着中国电力的飞速发展, 高压直流输电和特高压直流输电线路的建设步伐也越来越快, 变电站在电力系统中的地位也变得越加重要。所以变电站安全可靠运行关系到电力系统的总体运行安全, 但是雷电却一直是影响变电站安全运行的主要因素。特别是由于雷电而产生的过电压对变电站的影响, 其中尤其是对二次系统的影响更为严重。为了确保变电站的安全运行, 有必要加强变电站二次系统的防雷保护, 从而提高电力系统的安全性和可靠性。

关键词: 雷电; 变电站; 防雷; 浪涌保护器

Abstract: With the rapid development of power system in China, the pace of construction of HVDC and UHVDC transmission lines is also growing faster, and the status of substations in power system has become increasingly important. So the safe and reliable operation of substation influences the overall safe operation of power system, but lightning is always the main factor affecting the safe operation of substation, especially the impact of overvoltage caused by lightning where the impact on secondary system is more serious. In order to ensure the safe operation of substation, there is a need to enhance the lightning protection for secondary systems in substation so as to improve the safety and reliability of power system.

Key words: lightning; substation; lightning protection; surge protector

中图分类号: TM83 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2015)03-0058-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.03.014

0 引言

变电站(特别是高压大型变电站)是多条输电线路的交汇点和电力系统的枢纽。输电线路与变电站相比较而言雷电事故的影响面积较小,而且现代电网大多数具有备用供电电源,所以线路的雷电事故只能导致电网工况的短时恶化;但是变电站的雷电事故就要严重的多,往往导致大面积停电^[1];其次变电站的设备较多,如电力变压器、电缆、二次系统等,不能承受雷击产生的雷电过电压而导致损坏。尤其是变电站的二次系统,包括站内保护设备、自动化设备、通信系统、计算机网络设备及监控系统、交直流电源系统等,都采用大规模的集成电路,电子元件的性能大大提高的同时,其抗电磁干扰、抗过电压和雷击的能力却变得十分脆弱了,所以变电站的二次系统防雷就变得十分重要。

工作电压从而可能危害各种用电设备的异常电压。其中由于雷电引起的过电压,因其过电压的幅值高达数十万伏、甚至数兆伏,如果不采取保护措施和装设各种防雷保护装置,那将出现很严重的事故。

由大气中的雷云对地面放电引起的过电压称为雷电过电压。其持续时间大多在几十微秒,具有脉冲特性^[2]。雷电过电压又分为直击雷过电压和雷电感应过电压。雷闪直接击中电气设备导电部分时引起的过电压称为直击雷过电压,由于电效应、热效应和机械效应等混合力作用可直接击毁建筑物,还可能引起人员的伤亡^[3];其次雷击产生的电效应有可能使变电站的微电子设备遭受浪涌过电压的危害。而雷电感应过电压是雷闪击中电气设备附近地面,在放电过程中由于空间电磁场的急剧变化而使未直接遭受雷击的电气设备上感应出过电压的现象。这种过电压是对变电站的电子设备影响最大,特别是对通讯设备和通信网络系统。

1 雷电过电压及对变电站的危害

过电压是电力系统在特定条件下所出现的超过

2 雷电侵入的主要途径

现代变电站的一次防雷系统是比较完善和有效

的,防雷设备有架空地线、避雷器、避雷针等;但是相比于一次防雷系统来说,变电站的二次防雷系统的防雷措施还有待完善和改进。如图1所示雷电侵入变电站二次系统的主要途径^[4]。

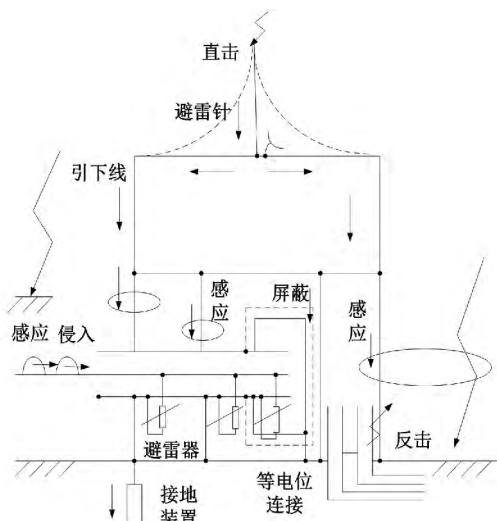


图1 雷电侵入途径

- 1) 雷电直击线路时雷电会沿着架空线路通过电压互感器和电流互感器作用到二次设备上;
- 2) 通信线路也会感应出雷电,使雷电压或电流直接传到设备,从而损坏设备;
- 3) 变电站上空的雷云电场,会通过静电感应耦合到电缆沟中所有的电缆中去^[4];
- 4) 当防雷装置接受雷击时,在引下线和接地体上都会产生很高的电压。因为雷电流具有固有的伏安特性,即极大的陡度和幅值,会在周围产生强大的变化磁场,而处在变化磁场中的导体均会感应出很高的电动势。如果防雷装置与其他电气设备、电线、或金属物体绝缘距离不够,就会对该物体发生反击放电从而引起设备的损坏;
- 5) 当雷电流经接地装置流入大地时,由于接地电阻的存在会使地网电位升高,这时与大地直接相连接的设备外壳和设备内部的导电部分之间的电位差可能达到危险的程度而击穿。

3 浪涌保护器在二次防雷中的应用

3.1 浪涌的成因

浪涌是指电路在遭遇雷击时产生的雷击过电压或者在接通、断开电感负载或大型负载时常常会产

生很高的操作过电压。这种瞬时过电压(或过电流)称为浪涌电压(或浪涌电流),这是一种瞬变干扰。此处所谓瞬态是指持续时间大大低于工频周期(0.02 s)的瞬变过程。对地闪击的雷电流波形的特点是持续时间极短,上升时间极短,而下降时间相对较长(几十秒到几百秒)的具有脉冲特性,如图2所示。

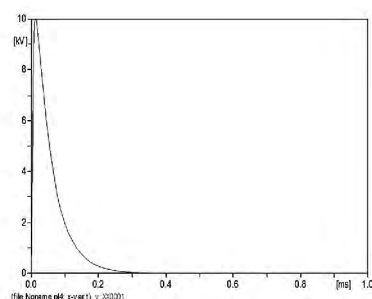


图2 雷电流模拟波形

浪涌包括浪涌冲击、电流冲击和功率冲击。由于变电站的二次系统中的二次设备大多数都是现代电子设备,其中很多元件集成度很高、很精密,所以对电流和电压的变化很敏感,特别是微处理器对浪涌电压电流更加敏感。出现浪涌时如不加以限制将会导致:引起电子设备的误动;电源设备和贵重的计算机及各种硬件设备的损坏,造成直接经济损失;在电子芯片中留下潜伏性的隐患,使电子设备运行不稳定和老化加速。

3.2 浪涌保护器原理

浪涌保护器(surge protection device, SPD),也称为电涌保护器。其工作原理是将浪涌保护器并联在被保护设备两端,通过泄放浪涌电流、限制浪涌电压来保护电子设备。浪涌保护器的核心元件主要是非线性元件(一个非线性电阻或是一个开关元件),通过非线性元件的伏安特性来完成泄放雷电流、限制浪涌电压的。在未发生浪涌之前,即在被保护电路正常工作,此非线性元件呈现极高的电阻,其漏电流几乎为零,所以对被保护电路没有任何影响;而当瞬态浪涌到来时,保护器内的非线性元件以纳秒级的迅速响应,立刻变为很低的电阻,将浪涌电流引入旁路,使被保护设备两端的电压限制在较低的水平,从而保护设备免遭过电压而损坏。而当浪涌结束后,该非线性元件又迅速、自动地恢复为极高电阻。

浪涌保护器既不影响设备的正常工作,又能将过电压限制在相应设备的耐压等级范围内,这样就可以限制瞬态过电压和分走电涌电流。所以浪涌保护器是电子设备防雷的主要手段,也是变电站内部防雷保护的主要措施,是变电站综合防雷体系的重要组成部分,如图3所示。

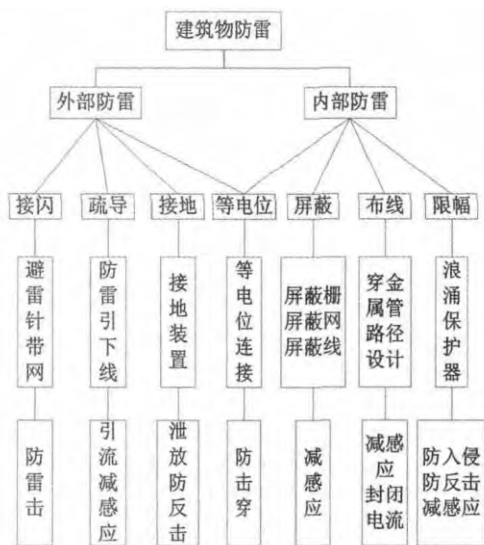


图3 变电站综合防雷体系

如果变电站的防雷体系中仅有接闪器、接地装置的话,则并不能避免雷电波从线路侵入到变电站二次系统中去,也不能在低接地电阻值下防止反击的出现,所以为了保护电子设备还必须要浪涌保护。从另一方面来看,浪涌保护也是以外部防雷保护为前提,也应与内部防雷保护其他措施(等电位连接、屏蔽)密切配合。如果建筑物的接地电阻选取过大,则很容易发生反击,并且反击时大部分的雷电流不是流经大地泄放而是从浪涌保护器流向配电变压器,加重了浪涌保护器的负担^[4]。

3.3 浪涌保护器的分类

3.3.1 电压限制型

电压限制型的浪涌保护器的工作原理是当没有浪涌过电压时,基本上为开路状态呈现为高电阻;但当浪涌过电压到来时,其极间电阻值随着浪涌电压和电流的增大而逐渐减小,其电压和电流特性成非线性。所以电压限制型浪涌保护器的核心保护元件是各种非线性元件,具有连续的伏安特性,电压限制型浪涌保护器中最常用的是金属氧化物非线性电阻(简称MOV),有时又称压敏电阻^[5]。MOV元件一般为圆片或方片状,由多种金属氧化物(主要是氧化锌)组成。此外,还有箝位二极管、瞬态电压抑制

器(一种专门用来限制大电流瞬态的二极管,简称TVS)和硅雪崩二极管(简称SAD)等。

3.3.2 电压开关型

电压开关型的工作原理是当没有浪涌过电压时,基本上为开路状态呈现为高电阻;但当浪涌过电压到来时,其极间电阻突然变成低阻值,允许大电流流过,所以电压开关型浪涌保护器的核心元件基本是各种开关型器件,如开放的空气间隙、封闭的气体放电管和晶闸管等。

3.3.3 复合型

复合型浪涌保护器是由其他各种不同类型器件结合运用的保护器,如电压限制型和电压开关型的元件组合,将两者串联或并联。利用各种保护器的不同特点可以达到更好的效果。由于电压限制型和电压开关型元件具有非线性,所以复合型浪涌保护器也具有非线性特性,其伏安特性也是不连续的,其表现与电压、电流有关,有时呈现电压限制型特性,有时呈现电压开关型特性。

4 浪涌保护器的选择和安装

4.1 浪涌保护器的参数

电压保护水平是指浪涌保护器限制接线端子间电压的性能参数^[6]。该值应该大于限制电压的最高值,所以在选择浪涌保护器时通常电压保护水平越低,保护效果越好。只有在级间配合时电压保护水平不是越低越好。

通流容量是指浪涌保护器最大能吸收而不损坏的能量^[7]。通流容量与电流波形(特别是波长)有关。在技术上,通流容量是决定浪涌保护器在雷电下动作时可靠性的主要因素;在经济上,通流容量是决定浪涌保护器规格和价格的主要因素。所以通流容量越高,雷电下安全性就越高,但是通流容量越高,浪涌保护器的价格也就越高。

最大持续运行电压主要是对MOV等电压限制型保护元件而言,指的是浪涌保护器能长期承受而不劣化的电压,这也是浪涌保护器的额定电压^[8]。可知最大持续运行电压越高,浪涌保护器长期运行的安全可靠性能就越高;但是最大持续运行电压也影响电压保护水平,在制造水平不变的条件下,最大持续运行电压越高电压保护水平也就越高。

4.2 浪涌保护器的安装

因为雷电固有的伏安特性,其具有的能量非常巨大,所以需要用电分级泄放的方法将雷击产生的能量逐步泄放到大地。所以变电站通常设有三级防护,第一级防护通过安装限制型浪涌保护器对直击雷击电流进行泄放或者当电源传输线路遭受直接雷击时,将传导的巨大能量进行泄放。通常浪涌保护器安装在变电站的总配电柜处^[1];第二级浪涌保护器是针对与第一级浪涌保护器的残余电压与区内感应雷击的防护设备,因为第一级吸收雷击能量时,不会完全吸收,仍会有一部分能量对设备来说是具有很大的危害,这时就需要第二级浪涌保护器进一步吸收。同时,经过第一级浪涌保护器的传输线路也会因雷击电磁脉冲辐射产生感应电压和电流,需要第二级浪涌保护器进一步对雷击能量实施泄放,将浪涌保护器安装在各楼层的分配电柜处及重要设备的输入电源侧;第三级浪涌保护器是将残余浪涌电压的值降至1 kV以内,使浪涌的能量不致于损坏设备^[2]。

4.3 浪涌保护器后备保护

如果出现浪涌保护器失效,则会引起电流过载以及短路,可能会使过电流保护元件动作,造成部分地区停电,所以必须选择合适后备保护。后备保护可采用熔断器、断路器和漏电断路器三种途径来实现。

在安装浪涌保护器时,正确、合理地选用后备保护元件,直接关系到变电站运行及浪涌保护器的安全性和可靠性。后备保护元件与浪涌保护器的配合,应该确保保护在额定浪涌电流作用时后备保护元件不动作,保证浪涌电流的正常泄放,同时其作用在支路上的残压低于用电设备的保护水平,以保证系统及用电设备安全^[3]。

5 结 论

浪涌保护器是通过泄放雷电流、限制浪涌电压来保护电子设备,是电子设备防雷的主要手段,也是变电站综合防雷体系中的重要组成部分,有着不可替代的作用。正确、合理的选择和安装浪涌保护器才能使浪涌保护器与其他防雷措施密切配合,达到

良好的防雷效果,确保变电站安全可靠的运行。

参考文献

- [1] 赵智大. 高电压技术(第二版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [2] 严璋, 朱德恒. 高电压绝缘技术(第二版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [3] 余睿. 变电站二次防雷系统的原理及应用 [J]. 城市建设, 2010(35): 413-414.
- [4] 叶蜚誉. 电涌保护的作用 [J]. 低压电器, 2004(2): 54-57.
- [5] 王宪磊. 变电站二次设备防雷保护探讨 [J]. 大众科技, 2012, 14(3): 137-138.
- [6] 叶蜚誉. 电涌保护器的原理 [J]. 低压电器, 2004(3): 54-56.
- [7] Abdel-Salam, M, Ahmed, N. A, Elhamd, I. S. Varistor as A Surge Protection Device for Electronic Equipments [J]. IEEE Industrial Technology, 2004, 12: 688-694.
- [8] 叶蜚誉. 电涌保护器的电压保护水平 [J]. 低压电器, 2004(4): 50-52.
- [9] 叶蜚誉. 电涌保护器的通流容量 [J]. 低压电器, 2004(5): 55-57.
- [10] 叶蜚誉. 电涌保护器的最大持续运行电压 [J]. 低压电器, 2004(6): 55-57.
- [11] 白日欣, 陈淑春. 基于不同电力系统的浪涌保护 [J]. 河北软件职业技术学院学报, 2008, 10(3): 68-70.
- [12] Braithwaite, I. Surge Protection Devices - installation Issues [J]. IEEE Surges, Transients and EMC, 1998(2): 1-8.
- [13] 刘中平. 浪涌保护器的应用分析 [J]. 低压电器, 2009(24): 33-36.

作者简介:

王贺新(1989), 硕士研究生, 研究方向为电力设备故障与诊断;

刘 念(1956), 博士, 研究方向为高电压技术应用;

刘航宇(1990), 硕士研究生, 研究方向为电力设备故障与诊断;

蒲丽娟(1991), 硕士研究生, 主要从事电力设备的状态检测与故障诊断研究;

李 娟(1990), 硕士研究生, 研究方向为高电压技术应用。

(收稿日期: 2015-04-07)

GIS 坡度分级法在藏区大高差电力线路设计中的应用

余靖峰¹, 余银普²

(1. 成都城电电力工程设计有限公司, 四川 成都 610041;

2. 四川省测绘地理信息局测绘产品质量监督检验站, 四川 成都 610041)

摘要: 针对川北藏区电力线路工程的大高差跨越地形特征, 引入 GIS 空间分析运算中的坡度算法, 基于数字高程模型 DEM, 生成研究范围的坡度专题层。依据《土地坡度等级划分技术规范》对坡度层进行二次分类定级, 最终获得 GIS 坡度分级专题层。结合高分卫片、坡度分级层及相关矢量专题信息, 在 GIS 空间分析平台上进行可视化线路优化设计, 可以有效地控制线路设计成果的整体坡度范围、合理规划杆塔的立塔位置, 将杆塔定位在坡度合理、地质条件稳定的地理位置上。研究论证表明, GIS 坡度分级技术能有效提高大高差跨越地区线路工程的整体安全系数, 降低后期外业勘测的作业难度, 最终使线路的建设、运营得到可靠的保障。

关键词: GIS; 坡度分级; 大高差跨越; 线路设计

Abstract: Aiming at the large elevation difference terrain of Tibetan area in Northern Sichuan, the slope algorithm of GIS spatial analysis is introduced in transmission line design. With the function of slope algorithm, slope layers can be calculated based on DEM data. According to the technical guidelines of land slope classification, the study reclassifies the slope layers and finally gets the thematic layer of slope reclassification. Using the thematic layer of slope reclassification with high resolution satellite images, the transmission line design can be done visually in GIS environment and the statistical data of the slope for transmission line project can be controlled effectively. The study shows that there is an obvious safety improvement according to the statistical data. Above all, the slope classification algorithm of GIS spatial analysis will reduce the difficulty of transmission line design in large elevation difference terrain and provide a reliable guarantee for the security of the project.

Key words: GIS; slope analysis; large elevation difference crossing; transmission line design

中图分类号: P231.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2015)03-0062-06

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.03.015

0 前言

近年来,四川电力建设的重心逐渐由城区骨干电网建设向川北甘孜藏族无电地区延伸。2012年3月,“十二五”四川藏区电网“一号工程”——“新甘石”工程的正式启动,拉开了川藏联网电力工程的序幕。随着设计勘察工作的不断深入,许多技术难点逐步凸显。其中较为显著的,是电力线路设计中所遭遇的川北藏区大高差跨越地形问题。川西藏区多属高山峡谷类地形,地势切割剧烈,悬崖绝壁较多。仅依靠传统的工程测量手段和既有地形图判读选线方法,已无法达到高效、合理的电力线路优化设计目标。大高差的地形,对传统的线路设计方式和沿线勘察测手段均提出了更高的技术要求。因此,寻求新型的设计技术手段来辅助藏区大高差型地貌电力线路设计势在必行。

GIS,又称地理信息系统,具有强大的空间分析功能和辅助决策功能。作为GIS空间分析技术中的核心运算之一,地形坡度运算已逐渐被电力行业所采纳,在输配电线路工程的设计和勘测工作过程中得到广泛应用。结合高分辨率的航天卫星影像及数字高程模型,通过GIS空间分析技术,对线路沿线进行地形专题数据的提取,获取电力线路路径的坡度信息,使设计人员能在线路设计初期对电力线路全线的地形地势有宏观而合理的把握。利用GIS平台的可视化交互查询,设置线路路径中立塔的地理最优位置,从而达到对输变电线路整体坡度范围的合理控制,实现输变电线路设计的优化。

1 GIS 坡度分级算法原理阐述

1.1 GIS 坡度空间分析运算原理

对于数字高程模型中的每一个像元而言,坡度

分析运算统计的是该像元与临近像元的最大地形变化率。基本上,一个地形像元的最大变化率由它和周边邻接的8个外像元决定。假设,这外围的8个像元被依次定义为 $a \sim i$,如图1(a)所示,以最大平均值原理进行中心像元水平、垂直方向的地形变化率运算,运算原理见公式(1)、公式(2)。

$$[dz/dx] = [(c + 2f + i) - (a + 2d + g)] / (8 \times x_cellsize) \quad (1)$$

$$[dz/dy] = [(g + 2h + i) - (a + 2b + c)] / (8 \times y_cellsize) \quad (2)$$

综合上述水平、垂直方向的坡度计算原理,对4个直接邻接单元的权重赋值,值取2;而4个角落单元的权重赋,值取1,权重赋值图见图1(b)。最终,中心地形像元的坡度计算公式见公式(3)。图中 G 表示格网尺寸, $e_i (i = 1 \cdots 8)$ 分别表示中心点 e 周围的格网点高程。以 3×3 大小为移动窗口,在数字高程模型矩阵中逐个计算每个格网数据的坡度信息,计算完将后将获得坡度栅格影像,详见图1(c)。

坡度值 θ 的正切值为

$$tg(P) = \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2} \quad (3)$$

式中, $\frac{\partial z}{\partial x}$ 、 $\frac{\partial z}{\partial y}$ 分别为 x 、 y 方向的偏导数; P 则表示中心像元的坡度值。

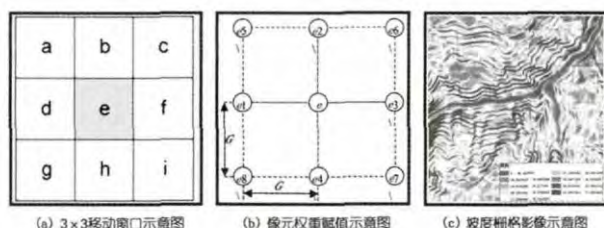


图1 坡度分析运算原理示意图

1.2 坡度分级原则

2008年6月,国土资源部综合了中国各地区地形地势坡度范围,按照其对农业、工业、环境水土保持等方面的影响限制程度,颁布了《土地坡度等级划分技术规范》。规范中指出,将中国的地形坡度分布分为了如下7个等级: $\leq 3^\circ$ 、 $3^\circ \sim 8^\circ$ 、 $8^\circ \sim 15^\circ$ 、 $15^\circ \sim 25^\circ$ 、 $25^\circ \sim 35^\circ$ 、 $35^\circ \sim 45^\circ$ 、 $> 45^\circ$ [4]。不同的坡度等级,对土壤地质环境的稳定性和水土保持产生的影像力有显著的差异性。

根据多年水土流失监测结果表明, $\leq 3^\circ$ 区域俗称无侵蚀区域,一般无水土流失现象发生; $3^\circ \sim 8^\circ$ 时,地表有轻微的细沟、浅沟出现,可发生轻度土壤

侵蚀,使用此区域土壤时,应需注意水土保持; $8^\circ \sim 15^\circ$ 可发生中度水土流失,应采取修筑梯田、等高种植等措施; $15^\circ \sim 25^\circ$ 地质侵蚀渐趋加剧,区域水土流失严重,必须采取工程、生物等综合措施进行防治。 25° 是土壤侵蚀方式的一个转折点, $> 25^\circ$ 以上的土壤区域将会大量出现重力侵蚀现象;而 35° 是黄土堆积面的临界休止角, $> 45^\circ$ 以上时极易发生坡面错落、滑坡、泻溜等重力侵蚀出现,此区域为开荒限制坡度,不易进行工程建设及开发,并采用退耕还林等水土保持措施。

2 GIS 坡度分级算法在藏区大高差电力线路工程中的应用

在举世瞩目的“川藏联网电力天路工程”中,多数线路工程属于高山峡谷类地形,有的地区坡度甚至超过了 60° 。地势切割剧烈,悬崖绝壁较多。如果不能正确对杆塔的立塔位置进行设计,控制线路的整体坡度范围,则会导致线路工程的整体安全系数降低,为后期的施工难度、工人的人生安全、线路的使用寿命带来极大的安全隐患。因此,采用GIS辅助决策技术,对线路路径的大方案设计进行优化,显得尤为重要。

本次研究基于ArcGIS空间分析平台,采用GIS坡度分级算法,提取研究区域的坡度专题数据。随后,依据国土资源部颁布的《土地坡度等级划分技术规范》文件,按照坡度数据的取值范围,对获取的坡度专题数据进行2次分类和定级,最终获得GIS坡度分级专题图层。叠加相关的工程影像数据、城市规划数据等要素,在ArcGIS平台上可视化查询各杆塔位置上的坡度值,实现杆塔立塔位置的合理设计,从而达到对线路整体方案所处坡度区域的合理调控。总体而言,本次技术研究分为如下6个大的研究方面,具体流程详见图2。

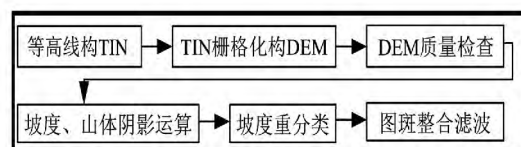


图2 技术流程图

2.1 研究区域及原始数据介绍

本次研究依托“东谷河一级水电站至丹巴500

kV 变电站 220 kV 线路工程”。该研究区域行政隶属于四川省甘孜藏族自治州丹巴县管辖,工程全长预估为 12 km。地理位置而言,研究区域线路地处四川盆地与青藏高原东南缘过渡地带,主体地形表现为侵蚀、剥蚀形成的高山峡谷地形,地形切割强烈,悬崖绝壁随处可见。山脊形态呈尖峭状,山坡和谷坡坡度较大,一般在 40° 以上,沟谷狭窄,横剖面呈“V”型。海拔方面,研究区域途经地段标高均在 2 100 m 以上,相对高差在 200 ~ 800 m 范围之间,属于典型的川北藏区大高差跨越地形,地形地质条件非常恶劣。

为了将新型勘测技术在实际工程中得以运用,开展线路的优化设计工作,向四川省测绘地理信息局收资 1:5 万比例尺精度、含 10 m 等高线要素层的数字化矢量地形图,共计 3 幅。配套卫星影像方面,收资了 2.5 m 分辨率的 IRS - P5 卫星影像,共计 6 幅。两套原始数据均已完成前期的几何纠正及正摄纠正处理,满足工程设计所需要的平面精度。原始资料的具体分布情况详见图 3。

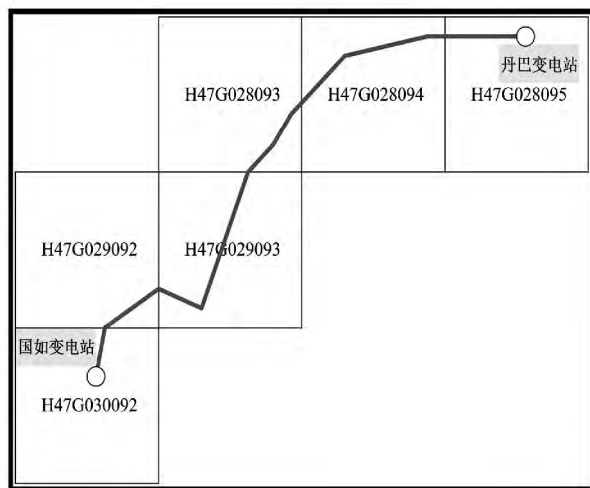


图 3 原始资料分布图

2.2 等高线反演 TIN 及 DEM

TIN (triangulated irregular network), 俗称不规则三角网,是构建数字地表模型 DEM 必不可少的步骤之一。具体而言,构建不规则 TIN 的流程和意义如下:通过将一系列的高程点以基于矢量形式组成三角形格网,从而使各矢量边形成不重叠的连续三角面,可用于捕获在地形起伏中发挥重要作用的线状要素(如山脊线或河道)的位置。由于网络是以不规则结点连接,因此可以将整个三角网络以不规则形式,放置于地形表面。在表面起伏变化较大或需

要更多细节的区域,网络分布密集,使 TIN 具有较高的分辨率,而在表面起伏变化较小的区域,网络分布稀疏,TIN 的分辨率较低^[4]。最终利用不同的数学插值算法,实现以数字模式来表示地表形态的目标,构建成果详见图 4(a)、图 4(b)。

构建 TIN 三角网的插值方法有很多种,如 Delaunay 三角测量法、距离排序法等。目前,GIS 平台运算中,普遍采用的是 Delaunay 三角测量算法。

利用线性或最邻近插值原理,通过查找落在二维空间中的三角形,计算像元中心相对于三角形平面的位置,作为每个输出像元的高程属性值。最终,将上一阶段生成的不规则三角网栅格化转换为平面栅格,实现由不规则三角网 TIN 生成数字高程模型 DEM 的目标。该流程俗称“TIN 栅格化构 DEM”,具体构建成果详见图 4(c)。

2.3 DEM 质量评估

采用上述处理流程,制作出本次工程全境范围内 10 m 等高线精度的数字高程模型 DEM,共计 3 张。对加工生产出的 DEM 栅格影像进行如下 3 个方面的成果质量评估检验。

1) 精度检查

①平面精度检查:与数字遥感正射影像图及地形图进行叠加,检查数字遥感所示地形地貌特征与 DEM 高程变化特征是否吻合。经检查,DEM 平面精度满足要求。

②接边精度检查:接边检查是对相邻两幅 DEM 重叠区的同名格网点高程,计算 DEM 接边精度。采用目视判读进行接边检查,经检查,接边处灰度连续、无错位的情况。

2) 数据完整性检查

数据完整性包括要素完整性、覆盖完整性、图幅间完全接边。将 DEM 数据进行镶嵌。经检查,DEM 数据覆盖区域完整;相邻图幅间能够实现完全接边。

3) 数据文件检查:经检查元数据文件内容齐全。

2.4 基于 DEM 的 GIS 坡度分级专题图提取及图层优化

按照前文所阐述的坡度系数提取原理,对研究范围内的所有 DEM 进行 GIS 坡度空间分析运算,提取出工程全境的 DEM 坡度专题层。随后,依据国土资源部《土地坡度等级划分技术规范》中所规定的

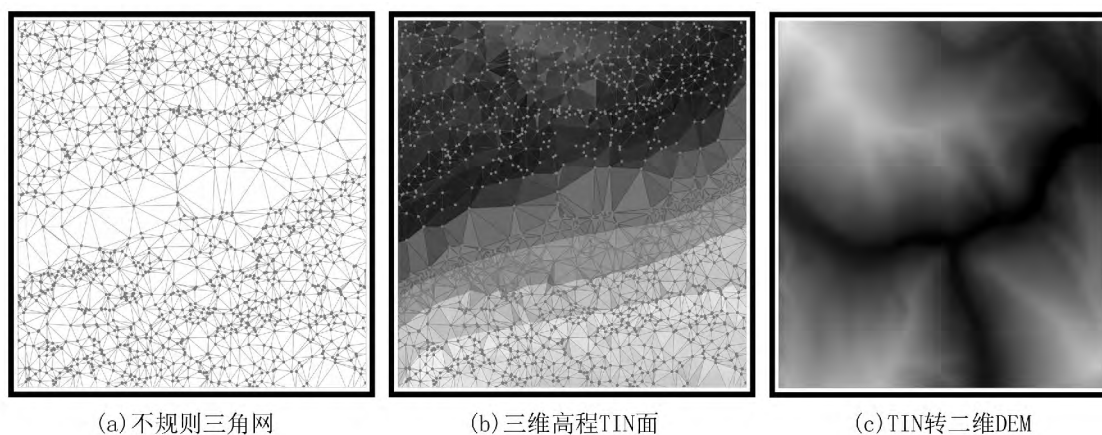


图 4 等高线反演 TIN、DEM 示意图

地形坡度临界值,对上一阶段的坡度专题图层进行 2 次分级运算,并赋予各个坡度级别相应的地物属性编码,从而得到坡度分级的基础图层。坡度分级基础图层详见图 5(a),坡度分级表详见表 1。

表 1 坡度分级表

坡度值范围	隶属坡度级别	地质特性
$\leq 3^\circ$	1	无侵蚀区域
$3^\circ \sim 8^\circ$	2	轻度土壤侵蚀
$8^\circ \sim 15^\circ$	3	中度水土流失
$15^\circ \sim 25^\circ$	4	区域水土流失严重
$25^\circ \sim 35^\circ$	5	大量重力侵蚀现象
$35^\circ \sim 45^\circ$	6	土堆积面临界休止角
$> 45^\circ$	7	开荒限制坡度

值得注意的是坡度重分类基础图图面中,不同的坡度值分级处呈现锯齿状,级别与级别间的过渡极不柔和。同时,在一个级别的坡度面状图斑中,会出现很多破碎的马赛克状的小颗粒,它们像“椒盐”一样散布在图斑中。这种情况,就是遥感影像分类技术中俗称的“椒盐噪声”现象^[5-7]。其存在的原因,可来源于大面积地形中某一处地形的坡度值突变所致,也可能因为分类算法在此处出现了误分类情况。综上所述,为了使坡度分级图的图面无椒盐噪声现象、边界过渡平滑,需要设定相应的面积阈值参数,对基础图层进行相应的二次滤波优化处理和图斑融合处理,实现坡度分级专题图的优化。

采用 Eliminate 算法,对细碎图斑进行融合。Eliminate 算法的中心思想是,依据 1 个或多个指定的属性聚合条件,将面与具有最大面积或最长公用边界的邻近面进行合并来消除面,通常用于移除叠加操作(如相交或联合)所生成的小的狭长面。细碎

图斑的典型特征是面积小,不足以成为单独被分为 1 个类别。依照此思路,本次研究选用了面积阈值参数作为临界条件,筛选出面积值小于 100 m^2 的所有细碎图斑。随后,以“选中类别周边的最大面积图斑”为算法准则,将被选中的类别融合到与其接壤的临近最大面积图斑里,并赋以相应属性,从而达到消除细碎图斑的目的。随后采用 Focal Statistics 算法进行输出栅格数据的 3×3 邻域运算,对栅格中锯齿状的分界边缘进行平滑,效果极佳。最终,得到画面清晰、边界过渡平滑的 GIS 坡度分级专题图层,详见图 5(b)。

为了使坡度的起伏情况更加直观,可运用 DEM 数据计算出山体地形起伏层,与坡度分级图进行合成,最终形成景观化坡度分级地形渲染图,详见图 6。设计人员在此底图基础上叠加相应的卫片信息,即可以在 GIS 空间分析平台上开展可视化的线路优化设计工作^[5-7],结合线路的实景卫片,分析拟定塔位点的坡度取值,观看线路设计的整体坡度范围,从而使线路设计的可靠性与合理性获得提高。

2.5 设计成果坡度范围质量分析

本次“东谷河一级水电站至丹巴 500 kV 变电站 220 kV 线路工程”,设计全周期依托于 ArcGIS 空间分析平台。通过 GIS 空间分析运算,生成了工程全境范围内的坡度专题层、坡度分级基础层、坡度分级优化专题层及景观化坡度分级地形渲染图层成果 4 套。叠合 2.5 m 分辨率的卫星遥感影像和地质、规划、矿区等设计重点专题信息数据,设计人员在 ArcGIS 空间分析平台上,对初期路径概率大方案开展了详细的可视化后期优化设计工作。

以线路转角塔 J12-J14 1 段为示例,进行坡度分级法在优化线路设计中的案例说明。如图 7 中白

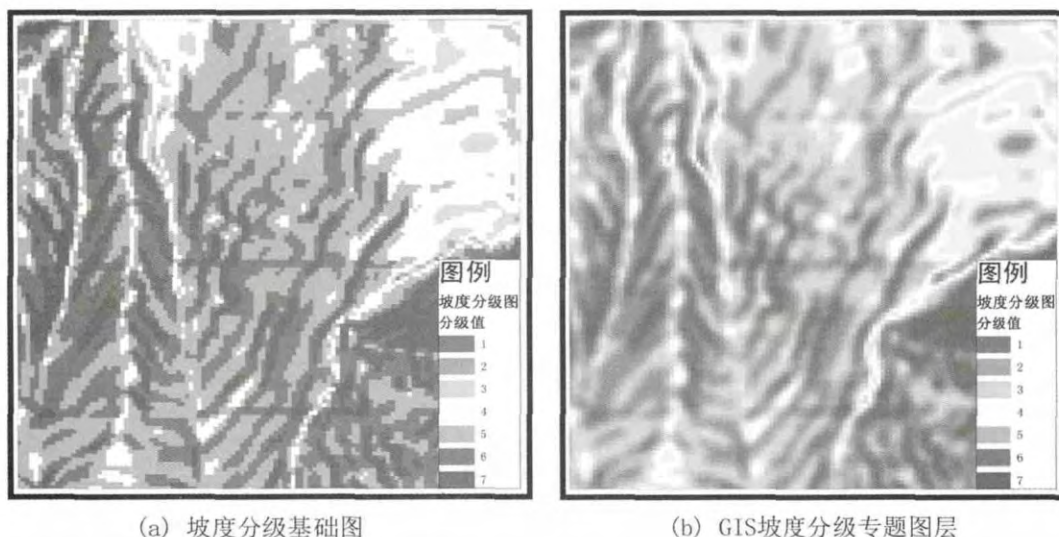


图5 GIS坡度分级专题图优化

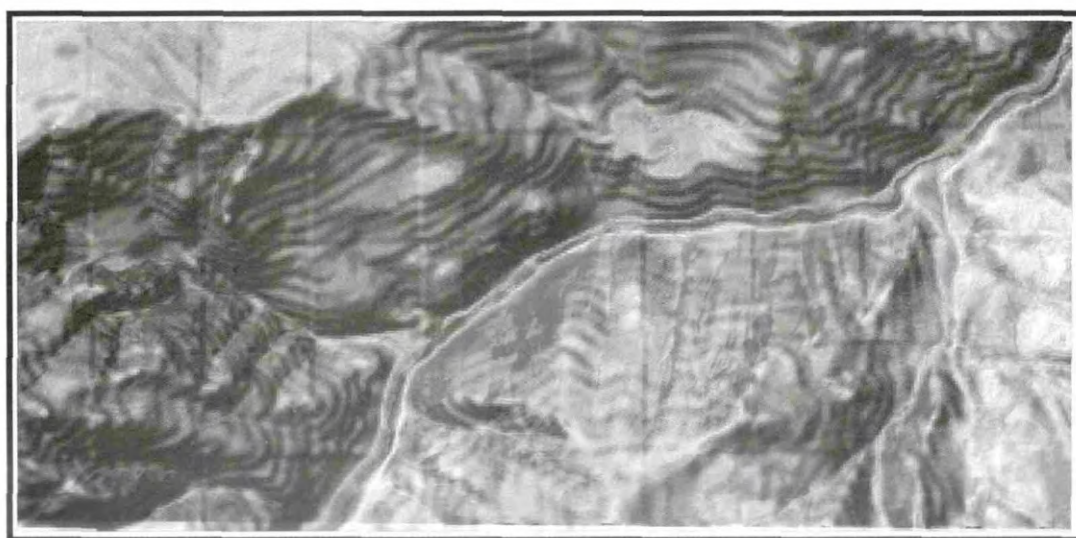


图6 景观化坡度分级地形渲染图

色三角注记所示,在初期概率方案中,J12、J13、J14 3级转角塔的坡度值分别为 45.01° 、 35.54° 、 41.65° ,隶属于棕红色的6级坡度范围内,已列入土堆积面临界休止角范围。初期方案的设计原理,是为了最大程度降低线路的曲折系数,减少线路总体长度、节约经济成本。但此3级塔的平均坡度值高达 40.73° ,属于极易发生坡面错落、滑坡的地理位置,安全隐患较大,因此在后期的线路优化工作中,需要做立塔位置的细部调整。

在优化设计阶段,设计人员结合GIS空间分析平台进行可视化设计,对该段线路进行了局部微调。经过优化设计,J12、J13、J14 3级转角塔坡度值调整为 17.98° 、 30.63° 、 30.96° ,平均坡度值为 20.32° ,隶属于浅黄色的4级坡度安全范围内。虽然一定程度上牺牲了局部的线路曲折系数,扩大了线路的整

体长度;但就工程的安全隐患而言,该段线路方案的整体可靠性得到了有效地保障,立塔位置的地质条件更为稳定,对终勘阶段现场勘测人工投入、后期工程的建设难度,都能实现经济、人力、工期上的成本节约。

综上所述,利用GIS坡度分级技术,此次线路工程优化设计范围内大方案修改共有17处,局部塔位微调5处。总体而言,本次工程的立塔坡度范围情况如下:最大坡度值为 33.32° ,最小坡度为 4.28° ;全线线路平均立塔坡度系数为 18.75° ,隶属于坡度分级中第4级别,为中低级安全坡度范围;曲折系数方面,4个线路标段的曲折系数分别为1.14、1.12、1.15、1.11,平均曲折系数1.13;交叉跨越方面,由于采用可视化设计,本工程交叉跨越较少,成功避让35 kV电力线4次,东谷河3次、S303省道3次。本

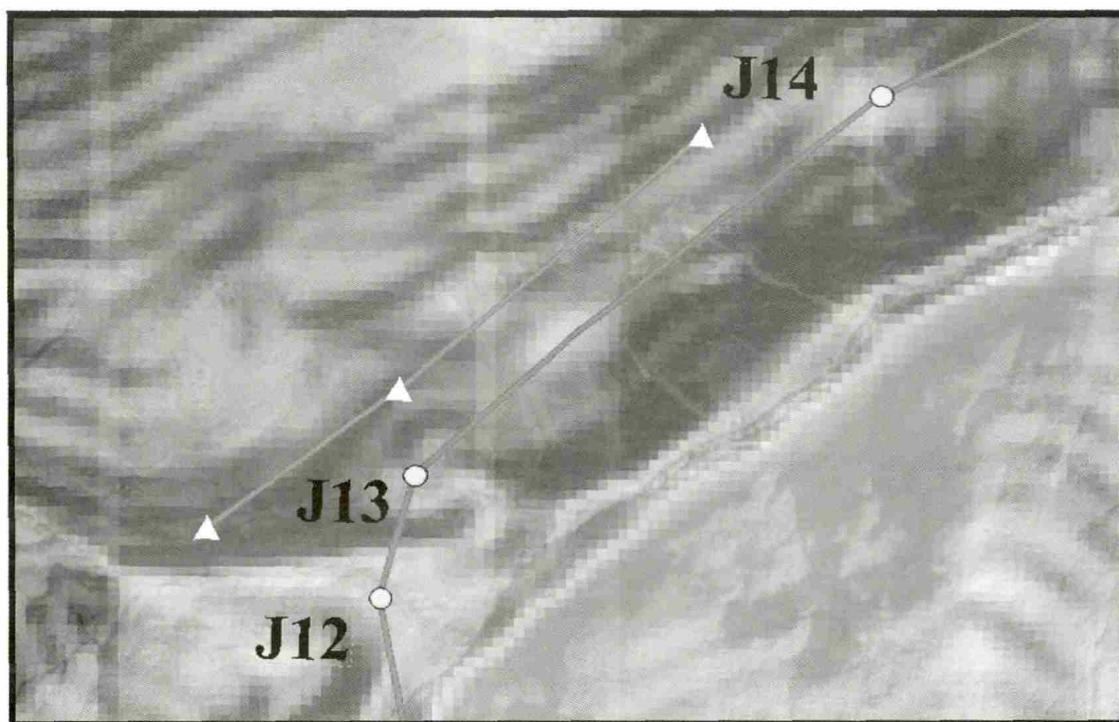


图7 GIS坡度分级法线路优化设计示意图

次线路工程的设计大方案走向平直、坡度适中、跨越及占地量均为低级别,判定设计方案较为经济,可以作为后期建设使用。

得了较好的成效,值得在后续的藏区电力线路勘测设计工程中加以延续应用。

参考文献

3 结 论

本次“东谷河一级水电站至丹巴 500 kV 变电站 220 kV 线路工程”,依托 GIS 空间分析中的坡度分级运算,获取了工程范围内的 GIS 坡度分级专题图层。结合高分辨率卫星影像和设计相关的各专题要素,最终达到了有效控制线路设计成果的坡度范围、合理规划立塔位置的设计目标,使杆塔定位在坡度合理、地质条件稳定的地理位置上,取得了较好成效。

本次新型勘测技术在“川藏联网”藏区电力工程中的研究与使用,体现了设计人员对国网四川省电力公司“两型三新”设计原则的深入贯彻,将线路设计勘测手段由传统型工程测量模式向数字化、精细化、集成化的新型勘测设计作业体制进行转变,取

- [1] TD/T 1014 - 2007,第二次全国土地调查技术规程 [S].
- [2] 汤国安,宋佳. 基于 DEM 坡度制图图中坡度分级方法的比较研究 [J]. 水土保持学报,2006,20(2): 157 - 160.
- [3] 宋国民,张锦明. 一种消除坡度分级图中“马赛克现象”的方法 [J]. 测绘工程,2010,11(1): 52 - 57.
- [4] 刘军,张正福,胡燕凌. 应用 DEM 数据进行耕地坡度分级量算方法研究 [J]. 遥感技术与应用,2009,24(5): 691 - 697.
- [5] 刘海飞,杨敏华,周军等. 基本 ArcGIS 平台的坡度分幅图快速制作 [J]. 山西建筑,2014,40(3): 262 - 264.
- [6] 戴立乾,陈娜,高鹏等. 基本数字高程模型的坡度分级及数据库的设计与实现 [J]. 河南科学,2012,30(5): 609 - 613.

(收稿日期:2015-01-20)

促节能减排和低碳发展 改善环境保护生态

基于场景概率潮流的电力系统无功优化研究

熊 强¹, 郑永康²

(1. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072)

摘 要: 多风电场出力的随机性和互相关性特点对电力系统无功优化调度有着不可忽视的影响。针对这一问题, 提出一种基于场景概率潮流的电力系统无功优化方法。该方法将风电出力场景化, 结合概率潮流计算, 以系统有功网损、发电机无功偏差和节点电压偏差期望加权值最小作为无功优化目标函数, 利用粒子群算法求得各风电出力场景下的最优无功控制策略。在含多风电场的 IEEE 30 节点系统中所提方法进行测试, 并与确定性的场景无功优化方法相对比, 验证了所提方法的有效性。

关键词: 概率潮流; 场景; 相关性; 无功优化

Abstract: The randomness and cross-correlation of wind farms output have a negligible impact on reactive power optimization scheduling of power system. Aiming at this problem, a reactive power optimization method based on scenario probabilistic load flow is proposed. The wind farm output is scenarized in this method. Combining with the probabilistic load flow, it takes the minimum weighted value of system network loss expectation, generator reactive power and node voltage deviation expectation as the target function and uses the particle swarm optimization to get the optimal reactive power control strategy in each scene. The proposed method is tested in IEEE 30 node system including wind farms and compared with the deterministic scenarios optimization method. The simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed method.

Key words: probabilistic load flow; scenario; correlation; reactive power optimization

中图分类号: TM74 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2015)03-0068-05

DOI: 10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.03.016

0 引言

传统的无功优化研究大多是基于确定的系统模型, 假定系统中的支路参数、负荷需求、发电机出力等保持不变。但在含多风电场的电力系统中风电出力的随机性和相关性会对电力系统运行状态会产生很大的影响^[1]。如若不考虑这些影响, 仍采用确定性的模型对系统进行无功优化, 所得到的控制策略往往不是最优的, 甚至可能起到恶化的效果。鉴于此, 文献 [2] 基于概率潮流计算方法, 以网损期望值最小、电压越限概率最小和负荷裕度最大为多目标, 采用粒子群算法进行了无功优化研究, 但没有考虑风电场之间的相关性对无功优化的影响。文献 [3] 考虑了随机变量相关性, 通过概率潮流计算方法对电力系统的电压稳定和无功优化问题进行了研究, 但由于文献假设风速服从威布尔分布, 故所得概率分析结果仅适用于系统长期或中长期评估^[4], 实际

参考价值有限。

针对这些问题, 提出一种基于场景概率潮流的无功优化方法, 建立了多风电场出力的场景概率模型, 结合蒙特卡洛模拟概率潮流计算方法^[5], 利用改进的粒子群算法求得各场景下的最优无功控制策略, 为电力系统运行与规划人员提供丰富的决策信息。

1 场景概率潮流计算

为了考虑多风电场出力的随机性和相关性, 将场景概率潮流计算引入到电力系统无功优化问题中。首先, 利用 K 均值聚类 and Copula 函数^[6-7]建立了多风电场出力的场景概率模型, 再结合蒙特卡洛模拟法在各场景中实现了概率潮流计算。具体实现过程如下。

1) 风电出力场景化。利用 K 均值聚类在识别数据内在结构上的优点, 将原始多风电场出力数据划分为 S 类, 并记录每一类发生概率;

2) 求取风电出力边缘分布函数。采用非参数核密度估计^[8]求得各场景中风电出力的边缘分布函数;

3) 构建多风电场出力场景概率模型。利用 Copula 理论建立各场景下风电出力的联合概率分布函数;

4) 场景概率潮流计算。对各场景下概率分布函数进行采样,利用蒙特卡洛模拟实现概率潮流计算;

5) 系统概率评估。对概率潮流计算结果进行统计分析,得到各状态变量的统计特性及分布信息。

2 基于场景概率潮流的电力系统无功优化

以场景概率潮流计算代替传统无功优化中的确定性潮流计算,以系统有功网损、发电机无功偏差和节点电压偏差期望加权值最小作为无功优化目标函数,利用改进粒子群算法求得各风电出力场景下的最优无功控制策略。

2.1 无功优化数学模型

1) 目标函数

$$F_{\min} = \overline{P_{\text{loss}}} + \lambda_Q \overline{\Delta Q_g} + \lambda_V \overline{\Delta V_{PQ}} \quad (1)$$

式中, $\overline{P_{\text{loss}}}$ 为系统网损期望值; $\overline{\Delta Q_g}$ 为发电机节点无功偏差期望值; $\overline{\Delta V_{PQ}}$ 为 PQ 节点电压偏差期望值; λ_Q 和 λ_V 分别为无功偏差和电压偏差权重系数。

2) 等式约束条件

$$\begin{cases} P_i - V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \\ Q_i - V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式(2)为系统潮流方程。

3) 不等式约束条件

$$\begin{cases} V_{G\min} \leq V_G \leq V_{G\max} \\ K_{T\min} \leq K_T \leq K_{T\max} \\ Q_{C\min} \leq Q_C \leq Q_{C\max} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $V_{G\min}$ 和 $V_{G\max}$ 分别为发电机端电压上限值和下限值; $K_{T\min}$ 和 $K_{T\max}$ 分别为可调变压器分接头的上限值和下限值; $Q_{C\min}$ 和 $Q_{C\max}$ 分别为补偿电容器投切组数的上下限值。

2.2 改进粒子群算法

采用改进的粒子群算法^[9,10]对概率无功优化模型进行求解,其算法原理如下:假设一个由 H 个

粒子构成的种群,每个粒子 i 在第 t 次迭代时的位置为决策空间中的一个 n 维向量,其位置可记为 $x_i(t) = [x_{i1}(t), x_{i2}(t), \dots, x_{in}(t)]$, ($i = 1, 2, \dots, H$), 将每个粒子代入目标函数 $F(x)$ 中求得相应的适应值 $F(x_i(t))$, 粒子的优劣由其适应值大小评价。每个粒子在迭代过程中适应值最优的位置称为该粒子的个体最优解,记为 $X_i^{pb}(t) = [X_{i1}^{pb}(t), X_{i2}^{pb}(t), \dots, X_{in}^{pb}(t)]$; 同样,所有粒子的历史最优位置称为全局最优解,记为 $X^{gb}(t) = [X_1^{gb}(t), X_2^{gb}(t), \dots, X_n^{gb}(t)]$ 。将每个粒子 i 在第 t 次迭代时的速度记为 $v_i(t) = [v_{i1}(t), v_{i2}(t), \dots, v_{in}(t)]$, ($i = 1, 2, \dots, H$)。粒子 i 在第 $t+1$ 次迭代时的个体极值和粒子群的全局极值按式(4)、式(5)更新:

$$X_i^{pb}(t+1) = \begin{cases} x_i(t+1), & F(x_i(t+1)) < F(X_i^{pb}(t)) \\ X_i^{pb}(t), & F(x_i(t+1)) \geq F(X_i^{pb}(t)) \end{cases} \quad (4)$$

$$X^{gb}(t+1) = \arg \{ \min F(X_i^{pb}(t+1)) \} \quad (5)$$

粒子位置向量和速度向量每一维按式(6)、式

(7) 更新:

$$\begin{cases} v_{ij}(t+1) = w(t) v_{ij}(t) + c_1 r_1(t) (X_{ij}^{pb}(t) - x_{ij}(t)) + \\ \quad (c_2 r_2(t) (X_{ij}^{gb}(t) - x_{ij}(t))) \\ x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + \eta v_{ij}(t+1) \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} v_{ij} = v_j^{\max}, & v_{ij} > v_j^{\max} \\ v_{ij} = -v_j^{\max}, & v_{ij} < -v_j^{\max} \end{cases} \quad (7)$$

式中, $w(t)$ 为惯性权重; c_1 和 c_2 为权重系数; $r_1(t)$ 和 $r_2(t)$ 为 0 到 1 之间的随机数; $v^{\max}$ 为粒子最大速度; η 为约束因子。

从式(6)可以看出 $w(t)$ 能够平衡 PSO 算法的全局搜索能力和局部寻优能力,其值越大全局搜索能力较强;反之,局部搜索能力较强。在迭代初期,希望各粒子能够具有较强全局探索能力;迭代后期,则希望粒子拥有良好的局部搜索能力。为此,采用线性递减权重原则来动态调整惯性权重值^[11],见式(8):

$$w(t) = w_{\max} - \frac{(w_{\max} - w_{\min}) \times t}{T_{\max}} \quad (8)$$

式中, $w_{\max}$ 、 $w_{\min}$ 分别为 w 最大值和最小值; $T_{\max}$ 为最大迭代次数。

2.3 算法流程

结合场景概率潮流和粒子群算法实现了考虑多风电场相关性的无功优化研究,具体算法流程如下。

- 1) 输入系统网络参数,各风电场实测出力数据;
- 2) 利用 K 均值聚类将风电场出力数据划分为 L 类;
- 3) 利用 Copula 函数建立各类中风电出力的联合概率模型;
- 4) 对各场景概率模型进行采样,得到各场景下的模拟风电出力数据,令 $T=1$;
- 5) 选择场景 T 样本数据进行无功优化;
- 6) 初始化种群,设置相关参数;
- 7) 利用概率潮流计算得到场景 T 中目标函数值;
- 8) 根据式(4)和式(5)更新粒子的最优位置;
- 9) 判断是否达到最大迭代次数:是,则进行下一步;否,则按式(6)和式(7)更新粒子的速度和位置;
- 10) 得到场景 T 的最优无功控制策略,判断 $T=L$ 是否成立:是,则算法结束;否则令 $T=T+1$,转入步骤 5) 循环迭代。

3 算例分析

在含多风电场的 IEEE 30 节点系统中所提方

法进行仿真测试,系统结构如图(1)所示。算例将负荷节点分为两个区域:1-15 和 16-30,区域内相关系数为 0.9,区域间相关系数为 0.5,并假设负荷随机变量服从正态分布。在节点 6 和 9 接入两个风电场,其出力数据取自两个相邻风电场的实测出力值。该系统中控制变量如表 1 所示。

算例中 PSO 算法的参数设置如下:学习因子取经典值 $c_1=c_2=2$;惯性权重 $w(t)$ 最大最小值分别取为 0.95 和 0.4;约束因子 $\eta=0.729$;种群数取为 30,最大迭代次数为 100,粒子维数为 13;目标函数中惩罚因子 $\lambda_Q=1, \lambda_V=100$ 。在概率潮流计算中采样规模取为 500。

表 2 为基于场景概率潮流的电力系统无功最优控制策略,图 2 为各场景无功优化过程中 PSO 算法收敛曲线。

决策人员可根据表 2 根据风电出力所处的场景进行相应的调度控制。此外,从加权目标函数值可以看出,随着风电出力的增加,优化后的系统运行状态更优。图 2 可以看出,各场景无功优化在 70 代左右收敛到最优值。

表 1 IEEE 30 节点系统控制变量信息表

控制变量类型	所在位置	最大值	最小值	步长	档数	变量性质
发电机节点电压	1、2、5、8、11、13 节点	1.06	0.94	—	—	连续
变压器变比	6-9、6-10、4-12、28-27 支路	1.1	0.9	0.0125	16	离散
并联电容器	3、10、24 节点	50	0	1	50	离散

表 2 场景概率模型最优无功控制策略

控制变量类型	参数	原始参数	各场景优化结果					
			S1	S2	S3	S4	S5	S6
发电机节点电压/(p. u.)	V_1	1.05	1.060 0	1.060 0	1.060 0	1.060 0	1.060 0	1.060 0
	V_2	1.00	1.030 4	1.029 9	1.031 1	1.029 7	1.034 7	1.037 4
	V_5	1.00	0.991 7	0.985 5	0.997 1	1.000 2	0.993 0	1.004 5
	V_8	1.00	0.997 6	0.989 7	1.007 3	1.014 9	1.005 8	1.014 2
	V_{11}	1.00	1.008 5	1.038 0	1.044 8	1.021 1	0.991 8	1.029 8
	V_{13}	1.00	1.037 8	0.999 6	1.020 5	1.019 7	0.995 9	1.060 0
并联电容器组数	C_3	0	12	36	13	24	21	16
	C_{10}	0	38	24	38	46	29	38
	C_{24}	0	10	20	19	17	22	16
变压器变比/(p. u.)	K_{6-9}	0.978	0.987 5	0.900 0	1.075 0	1.050 0	1.050 0	1.025 0
	K_{6-10}	0.969	1.025 0	1.037 5	0.975 0	1.025 0	1.025 0	0.937 5
	K_{4-12}	0.932	1.025 0	0.987 5	1.012 5	1.025 0	1.012 5	0.975 0
	K_{28-27}	0.968	0.950 0	1.000 0	0.962 5	1.000 0	0.975 0	0.962 5
加权目标函数值	—	—	17.307 1	16.435 2	14.534 0	13.079 5	11.686 6	9.486 7
场景发生概率/%			32.00	24.33	17.37	12.33	9.42	4.55

表 3 确定模型最优无功控制策略

控制变量类型	参数	原始参数	各场景优化结果					
			S1	S2	S3	S4	S5	S6
发电机节点电压/(p. u.)	V_1	1.05	1.059 7	1.052 5	1.060 0	1.060 0	1.051 6	1.060 0
	V_2	1.00	1.025 3	1.022 3	1.035 5	1.035 1	1.025 9	1.039 4
	V_5	1.00	0.996 5	0.951 6	0.998 1	1.003 5	0.985 1	1.009 4
	V_8	1.00	0.999 4	0.983 5	1.001 6	1.010 4	0.989 4	1.012 5
	V_{11}	1.00	1.039 1	1.008 7	1.032 5	1.051 1	1.015 6	1.055 0
	V_{13}	1.00	1.056 7	1.031 0	1.027 3	1.006 0	1.026 7	1.034 6
并联电容器组数	C_3	0	50	18	10	24	23	20
	C_{10}	0	40	24	7	8	27	0
	C_{24}	0	4	11	22	16	6	21
变压器变比/(p. u.)	K_{6-9}	0.978	1.087 5	0.975 0	0.925 0	1.025 0	0.987 5	0.925 0
	K_{6-10}	0.969	0.900 0	0.900 0	0.987 5	0.937 5	0.925 0	1.037 5
	K_{4-12}	0.932	0.975 0	1.050 0	1.037 5	0.975 0	0.937 5	1.037 5
	K_{28-27}	0.968	0.937 5	0.900 0	0.987 5	0.975 0	0.900 0	1.000 0
加权目标函数值	-	-	17.307 1	16.435 2	14.612 7	12.903 0	11.717 5	9.383 3

表 4 不同优化方法各场景结果比较

目标函数	优化方法	各场景优化结果					
		S1	S2	S3	S4	S5	S6
系统网损	方法 1	17.270 1	16.365 6	14.497 1	13.019 9	11.544 0	9.1759
	方法 2	17.533 7	16.792 8	14.647 3	12.935 9	11.792 6	9.491 7
	优化前	19.035 1	17.604 9	16.145 3	14.600 3	13.036 9	11.028 5
节点电压偏差期望	方法 1	0	0.000 2	0	0	0	0
	方法 2	0	0.000 4	0	0	0.001 1	0
	优化前	0.000 2	0.000 3	0.000 4	0.000 7	0.001 1	0.002 6
发电机无功偏差期望	方法 1	0.038 5	0.052 9	0.047 3	0.068 5	0.143 0	0.339 1
	方法 2	0.955 2	1.904 6	2.834 5	3.319 6	1.519 0	4.227 4
	优化前	104.227 4	107.546 3	111.585 0	116.636 7	122.799 8	133.335 9
加权目标函数	方法 1	17.308 6	16.436 5	14.544 3	13.088 4	11.687 0	9.517 0
	方法 2	18.488 9	18.739 7	17.481 8	16.255 5	13.420 9	13.720 3
	优化前	123.281 3	125.177 1	127.773 3	131.302 5	135.951 3	144.624 0

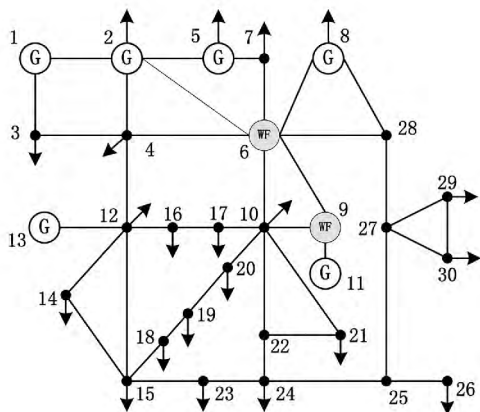


图 1 含两个风电场的 IEEE 30 节点系统

为了验证所提方法优于传统确定性无功优化方法,将两种方法进行了对比分析:其中方法 1 为所提

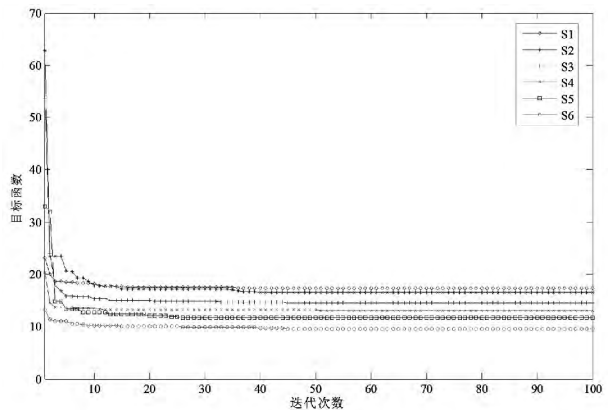


图 2 各场景 PSO 收敛曲线

方法;方法 2 为传统的确定性场景无功优化方法,即不考虑系统中存在的不确定因素,将各场景中风电出力的平均值作为实际出力,代入无功优化模型,以

确定性潮流计算所得适应值作为目标函数,得到各场景下的最优无功控制策略。

由于在实际电网运行过程中,风电出力 and 负荷不可能固定不变,故将方法 2 所得到的最优控制策略代入方法 1 考虑随机因素的目标函数中,将所得各场景下的适应值与方法 1 的结果相对比。

表 3 为方法 2 各场景最优无功控制策略;表 4 为两种方法对比结果。

对比表 3 和表 4 可以看出:在最优控制策略下方法 1 和方法 2 在各场景中的加权目标函数值相差都很小,个别场景方法 2 甚至优于方法 1。从表 4 可以看出,在考虑风电出力随机变化时,虽然两种方法都能较大程度上实现对系统的优化,但在方法 1 的最优控制策略下,系统的各项指标明显优于方法 2,说明方法 1 能够考虑系统中存在的随机变量,得到更可靠的无功优化策略。

4 总 结

将场景概率潮流计算方法应用到电力系统无功优化研究中。充分考虑了系统中负荷、风电出力的随机性和相关性,从概率的角度得到了各场景下的最优无功控制策略。与传统的确定性无功优化方法相比,所提方法在含不确定性因素的系统中表现更优,所得到的无功配置方案能够适应随机因素的变化,为运行与规划人员提供更可靠、更全面、更经济的控制策略。

参考文献

[1] 潘雄,周明,孔晓民,等. 风速相关性对最优潮流的

(上接第 36 页)

- [2] 冯建清,唐明晓. 电容器发热问题分析及解决措施 [J]. 电力电子技术,2007,41(5):1-6.
- [3] DL/T 664-2008,带电设备红外诊断应用规范 [S].
- [4] 李澍森,陈晓燕. 试验线段电晕测量技术及结果 [J]. 高电压技术,2006,12(7):32-36.
- [5] 徐玲玲,张国威,王世民,等. 直流输电换流站电容器运行情况分析 & 改进措施 [J]. 电力电容器,2007(1):11-16.
- [6] 孙翠平,关素娇,李晓军,等. 青藏换流站电容器成套装置外绝缘的设计总结 [J]. 2012 输变电年会论文集,2012.

影响 [J]. 电力系统自动化,2013(6):37-41.

- [7] 柳杰,刘志刚,孙婉璐,等. 含风电场电力系统电压稳定性概率评估及其在无功优化中的应用 [J]. 电网技术,2012(11):134-139.
- [8] 李鸿鑫. 考虑不确定性因素的电力系统电压稳定与无功优化问题研究 [D]. 武汉:华中科技大学,2013.
- [9] 朱星阳,刘文霞,张建华,等. 电力系统随机潮流及其安全评估应用研究综述 [J]. 电工技术学报,2013(10):257-270.
- [10] 陈雁,文劲宇,程时杰. 考虑输入变量相关性的概率潮流计算方法 [J]. 中国电机工程学报,2011(22):80-87.
- [11] Nelsen R B. An Introduction to Copulas [M]. Springer Science & Business Media, 2007.
- [12] 黎静华,韦化. 基于内点法的机组组合模型 [J]. 电网技术,2007(24):28-34.
- [13] 秦志龙. 计及相关性的含风电场和光伏电站电力系统可靠性评估 [D]. 重庆:重庆大学,2013.
- [14] 梁艳春. 群智能优化算法理论与应用 [M]. 北京:科学出版社,2009.
- [15] 陈前宇,陈维荣,戴朝华,等. 基于改进 PSO 算法的电力系统无功优化 [J]. 电力系统及其自动化学报,2014,26(2):8-13.
- [16] Shi Y, Eberhart R. A Modified Particle Swarm Optimizer [J]. IEEE, World Congress on Computational Intelligence, 1998.

作者简介:

熊 强(1989),硕士研究生,研究方向为电力系统及其自动化;

郑永康(1977),博士,高级工程师,主要研究方向为继电保护。

(收稿日期:2015-04-07)

- [17] 周承刚,赵宁. 换流站电容器组安装的施工方案及注意事项 [J]. 科学之友,2012(15):33-38.
- [18] 李靖翔. 宝安换流站低压电容器多起跳闸情况分析 [J]. 中国科技信息,2011,22(4):67-71.

作者简介:

禹 佳(1983),本科,工程师,研究方向为特高压直流输电技术;

孙 文(1981),本科,工程师,研究方向为特高压直流输电技术;

王 鑫(1987),研究生,工程师,研究方向为特高压直流输电技术。

(收稿日期:2015-01-06)

基于广义等效法的含大规模风电接入的发电系统可靠性评估

张择策, 沈天时

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 只含有传统机组的发电系统, 由于可将机组简化为两种状态模型, 采用蒙特卡洛模拟法模拟机组状态, 其可靠性评估较易实现。由于风的随机性和间歇性, 在含有大规模风电接入的发电系统中, 不能简单将风电机组看成两种状态模型。因此, 提出广义等效法, 将风电机组群一步步等效成1个传统机组, 并引入 z_{zc} 系数定义了该等效机组的平均稳定工作时间MTTS。选取RTS79系统作为算例, 考虑大规模风电的接入, 使用广义等效法计算可靠性指标EENS和LOLE, 并与传统蒙特卡洛模拟法的结果进行比较。所提方法为简化风电机组群模型提供了思路, 对含大规模风电接入的发电系统可靠性评估有一定指导作用。

关键词: 风电; 可靠性评估; 广义等效法; z_{zc} 系数; MTTS

Abstract: The reliability of power system which only consists of traditional generators is easy to be assessed using Monte Carlo simulation because the generators can be simplified to a two-state model. But the wind turbine generator system cannot be treated as a two-state model in power system considering large-scale wind power integration due to the randomness and intermittent of wind. Hence, generalized equivalent approach is put forward. In this method, wind turbine generator system can be equivalent to a traditional generator step by step and a coefficient named z_{zc} is introduced to define the equivalent generators' average time of steady operation—MTTS. The RTS79 system is chosen as an example. Considering the large-scale wind power integration, the reliability index like EENS and LOLE are calculated using generalized equivalent approach and its outcomes are compared to those using traditional Monte Carlo simulation. It provides an idea to simplify the model of wind turbine generator system, which has guiding meaning to the reliability assessment of power system considering large-scale wind power integration.

Key words: wind power; reliability assessment; generalized equivalent approach; coefficient of z_{zc} ; MTTS

中图分类号: TK89 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2015)03-0073-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.03.017

0 前言

发电系统可靠性在电力系统可靠性中至关重要, 它直接影响电能的充裕度。风力发电是可再生能源发电形式中技术最成熟、最具开发规模 and 商业化前景。然而风在时间和空间上鲜明的间歇性和波动性会造成风机出力不稳, 这对发电系统可靠性指标的传统计算方式产生了冲击^[1-4]。

许多研究者认为, 可以将风电机组看成1个多状态机组进行处理, 这在一定程度上计入了风电本身的特征。然而, 风电机组容量小、数量多, 若用传统的模拟法模拟机组状态, 在风机数量增多或者风机状态数增多时, 将会造成极大的运算量^[5-8]。

下面提出了广义等效法, 基于概率分布的理论

使用按权分配的方法将风电机组群一步步等效成一个传统机组, 为实现计算的统一性, 引入 z_{zc} 系数定义了该等效机组的平均稳定工作时间MTTS。为简化风电机组群模型提供了思路, 对含大规模风电接入的发电系统可靠性评估有一定指导作用。

1 广义等效法

传统模拟法难以处理大规模多状态风电机组群, 其根本原因是将风电机组的地位看成是与传统机组平等的。大量研究者认为, 在发电系统可靠性评估中, 既然对每个传统机组要单独模拟其状态和状态持续时间, 那么对于风电机组也应该做同样的处理^[9-11]。这样的思路无疑是忽略了风电机组本身的一些特点。在实际风电机组群中, 是大量完全

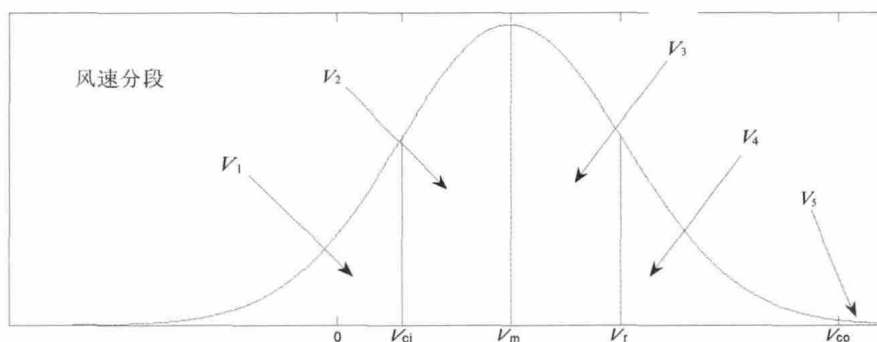


图1 风速分段

相同的风电机组,它们容量很小,往往整个风电机组群的总容量才相当于1个传统机组。

因此,提供的思路是将整个风电机组群对发电系统的影响看成是1个等效机组的影响,而在可靠性指标计算中将该等效机组看成传统机组进行处理。广义等效法的实质是在预处理阶段计入风电的间歇性和波动性,而等效后就看成传统机组参与状态模拟,以节省模拟的运算量。

1.1 风电机组群的容量等效

标准正态分布已在工程实践中得到广泛应用,假设当某地的风速统计数据足够长时,则在统计时间内的风速可近似的服从正态分布^[8]。

将风速分布划分为如下5个区段^[12]:小于切入风速 V_{ci} 、切入风速 V_{ci} 和平均风速 V_m 之间、平均风速 V_m 和额定风速 V_r 之间、额定风速 V_r 和切出风速 V_{co} 之间以及大于切出风速 V_{co} ,即将所有风速分为落入图中5个区段的5种风速 V_1 、 V_2 、 V_3 、 V_4 、 V_5 ,其中,取 $V_2 = 0.5 \times (V_{ci} + V_m)$, $V_3 = 0.5 \times (V_m + V_r)$ 。另外,根据风功率 P 与风速 V 的关系, V_1 、 V_4 、 V_5 对应的 P 为已知值。

风速分段如图1所示。由于风速服从正态分布,5种风速所对应的概率也容易得到,见表1。

表1 5种风速及其概率

风速/(km·h ⁻¹)	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
概率	p_1	p_2	p_3	p_4	p_5

风功率 P 与风速 V 的关系如下。

$$P = \begin{cases} 0, & V < V_{ci} \\ P_r \times \frac{(V - V_{ci})^3}{(V_r - V_{ci})^3}, & V_{ci} \leq V \leq V_r \\ P_r, & V_r < V \leq V_{co} \\ 0, & V > V_{co} \end{cases}$$

易得各风功率值及其概率,见表2。

表2 各风功率及其概率

风功率/MW	P_1	P_2	P_3	P_r
概率	$p_1 + p_5$	p_2	p_3	p_4

其中 $P_1 = 0$,假设风电机组群由 n 台额定容量为 P_r 的风机组成,忽略尾流效应,定义风电机组群的等效容量:

$$P_w = n(p_2 \times P_2 + p_3 \times P_3 + p_4 \times P_r)$$

至此,将整个风电机组群看成1台容量为 P_w 的传统机组。

1.2 风电机组群的参数等效

传统机组参与计算的参数有容量 P 、强迫停运率 FOR、平均故障修复时间 MTTR 和平均无故障工作时间 MTTF。上节已得到等效容量 P_w ,为实现等效,还需要得到风电机组群的广义停运率 FOR_{BS}、平均故障修复时间 MTTR'和1个在公式中用来代替 MTTF,表征风电出力稳定性的时间参数——平均稳定工作时间 MTTS。

FOR_{BS}定义为理论上风机出力为0的频率,即历史风速数据中风速小于 V_{ci} 以及大于 V_{co} 的频率。MTTR'与常规机组一样定义为修复率 μ 的倒数。

MTTS 的定义如下。

首先定义 k 率,用于表征出现各个不同相邻风速波动的频率。即比较每个相邻小时风速差值的绝对值,设历史数据共有 m 个小时,则

```

while(  $t \leq m$  ) do  $|V_{t+1} - V_t|$ 
case1:  $|V_{t+1} - V_t| = 0, k'_0 + +$ 
case2:  $0 < |V_{t+1} - V_t| \leq 5, k'_1 + +$ 
case3:  $5 < |V_{t+1} - V_t| \leq 10, k'_2 + +$ 
case4:  $10 < |V_{t+1} - V_t| \leq 15, k'_3 + +$ 
case5:  $k'_{else} + +$ 
end

```

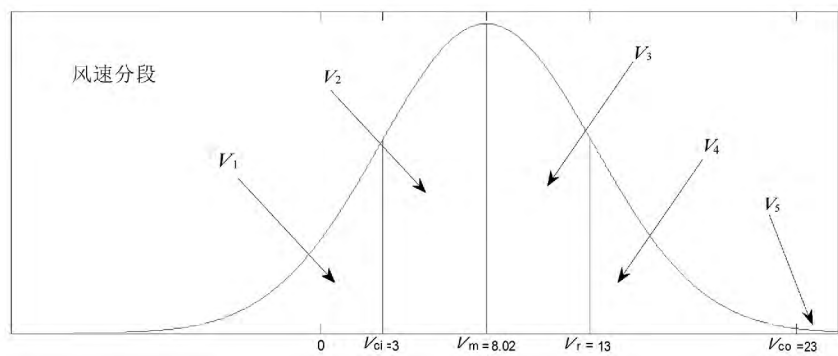



图 2 实际风速分段

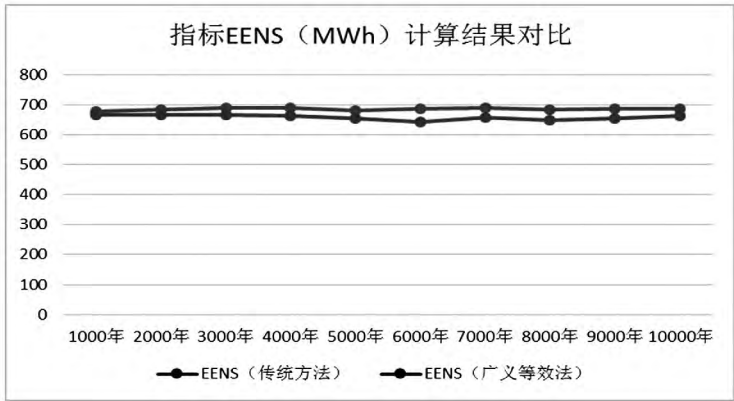


图 3 EENS 结果对比

$k_0 = k'_0/m, k_1 = k'_1/m, k_2 = k'_2/m, k_3 = k'_3/m, k_{else} = k'_{else}/m$

不同 k 率对风机不稳定性的贡献是不同的,因此定义 zzc 系数与 z 率,假设相邻 k 率对 z 率的贡献相差 10 倍,公式如下:

$$z = zzc \times \sum_{i=1}^n k \times 10^{i-1}$$

z 率表征风机综合不稳定性,其中 zzc 系数用于调整 z 率的数量级。类比传统机组 MTTF 的定义,取 z 率的倒数 $1/z$ 为平均稳定工作时间 MTTS。

2 算例与分析

2.1 算例计算

为验证广义等效法的有效性,下面选用 RTS79 系统作为算例,该系统含有 32 台火电机组,总容量 3 405 MW,年负荷选用 RTS79 系统负荷数据。已知各单台机组的额定容量、强迫停运率 FOR、平均故障修复时间 MTTR 和平均无故障工作时间 MTTF。考虑 300 台额定功率为 1.5 MW 的风机(修复率已知)接入发电系统,此时的风电渗透率为 11.67%。

历史风速数据使用 5 年(43 648 h) 的风速数

据,其中:

$V_m = 8.02 \text{ km/h}, \sigma = 5.19 \text{ km/h}, V_{ci} = 3 \text{ km/h}, V_{co} = 23 \text{ km/h}, V_r = 13 \text{ km/h}$

风速分布曲线如图 2 所示。

按风速服从正态分布计算出 5 种风速所对应的概率 $p_1 \sim p_5$ 见表 1。

表 3 5 种实际风速及其概率

风速 $/(\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
概率	0.165 3	0.334 7	0.329 5	0.168 5	0.002 0

再由风功率 P 与风速 V 的关系得到各风功率值及其概率,见表 4。

表 4 各实际风功率及其概率

风功率/MW	0	0.098 1	0.787 7	1.5
概率	0.167 3	0.334 7	0.329 5	0.168 5

计算出等效容量 $P_w = n \times (p_2 \times P_2 + p_3 \times P_3 + p_4 \times P_4) = 245.314 \text{ MW}$,选取风机修复率为 0.006 7,计算出平均故障修复时间 MTTR' 为 149.253 7 h 的风机,广义停运率 FOR_{BS} 为 0.095 9,按照 1.2 的办法求得不同 zzc 系数下的 z 率,MTTS 如表 5 所示。

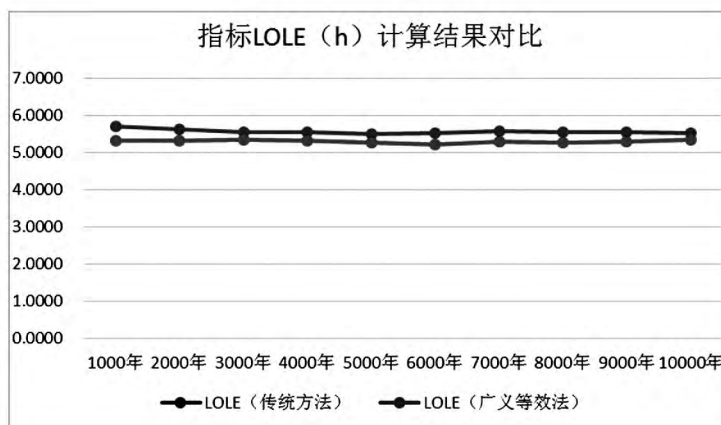


图 4 LOLE 结果对比

表 5 不同 zzc 系数下的 z 率和 MTTS

zzc 系数	z 率	MTTS/h
$zzc = 0.0025$	0.0225	44.444
$zzc = 0.0030$	0.0270	37.037
$zzc = 0.0035$	0.0315	31.746

至此,将 300 台组成 1.5 MW 的风电机组群看做 RTS 系统的第 33 台传统机组,计算中代入参数 P_w 、 FOR_{BS} 、 $MTTR'$ 和 $MTSS$,广义等效完成。

2.2 结果分析

以 zzc 系数取 0.003 为例分析,用传统的序贯蒙特卡洛法和广义等效法分别模拟 1000 年、2000 年……10000 年的情况,比较指标 EENS 和 LOLE,如图 3 和图 4 所示。

从图中可以看出使用广义等效法计算出的指标结果和传统方法的计算结果差别很小,下面再考察指标 EENS 和 LOLE 的精度,如图 5 所示。

当模拟 10 000 年时,各结果的比较如表 6 所示。

从表 6 中数据可以看出,当模拟 10 000 年时,使用广义等效法与使用传统方法得到的指标差值百分比在 5% 以下,而指标精度在 0.02 之上,由此可见广义等效法是有效的。

表 6 计算结果

	传统方法	广义等效法	两法的差值	差值百分比/%	计算精度
EENS / MWh	686.29	661.72	24.57	4	0.019
LOLE/h	5.54	5.35	0.19	3	0.015

3 结 论

1) 传统蒙特卡洛模拟法评估含大规模风电接

入的发电系统可靠性,其难点在于风机数量增多或风机状态数增多时,运算量很大。小容量风机和传统机组在系统中的地位是不平等的。所提出了广义等效法,将风电机组群一步步等效成 1 个传统机组。

2) k 率表征出现各个不同相邻风速波动的频率, z 率表征风机综合不稳定性,不同 k 率对 z 率的贡献不同,假设相邻 k 率对 z 率的贡献相差 10 倍,引入 zzc 系数后定义等效机组的平均稳定工作时间 MTTS。

3) 选取 RTS79 系统作为算例,考虑大规模风电(渗透率达 11.67%)的接入,使用广义等效法计算可靠性指标 EENS 和 LOLE,当模拟 10 000 年时(精度均在 0.02 上),结果分别为 661.72 MW 和 5.35 h,与传统蒙特卡洛模拟法的结果相比误差均在 5% 以内,有效性显而易见。

4) 广义等效不仅是一种方法,更是一种思维。所提方法为简化风电机组群模型提供了思路,对含大规模风电接入的发电系统可靠性评估有一定指导作用。

参考文献

- [1] 余民,杨晏宸,蒋传文,等. 风电并网后电力系统可靠性评估和备用优化研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2012(12): 100-104,135.
- [2] 蒋泽甫. 风电转换系统可靠性评估及其薄弱环节辨识 [D]. 重庆: 重庆大学,2012.
- [3] 雷潇. 风电机组短期可靠性预测模型与风电场有功功率控制策略研究 [D]. 重庆: 重庆大学,2014.
- [4] 何禹清,彭建春,孙芊. 考虑风电能量随机性的配电网可靠性快速评估 [J]. 中国电机工程学报, 2010(13): 16-22.
- [5] Dobakhshari, A. S. and M. Fotuhi - Firuzabad. A Relia-

bility Model of Large Wind Farms for Power System Adequacy Studies [J]. Energy Conversion, IEEE Transactions on, 2009, 24(3): 792–801.

- [6] Haghi, H. V., S. M. Hakimi, and S. M. M. Tafreshi. Optimal Sizing of a Hybrid Power System Considering Wind Power Uncertainty Using PSO – embedded Stochastic Simulation [J]. in Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), 2010 IEEE 11th International Conference on. 2010.

[7] 鲍晓慧, 侯慧. 电力系统可靠性评估述评 [J]. 武汉大学学报: 上海工学版, 2008(4): 96–101.

[8] 蒋小亮. 风电并网对电力系统可靠性和备用影响研究 [J]. 上海交通大学, 2011.

[9] 曲翀, 王晋丽, 谢绍宇, 等. 不同风速模型和可靠性指标对风电可信容量评估的影响 [J]. 电网技术, 2013

(10): 2896–2903.

[10] 石文辉, 别朝红, 王锡凡. 大型电力系统可靠性评估中的马尔可夫链蒙特卡洛方法 [J]. 中国电机工程学报, 2008(4): 9–15.

[11] 王学良. 风电场可靠性评估研究 [D]. 天津: 天津大学, 2009.

[12] Karki, R., H. Po, and R. Billinton. A Simplified Wind Power Generation Model for Reliability Evaluation [J]. Energy Conversion, IEEE Transactions on, 2006, 21(2): 533–540.

[13] Sulaeman, S., M. Benidris, and J. Mitra. A Method to Model the Output Power of Wind Farms in Composite System Reliability Assessment [J]. in North American Power Symposium (NAPS), 2014.

(收稿日期: 2015–02–12)

(上接第49页)

参考文献

[1] 梁国艳, 梁中华. 电流互感器饱和的检测方法及在微机母线保护中的应用 [J]. 东北电力技术, 2006(12): 66–70.

[2] 王燕. 电流互感器的误差及其对继电保护的影响 [J]. 东北电力技术, 2009(1): 66–70.

[3] 王优胤. 大型发电机变压器组差动保护用电流互感器选型 [J]. 东北电力技术, 2010(6): 25–28.

[4] 毕大强, 冯存亮, 葛宝明. 电流互感器局部暂态饱和识别的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2012(11): 24–27.

[5] 景敏慧, 孔萧迪. P类电流互感器饱和原因分析及对策 [J]. 电力系统自动化, 2007(11): 45–48.

[6] 任先文, 徐宏雷, 孙楷琪. 非周期分量对电流互感器饱和特性的影响的仿真 [J]. 电力系统保护与控制, 2009

(3): 30–33.

[7] 邓旭阳, 索南加乐, 李广. 基于参数识别的电流互感器的识别原理研究 [J]. 电力系统自动化, 2010(8): 42–45.

[8] 陈建玉, 孟宪民, 王志华. 电流互感器饱和对继电保护影响的分析及对策 [J]. 电力系统自动化, 2004(10): 32–35.

[9] 柳树. 电流互感器饱和过程分析及对策 [J]. 华北电力技术, 2009(3): 37–40.

[10] 陈玥名, 崔广泉, 刘长江. 电力电流互感器检测试验方法研究 [J]. 东北电力技术, 2009(11): 3–6.

作者简介:

何小飞(1986), 硕士, 工程师, 目前从事继电保护装置运维检修工作;

王锐(1975), 本科, 高级工程师, 主要从事变电检修技术工作.

(收稿日期: 2015–02–02)

(上接第57页)

参考文献

[1] 郭小江, 郑超, 尚慧玉, 等. 西藏中部同步电网安全稳定控制研究 [J]. 电网技术, 2010, 34(6): 87–92.

[2] 吕虎, 谢国平, 朱艺颖, 等. 青藏直流接入西藏电网数模混合仿真 [J]. 电网技术, 2013, 37(2): 455–459.

[3] 唐晓骏, 刘东冉, 陈麒麟, 等. 青藏直流接入后西藏地区电网电压/无功控制 [J]. 电网技术, 2010, 34(9): 94–99.

[4] 赵文强, 王杨正, 李林, 等. 青藏直流联网工程大负荷

试验策略研究 [J]. 电网技术, 2014, 38(11): 3052–3058.

[5] 吴冲, 刘汉伟, 董卫国, 等. 青藏直流联网后藏中电网安全稳定控制系统的重构 [J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(1): 54–57.

[6] 李惠军, 汤奕, 李雪明, 等. 电源送出安全稳定控制系统典型方案及装置主辅运设置原则分析 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(4): 141–145.

作者简介:

王郑锋(1982), 工程师, 主要研究领域为电网规划设计.

(收稿日期: 2015–02–28)

固定电压法与改进电导增量法 结合的光伏发电系统最大功率点跟踪

崔东君, 彭宇, 杨进

(国网北京顺义供电公司, 北京 101399)

摘要: 由于光照强度、光伏阵列温度、负载时时变化, 使光伏电池阵列的最大功率点也发生变化, 需采用适当的最大功率点跟踪(MPPT)算法提高光伏转换率。提出固定电压法与改进的电导增量法结合的MPPT方法, 先采用固定电压法将光伏阵列的工作点调整到最大功率点附近, 以保证跟踪的快速性; 而后利用变步长的电导增量法, 使工作点电压与最大功率点电压近似相等。仿真结果表明, 固定电压与电导增量法结合追踪最大功率点能够快速、准确地跟踪光伏阵列的最大功率点, 减少了在最大功率点振荡的能量损失, 提高了光伏发电系统的能量转换率。

关键词: 光伏阵列; 最大功率点跟踪; 固定电压法; 改进电导增量法

Abstract: As the light intensity, photovoltaic array temperature and load change from time to time, the maximum power point tracking (MPPT) of photovoltaic cell array is changed too, so it needs to adopt the appropriate MPPT algorithm to improve the photovoltaic conversion rate. The MPPT algorithm combined with constant voltage method and improved incremental conductance method is proposed. Firstly, constant voltage method is adopted to adjust the operating point of photovoltaic array near to maximum power point to ensure the fast MPPT. And then, improved incremental conductance method is adopted to make the voltage of operating point approximately be equal to the voltage of maximum power point. The simulation results show that the maximum power point of photovoltaic array can be tracked quickly and accurately combined with constant voltage method and improved incremental conductance method, which reduces the energy losses of maximum power point oscillation and improves the energy conversion rate of photovoltaic generation system.

Key words: photovoltaic array; maximum power point tracking; constant voltage method; improved incremental conductance method

中图分类号: TM732 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2015)03-0078-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.03.018

0 引言

目前新能源发电技术蓬勃发展, 尤其是光伏发电的应用已经进入寻常百姓家庭。政府的政策扶植和电力公司购买发电客户电能流程的便捷程度都促使着光伏发电应用的迅猛发展。光伏发电具有无噪声、无污染、取之不尽、用之不竭等优点, 是一种前景广阔的绿色能源^[1]。

从光伏发电技术上说, 发电效率仍有待提高, 以便为发电客户带来更大的经济效益。光伏发电系统中制约发电量的主要因素是电池阵列的发电量受环境因素影响。电池表面温度和日照强度的变化都可以导致输出特性发生较大的变化, 另外光伏电池的转换效率低且价格昂贵。因此需要加装最大功率追

踪(maximum power point tracking, MPPT)装置, 捕捉光伏电池的最大功率点, 提高太阳能的利用率。常用的MPPT方法为扰动观察法、固定电压法、增量电导法。其中扰动观察法被测参数少, 易于实现, 但在最大功率点附近会产生振荡, 环境变化较快时功率损失大且可能发生误判; 固定电压法最为简单, 但其忽略了温度变化的影响, 正逐渐被其他方法取代; 电导增量法通过修改逻辑判断式减小了振荡, 但在步长和阈值的选择上存在一定的困难^[2]。

下面将固定电压法与改进的电导增量法相结合跟踪最大功率点, 当外界环境突变时, 采用固定电压法将光伏阵列的工作点电压调整到最大功率点附近, 以保证跟踪的快速性。在此基础上, 采用变步长的电导增量法进一步靠近最大功率点, 提高光伏阵列的利用效率。两种方法相结合, 相互取长补短, 达

到高效追踪最大功率点的目的。

1 光伏电池特性

1.1 光伏阵列的数学模型^[3]

定义 t_c 为在任意太阳辐射强度 R (W/m^2) 及任意环境温度 t_a ($^{\circ}C$) 下的电池温度, 则有如下公式:

$$t_c = t_a + t^* R \quad (1)$$

式中, t^* 为光伏电池模块的温度系数, $^{\circ}C \cdot m^2/W$ 。

在参考条件下, I_{sc} 为短路电流, U_{oc} 为开路电压, I_m 、 U_m 为最大功率点电流和电压, 则当光伏阵列电压为 U , 其对应的电流 I 为

$$I = I_{sc} \left[1 - C_1 \left(e^{\frac{U}{C_2 U_m}} - 1 \right) \right] \quad (2)$$

$$C_1 = \left(1 - I_m / I_{sc} \right) e^{-\frac{U_m}{C_2 U_m}} \quad (3)$$

$$C_2 = \left(U_m / U_{oc} - 1 \right) \ln \left(1 - I_m / I_{sc} \right) \quad (4)$$

考虑太阳辐射变化和温度变化时

$$I = I_{sc} \left[1 - C_1 \left(e^{\frac{U-dC}{C_2 U_m}} - 1 \right) \right] + dI \quad (5)$$

$$dI = \alpha R / R_{ref} \cdot dt + \left(R / R_{ref} - 1 \right) I_{sc} \quad (6)$$

$$dU = -\beta dt - R_s dI \quad (7)$$

$$dt = t_c - t_{ref} \quad (8)$$

式中, R_{ref} 、 t_{ref} 为太阳辐射和光伏电池温度参考值, 一般取 $1 kW/m^2$, $25^{\circ}C$; α 为在参考日照下, 电流变化温度系数, $A/^{\circ}C$; β 为在参考日照下, 电压变化温度系数, $V/^{\circ}C$; R_s 为光伏模块的串联电阻, Ω 。

1.2 光伏电池特性曲线

光伏电池既非恒流源, 也非恒压源, 而是一种非线性直流电源。其输出电流在大部分工作电压范围内近似恒定, 在接近开路电压时, 电流下降很大。选用光伏电池在不同温度、辐射强度下的 $P-U$ 特性曲线如图1、图2所示。

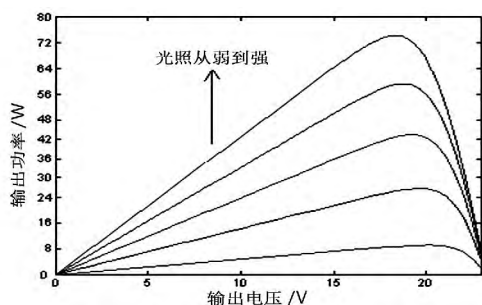


图1 不同光强条件下电压和功率的关系曲线

由图1可见, 光伏电池在任何时刻都存在一个最大功率输出的工作点, 而且随着光强和温度的变化而变化。因此需采用 MPPT 控制, 跟踪不同条件

下的最大功率点, 提高光伏电池能量的利用率^[4]。

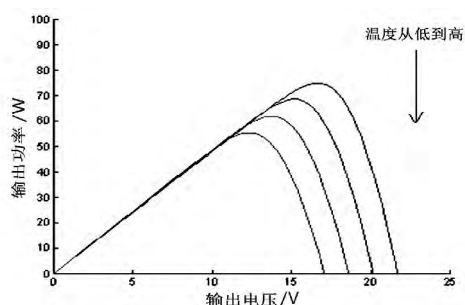


图2 不同温度时电压和功率的关系曲线

2 MPPT 控制算法

2.1 固定电压法原理

不同日照时的阵列最大功率点位置基本都位于某个恒定电压 $U_m = \text{const}$ (const 为常数) 的垂直线附近, 特别是日照比较强时该点距离 U_m 更近。在工程上允许把最大功率点出现的轨迹近似处理为一根电压垂直线 $U_m = \text{const}$, 且最大功率点电压约为开路电压的 78%。调整工作点电压至 $0.78U_{oc}$ 处以提高光伏阵列的效率, U_{oc} 为开路电压值^[5]。

2.2 电导增量法原理

电导增量法是通过比较光伏电池阵列的瞬时导纳与导纳变化量的方法来完成最大功率点的跟踪。

$$P = U \times I \quad (9)$$

$$\frac{dP_{\max}}{dU} = I + U \times \frac{dI}{dU} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{dI}{dU} = -\frac{I}{U} \quad (11)$$

其达到最大功率点的条件是当输出电导的变化量等于输出电导的负值时, 光伏电池阵列工作于最大功率点。随后通过比较光伏阵列的电导增量和瞬间电导来改变控制信号, 在电导增量大于瞬间电导的区域增加工作电压, 在电导增量小于瞬间电导的区域减小工作电压, 当两者相等时, 电压保持不变; 在电压不变电流增加时, 增加工作电压, 在电压不变电流减小时, 减小工作电压。电导增量法控制流程图^[6]如图3所示。

2.3 固定电压法与改进电导增量法结合的 MPPT

利用固定电压法可将工作点电压与最大功率点电压之差减小, 但工作点还未到最大功率点。但固定电压法跟踪最大功率点忽略了温度对光伏阵列的影响。当温差较大时固定电压法的精度较低。进而引

入电导增量法使工作点进一步向最大功率点靠近。

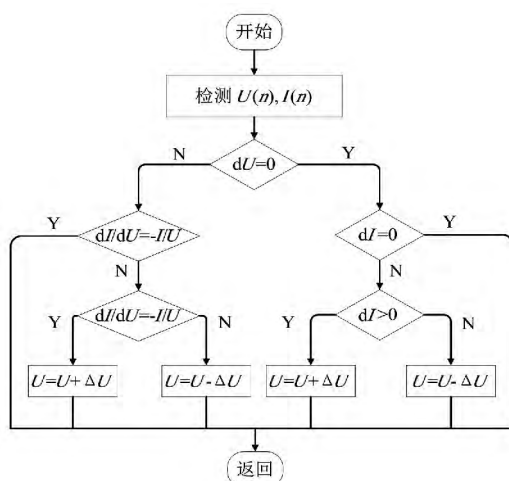


图 3 电导增量法最大功率点追踪控制流程图

传统的电导增量法能够根据外界环境的变化做出正确的跟踪判断,但它的步长是固定的。步长过小会造成功率损失,步长过大又会是光伏阵列在最大功率点处振荡加剧^[7]。针对以上不足,引入将固定跟踪步长改为可变步长,并且根据工作点离最大功率点的远近调整步长大小的方法。下面分别加以说明。

由光伏阵列的 $P-U$ 曲线可知,在最大功率点 $P_{\max}$ 处有 $dP/dU = 0$,而在其它点 dP/dU 均不为 0。因此令 $\text{step} = N \cdot |dP/dU|$ 作为算法中步长数据, N 为比例因子。当工作点与最大功率点很近时, $|dP/dU|$ 随之减小,以较小步长调整工作点电压;当工作点远离最大功率点时, $|dP/dU|$ 随之增大,以较大步长调整工作点电压^[8]。

先采用固定电压法进入最大功率点附近后,改用变步长方法进行 MPPT 的控制方法。相对于传统的 MPPT 方法,该方法控制效果好,调整速度快,适应于不同环境下的控制情况。其步骤为:当光伏阵列输出电压在固定电压控制算法设定的电压 $\pm \Delta U$ 之外,执行固定电压算法;当光伏阵列的输出电压在控制算法设定的电压 $\pm \Delta U$ 之内,进行变步长的电导增量法;在执行电导增量法时,根据 $|dP/dU|$ 不断调整步长大小。算法流程图如图 4 所示。

3 仿真分析

利用 Matlab(一种数学计算与仿真分析软件)软件对常用的固定电压法(即 constant voltage tracking, CVT)、扰动观察法(perturbation and observation, P&O)、电导增量法(increment conductance, INC)的

最大功率点跟踪情况进行仿真分析。将这 3 种方法的结果与固定电压法与电导增量法结合的方法进行比较,说明固定电压法与电导增量法结合的最大功率点跟踪有其优势。

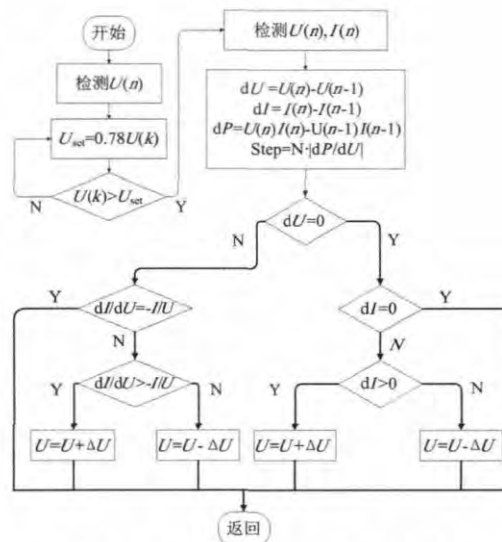


图 4 固定电压与电导增量结合的最大功率点追踪控制流程图

以尚德公司生产的 STP-260 光伏阵列为例,其参数为: $I_{sc} = 8.09 \text{ A}$, $U_{oc} = 44.0 \text{ V}$, $I_m = 7.47 \text{ A}$, $U_m = 34.8 \text{ V}$,短路电流温度系数为 0.055% ,开路电压温度系数为 -150 mV/k 。仿真温度设为 $t = 50^\circ\text{C}$,通过仿真得到在 $S = 1000 \text{ W/m}^2$ 时最大功率点功率为 260.5 W ,在 $S = 400 \text{ W/m}^2$ 时的最大功率点功率为 97.34 W 。在 0.2 s 时光强从 $S = 1000 \text{ W/m}^2$ 变化到 $S = 400 \text{ W/m}^2$,在 0.3 s 时光强从 400 W/m^2 变化到 1000 W/m^2 。采用固定电压法、扰动观察法、电导增量法和固定电压法与电导增量法结合的方法(简称结合法)分别进行 MPPT 仿真。根据光伏阵列的输出电压、温度、光强、短路电流温度系数及开路电压温度系数计算出光伏阵列的输出电流。

表 1 不同追踪方法的输出功率均值

MPPT 方法	P/W	
	$S = 1000 \text{ W/m}^2$	$S = 400 \text{ W/m}^2$
CVT	258.8	95.2
P&O	259.1	96.7
ICA	259.2	96.8
结合法	259.8	97.2

图 5 ~ 图 8 为不同方法的仿真波形比较,图 9 表示结合法中固定电压法执行时间,纵坐标为 1 表示 MPPT 执行的是固定电压法;为 0 表示 MPPT 执行的是电导增量法。表 1 列出了各方法下的输出功

率均值。

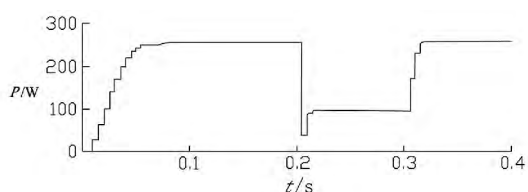


图 5 固定电压法输出功率曲线

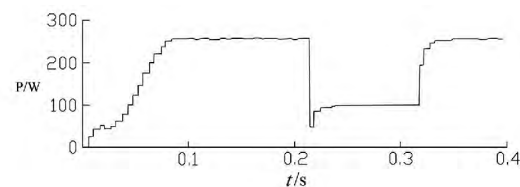


图 6 扰动观察法输出功率曲线

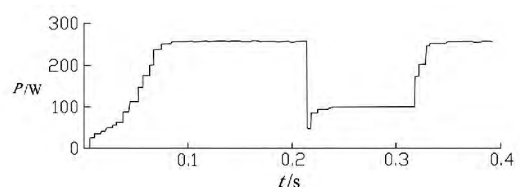


图 7 电导增量法输出功率曲线

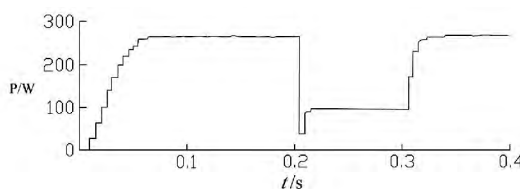


图 8 结合法输出功率曲线

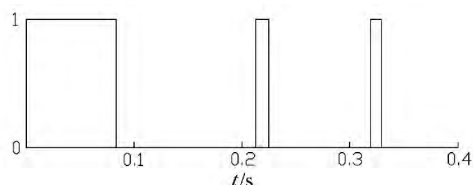


图 9 结合法中固定电压法运行时间

从图 5 可以看出,固定电压法能迅速到达最大功率点附近,但当外部环境条件发生变化时,固定电压法功率损失较多;图 6 所示 $\Delta d = 0.01$ 的扰动观察法,此处步长选择较小,跟踪速度较慢,若选择大步长则会产生较大振荡;图 7 为电导增量法,其跟踪速度较慢,准确性和扰动观察法相近;图 8 为结合法,其具有了固定电压法的快速性,又有电导增量法的准确性。在光强突变时结合法采用固定电压法对最大功率点进行快速跟踪,使工作点快速移动到最大功率点附近;在稳态输出时,采用电导增量法,不断逼近最大功率点。

表 1 数据显示固定电压与电导增量结合的方法跟踪效果高于其他方法,从仿真分析可知,结合法能更有效地跟踪最大功率点,使输出功率更大。

4 结 论

在常用的 MPPT 算法基础上提出了固定电压法与电导增量法结合的 MPPT 算法。该方法在固定电压法的基础上加入了电导增量法。先利用固定电压法将工作点电压快速调整到最大功率点附近,再由变步长的电导增量法准确跟踪最大功率点,此处对电导增量法步长的选取进行了改进,引入变步长的电导增量法,使其跟踪效率进一步提高。最后的仿真说明此方法切实有效。

参考文献

- [1] 王岩,李鹏,唐劲飞. 基于模糊参数自校正 PID 方法的光伏发电系统 MPPT 控制 [J]. 电力自动化设备,2008,28(3):55-58.
- [2] 周林,武剑,栗秋华,等. 光伏阵列最大功率点跟踪控制方法综述 [J]. 高电压技术,2008,34(6):1145-1154.
- [3] 茆美琴,余世杰,苏建徽. 带有 MPPT 功能的光伏阵列 Matlab 通用仿真模型 [J]. 系统仿真学报,2005,17(5):1248-1251.
- [4] 乔兴宏,吴必军,邓赞高,等. 模糊/PID 双模控制在光伏发电 MPPT 中应用 [J]. 电力自动化设备,2008,28(10):92-95.
- [5] 熊远生,俞立,徐建明. 固定电压法结合扰动观察法在光伏发电最大功率点跟踪控制中应用 [J]. 电力自动化设备,2009,29(6):85-88.
- [6] Tac-Yeop Kim, Ho-Gyun Ahn, Seung Kyu Park, et al. A Novel Maximum Power Point Tracking Control for Photovoltaic Power System under Rapidly Changing Solar Radiation [C]. Proceeding of IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2001:1011-1014.
- [7] 陈兴峰,曹志峰,许洪华,等. 光伏发电的最大功率跟踪算法研究 [J]. 可再生能源,2005,119(1):8-11.
- [8] 冯冬青,李晓飞. 基于光伏电池输出特性的 MPPT 算法研究 [J]. 计算机工程与设计,2009,30(17):3925-3931.

作者简介:

崔东君(1984),工学硕士,工程师,从事供电方案制定、工程组织相关工作;

刘彭宇(1979),工学硕士,顺义供电公司营销部主任,从事营销管理工作;

杨进(1971),工学学士,顺义公司营销部副主任,从事客服专业管理工作。(收稿日期:2015-01-15)

300 MW 汽轮机节能降耗改造分析研究

魏志全¹, 彭林², 袁锋³

(1. 神华国能循环流化床(CFB)技术研发中心, 四川 内江 641000;

2. 四川电力工业调整试验所, 四川 成都 610011;

3. 四川白马循环流化床示范电站有限责任公司, 四川 内江 641000)

摘要: 简要介绍了 300 MW 机组汽轮机主要技术参数, 重点分析了轴封系统在运行中出现的故障及对经济性的影响, 采取了行之有效的解决办法, 对系统改造前后的数据进行了分析, 对同型机组有借鉴意义。

关键词: 汽轮机; 轴封系统; 运行数据; 改造依据; 节能降耗

Abstract: The main technical parameters of steam turbine in Baima 300 MW unit are introduced briefly. The analysis gives emphasis on the failures occurring in the operation and the influence of gland seal system on economy. Through the successful experiences of the reconstruction, the related parameters before and after the reconstruction are analyzed, which gives a useful reference to the units of same kind.

Key words: steam turbine; gland seal system; running parameter; reconstruction basis; energy saving and consumption reducing

中图分类号: TK268 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2015)03-0082-03

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.03.019

0 概述

神华集团四川白马公司 31 号机组锅炉岛由法国 ALSTOM 公司设计制造, 配套汽轮机为东方汽轮机厂生产的 N300-16.7/537/537-8 型汽轮机和东方电机厂生产的 QFSN-300-2-20 型发电机(简称 31 号机组)。31 号机组于 2006 年 4 月 17 日通过国内 168 h 满负荷试运行并投入商业运行。

汽轮机型号为 N300-16.7/537/537-8 型, 亚临界、单轴、双缸双排汽、中间再热、冷凝式汽轮机; 高压排汽缸压 3.527 MPa, 高压排汽缸温度 302.6 °C, 中压主汽门前压力 3.18 MPa, 中压主汽门前温度 537 °C, 额定蒸汽流量 904 t/h。

1 汽轮机轴封系统简介

汽轮机汽封系统的主要作用是为了防止蒸汽沿高、中压缸轴端向外泄漏, 甚至窜入轴承箱致使润滑油中进水, 防止空气漏入低压汽缸而破坏机组的真空。

汽轮机高中压轴封、隔板汽封采用高、低齿“尖

齿”汽封, 低压轴封、隔板汽封采用斜平齿铜汽封。

轴封系统由轴端汽封的供汽、漏汽管路, 主汽阀和主汽调节阀的阀杆漏汽管路, 中压联合汽阀的阀杆漏汽管路以及相关设备组成。轴封供汽采用三阀系统, 即在汽轮机所有运行工况下, 供汽压力通过 3 个调节阀即高压供汽调节阀、辅助汽源供汽调节阀和溢流调节阀来控制, 使汽轮机在任何运行工况下均自动保持供汽母管中设定的蒸汽压力。辅助汽源供汽站选用了两种汽源供汽, 除机组本身的再热冷段外, 还增加了本机组以外的辅助蒸汽供汽, 机组启动或低负荷运行时由辅助蒸汽经辅助汽源站调节阀, 进入自密封系统。此外, 为满足低压缸轴封供汽温度要求, 在低压轴封供汽母管上设置了一台喷水减温器, 通过调节其喷水量, 从而实现减温后的蒸汽满足低压轴封供汽要求。

2 汽轮机运行参数分析

该机组 2008 年进行了一次 A 修后, 机组长期处于运行状态, 前期参数基本稳定, 但随着运行时间的积累, 汽轮机参数逐渐出现异常, 主要体现在: 汽

轮机存在汽耗率较高的现象; 汽轮机润滑油内含水量增加; 汽轮机大轴振动增加; 汽轮机转子轴向位移增大。

汽轮机运行参数的异常表现引起了公司专业技术人员的高度重视, 并组织专业人员进行了具体分析, 初步认为汽轮机轴封系统出现了泄漏以及汽轮机叶片可能出现了结垢。

为了检查设备状况, 掌握机组热耗指标, 白马公司委托四川省电力工业调整试验所于 2013 年 8 月 5 日至 8 月 7 日进行了大修前的热力试验, 汽轮机试验数据见表 1。

表 1 大修前汽轮机热力试验数据

单位	200 MW	250 MW	300 MW
	工况	工况	工况
试验负荷/MW	197.2	251.8	295.0
试验主汽流量/(t·h ⁻¹)	640.5	826.3	975.7
试验热耗/(kJ·kWh ⁻¹)	9 029.2	8 804.9	8 754.0
修正后热耗/(kJ·kWh ⁻¹)	8 836.9	8 484.1	8 262.4
高压缸效率/%	83.44	82.31	83.51
中压缸效率/%	92.76	92.92	93.01
系统泄漏量/%	1.132	1.119	1.267

注: 所有数据均来自于四川省电力工业调整试验所的试验报告。

通过分析汽轮机大修前的试验数据, 白马公司和四川省电力工业调整试验所的专业技术人员取得了一致意见, 认为: 1) 机组额定负荷试验得到的修正热耗高于设计值(THA 工况), 系统存在一定的内漏及外漏, 是导致热耗增加的原因之一; 2) 机组长期运行, 存在一定的老化, 汽封系统漏汽量增大以及通流部分可能存在结垢也是导致热耗升高的原因(31 号机组 2008 年进行了 1 次 A 修, 已 5 年未 A 修); 3) 另外锅炉冷渣器、灰控阀使用了凝结水作为冷却介质, 低加回热系统运行方式偏离了设计方式是导致热耗上升的原因之一。

3 汽轮机节能降耗改造的依据

四川白马公司通过分析 31 号机组 A 修前试验数据, 找到了为汽轮机进行节能降耗改造的方向, 同时对国内同类型已做过相同技术改造的机组进行了大量的技术咨询和资料收集工作。技术资料证明汽

轮机的梳齿型齿汽封存在一定的缺陷, 汽封系统漏汽量增大以及通流部分结垢导致热耗升高, 目前使用较多的蜂窝状轴封密封可以明显改善此项技术缺陷。汽轮机叶片结垢后通过叶片粒化处理后可明显优化汽轮机运行参数, 因此公司决定对汽轮机的相关部件进行技术改造, 更换汽轮机轴封系统的全部汽封以及对汽轮机叶片进行粒化处理。

4 汽轮机节能降耗改造及试验对比

汽轮机揭缸检查可以明显看出原来梳齿型密封已有部分残缺, 且锈蚀较为严重, 这将影响到轴封漏汽量的增加。机组大修期间对所有汽封进行了更换。

汽轮机揭缸检查时还发现, 汽轮机叶片上积累的水垢较为严重, 这可能与机组水质控制且长期运行有直接关系。通过采用国内先进的粒化处理技术, 全部清除了叶片上的水垢, 基本达到了汽机叶片出厂时的洁净程度。

白马公司 31 号机组完成机组 A 修投入运行后, 2013 年 12 月 24 日至 12 月 25 日进行了大修后的热力试验, 以检验机组大修效果, 汽轮机试验数据见表 2。

表 2 大修后汽轮机热力试验数据

单位	200 MW	250 MW	300 MW
	工况	工况	工况
试验负荷/MW	199.9	263.6	295.7
试验主汽流量/(t·h ⁻¹)	588.4	808.7	925.5
试验热耗/(kJ·kWh ⁻¹)	8 171.2	8 290.1	8 281.9
修正后热耗/(kJ·kWh ⁻¹)	8 410.4	8 232.1	8 088.3
高压缸效率/%	80.11	80.45	81.94
中压缸效率/%	94.73	94.21	93.98
系统泄漏量/%	0.452	0.188	0.437

注: 所有数据均来自于四川省电力工业调整试验所的试验报告。

5 汽轮机节能降耗改造的结论

通过比较汽轮机机组 A 修前、后在 200 MW、250 MW 以及 300 MW 工况的试验数据可以看出以下效果:

1) 汽轮机高压缸效率、中压缸效率发生了明显

变化(高压缸效率下降,中压缸效率上升);

2) 通过对系统阀门进行维修或更换,降低了系统的泄漏量,汽轮机蒸汽流量得到了有效降低;

3) 汽轮机修正后的热耗分别下降了 426.5 kJ/kWh、252.0 kJ/kWh 和 174.1 kJ/kWh;

4) 汽轮机节能改造后,较大幅度地降低了机组的热耗,取得了较为显著的节能效果;

5) 对机组经济性的影响(仅计算发电煤耗一项)发电煤耗按下式进行计算。

$$b_{fd} = HR / (\eta_{gl} \times \eta_{gd} \times 29.307)$$

式中, b_{fd} 为发电煤耗, g/kWh; HR 为汽机热耗率, kJ/kWh; η_{gl} 为锅炉效率设计值(BMCR 工况), %, ALS-TOM 提供的锅炉效率设计值为 91.9%; η_{gd} 为管道热耗率取 99%。

在 300 MW 负荷情况下发电煤耗的变化为

$$\begin{aligned} \Delta b_{fd} &= \Delta HR / (\eta_{gl} \times \eta_{gd} \times 29.307) \\ &= 174.1 / (0.919 \times 0.99 \times 29.307) \\ &= 6.53 \text{ (g/kWh)} \end{aligned}$$

以 31 号机年运行小时数 5 000 h 计算,年发电量 150 GWh,累计年节约煤量约为 9 796 t,以公司入

炉年均标煤单价 815 元/t 计算,年节约费用近 800 万元,如果机组平均负荷降低,热耗率还将进一步降低,考虑到影响机组发电煤耗的诸多因素如机组负荷率、厂用电率、环境温度、机组老化、排污等,节约费用只能是一个大概数字,但实际节约的费用仍相当可观。

由此可见,大修后的汽轮机在各项参数上都有了较高幅度的增长,但在提高缸效率方面仍具有很大的空间。汽轮机通流部分的改造是提高机组效率的有力措施。通过减少轴封、隔板汽封漏汽以及减少漏汽对下一级汽流流场的扰动来提高效率 and 整机效率。总体来看,整机改造后机组效率可提高,热耗率下降,出力增加,效果显著。

参考文献

- [1] 吴季兰. 汽轮机设备及系统 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [2] 景朝辉. 热工理论及应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.

(收稿日期: 2015-02-12)

(上接第 41 页)

- [1] 罗毅,周窗立,刘向杰. 多层次灰色关联分析法在火电机组运行评价中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(17): 97-103.
- [2] 熊浩,孙才新,张昀,等. 电力变压器运行状态的灰色层次评估模型 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(7): 55-59.
- [3] 戴婷,宋斌,彭正洪. 基于灰色层次分析法的变电站通信网路状态评价 [J]. 武汉大学学报: 工版, 2011, 44(4): 526-529.
- [4] 冯利法,杨新宇,朱誉,等. 基于熵权和多级物元分析的汽轮机 DEH 调节系统状态综合评价 [J]. 热能动力工程, 2009, 24(5): 583-587.
- [5] 张建,李铁骊. 基于 DHGF 法的船舶操纵性综合评价 [J]. 中国舰船研究, 2010, 5(6): 56-59.
- [6] 钱学森,于景元,戴汝为. 一个科学新领域——开放的复杂巨系统及其方法论 [J]. 自然杂志, 1990, 13(1): 3-10.
- [7] 顾基发,唐锡晋,朱正祥. 物理-事理-人理系统方法论综述 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2007, 7(6): 51-60.

- [6] 邓聚龙. 灰预测与灰决策 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
- [7] 谢季坚,刘承平. 模糊数学方法及其应用(第二版) [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2004.
- [8] Victor R L. A Novel Cryptosystem Based on Grey System Theory and Genetic Algorithm [J]. Applied Mathematics and Computation, 2005, 170(2): 1290-1302.
- [9] 陈士涛,杨建军,张志峰,等. 基于 DHGF 算法和三角模糊数的装备研制风险评价 [J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(8): 54-58.
- [10] 宾光富,李学军, DHILLON Balbir-S. 基于模糊层次分析法的设备状态系统化评价新方法 [J]. 系统工程理论与实践, 2010, 30(4): 744-749.

作者简介:

肖屏(1981), 硕士研究生, 主要研究方向为电力设备状态监测与故障诊断, 高压直流输电;

王渝红(1971), 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为电力设备状态监测与故障诊断、电力系统稳定与控制、高压直流输电。

(收稿日期: 2015-04-28)

四川省光伏发电开发利用现状分析及发展

吴晓刚, 黄 睿

(国网四川省电力公司电源技术中心, 四川 成都 610072)

摘 要: 对四川电网中的光伏电站的发展现状进行了分析,总结了其对电网安全稳定运行的影响,并提出了发展光伏发电的一些建议和措施。

关键词: 光伏发电; 四川电网; 安全运行

Abstract: The development status of photovoltaic power stations in Sichuan power grid is analyzed, its impact on the safe and stable operation of power grid is summarized, and some suggestions and measures for the development of photovoltaic power generation are proposed.

Key words: photovoltaic power generation; Sichuan power grid; safe operation

中图分类号: TK51 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2015)03-0085-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.03.020

1 四川省发展光伏发电的必要性

1.1 环境容量有限

四川省作为长江上游的生态屏障,肩负着维护长江上游生态的重任。固有的地形地貌,又使四川省主要人口和主要产业都聚集在盆地腹心地区。特殊的地理位置和和几千年形成的经济布局,使四川的环境容量相对有限,因此,必须满足低能耗、低污染的要求。

1.2 盆地地形需要

四川盆地是全国酸雨污染最严重的地区之一。固有的盆地地形,使大气污染难以扩散。一方面,盆地地形加剧了本地的大气污染,另一方面四川的废气排放量又明显偏高。大力开发使用无污染的光伏发电,对减少以二氧化碳为代表的废气排放具有重要作用。

1.3 降低生产成本

随着资源日趋枯竭,同时对环保的要求越来越高,化石能源开采成本必然大幅上升。随着移民安置和生态保护标准提高,水电的发电成本也将明显

上升。与此同时,光伏发电的开发成本由于技术的快速发展而不断降低。大力发展光伏发电,有利于降低四川企业的生产成本和竞争能力。

1.4 供求需要平衡

四川已在整体上进入工业化中期,高能耗工业发展迅速。目前,六大高耗能工业占四川省工业增加值的比重已超过全国的平均水平。面对中国的化石能源现状,大力增加光伏发电的产能,可以有效弥补能源供求缺口。

预计2015年四川电网需电量和最高负荷分别约225 000 GWh和4 250 MW/h,“十二五”期需电量和最高负荷年均增长率分别约7.8%和9.5%;2017年四川电网需电量和最高负荷分别约258 000 GWh和4 950 MWh;2020年四川电网需电量和最高负荷分别约302 000 GWh和60 200 MWh,“十三五”期需电量和最高负荷年均增长分别约6.1%和7.2%。

2 四川省光伏发电面临的主要问题

2.1 日照时间相对不足

表1 四川电网2006—2013年电力供需增长情况表

年份	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
全社会用电量/GWh	105 940	117 750	121 340	132 460	154 900	174 800	183 070	194 900
全网最大负荷/MW	17 870	20 300	20 900	22 920	27 000	31 000	32 800	35 500
利用小时数/h	5 928	5 800	5 806	5 779	5 737	5 639	5 581	5 490

表 2 四川电网电力需求预测

年份	2013 年	2015 年	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	2020 年
需电量/GWh	194 900	225 000	238 700	258 000	268 700	285 100	302 000
最高负荷/MWh	35 500	42 500	45 560	49 500	52 360	56 130	60 200
利用小时数/h	5 490	5 294	5 240	5 212	5 133	5 080	5 017

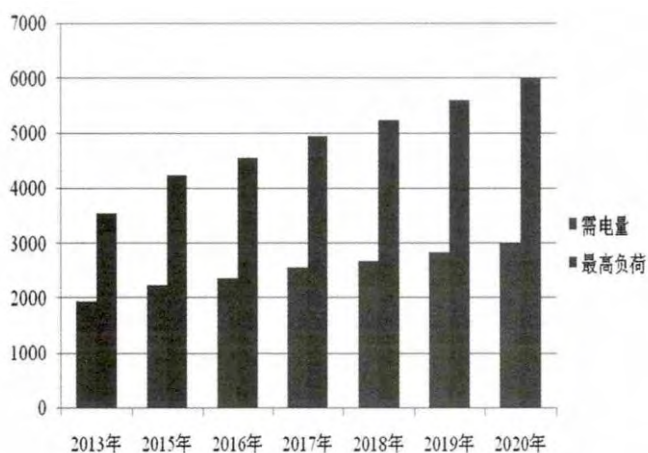


图 1 四川电网电力需求预测

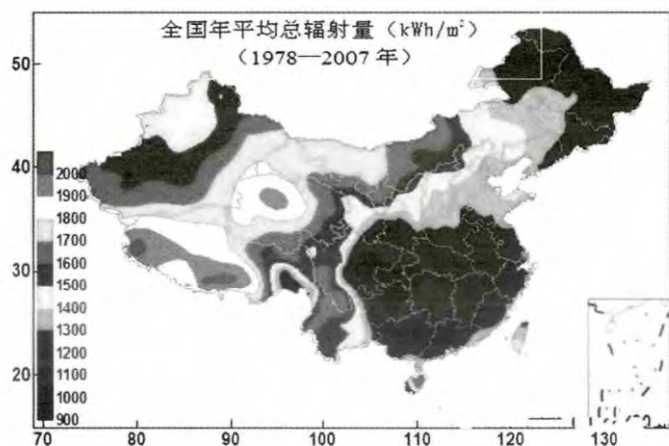


图 2 国家气象局风能太阳能资源评估中心提供的中国 1978—2007 年平均的总辐射年总量空间分布(kWh/m^2)

尽管太阳能是取之不尽的新能源,但不同地区的太阳能资源却存在明显差异。中国太阳能资源分布的特点是,青藏高原为高值中心,四川盆地值为低值中心。四川的气候复杂多变,西部是川西高原,东部是川东盆地,全年云雾多、日照少,有云雾的阴天每年平均占 200 天以上,冬雾尤甚。由于盆地雨多、雾多、晴天较少,四川是太阳年辐射总量最小的省份之一。全省 21 个市州,除攀枝花、阿坝州的年平均日照时数高于 2 000 h,凉山州、甘孜州的年平均日照时数接近 2 000 h 外,其余 17 个市州的年平均日照时数,均低于 1 400 h。西部高原全年日照约 2 000

~2 500 h,太阳总辐射量多为 5 000 ~ 6 800 MJ/m^2 ;东部盆地全年日照范围 900 ~ 1600 h,盆西 900 ~ 1 200 h,盆中 1 200 ~ 1 400 h,盆东 1 400 ~ 1 600 h。从整体来看,四川省太阳能资源不具备开发优势,也不能成为未来能源供应主力;但可以根据区域特征,集中力量进行区域局部重点开发。

2.2 土地资源明显不足

四川的人均土地面积只相当于全国平均水平的四分之三,人均耕地面积不到全国的一半。大量占用土地用于光伏电站建设,受到较大限制。

2.3 新能源人才严重匮乏

在新能源产业发展中对各类人才的需求是很大的,四川省没有形成新能源产业人才培养体系,专门人才严重匮乏是制约新能源产业发展的关键因素之一。

3 四川省光伏发电项目开发情况

截止 2014 年 9 月,四川省已经建成的唯一一个光伏电站是树堡乡光伏电站,装机容量为 30 MWh。目前,省内所有太阳能发电项目已核准(备案)的有 8 个,装机容量为 190 MWh。获得路条的项目有 4 个,装机容量为 155 MWh。处于前期调查阶段的项目有 5 个,装机容量为 110 MWh。属于十三五规划的项目一共有 6 个。整个已有的光伏项目总装机容量为 455 MWh。

目前甘孜州拥有 6 个光伏项目,累计装机容量为 195 MWh,占四川省总装机容量的 42.9%。其中获得路条的有 2 个,累计容量为 75 MWh;备案的有 2 个,累计容量为 60 MWh,属于十三五规划的有 2 个,累计容量为 60 MWh。凉山州拥有 7 个光伏项目,累计装机容量为 180 MWh,占四川省总装机容量的 39.6%。其中已经建成的有 1 个,容量为 30 MWh;已经核准的有 3 个,累计容量为 50 MWh;获得路条的有 2 个,累计容量为 80 MWh;备案的有 1 个,容量为 20 MWh。阿坝州拥有 3 个光伏项目,累计装机容量为 50 MWh,占四川省总装机容量的

11%。这3个光伏项目均属于十三五规划。攀枝花拥有1个光伏项目,容量为30 MWh,目前属于备案状态。

表3 四川省各市州光伏发电项目情况

地州市	电站名称	容量 /MW	预计年发电量 /MWh
甘孜	洛若乡光伏电站	50	71 840
	火古龙村光伏电站	50	77 050
	傍河乡光伏电站	35	十三五规划
	共塘岗光伏电站	50	十三五规划
	竹桑乡光伏电站	50	十三五规划
	树堡乡光伏电站	30	40 000
凉山州	会理光伏电站	50	40 433
	阿月光伏电站	10	14 221
	下大沟光伏电站	30	核准
	小龙潭光伏电站	30	41 586
	三棵樹光伏电站	50	核准
	红原光伏电站	20	十三五规划
阿坝州	若尔盖光伏电站	20	十三五规划
	壤塘光伏电站	50	59 990
攀枝花市	万家乡光伏电站	30	39 915

4 光伏发电对电网的影响

4.1 对系统有功/无功特性的影响

光伏发电具有以下特性: 1) 随机波动性; 2) 无转动惯量; 3) 低电压穿越的问题; 4) 易发生脱网; 5) 通过逆变器并网, 具备四象限控制及有功/无功解耦控制的能力。

光伏系统的这些特性, 使得大规模光伏接入后系统的稳态特性和暂态特性均发生变化, 这将影响到系统的规划和运行。光伏出力大幅、频繁的随机波动性对系统有功平衡造成了冲击, 进而影响到系统的一次、二次调频等运行特性, 对经济调度产生很大的影响, 频率质量越限等风险加大; 系统备用优化策略等将因光伏接入而发生变化, 对与常规能源的网源协调控制以及调频参数的整定等也提出了更多的适应性需求; 同时, 由于光伏电源是非旋转的静止元件, 随着接入规模的增大, 系统等效转动惯量降低, 对系统应对功率缺额和功率波动的能力形成威胁, 极端工况甚至会发生频率急剧变化, 触发低频减

载、高频切机等运行问题。

同时, 大规模光伏集中接入点更多是在远离负荷中心的地区, 当地负荷水平较低, 需要通过高压输电送出。由于接入地区的电网短路容量相对较小, 输电通道距离相对较长, 有功功率的随机波动将会对电网无功平衡特性产生影响, 进而造成沿途的母线电压大幅波动。同时, 由于光伏电源无功电压支撑能力较弱, 使得发生电压质量越限甚至电压失稳的风险加大; 另外, 分布式的光伏接入使得电网的结构发生变化, 单电源结构变成了双电源或多电源结构, 电网的潮流分布也相应的会发生很大变化, 进而对电网的电压质量、继电保护等问题都会产生很大影响。

4.2 对功角稳定性的影响

光伏电源本身不存在功角稳定问题, 但由于其随机波动性且无转动惯量, 同时, 大规模的光伏电源接入后改变了电网原有的潮流分布、通道传输功率, 减小了系统的等效转动惯量; 同时, 考虑故障时光伏具有与常规机组不同的动态支撑性能, 因此光伏电源接入后电网功角稳定性会发生变化, 变化情况取决于电网拓扑结构、电网运行方式及所采用的光伏电源控制技术、光伏并网位置及规模。光伏并网还可能因低电压穿越能力不足造成大面积脱网, 这将对系统稳定性带来的巨大的冲击。

光伏发电的随机波动性改变了系统运行特点, 与常规机组相比, 光伏发电由于采用逆变器并网, 具有不同的控制策略, 这些都会改变系统的阻尼, 不但对系统原有的机电振荡模式产生影响, 也会带来新频段范围的振荡。

4.3 对小扰动稳定性的影响

光伏电源虽不存在机械与电磁量不平衡的动力学稳定问题, 但也存在电气运行不稳定问题, 进而当大规模光伏并网后也会影响到电网的稳定性。

4.4 对电能质量的影响

由于光伏电源含有大量的电力电子器件, 当大规模的光伏电源接入系统后, 将会使得大量非线性负载也加入到系统中, 对电力系统的电能质量造成污染, 最突出的就是逆变器导致的谐波问题; 当太阳光变化剧烈, 引起输出功率变化过于剧烈的情况下, 将会产生较大的谐波, 也会出现大规模光伏集中并网时电流谐波叠加的问题等。现有的国内外光伏电站的运行经验表明: 即使单台并网逆变器的输出电

流谐波较小,多台并网逆变器并联后输出电流的谐波也有可能超标。针对光伏接入后的电能质量问题,已经提出抑制谐波的有效方法:包括增加谐波补偿器、无源固定频次滤波器、有源滤波器、混合滤波器等;同时,直流注入、电压波动、闪变以及电压偏差、频率波动等也是光伏并网需要解决的关键问题之一,产生原因是多方面的。目前,提出治理直流注入的有效解决方法包括:1) 安装隔离变压器;2) 设计合理的逆变器拓扑结构;3) 电容隔直;4) 检测补偿;5) 虚拟电容法等。

4.5 对配电系统保护的影响

光伏电源接入电网后使电网的故障特征发生了变化,将会对继电保护和自动装置产生如下影响:

1) 电网结构由单电源辐射状网络变为双电源、多电源的复杂拓扑结构,从而故障电流大小、方向及持续时间均发生变化,原有馈线保护都将受到影响,保护装置会发生误动或拒动;

2) 与变压器相连的逆变器会额外形成接地回路,影响零序电流或在单相接地故障时的对地电压,改变继电保护的動作特性;

3) 新增加的保护内容,如低电压穿越、输出谐波超标、输出直流分量超标和三相不平衡保护等;

4) 对配电系统中的线路三相1次重合闸以及变电站(开闭所)的备用电源自投装置应用产生一定的影响。

5 光伏发电发展的策略

5.1 提升光伏能源的地位

针对四川省的地理特点,提升光伏发电在四川省经济发展中的战略地位。通过对光伏发电的相关规划,统筹制订扶持政策,积极促进四川省光伏发电的健康发展。

5.2 加强光伏产业管理

四川省的光伏发电产业刚刚起步,尚未建立专职部门,因此容易出现效率低下、重复建设等问题,不利于光伏产业的健康发展。必须根据国家政策的要求和行业发展的实际需要,切实加强光伏发电的管理,引导地方政府遏制低水平重复建设,避免一哄而上式的发展和形成恶性竞争。

5.3 推进光伏产业的合理规划和布局

加强光伏产业的统筹规划,坚持政府引导,顺应

市场需要,扶持光伏发电企业的同时也帮助光伏设备的相关生产企业,使之扩大发展规模,积极参与国际竞争,推动资源整合。

5.4 积极开拓多样化市场

目前四川光伏电源具有开发价值的地方多在远离负荷中心的偏远地区,针对目前四川的地理环境特点,应坚持并网发电与离网应用相结合,支持小型光伏系统、分布式光伏系统、风光储联动应用系统、屋顶光伏发电系统等应用,开发多样化的光伏产品。通过制定合理的上网电价标准、并提供适度的财政补贴,同时推进金融扶持,积极扩大四川省的光伏市场。

参考文献

- [1] 赵争鸣,雷一,贺凡波,等. 大容量并网光伏电站技术综述 [J]. 电力系统自动化,2011,35(12):101-107.
- [2] 刘东冉,陈树勇,马敏,等. 光伏发电系统模型综述 [J]. 电网技术,2011,35(8):47-52.
- [3] 苏建徽,余世杰,赵为,等. 硅太阳能电池工程用数学模型 [J]. 太阳能学报,2001,22(4):409-412.
- [4] 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.
- [5] 王皓怀,汤涌,侯俊贤,等. 风光储联合发电系统的组合建模与等值 [J]. 中国电机工程学报,2011,31(34):1-9.
- [6] 郑颖楠,王俊平,张霞. 基于动态等效阻抗匹配的光伏发电最大功率点跟踪控制 [J]. 中国电机工程学报,2011,31(2):111-118.
- [7] 郑飞,张军军,丁明昌. 基于RTDS的光伏发电系统低电压穿越建模与控制策略 [J]. 电力系统自动化,2012,36(22):19-24.
- [8] 张国荣,张铁良,丁明,等. 具有光伏并网发电功能的统一电能质量调节器仿真 [J]. 中国电机工程学报,2007,27(14):82-86.
- [9] Tan Y T, Kirschen D S, Jenkins N. A Model of PV Generation Suitable for Stability Analysis [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2004,19(4):748-755.
- [10] Villalva M G, Gazoli J R, Filho E R. Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays [J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2009,24(5):1198-1208.
- [11] Li F, Li W, Xue F, et al. Modeling and Simulation of Large-scale Gridconnected Photovoltaic System [C] //

- Proceedings of the Power System Technology of IEEE, Aviva, 2010.
- [2] 王守相, 黄丽娟, 王成山, 等. 分布式发电系统的不平衡三相潮流计算 [J]. 电力自动化设备, 2007, 27(8): 11-15.
- [3] 梁双, 胡学浩, 张东霞, 等. 光伏发电置信容量的研究现状与发展趋势 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35(19): 101-107.
- [4] 汪海瑛, 白晓民. 并网光伏的短期运行备用评估 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(5): 55-60.
- [5] 李峰, 李威, 薛峰, 等. 规模化光伏电站与电网暂态交互影响定量分析 [J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(11): 50-56.
- [6] 龙源, 李国杰, 程林, 等. 利用光伏发电系统抑制电网功率振荡的研究 [J]. 电网技术, 2006, 30(24): 44-49.
- [7] 刘莉敏, 曹志峰, 许洪华. 50 kWp 并网光伏示范电站系统设计及运行数据分析 [J]. 太阳能学报, 2006, 27(2): 146-151.
- [8] 李斌, 袁越. 光伏并网发电对保护及重合闸的影响与对策 [J]. 电力自动化设备, 2013, 33(4): 12-17.
- [9] 杨国华, 姚琪. 光伏电源影响配电网线路保护的仿真研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(15): 75-79.
- [20] 黄伟, 雷金勇, 夏翔, 等. 分布式电源对配电网相间短路保护的影响 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(1): 93-97.
- [21] 丁明, 王伟胜, 王秀丽, 等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 1-14.
- [22] 孟祥林. 四川能源现状及其能源结构发展选择——从中国太阳能第一楼谈起 [J]. 西华大学学报: 社会科学版, 2006(5): 46-49.
- [23] 杜心远, 何荣华. 四川省新能源发展战略构想 [J]. 商场现代化, 2007(35): 216.
- [24] 四川省“十二五”能源发展规划 [EB/OL]. <http://wenku.baidu.com/view/9bfd69ec856a561252d36fe5.html>.
- [25] 陈国阶. 对四川发展若干战略问题的思考 [J]. 决策咨询通讯, 2010(1): 8-9, 72.
- (收稿日期: 2015-02-28)

(上接第32页)

做较为准确的计算,但对于山区架空输电线路的设计风速计算需考虑地形、下垫面等自然因素的复杂影响。在无建站条件和无资料地区,目前只有采用调整系数法进行估算;资料条件充足时可建立数值模型进行推算。当前国内外也开发了一些风能资源评估系统软件,可为计算山区架空输电线路设计风速提供一定的参考依据,由于目前的风能资源评估系统软件是平均风速的概念,尚缺乏一定的适用性,

(上接第45页)

次接线布置与继电保护配置都较为简单,然而与常规接线的厂站相比,其特殊性也是显而易见的。在保护设计、调试、整定等工作中应对以上列举的关键问题引起重视,根据需求和现场实际情况进行相应的取舍,力争实现方案的最优化。

参考文献

- [1] 刘文. 浅析发电机-变压器-线路组保护配置特点 [J]. 继电器, 2005, 33(15): 18-20.
- [2] 王晶晶. 发电机-变压器-线路组保护的配置特点及实例分析 [J]. 华北电力技术, 2007, 8: 37-52.
- [3] 郑太一, 马丽红, 王建勋, 等. 终端线路变压器组继电

推求山区架空输电线路设计风速还有待进行更进一步研究。

参考文献

- [1] GB 50009-2012, 建筑结构荷载规范 [S].
- [2] DL/T 5158-2012, 电力工程气象勘测技术规程 [S].
- 作者简介:
谢直卉(1982), 硕士, 工程师, 主要从事电力工程水文气象勘测工作。
- (收稿日期: 2014-12-29)

- 保护配置及变压器中性点接地方式研究 [J]. 吉林电力, 2009, 37(5): 5-7.
- [4] Q/CSG110039-2012, 南方电网继电保护配置技术规范 [S].
- [5] 国家电力调度通信中心. 国家电网公司继电保护培训教材 [J]. 2009.
- [6] 张鹏. 浅谈电流互感器二次绕组极性 [J]. 云南电力技术, 2013, 41(3): 61-63.
- [7] 王媛婷, 郭志彬. 变电站调度事故总信号改进方案 [J]. 电力与电工, 2012, 32(4): 86-88.

作者简介:

李津津(1988), 主要从事电网继电保护整定计算及运行管理工作。

(收稿日期: 2015-01-14)

先进控制理论在同步发电机调速控制系统中的应用

黄乙晋¹, 陈 钊²

(1. 华电四川发电有限公司攀枝花分公司, 四川 攀枝花 617065;

2. 四川省电力工业调整试验所, 四川 成都 610072)

摘 要: 发电机调速控制由于在电力系统稳定中所起的重要作用, 一直以来都是众多电力科研工作研究热点。近年来, 随着控制理论的快速发展, 发电机调速控制也进入了一个新的局面, 几乎所有的先进控制理论均被应用到同步发电机控制系统中, 但目前实际工程仍以传统控制方式为主。秉着理清思路、抓住重点、明确方向的目的对多种先进控制方法在同步发电机控制系统中的应用情况进行了剖析, 总结现有成果及问题, 同时对未来进行了展望。

关键词: 调速控制; 综合控制; 先进控制理论; 发电机

Abstract: Excitation and governor control are always the hot points in electric power research because of their significant effects in the stability of power system. With the rapid development of control theory, excitation and governor control has entered a new situation in recent years. Almost all of the advanced control theories are applied to control system of synchronous generator, but the traditional control is still most widely used in real project. In order to clear the thoughts, grasp the main points and clarify the direction, kinds of advanced control theories used in control system of synchronous generator are analyzed, the achievement and problems are summarized, and the future prospects are forecasted.

Key words: governor control; integrated control; advanced control theory; generator

中图分类号: TM621 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2015)03-0090-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2015.03.021

0 引 言

随着电力系统的逐步扩大和发电机单机容量的迅速增加, 保证系统运行的可靠性和稳定性, 提供合格的电能质量和良好的动态品质具有极其重要的意义。发电机组的励磁控制和调速控制是改善电力系统稳定运行的有效措施, 随着现代控制理论的发展和完善, 许多科技工作者进行了大量的研究工作, 将各种先进控制理论如反馈线性化、鲁棒控制、最优变目标、自适应控制、变结构控制、智能控制等用于改进和发展发电机控制系统^[1]。重点介绍上述先进控制理论方法在同步发电机调速及励磁调速综合控制系统中的研究情况, 并分析了各种先进控制理论的优缺点、适用范围及推广应用可行性, 谨供广大电力科研人员参考。

1 控制理论的发展^[1]

控制理论的发展经历了古典控制、现代控制

(包括线性最优控制) 和非线性控制几个发展阶段, 特别是近十几年来非线性控制理论的飞速发展, 为研究和解决电力系统问题提供了新的理论基础。然而, 认识的发展是无止境的。工程技术人员总是在不断地寻找更加直观、简明、有效的理论和方法。近20年来, 非线性系统控制理论在电力系统的应用得到了大量的研究。按方法主要分为: 基于微分几何理论的反馈线性化方法、直接反馈线性化方法、基于Lyapunov稳定性理论的控制方法、非线性变结构控制(滑动模态控制)方法和非线性自适应控制等。

1.1 反馈线性化方法

反馈线性化方法是非线性系统控制理论的一种有效方法, 包括基于微分几何理论的输入对状态反馈线性化、输入输出线性化、直接反馈线性化(DFL)方法和逆系统方法等。

1.1.1 基于微分几何理论的反馈线性化方法

对于式(1)所表示的单输入单输出的仿射非线性控制系统

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + g(x)u \\ y = h(x) \end{cases} \quad (1)$$

式中, $x \in R^n$ 为状态向量; u 为控制量; y 是系统输出; $f(x)$, $g(x)$ 和 $h(x)$ 是 R^n 上的光滑向量场。

基于微分几何理论的反馈线性化方法主要有2种方法: 输入对状态反馈线性化和输入输出线性化。前者主要用于研究非线性系统的正定(stabilization)问题, 后者用于研究系统的跟踪(track)和调节(regulation)问题。在系统满足一定的条件下, 这两种方法可以互相转化。

1) 输入对状态反馈线性化

若非线性系统(1)能被输入对状态反馈线性化, 则在一个邻域中存在一个微分同胚 $T: \Omega \rightarrow R^n$, 在新的坐标变量 $z = T(x)$ 下, 系统(1)变换为

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 \\ \dot{z}_n = \alpha(x) + \beta(x)u \end{cases} \quad (2)$$

并通过一个非线性反馈控制规律得

$$u = \beta^{-1}(x)(-\alpha(x) + v) \quad (3)$$

在新的控制 v 下, 系统(1)可精确转化为一线性系统为

$$\dot{z} = Az + Bv \quad (4)$$

对于线性系统(4), 可用各种成熟的线性系统控制方法来设计它的控制 v , 比如线性最优控制理论、极点配置等。这种方法的特点是: ①状态线性化是通过一个状态变换 $z = T(x)$ 和输入变换(非线性反馈控制规律(3))得到的, 需要用到系统所有的状态变量; ②新的状态变量 z 必须可以得到。如果没有直接的物理意义或者不可测量, 则需要原来的状态变量 x 来计算 z ; ③控制规律需要系统的精确模型, 理论上不具备对参数和模型不精确性的鲁棒性。

2) 输入输出线性化

非线性系统(1)在 $x_0 \in R^n$ 具有相对度(relative degree) $r, r \leq n$, 是指存在 x_0 的一个邻域 Ω

$$L_g^k h(x) = 0 \quad \forall x \in \Omega \quad 0 \leq k \leq r-2$$

$$L_g L_f^{r-1} h(x) \neq 0 \quad \forall x \in \Omega$$

输入输出线性化的方法是通过输出对时间微分 r 次, 直至控制 u 显式出现。 y 的 r 次微分为

$$\frac{d^r y}{dt^r} = \alpha(x) + \beta(x)u \quad (5)$$

其中, $\alpha(x) = L_f^r h(x)$; $\beta(x) = L_g L_f^{r-1} h(x)$

当 $\beta(x) \neq 0$, 通过非线性反馈控制得

$$u = \beta^{-1}(x)(-\alpha(x) + v) \quad (6)$$

得到 r 阶线性系统为

$$\frac{d^r y}{dt^r} = v \quad (7)$$

当 $r = n$ 时, 输入输出线性化同输入对状态线性化等价。当 $r < n$ 时, 系统(1)只能部分线性化。余下的 $(n-r)$ 阶系统成为系统的内部动态, 可以用零动态方法加以分析。这种方法具有以下特点: ①不需要状态变换, 只需要输出的 r 阶微分; ②控制规律需要系统的精确模型和状态来实现。

1.1.2 直接反馈线性化方法

对由式(8)描述的非线性系统

$$\dot{x}^{(n)} = f(x, x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(n-1)}, u, t) \quad (8)$$

其中, $x^{(i)} (i = 0, 1, \dots, n-1)$ 是状态变量; u 是控制变量。

定义

$$v = f(x, x^{(1)}, x^{(2)}, \dots, x^{(n-1)}, u, t) \quad (9)$$

如果函数 $f: u \rightarrow v$ 的逆函数存在且有唯一的解析解有

$$u = f^{-1}(x^{(i)}, v, t) \quad i = 0, 1, \dots, n-1$$

则可以通过非线性的反馈控制 u 将非线性系统(8)线性化成一个线性系统 $\dot{x}^{(n)} = v$ 。可以看出, 直接反馈线性化方法可以看做是输入输出线性化的一个特例。它不需要进行复杂的数学推导和坐标变换, 在工程应用上有一定的优越性。这种方法在电力系统的非线性控制中得到了大量的研究, 是一个主要的研究方向。

1.2 非线性变结构控制

变结构控制在电力系统的非线性控制中很早得到了应用, 比如早期的 Bang-Bang 控制。这种控制主要有两种形式: 一种是在微分几何方法的基础上, 对线性系统(4)采用线性变结构控制, 这一类方法仍然需要非线性控制反馈规律, 没有充分地利用变结构控制对参数的鲁棒性; 另一种方法是在非线性系统模型上直接设计变结构控制规律。

变结构控制方法(滑动模态控制)是一种有效的非线性控制方法。它具有如下的一些优点: 1) 控制系统的响应不依赖系统结构和参数; 2) 理论上可以应用到所有类型的非线性系统; 3) 对比于其他的非线性控制方法, 容易实现; 4) 对参数不确定性和外部扰动具有很好的鲁棒性。当然, 它也存在一些缺点, 例如控制规律中存在的高频抖动。近年来, 采用饱和的切换函数替换理想的切换函数等方法使这一问题得到了一定程度的解决。在变结构控

制系统中,控制规律是一个根据在状态空间中定义的超平面上切换的非连续的函数。控制规律迫使处于任何初始条件下的系统状态按一定的趋近率到达并保留在该超平面上,在超平面上系统的动态成为滑动模态。

1.3 Lyapunov 直接控制方法

传统上,应用 Lyapunov 直接控制方法估计电力系统的稳定域并进行实时的动态安全估计。但它也是一种设计非线性系统控制规律的有效方法。对式(10)描述的非线性系统有

$$\dot{x} = f(x) \quad (10)$$

如果 $f(\hat{x}) = 0$, 则 $(\hat{x})$ 是系统的一个平衡点。

Lyapunov 直接控制方法通过寻找一个适当的 Lyapunov 函数 $V(x)$, $V(x)$ 是定义在状态空间上的正定标量函数并且在平衡点 $\hat{x}$ 有最小值。如果 $\dot{V}(x) = \frac{\partial V}{\partial x} f(x) \leq 0$, 则系统在 $\hat{x}$ 处是稳定的。如果 $\dot{V}(x) = \frac{\partial V}{\partial x} f(x) < 0$, 则系统在 $\hat{x}$ 处是渐近稳定的。 $\dot{V}(x)$ 取负值表明 $V(x)$ 随着时间递减到它的最小值。由于 $V(x)$ 在平衡点有最小值, $x(t)$ 最后收敛于平衡点 $\hat{x}$ 。 $V(x)$ 的负值越大, $x(t)$ 收敛得越快。Lyapunov 最优控制规律定义为: 在所有时刻使 $\dot{V}(x)$ 取得最大负值的控制规律。用 Lyapunov 直接控制方法设计控制规律可以分如下 3 步: 1) 找到系统的一个合适的 Lyapunov 函数; 2) 选择使得 $\dot{V}(x)$ 在所有的系统轨迹上取得最大负值的控制规律; 3) 选择本地变量实现控制规律。

2 先进控制理论在调速控制中的应用

调速系统是一个集机械、电气为一体的复杂闭环自动调节控制系统,从控制的角度看,调速系统是一个典型的高阶、时变、非最小相位、参数随工况点改变而变化的非线性的复杂系统。

2.1 先进控制理论在水轮机调速系统中的应用

水轮机水门调节是一个复杂的水、机、电过程。由于引水系统的水锤效应及水轮机组的较大惯性,使得水轮机调节器设计十分困难。PID 控制是水轮机调速器设计中使用最广泛、最成熟的一种。但是同传统励磁调节器一样,水轮机 PID 控制受限于线性化控制理论,通常只有空载和负载两组参数,没有

充分考虑对象固有的非线性特征,常规的 PID 控制很难保证水轮机调节中获得所有工况的最佳调节,甚至可能在某些工况下还会出现不稳定现象。

由于鲁棒控制理论在解决系统的非线性和不确定性方面具有良好的效果,其在水轮机调速系统控制中也有较广的应用。文献 [2] 基于非线性微分几何控制理论和非线性 H_∞ 控制理论给出了针对具有刚性水锤效应的水轮发电机组的鲁棒控制规律。除此之外,自适应控制 [3-4]、变结构控制 [5-7] 和预测控制 [8] 等在水电机组调节中也都得到了应用,但大多缺乏工程应用的实例。上述非线性控制方法对于水轮机时间常数 T_w 所存在的问题的研究较少,水轮机调速系统中的水门开度也是有一定范围的,即存在着饱和和限幅特性,现有非线性控制研究较少考虑这些方面。

由于处理非光滑非线性时变参数系统的控制问题具有良好的控制效果,智能控制在水轮机调速系统控制中也有着广泛的研究。文献 [9] 在对水轮机调节对象模型特性做出分析的基础上对采用模糊控制规则和算法进行了研究,通过计算机仿真证明了模糊调速控制系统有较快的收敛性和强的鲁棒性,虽然在模糊控制的基础上考虑了引入积分控制作用,但仍难克服稳态偏差。文献 [10] 在文献 [9] 的基础上提出模糊 PID 控制的策略,结果表明,此种控制方式可以集中模糊控制和 PID 控制的优点,从而使水轮机调速系统具有更优良的动态品质。

模糊控制本身具有一定的鲁棒性,但仍然难以适应大范围调节的要求,需要对控制规律和参数进行不断调整。同时,与常规控制理论相比,模糊控制技术还不完善,主要问题是如何提高模糊控制的控制品质(如稳态误差和超调等),以及如何提高学习能力。

在神经网络控制方面,文献 [11] 以水轮机调速系统为研究对象,对自适应神经元智能控制器进行了实验研究,结果表明神经网络控制可直接应用于工程实际。文献 [12] 应用神经网络的学习、映射和综合能力来研究水电机组的优化与自适应控制问题,较好地解决了稳定性较差的贯流式水轮发电机组的调节问题。

目前,国内已有部分水电控制专家正着手开发既能有效处理模糊知识又能有效学习的模糊与神经网络集成技术。文献 [13] 提出了一种智能模糊控

制系统,它充分利用水轮机调速器的现有硬件资源,在进行智能模糊实时控制的同时,以神经网络完成对水轮机调速系统的模拟和学习,解决了以往控制学习时由于模型未知而无法求反向传播误差的问题,为水力发电过程智能控制提供新的解决途径。

2.2 先进控制理论在汽轮发电机调速系统中应用

70年代以来,汽轮发电机快速电液调速系统不断完善和改进,使汽门关闭和开启速度有了很大提高,快控汽门技术日益受到人们的重视。鲁棒控制、自适应控制、反馈线性化控制、变结构控制、人工智能等方法在汽门控制领域都有应用。文献[4]用大范围线性化方法将非线性系统转化为线性系统,然后利用线性系统的李雅普诺夫函数方法对线性化后的系统进行设计,避免了构造非线性系统李雅普诺夫函数的困难,获得的汽门控制器解耦控制规律。文献[5]用反馈线性化技术将非线性系统转化为线性系统,然后用线性最优控制理论对其进行了设计,设计了两个控制器,一个用于小扰动,一个用于大扰动,二者结构相同,参数不同,二者共同作用得到总的汽门连续控制信号。文献[6-18]分别用LQ/H ∞ 控制、非线性变结构控制、模糊变结构控制对汽门控制进行设计。由于受到理论本身的局限性和电力系统复杂性的影响,基于上述理论的汽门快控技术有着与先进励磁控制相似的不足。

3 发电机励磁调速综合控制

传统控制方式下,发电机输出的有功功率、无功功率分别由调速系统与励磁系统控制,以保证发电机频率及机端电压的稳定。目前,这种独立控制方式已发展得较成熟,实际工程中也基本采用此种控制策略。但励磁、调速独立控制,各自对反馈量进行调节,不考虑发电机的耦合作用造成它们之间相互影响,在某些情况下不但不能使系统快速稳定,甚至会破坏系统稳定性。二者的综合控制被认为是改善电力系统稳定性及电能品质的有效措施,长期以来一直受到重视。目前大型发电机都配备了电液转换器和微机调速器,文献[9]认为,现代汽轮机调速系统对控制作用响应的快速性并不低于励磁系统,因而发电机励磁、调速系统综合控制是完全可行的。

文献[20-21]针对近似线性系统模型将自适应控制理论用于多机系统励磁和汽门的综合控制。文献[22]建立了适合于暂态稳定综合控制的数学

模型,并按照最大能量耗散原理推出了励磁和快关汽门综合非线性最优变目标控制规律,这种控制策略只需要获得局部信息,容易在线实现。文献[23]根据电力系统在受到大扰动时系统不失稳和故障后系统发电机端电压具有好的调节特性的要求,励磁控制器分两个时段考虑满足不同的要求,励磁控制器设计完成后,在汽门控制器的设计过程中,考虑励磁控制器的调节作用,得到相应的两个时段的汽门控制器。文献[24]运用非线性变结构理论,提出了汽轮发电机组综合控制器的设计方法,汽门控制的目标是改善功角稳定,励磁控制的目标是同时改善系统的功角稳定和发电机端电压的动态特性,得到的变结构综合控制规律与系统工作点无关,鲁棒性强。文献[25]基于逆系统的方法设计了汽轮发电机的综合控制器,将电力系统这一多变量、非线性、强耦合的复杂被控对象解耦成两个独立的SISO线性化积分型子系统,然后基于线性系统理论设计了综合控制器,在系统受到较大冲击进入暂态运行时,采用 α 阶逆系统控制方法,明显地增强了系统第一摆的稳定性。文献[26]先设计一个DFL的补偿器,然后将系统的耦合等作为扰动,进一步采取鲁棒控制方法设计了励磁和汽门开度的协调控制。

然而,发电机励磁、调速系统综合控制一直停留在理论研究阶段,难以用于工程实际,除了先进控制理论本身在工程实践中应用较困难外,还有文献认为,存在一系列机械动作的调速控制系统与完全不存在机械动作的励磁控制系统带宽差距较大,调速系统机械机构及其安全可靠运行的要求不允许系统过于快速、频繁地动作,因而,励磁、调速系统综合控制不能真正实现[27]。

4 存在的问题及展望

虽然先进控制理论在发电机调速及励磁调速综合控制中已取得不少成果,但要将其在具体工程中应用,还面临着如下问题:1)电力系统建模及等值问题。准确的模型及等值方法可以大幅度促进先进控制理论在电力系统中的应用。2)非线性问题。智能控制理论可以很好解决不可微非线性问题,但现有方法仍带有一定“试凑”性质,理论仍需深入、完善。

除此之外,基于先进控制理论设计的发电机控制器在响应速度,参数整定等方面的问题仍需进一步研究、解决。在取得显著成绩的同时,同步发电机控制

方法还需要进一步总结、提炼、深入、创新,只有综合解决好控制方法在理论与实践中的各种问题,才能将电力系统控制理论的研究推向一个新的高度。

5 总 结

为促进发电机控制理论研究和工程应用的进一步开展,并最终提高现代大型电力系统的安全运行稳定性,就近年来先进控制理论在同步发电机励磁、调速系统中的应用情况进行了全面的概括,同时阐明了这一研究领域的核心问题所在,并指出了进一步研究工作所面临的问题及本领域发展方向。

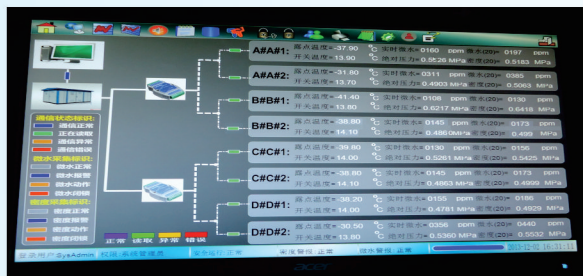
参考文献

- [1] 吴青华,蒋林. 非线性控制理论在电力系统中应用综述[J]. 电力系统自动化,2001,25(3):1-10.
- [2] 孙郁松,邵宜祥. 水轮机调节系统非线性 H_∞ 控制规律的研究[J]. 中国电机工程学报,2001,21(2):56-59.
- [3] Scott C. Bonnert, L. Wozniak. Adaptive Speed Control of Hydro-generators by Recursive Least Squares Identification Algorithm[J]. IEEE Trans. On Energy Conversion,1995,10(1):162-168.
- [4] Jing Lei, Ye Luqing. An Intelligent Discontinuous Control Strategy for Hydroelectric Generating Unit[J]. IEEE Trans. on Energy Conversion,1999,13(1):84-89.
- [5] Ye Luqing. Variable Structure Control and Its Applications to Hydroelectric Generating Unit[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 1992(1):28-38.
- [6] Ye Luqing. Variable Structure and Time-varying Parameter Control for Hydroelectric Generating Unit[J]. IEEE Trans. on Energy Conversion, 1989, 4(3):293-299.
- [7] Ye Luqing. An Intelligent Self-improving Control Strategy with a Variable Structure and Time-varying Parameters for Water Turbine[J]. La Houille Blanche, 1989(6):463-475.
- [8] Louis Wozniak, Daniel J. Bitz. Load-lever-sensitive Governor for Speed Control of Hydro-generators[J]. IEEE Trans. on Energy Conversion,1988,3(1):78-84.
- [9] 李值鑫,陈启卷. 水轮机调节系统FUZZY控制研究[J]. 武汉水力电力学院学报,1989,22(5):66-73.
- [10] 蔡维由,邓世洪. 水轮机调节系统的FUZZY-PID复合控制[J]. 电气自动化,1996,18(4):10-12.
- [11] 陈捷,王宁. 水轮发电机组的智能同期控制[J]. 中国电机工程学报,1994,14(5):33-37.
- [12] 赵闻鹰,郭尚来. 基于人工神经网络的水轮发电机组调速系统[J]. 电气自动化,1996(5):8-9.
- [13] 景雷,叶鲁卿,周泰经. 一种新型水轮发电机组智能模糊控制系统[J]. 中国电机工程学报,1994,12(2):28-30.
- [14] 刘国贤,林宪枢,杨奇逊. 多机系统快速汽门非线性控制研究[J]. 电力系统自动化,1996,20(12):10-15.
- [15] H. Borules, F. Colledani, M. P. Houry. Robust Continuous Speed Governor Control for Small-signal and Transient Stability[J]. IEEE Transaction on Power Systems, 1994,9(3):1218-1225.
- [16] 鲍文,于达仁,李松晶. 基于扭振分量极小化的LQ/ H_∞ 最优汽门控制器设计[J]. 中国电机工程学报,2000,20(4):6-8.
- [17] Subbarao G V, Iyer A. Nonlinear Excitation and Governor Control Using Variable Structures[J]. International Journal of Control,1993,57(6):1325-1342.
- [18] 刘瑞叶,于浩,陈学允. 带自调整因子的模糊变结构汽门控制[J]. 电力系统自动化,1998,22(7):27-29.
- [19] LU Q, SUN Y Z, MEI S W. Nonlinear Control Systems and Power System Dynamics[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers,2001.
- [20] N. C. Pahalawatha, G. S. Hope, O. P. Malik. Multivariable Self-turning Power System Stabilizer Simulation and Implementation Studies[J]. IEEE Transaction on Energy Conversion,1991,6(2):310-318.
- [21] 刘伟,余贻鑫,田树苞. 变结构模型参考自适应励磁与调速综合控制器(上)[J]. 电力系统自动化,1998,22(4):8-12.
- [22] X. Y. Li, Y. H. Song, X. C. Liu, et al. Nonlinear Optimal-variable-aim Strategy for Improving Multimachine Power System Transient Stability[J]. IEEE Proc. Gener. Transm. Distrib,1996,143(3):229-252.
- [23] Youyi Wang, David J. Hill, Richard H. Middleton. Transient Stability Enhancement and Voltage Regulation of Power System[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1993,8(2):620-627.
- [24] 于占勋,陈学允. 用变结构控制理论设计的汽轮发电机组综合控制器[J]. 电力系统自动化,1997,21(12):27-29.
- [25] 张腾,戴先中,陆翔. 基于逆系统方法的汽轮发电机综合控制器[J]. 电力系统自动化,2001,25(6):27-30.
- [26] Guo G X, Wang Y Y. Robust Nonlinear Controller for Power System Transient Stability Enhancement with Voltage Regulation[J]. IEEE Proceeding of Generation Transmission Distribution, 1996, 143(5):407-412.
- [27] 王剑,毛宗源,许敬涛. 发电机励磁调速综合控制可行性分析[J]. 中国电机工程学报,2007,26(13):74-78.

(收稿日期:2015-01-14)

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

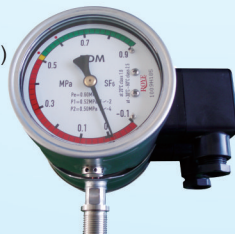
外壳防护等级：IP65

密封性能：5.0 × 10⁻⁹ mbar·l/s

触点容量：AC/DC 250 V 1 000 VA/500 W

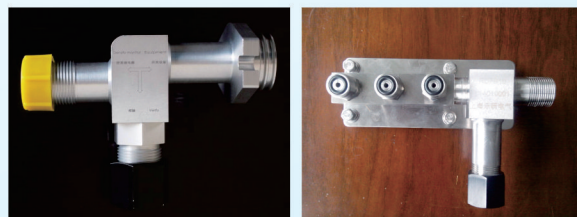
环境温度：-40℃ ~ +60℃

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。



四川西昌电力股份有限公司

Sichuan Xichang Electric Power Co., Ltd.

四川西昌电力股份有限公司地处凉山州首府西昌市，公司成立于1980年，1994年6月18日改制为股份有限公司，2002年5月30日在上海证券交易所上市，是凉山州境内唯一一家A股上市公司，是集发输配供一体化的能源载体企业，公司简称西昌电力，股票代码600505，现有总股本36 456.75万股，市值40多亿元，国网四川省电力公司、凉山州国有投资发展有限责任公司、四川省水电投资经营集团有限公司为第一、二、三大股东。

公司目前拥有8座水力发电厂，权益水电装机139.42 MW（有145 x 10⁵ m³库容调节水库一座，65 MW装机具备不完全年调节能力），在建、拟建水电站权益装机约161.8 MW，自发电量约600 GWh，供电量约1 600 GWh。网内并网电站119座，并网装机容量约6 100 MW。公司经营的凉山州地方骨干电网以110 kV线路为网架、35 kV线路为补充，输配电线路136条，总长1 961.4 km，110 kV变电站7座、35 kV变电站6座，变电总容量58.06万kVA。

公司主要负责西昌市城区及周边地区供电，线路连接州内普格、昭觉、美姑、金阳、布拖、盐源、木里七县及德昌、会理和冕宁部分地区。

多年来，公司秉承“客户至上，社会责任优先”的理念，实施“新电力、新服务”发展战略，在各级党委政府的坚强领导、各股东单位和社会各界的关心支持下，保增长，促改革，保供电，强服务、惠民生成果显著。“十二五”期间，凉山地区的经济发展、民生改善，迫切需要进一步优化电网规划、加大电网投入。西昌电力将在各级党委政府一如既往的关心、支持

下，依然以促进全州经济社会跨越式发展为己任，加快自有电源点开发建设，加快城区配网、农网改造进度，规划、建设系列骨干输变电工程，为形成凉山一张网的电力供应体系积极努力，力争把更加充足、安全、实惠的电能奉献给凉山人民，进一步推动全州经济社会持续快速健康发展，造福全州各族人民。



成凉工业园区



上街发放电力宣传单



给孩子们分发安全用电小册子



锅盖梁变电站



拉青电站



永宁河四级站

西昌电力 奉献清洁能源

Xichang Electric, Dedicated clean energy

established, started its business in Xichang in February 1980 with the first plant 35 kV including well experienced substation, transmission and service