

四川電力技术

SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY



国网四川省电力公司德阳供电公司

ISSN 1003-6954



四川省电机工程学会 四川电力科学研究院

Vol.37
2014
No.2

四川蜀能电力有限公司



省公司葛兆军书记调研新都桥变电站



省公司王抒祥总经理视察新都桥变电站



公司总经理王世彬在川藏联网铁塔首基试点仪式上讲话



川藏联网技术交底



飞艇助力映秀抢险

四川蜀能电力有限公司成立于1994年，原为四川电力送变电建设公司多经企业，2012年5月由四川科锐得实业集团有限公司全资收购，现注册资本金7107万元，资产总额约6.54亿元。公司具有送变电专业承包一级资质和电力设施一级承装（修、试）类许可资格，是工程建设施工组织质量管理体系（GB/T19001-2008 idt ISO9001:2008+GB/T50430-2007）、职业健康安全管理体系（GB/T28001-2001）、环境管理体系（ISO14001:2004 GB/T24001-2004）认证企业。公司主营业务范围涵盖电力生产、机电设备安装工程、送变电工程、建筑机械及设备租赁等。拥有种类齐全、配套完整的输变电工程施工技术装备及飞艇、多旋翼飞行器展放引绳技术装备，机械化施工能力达到较高水平。

公司本部设综合管理部、安全监察质量部、工程管理部等6个部门，下设成都蜀达分公司、电网运维分公司、送电、建安、调试工程各项目部及机械作业班。公司现有员工269人（不包括蜀达、运维），有一级建造师18人、二级建造师44人、注册安全工程师4人

2013年，公司全年共承建工程项目29个（含改扩建项目），其中线路项目11个，变电项目18个。年内建成投运工程项目14个，其中线路项目5个，线路长度约420 km（500 kV线路约140 km），变电项目9个（含扩建项目3个），容量1150 MVA，实现主营业务收入4.59亿元。目前，公司在建项目共15个，其中线路工程项目6个，变电站项目9个，在建工程中属于藏区的工程项目有7个，占总数的41%。

公司承建的川藏联网工程包5、包6标段顺利推进，两个标段的综合排名在全线12个标段中一直保持领先地位，受到国网公司川藏联网指挥部高度肯定。公司被指挥部指定为全线杆塔工程“首基试点”单位，经过精心策划、周密部署，于2014年3月9日顺利举行全线杆塔组立“首基试点”。500 kV新都桥变电站工程项目克服工期紧、任务重、冬季施工困难的影响，基本完成土建户外工程，为“电力天路”工程里程碑进度计划的实现奠定了基础。500 kV新甘线、220 kV茨乡线工程安全、质量、工期在同线路中处于领先地位。公司在220 kV蓬安变工程建设中实现了土建、电气安装、调试等全部任务独立完成，展示了公司在智能变电站建设领域的施工能力。特别是公司调试队伍自成立以来迅速成长，承担了该站全部调试任务，显示了队伍实力。该工程以总评第一的成绩荣获省公司项目综合管理流动红旗，并获得集团公司先进集体荣誉。

公司承担建设的500 kV甘谷地开关站、攀枝花II变电站、绵广线路π接，220 kV文峰变电站、水南线等7个工程在2013年获得国家电网公司优质工程称号，创造了年度获得国网优质工程数量新高。

四川通能电力科技有限公司



印尼龙湾电厂运行人员在华培训之开学典礼



通能公司监理在印尼龙湾电厂与indonesia power(印尼电力运行公司人员)合影



越南锦普电厂运行人员在华接受运行操作仿真机培训



海外工程项目现场操作培训



中海油161平台电热站调试

四川通能电力科技有限公司是一家电力高新技术公司，从事电站运行、维护及人员培训、基建调试、电力科技开发、产品制造、火电技术服务等业务。公司取得QEH标准化管理体系认证，拥有甲级电力建设调试资质，严格实施项目全过程标准化管理，全面推行以“关注用户为目标”的质量控制体系，以客户满意度作为衡量质量控制的最终目标。

公司现有职工300余人，其中高级工程师88人，硕士18人，博士2人，四川电力专家库专业人才十余人，拥有大批经验丰富的调试、运行、维护、教学专业人员；现代化的培训设施（多媒体教学、仿真中心等）和仪器设备；已完成多项国内外调试运行、维护和培训项目，如越南锦普电厂 1×330 MW燃煤发电机组运行及检修人员培训；印尼龙湾 3×315 MW燃煤电厂运检人员培训及机组承运；越南海防电厂 2×300 MW机组承运、印度提隆达电厂 5×660 MW机组调试等项目，受到客户的好评。同行业中率先开展460 t/h CFB锅炉的调试工作，已经取得了20多台460 t/h 等级CFB锅炉的调试业绩，并参加了内江白马和黑龙江鸡西多台1000 t/h CFB锅炉的调试，技术能力居于全国领先水平。

“四川白马300 Mw循环流化床示范工程的调试和性能试验”科研成果获得国家科技进步二等奖、电力科技进步一等奖，奠定了全国循环流化床调试科研方面领头地位。

公司参与调试的大唐鸡西 2×300 MW项目、大渡河 6×600 MW项目获得2013年“中国电力优质工程奖”，中电投福溪 2×600 MW循环流化床项目获得“达标投产机组”荣誉称号。

公司网址：<http://www.powerteck.com.cn>

地址：四川省成都市青羊区青华路24号

联系人：李先生 刘小姐

电话：028-87082410



调试能力资质



热化学清洗资质2012.07.13

德阳供电公司

全力开创企业科学发展新局面



德阳供电公司总经理甘涛（左三）在中江农村了解老百姓用电情况



德阳供电公司党委书记廖学静看望慰问一线员工

国网德阳供电公司成立于1984年6月，属国网四川省电力公司直属特大型供电企业。截至2014年1月31日，城市用电营业户数64万户，农村供电客户92万户（含控股公司）。

德阳电网是一个典型的受端网络，95%以上的电力由外部送入，境内的德宝直流德阳换流站是四川电网“丰枯调节、水火互济”的重要枢纽。德阳电网目前共有变电站127座，其中 ± 500 kV换流站1座，500 kV变电站2座，220 kV变电站10座、110 kV变电站70座、35 kV变电站44座。拥有35 kV~220 kV输电线路213条，总长2 221 km。

2013年，德阳供电公司在四川省电力公司和德阳市委市政府的坚强领导下，紧紧围绕“两个转变”的工作要求，完成电网投资4.64亿元，完成并表口径售电量94.08亿千瓦时。全体干部员工同心同德、攻坚克难，推动公司实现经营管理有力有序，电网发展协调推进，抗灾抢险科学高效，员工队伍团结和谐，业绩指标稳步提升，荣获省公司“红旗党委”、“四好班子”称号。



“4.20”芦山地震后，德阳供电公司紧急驰援灾区。图为电力员工正在恢复芦山城区低压线路。



2013年3月5日，国家电网四川电力（德阳）共产党员服务队队长鲁鹏当选“身边雷锋时代榜样——2012年度感动四川十大人物”。



2013年4月27日，德阳供电公司组建了抢修服务队，把以前单一的配网专业组发展成了涵盖低压、高压、计量及配网多个专业，故障处理面更广的配网综合处理队伍，并同时推行“五个一”抢修服务。



2013年8月28日，国内首座110 kV移动变电站在国网德阳供电公司110 kV光明变电站内接入电网，并成功投运。



2013年7月26日上午，由国网德阳供电公司承担的“电力天路”藏区电网援建工程色达、翁达项目在甘孜州色达县正式启动。

四川省电机工程学会 第七届四次常务理事会议纪要



王平理事长在做重要讲话



四川省电机工程学会第七届四次常务理事会议

四川省电机工程学会第七届四次常务理事会议于2014年3月20日在成都市名雅山庄召开，51名常务理事出席了会议，5人列席了会议

会议由副理事长李巧模主持，常务理事胡灿汇报2013年学会的工作总结及2014年学会工作计划；副秘书长张治安传达中国电机工程学会及四川省科协的有关会议精神，对吸纳单位会员、增补推荐第七届理事会副理事长单位、常务理事单位的情况作了说明；副理事长张启德宣读学会2013年度先进集体和先进个人建议名单；副理事长兼秘书长袁邦亮汇报学会2013年度财务报告，宣读关于收取2014年会费的通知。

王平理事长作总结发言，他感谢各位常务理事在工作十分繁忙的情况下出席会议，履行职责；通过交流信息，深入讨论，大家充分肯定2013年学会的工作，完全同意2014年学会工作计划，充分体现学会民主办会的精神。他对学会下一步工作提出了明确要求。

1、要进一步发挥学会整体优势，积极开展学术交流，把它作为学会生存和发展的基础，充分体现学会价值，推动电力科技进步，为实现四川电力的跨越发展贡献力量。他表扬八个专（工）委会2013年结合实际，开展多项学术活动。要求城市供用电专委会发扬传统，以四川供用电为平台，继续开展好各项活动。

今年我们将协助中国电机工程学会举办《电力科普凉山行》和电力系统技术国际会议两次活动，请秘书处配合总会制定详实的方案，认真组织实施，希望各会员单位踊跃参加。

2、围绕四川电力发展中的重要技术问题，开展调查研究，拓展服务空间，提高服务水平。

3、努力办好电力期刊；提高科普工作水平，提高公众的电力科技素质。

4、加强学会自身建设，努力提高办事能力，发挥好桥梁纽带作用。

5、经过审计，学会财务是规范的。2013年四川省电力公司、西南电力设计院、华能公司、东方电气集团、华电公司、国电公司积极缴纳了会费，会费是学会各项工作和各类活动开展的重要保障，希望继续按章缴纳。

6、政府机构改革和职能转变，为学会承接政府转移的社会化服务职能提供了难得的机遇，我们应审时度势，抢抓机遇，把学会工作推上水平。

会议形成以下决议：

1、审议通过2013年工作总结和2014年工作计划。

2、审议通过2013年度先进集体和先进个人的名单。

3、审议通过学会2013年度财务报告。

4、审议通过下面两家发电公司为学会副理事长单位：中国电力投资公司四川分公司和国电大渡河流域水电开发有限公司，并增补周庆葭为副理事长。

审议通过下面四家公司为学会单位会员，并增补为常务理事单位：四川西昌电力股份有限公司，乐山电力股份有限公司，四川明星电力股份有限公司，四川岷江水利电力股份有限公司，相应增补古强、廖正权、秦怀平和曾敬为常务理事，陈家盛、杨景岗、闵增华和贺超为理事。

《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

2014年第37卷第2期(总230期)

主管单位:四川省电力公司

主办单位:四川省电机工程学会

四川电力科学研究院

发行范围:公开

主 编:胡 灿

副 主 编:吴小冬

编辑出版:《四川电力技术》编辑部

发 行:四川电力科学研究院情报室

地 址:成都市青华路24号

邮政编码:610072 电话:(028)87082037

传 真:(028)87082036

E-mail:cdsdljs@163.com

印 刷:四川明源印务有限责任公司

封面设计:成都宏泰广告有限公司

国内定价:每册6.00元

[期刊基本参数] CN51-1315/TM* 1978*

b* A4* 94* zh* P* ¥6.00* 4300* 22*

2014-04

目 次

• 基金项目 •

基于小波去噪的配电网C型行波故障测距 郑莹莹 舒 勤(1)

变压器微水在线控制与延长变压器寿命技术的研究

..... 尧 广 李利红 曾明贵 熊 攀 王 勇(6)

• 电力系统 •

利用无源滤波器抑制励磁涌流引发谐波过电压可行性分析

..... 滕予非 汤 凡 魏 巍 李 甘 丁理杰 张 华(10)

影响BZT装置正确动作的原因分析及自适应改进措施 王 红 常喜强(14)

光伏电站与电气化铁路集中接入地区电网稳定性研究

..... 胡仁祥 白生荣 常喜强 罗金玉(18)

基于层次分割的电网灾难性事故风险模糊评估法 田立伟 肖先勇(22)

风电场宏观选址综合决策方法的研究

..... 陶奕杉 闫广新 王建军 马 乐 张同宇(27)

基于保护矩阵和网络化简的最小断点集计算新方法

..... 张向亮 徐 文 姚 强(31)

降低10 kV配电网损耗及提高供电质量措施

..... 张 迺 胡晓阳 胡建川 王主丁(36)

基于模糊滑模变结构的直流伺服系统控制器设计

..... 冉 鸿 陈 静 罗 洪(42)

精简监控系统遥测越限告警信号量

..... 袁建党 易炳星 李 军 聂文萍 王 亮 李敏瑞(45)

• 高电压技术 •

配电网投切无功补偿装置的过电压与抑制分析

..... 庄 琛 姚圣平 陈少卿 聂鸿宇 谢同平 黄小琼(48)

考虑波形起始点的特高压变电站雷电入侵过电压分析 梁 玲 肖先勇(52)

直流支柱绝缘子电场影响因素分析 许 安 何大猛 刘守豹(56)

110 kV零值瓷绝缘子电场仿真分析研究 白 欢 陈洪波 黄道春(62)

高压开关柜中TEV信号仿真分析 邵 菲 魏力强 吴 昊 茹满辉(68)

电容式套管末屏接线法在绕组变形测试中的应用研究 杨 洋(72)

GW16A-252DW型隔离开关拒动故障原因分析及处理 李运涛 刘同杰(75)

对某35kV开关柜绝缘缺陷造成全厂停电的事故分析 陈海平(78)

• 环保化学 •

电力企业厂界噪声监测中背景噪声测量和修正的探讨

..... 叶春燕 兰新生 王志高 周易谦 林巧红 刘 虹(81)

绝缘油中溶解气体组分含量的气相色谱测定(溶解平衡法)浅析

..... 胡仕红 鲁登峰 王 杰 刘 虹(86)

四川省新能源发电发展研究

..... 袁 川 黎 岚 刘 洋 金键可 邵 霄(91)

本期责任编辑 程文婷 编辑 吴小冬 刘斌蓉

CONTENTS

C - Type Traveling Wave Fault Location of Distribution Network Based on Wavelet Denoising	Zheng Yingying Shu Qin (1)
Research on Online Control of Micro - water in Transformer and Extension Technology of Transformer Life	Yao Guang Li Lihong Zeng Minggui Xiong Pan Wang Yong (6)
Feasibility Analysis on Harmonic Overvoltage caused by Inrush Current Suppression with Passive Filter	Teng Yufei Tang Fan Wei Wei Li Gan Ding Lijie Zhang Hua (10)
Analysis on Reasons affecting Correct Action of Automatic Throw - in Device of Stand - by Power and Its Adaptive Improving Measures	Wang Hong Chang Xiqiang (14)
Research on Stability of Concentrated Integration of District Power Grid with Photovoltaic Power Station and Electrified Railway	Hu Renxiang Bai Shengrong Chang Xiqiang Luo Jinyu (18)
Risk Fuzzy Assessment Method for Catastrophic Accident of Power Grid Based on Hierarchy Partition	Tian Liwei Xiao Xianrong (22)
Research on Synthetic Decision Method of Macro - siting for Wind Farms	Tao Yishan Yan Guangxin Wang Jianjun Ma Le Zhang Tongyu (27)
New Method for Selecting Minimum Break Point Set Based on Relay Matrix and Network Reduction	Zhang Xiangliang Xu Wen Yao Qiang (31)
Measures for Reducing Losses of 10 kV Distribution Network and Improving Power Supply Quality	Zhang Jiong Hu Xiaoyang Hu Jianchuan Wang Zhuding (36)
Design for DC Servosystem Controller Based on Fuzzy Sliding Mode Variable Structure	Ran Hong Chen Jing Luo Hong (42)
Simplification of Out - of - limit Alarm Signal of Telemetry in Monitoring System	Yuan Jiangdang Yi Bingxing Li Jun Nie Wenping Wang Liang Li Minrui (45)
Analysis on Overvoltage of Reactive Compensation Device and Its Suppression in Distribution Network	Zhuang Chen Yao Shengping Chen Shaoqing Nie Hongyu Xie Tongping Huang Xiaoqiong (48)
Analysis on Lightning Invading Overvoltage of UHV Substation Considering Point on Wave	Liang Ling Xiao Xianrong (52)
Analysis on Electric Field Influencing Factors of DC Post Insulator	Xu An He Dameng Liu Shoubao (56)
Analysis and Research on Electric Field Simulation of 110 kV Zero - value Insulator	Bai Huan Chen Hongbo Huang Daochun (62)
Simulation Analysis of Transient Earth Voltage Signals in HV Switch Cabinet Caused by Partial Discharge	Shao Fei Wei Liqiang Wu Hao Ru Manhui (68)
Application and Research of End Shield Wiring Method of Capacitor Bushing in Winding Deformation Testing	Yang Yang (72)
Cause Analysis on Failure to Operate of GW16A - 252DW Disconnecting Switch and Its Treatment	Li Yuntao Liu Tongjie (75)
Fault Analysis for Outage Caused by a 35 kV Switchgear Insulation	Chen Haiping (78)
Discussion on Background Noise Measurement and Correction in Boundary Noise Monitoring of Electric Power Enterprises	Ye Chunyan Lan Xinsheng Wang Zhigao Zhou Yiqian Lin Qiaohong Liu Hong (81)
Superficial Discussion on Determination of Component Contents of Gases Dissolved in Insulating Oil by Gas Chromatography (Dissolution Equilibrium Method)	Hu Shihong Lu Dengfeng Wang Jie Liu Hong (86)
Research on Development of Power Generation with New Energy Sources in Sichuan Province	Yuan Chuan Li Lan Liu Yang Jin Jianke Shao Xiao (91)

SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY

2014 Vol. 37 No. 2

(Ser. No. 230)

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

基于小波去噪的配电网 C 型行波故障测距

郑莹莹 舒 勤

(四川大学电气信息学院 四川 成都 610065)

摘 要: 对于配电网 C 型行波测故障测距方法,通常将故障相和非故障相的电压差作为测量信号进行故障测距。但是对于实际配电网系统,分支对信号的衰减和噪声的干扰常使测量信号淹没在噪声中,使得算法失效。提出一种基于小波重构的配电网行波去噪方法,利用小波分析对信号进行多尺度分解、重构去噪提取故障信号。与传统的去噪方法相比,去掉了信号高频部分,减小了在实际配电网中由于噪声对测量信号行波波头提取的影响,仿真结果表明该方法的正确性。采用 PSCAD/EMTDC 仿真软件,建立中性点非有效接地的系统仿真模型,仿真结果表明基于小波去噪的配电网 C 型行波故障测距的可行性。

关键词: 行波测距; 小波重构; 噪声

Abstract: When C-type traveling wave is used in transmission line fault location, the voltage difference of faulty phase and normal phase is usually treated as the measurement signal. However, in real distribution network, the measurement signal is attenuated by branches and annihilated by noises, thus this method is ineffective. A denoising method for traveling wave in distribution network based on wavelet reconstruction is proposed. This method decomposes the signal in multi-scales and reconstructs it to reduce noises within the signal. Compared to the traditional denoising methods, the high-frequency part of the signal which is considered to contain noises is removed. As a result, the influence of noises is reduced and the simulation results prove its effectiveness. A simulation model of a system with neutral point non-effectively grounded is established using PSCAD/EMTDC. The simulation results prove the feasibility of C-type traveling wave fault location based wavelet denoising in distribution network.

Key words: traveling wave location; wavelet reconstruction; noise

中图分类号: TM835 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)02-0001-05

0 引 言

统计数据表明,配电网系统发生单相接地故障概率为 70%~78%^[1],故障发生后能够快速、准确确定故障位置,恢复供电是保障电力系统供电可靠性的关键环节。但因配电网结构复杂,分支众多,常导致故障定位非常困难,是国内外尚待解决的难题。目前配电网系统故障定位可分为主动式故障定位方法与被动式故障定位方法两大类。

主动式故障定位方法是在线路故障发生后向系统注入特定信号,根据相应的定位原理确定故障位置;被动式故障定位方法则是利用线路故障前后线路本身电压、电流等信号特征的变化设计定位判据确定故障位置。两类方法均是分析测量装置接收到的信号以确定故障位置,因此准确提取故障信息是

配电网故障定位的关键^[2]。

C 型行波法是主动式故障定位中的典型方法^[3-6]。它是通过比较线路非故障运行和故障运行时检测端接收到的电压行波测距。该法利用故障点返回的行波波头信息确定故障位置。对于单支路或是简单网络,该法可以达到快速准确测距^[8]。然而对于含有多分支的实际配电网系统,分支对信号的衰减和噪声的存在对行波波头提取造成很大困难,而电压行波是一个非平稳变换的、具有突变性质的信号^[3],小波去噪可以将高频范围内的噪声去除。利用小波对检测端接收到的信号进行去噪处理,在一定程度上减弱了噪声对故障行波波头提取的干扰。

1 行波折射与反射

行波是某一物理量的空间分布随着时间的推移,沿着某一介质行进形成且传播方向为无限的一

• 1 •

基金项目: 四川省科技支撑计划项目(2012GZ0009); 四川省电力公司科技项目(12H1541)

种形态。行波在波阻抗不连续处会发生折射和反射。对输电线路而言,电压行波和电流行波的比值为线路的波阻抗,线路的波阻抗与线路本身的结构与绝缘介质及导体材料有关,而与线路长短无关^[4]。

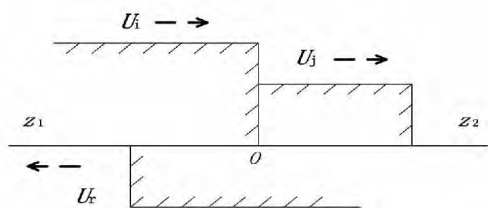


图1 行波在波阻抗不连续点的折反射过程

图1中O点为线路波阻抗不连续点,当入射波 U_i 到达O点时发生反射和折射,产生反射波 U_r 和折射波 U_j 。设O点左侧线路波阻抗为 Z_1 ,右侧线路波阻抗为 Z_2 。则有^[2]

$$U_r = (Z_2 - Z_1) / (Z_2 + Z_1) \cdot U_i = \alpha U_i \quad (1)$$

$$U_j = 2Z_2 / (Z_2 + Z_1) \cdot U_i = \beta U_i \quad (2)$$

式中 $\alpha = (Z_2 - Z_1) / (Z_2 + Z_1)$ 为电压行波反射系数; $\beta = 2Z_2 / (Z_2 + Z_1)$ 为电压行波折射系数。

2 C型行波故障定位原理

对于C型行波定位法,如何从检测端接收到的行波信号中辨识故障行波波头对于测距的准确度是非常关键的。故障点与检测端之间的距离、故障点所在线路的区段依赖于行波波头辨识的准确度。

先借用图2所示的简单线路介绍C型行波测距原理,M为母线端,F点为故障点,线路发生故障后,从检测端(M点)注入高压脉冲信号作为检测信号,检测信号遇到故障点发生反射,反射波返回到检测端,检测端利用接收到的故障点反射行波测距。

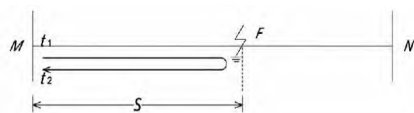


图2 C型行波原理示意图

若记信号注入时刻为起始时刻, Δt 表示从信号注入时刻到故障点反射信号的波头返回注入端的时间差; S 表示故障距离; v 表示波速^[8],则C型行波测距原理用公式描述如下。

$$S = 1/2 \Delta t \cdot v \quad (3)$$

由行波传播特性可知,行波会在故障点和所有

分支点来回反射和折射,至能量衰减为零。为便于讨论,定义故障点首次返回检测端的反射行波为故障点反射波,分支点首次返回检测端的反射行波为节点反射波,检测端接收到的其他信号称为杂波。换句话说,检测端接收到的信号为故障点反射波、节点反射波和杂波的叠加。为了提取故障点反射波,C型行波法通常采取以下两种方式:一种是在故障后分别向故障相和非故障相注入高压直流脉冲,在检测端得到线路故障和非故障运行两组波形数据,将数据相减得到测量信号,由此提取故障信息;一种是在系统未发生故障前分别向每相注入高压直流脉冲信号得到每相非故障运行数据,线路发生故障后向故障相注入相同的高压直流脉冲信号得到故障信号,将故障相故障和非故障运行得到的两组数据相减得到测量信号,由此提取故障信息。这两种方法原理相同,下面以第1种方式为例讨论。

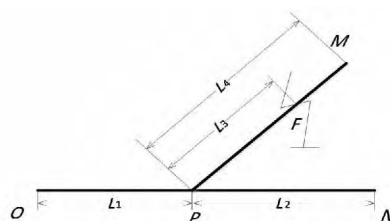


图3 故障测距仿真拓补图

如图3所示的简单线路,线路PM段F点发生单相接地故障,P为分支点。线路OP长度为 l_1 ,线路PN长度为 l_2 ,线路PF段长度为 l_3 ,线路FM长度为 l_4 。线路发生故障后从母线端O点注入高压直流脉冲。设脉冲由O点经P点向M、N传播方向为正方向,反射行波经P点返回O点的传播方向为反方向,M、N、P、F点的电压行波反射系数分别为 α_M^X 、 α_N^X 、 α_P^X 、 α_F^X ,正向电压行波折射系数为 β_M^X 、 β_N^X 、 β_P^X 、 β_F^X ,X取值表示A、B相。检测端接收到的信号 $R(t)$ 、 $u(t)$ 为阶跃信号。假设F点发生A相单相接地电阻接地故障。设 $l_3 > l_2$ 只考虑故障点反射波和节点反射波。

假定在 $t=0$ 时从非故障相B相注入高压脉冲

行波。在 $t = \frac{l_1}{v}$ 时刻行波到达分支点P,并在P点折

返射分成3个信号,P点的反射信号再次经 $\frac{l_1}{v}$ 时间返回O点得到P节点反射波 $\alpha_P^B U_0$,即从初始时刻到O点接收到第一个反射信号(P节点反射波)经历了 $t = \frac{2l_1}{v}$ 时间。P点的折射信号 $\beta_P^B U_0$ 向N、M两点传播。

先讨论此折射信号向 N 点传播的情况, 经 $t = \frac{l_1 + l_2}{v}$ 折射信号 $\beta_P^B U_0$ 到达 N 点并在 N 点发生反射得到反射波 $\beta_P^B \alpha_N^B U_0$, 此反射波经 $\frac{l_2}{v}$ 时间返回 P 点, 并在 P 点向 O 点折射, 设折射系数为 $\bar{\beta}_P^B$, 折射信号的幅值为 $\beta_P^B \alpha_N^B \bar{\beta}_P^B U_0$, 此折射波经过 $\frac{l_1}{v}$ 时间返回 O 点, 即 O 点在发射脉冲信号后在 $t = \frac{2(l_1 + l_2)}{v}$ 时刻, 接收到 N 节点反射波 $\beta_P^B \alpha_N^B \bar{\beta}_P^B U_0$ 。同理 P 点的折射信号 $\beta_P^B U_0$ 经 $\frac{l_1 + l_4}{v}$ 时间到达 M 点并在 M 点发生反射得到反射波 $\beta_P^B \alpha_M^B U_0$, 此反射波经 $\frac{l_4}{v}$ 时间返回 P 点, 并在 P 点向 O 点折射, 设折射系数为 $\bar{\beta}_P^B$, 折射信号的幅值为 $\beta_P^B \alpha_M^B \bar{\beta}_P^B U_0$, 此折射信号经过 $\frac{l_1}{v}$ 时间返回 O 点, 即 O 点在发射脉冲信号后在 $t = \frac{2(l_1 + l_4)}{v}$ 时刻接收到 M 节点反射波 $\beta_P^B \alpha_M^B \bar{\beta}_P^B U_0$ 。

综上所述, 在如下时刻检测端接收到节点反射波为

$$\begin{aligned} t = \frac{2l_1}{v} \quad R(t) &= \alpha_P^B U_0 u\left(t - \frac{2l_1}{v}\right) \\ t = \frac{2(l_1 + l_2)}{v} \quad R(t) &= \beta_P^B \alpha_N^B \bar{\beta}_P^B U_0 u\left(t - \frac{2(l_1 + l_2)}{v}\right) \\ t = \frac{2(l_1 + l_4)}{v} \quad R(t) &= \beta_P^B \alpha_M^B \bar{\beta}_P^B U_0 u\left(t - \frac{2(l_1 + l_4)}{v}\right) \end{aligned}$$

因此, 当 $t > \frac{2(l_1 + l_4)}{v}$ 线路非故障运行数据是

$$R(t) = (\alpha_P^B + \beta_P^B \alpha_N^B \bar{\beta}_P^B + \beta_P^B \alpha_M^B \bar{\beta}_P^B) U_0 u\left(t - \frac{2(l_1 + l_4)}{v}\right) \quad (4)$$

同理当 PM 线路 F 点发生单相接地故障, 在 $t = 0$ 时从故障相 A 相注入高压脉冲行波, 入射脉冲同样在 P, N 两点发生折返射, 并在检测端检测到节点反射波。但 P 点折射波在向 M 点传播中, 在 $t = \frac{l_1 + l_3}{v}$ 时刻遇到故障点 F , 在 F 点发生折反射, 得到反射波 $\beta_P^A \alpha_F^A U_0$, 此反射波经 $\frac{l_3}{v}$ 时间返回 P 点, 并在 P 点向 O 点折射, 设折射系数为 $\bar{\beta}_P^A$, 折射信号的幅值为 $\beta_P^A \alpha_F^A \bar{\beta}_P^A U_0$, 此折射信号经过 $\frac{l_1}{v}$ 时间返回 O 点,

即 O 点在发射脉冲信号后在 $t = \frac{2(l_1 + l_3)}{v}$ 时刻接收到故障点 F 的反射波 $\beta_P^A \alpha_F^A \bar{\beta}_P^A U_0$ 。 F 点的折射信号 $\beta_P^A \beta_F^A U_0$ 向 M 点传播, 经 $\frac{l_4 - l_3}{v}$ 时间到达 M 点并在 M 点发生反射得到反射波 $\beta_P^A \beta_F^A \alpha_M^A U_0$, 反射信号经过 $\frac{l_4 - l_3}{v}$ 时间返回 F 点, 并在 F 点向 P 点折射, 设折射系数为 $\bar{\beta}_F^A$, 折射信号的幅值为 $\beta_P^A \beta_F^A \alpha_M^A \bar{\beta}_F^A U_0$, 此折射信号 $\beta_P^A \beta_F^A \alpha_M^A \bar{\beta}_F^A U_0$ 经过 $\frac{l_3}{v}$ 时间返回 P 点, 并在 P 点向 O 点折射, 设折射系数为 $\bar{\beta}_P^A$, 折射信号的幅值为 $\beta_P^A \beta_F^A \alpha_M^A \bar{\beta}_F^A \bar{\beta}_P^A U_0$, 此折射信号再次经过 $\frac{l_1}{v}$ 返回 O 点, 即 O 点在发射脉冲信号后在 $t = \frac{2(l_1 + l_3)}{v}$ 时刻接收到节点 M 的反射波 $\beta_P^A \beta_F^A \alpha_M^A \bar{\beta}_F^A \bar{\beta}_P^A U_0$ 。

综上所述, 在如下时刻检测端接收到节点反射波为

$$\begin{aligned} t = \frac{2l_1}{v} \quad R(t) &= \alpha_P^A U_0 u\left(t - \frac{2l_1}{v}\right) \\ t = \frac{2(l_1 + l_2)}{v} \quad R(t) &= \beta_P^A \alpha_N^A \bar{\beta}_P^A U_0 u\left(t - \frac{2(l_1 + l_2)}{v}\right) \\ t = \frac{2(l_1 + l_3)}{v} \quad R(t) &= \beta_P^A \alpha_F^A \bar{\beta}_P^A U_0 u\left(t - \frac{2(l_1 + l_3)}{v}\right) \\ t = \frac{2(l_1 + l_4)}{v} \quad R(t) &= \beta_P^A \beta_F^A \alpha_M^A \bar{\beta}_F^A \bar{\beta}_P^A U_0 u\left(t - \frac{2(l_1 + l_4)}{v}\right) \end{aligned}$$

因此当 $t > \frac{2(l_1 + l_4)}{v}$ 线路故障运行数据是

$$R(t) = (\alpha_P^A + \beta_P^A \alpha_N^A \bar{\beta}_P^A + \beta_P^A \alpha_F^A \bar{\beta}_P^A + \beta_P^A \beta_F^A \alpha_M^A \bar{\beta}_F^A \bar{\beta}_P^A) U_0 u\left(t - \frac{2(l_1 + l_4)}{v}\right) \quad (5)$$

用 $C(t)$ 表示线路中行波在各节点往返多次产生的杂波信号, 由于节点对信号的衰减作用, 杂波信号能量较小, 对故障点反射波的提取无影响。用 $e(t)$ 表示实际线路中噪声信号, 为便于表示, 假设线路波阻抗相同, 那么节点的正向电压行波折射系数等于反向电压折射系数, 将式(5)、式(4)得到测量信号 $D(t)$ 为

$$D(t) = \begin{pmatrix} (\alpha_N^A (\beta_P^A)^2 - \alpha_N^B (\beta_P^B)^2) + \alpha_F^A (\beta_P^A)^2 \\ + (\alpha_M^A (\beta_P^A \beta_F^A)^2 - \alpha_M^B (\beta_P^B)^2) \end{pmatrix}$$

$$\times U_0 u(t - \frac{2(l_1 + l_4)}{v}) + C(t) + e(t) \quad (6)$$

将图 3 所示的简单线路推广到一般情况。设故障线路故障点前共有 n 个分支点,故障点后共有 s 个分支点,线路共有 m 个分支点, $m \geq n$ 。检测端发射的脉冲电压幅值为 U_0 ,分支点的电压行波反射系数为 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_m$,电压行波折射系数为 $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \dots, \beta_m$,故障点的电压行波反射系数为 α_F ,电压行波折射系数为 β_F 。在 $t_0 = \frac{2s}{v}$ 时刻检测端接收到故障点

反射波信号,当 $t > \frac{2s}{v}$ 得到的测量信号 $D(t)$ 为

$$\begin{aligned} D(t) = & \sum_{k=1}^{m-s} (\prod_{i=1}^k (\beta_i^A)^2 U_0) - \sum_{k=1}^{m-s} (\prod_{i=1}^k (\beta_i^B)^2 U_0) \\ & + \sum_{i=1}^n \alpha_F^A (\beta_i^A)^2 U_0 + \beta_F^A \beta_F^A \sum_{k=1}^s (\prod_{i=1}^k (\beta_{i-1}^A)^2 U_0) \\ & - \sum_{k=1}^s (\prod_{i=1}^k \alpha_i^B (\beta_{i-1}^B)^2 U_0) + C(t) + e(t) \quad (7) \end{aligned}$$

考虑到线路波阻抗相同,对于前面讨论的三相平衡的配电网系统,非故障支路节点的节点反射波的测量值为 $\sum_{k=1}^{m-s} (\prod_{i=1}^k (\beta_i^A)^2 U_0) - \sum_{k=1}^{m-s} (\prod_{i=1}^k (\beta_i^B)^2 U_0) = 0$,此时测量信号为

$$\begin{aligned} D(t) = & \left(\sum_{i=1}^n \alpha_F^A (\beta_i^A)^2 U_0 + \beta_F^A \beta_F^A \sum_{k=1}^s (\prod_{i=1}^k (\beta_{i-1}^A)^2 U_0) \right. \\ & \left. - \sum_{k=1}^s (\prod_{i=1}^k \alpha_i^B (\beta_{i-1}^B)^2 U_0) \right) \\ & \times u(t - \frac{2s}{v}) + C(t) + e(t) \quad (8) \end{aligned}$$

由上述分析可知:故障点的位置只影响故障点所在支路之后分支点的节点特征波,对于故障点所在支路之前分支点和其他支路的节点反射波无影响。当线路发生故障后,从检测端分别向故障相和非故障相注入同样的脉冲电压,得到线路故障和非故障情况下的反射波两组数据,对比线路故障运行和非故障运行两组波形得到的测量信号,测量信号中波形第一个突变点必为故障点反射波。

3 小波去噪

以上讨论都是在理想情况下进行的,即没有考虑实际线路总是或多或少存在白噪声的影响,噪声的存在将对故障行波波头的准确提取产生影响,外加分支对信号的衰减作用,故障点反射波有可能完全湮没在噪声信号当中,检测端若不能将故障点反射波从噪声中有效的分离出来,将直接导致故障定

位失败。

图 4 为线路中加入信噪比为 40 dB 的高斯白噪声的仿真波形。其中实线为 C 行波算法在没有加入噪声时的理想波形,虚线为加入噪声后的波形。图中可以明显看出,加噪后的波形杂乱无章,故障点特征行波完全湮没在噪声信号中,按照 C 行波算法,故障点的特征行波应为局部放大图 5 中的第一个负向突变点 0.000 014 s 处,根据测距原理测得故障距离为

$$\begin{aligned} s = & \frac{v \times (t_2 - t_1)}{2} = \frac{3 \times 10^8 \times (0.000 014 - 0.000 004)}{2} \\ & = 1.50 \text{ km} \end{aligned}$$

这和故障点距离检测端 20 km,误差过大。因此受到噪声的干扰,无法正确识别故障点反射波,无法测出故障点的距离,因此在提取故障信号之前需要去噪处理。

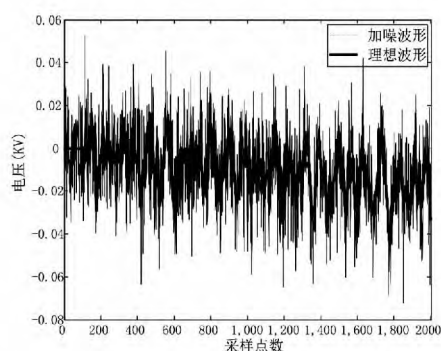


图 4 信噪比 40 dB 噪声反射行波

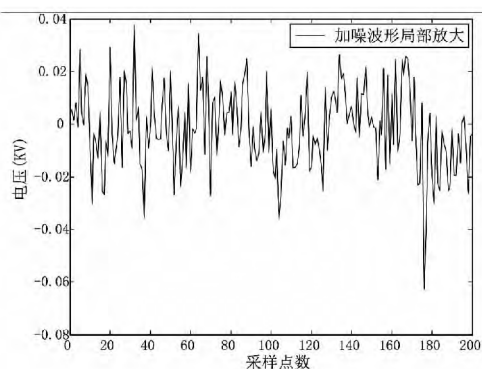


图 5 信噪比 40 dB 测量信号局部图

利用小波进行去噪^[8]。小波去噪是将需要被提取的信号按照频率大小对其进行小波分解,利用噪声和信号在频域上的分布不同而完成的。是一个信号滤波问题。传统的傅里叶信号去噪方法直接对信号进行低通或带通滤波,虽然达到去噪效果,但破坏了信号细节。而电压行波是一个具有突变性质的信号,需要去噪后还可以很好地保留信号特征,利用

小波分析既能将噪声的影响降低,又能保持信号细节信息,实际上是特征提取和低通滤波功能的综合^[9]。

设 $f(t) \in L^2(R)$ $\psi(t)$ 为基小波函数,则连续小波变换及其逆变换(重构)的定义为^[10]

$$WT_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi^*\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (9)$$

$$f(t) = \frac{1}{C_\psi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{a^2} WT_f(a, b) \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) da db \quad (10)$$

式中 a 为尺度因子; b 为位移因子; $\frac{1}{\sqrt{a}}\psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 为基

小波经伸缩平移操作所形成的小波函数族。在实际应用中,常需要对小波及其变换进行离散,则离散小波函数为^[10]

$$\psi_{j,k}(t) = a_0 \psi(a_0^{-j}t - kb_0), \quad j, k \in Z \quad (11)$$

离散小波变换的系数为

$$W_{j,k}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi_{j,k}(t) dt \quad (12)$$

其重构公式如下所示。

$$f(t) = C \sum_{j=-\infty}^{\infty} \sum_{k=-\infty}^{\infty} W_{j,k}(t) \psi_{j,k}(t) \quad (13)$$

式中 C 为常数,与信号无关。

从以上分析可以看出,小波去噪就是对信号信息进行二频带划分,观察信号在不同频带上的实现,从而实现对反射行波信号的特征提取和去噪。

对于小波基的选择,电压行波是一种非平稳的突变信号,综合考虑时域和频域的紧支撑性和带通滤波性,基于重复实验,经验选择原则,选择 db4 小波^[11]。由于行波信号的小波变换后的系数具有模极大值,且不算尺度变化而改变,而噪声的小波变化随着尺度的增大而迅速衰减,据此可以将噪声和信号分别出来^[12]。图 6 为 db4 小波五层分解后的波形图。从图中对比可以看出,小波去噪可以将故障信号在一定程度上从原本杂乱无章的信号中提取出来,同时细节信息得以保持。同样根据式(3)选取第一个负向模极大值点 0.000 137 s,根据测距原理测得故距离为

$$s = \frac{v \times (t_2 - t_1)}{2} = \frac{3 \times 10^8 (0.000 137 - 0.000 004)}{2} = 19.95 \text{ km}$$

误差为 50 m,在误差允许范围内。因此在噪声存在的情况下,经小波分析后可以将故障信号从噪声中有效分解出来,将噪声的存在对 C 型行波测距算法的影响降低,提高该算法在实际应用中的有效

性。

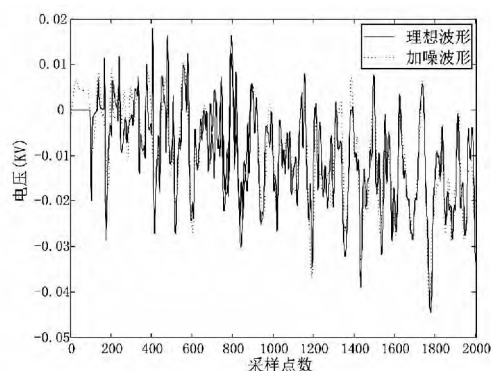


图 6 行波信噪比 40 dB 小波重构波形

4 结 论

采用 C 型行波测距方法,对于三相平衡的配电网系统,通过比较故障相和非故障相电压行波信号,消除了波阻抗不连续点对故障特征行波的影响。利用小波分析算法对检测端接收到的测量信号进行多尺度分解、重构去噪处理,通过 PSACD 和 MATLAB 的仿真验证,在理想条件下算法总体误差控制在 50 m,在误差允许范围内。有效地去除了配电网实际运行中噪声的存在对故障行波波头提取的影响,进一步提高 C 型行波算法在配电网故障测距实际应用中的有效性。

参考文献

- [1] 葛耀中,徐丙垠. 利用暂态行波测距的研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 1996, 8(3): 17-22.
- [2] 季涛,谭思园,徐丙垠,等. 基于波形分析的直流系统接地故障检测新方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(22): 69-72.
- [3] 覃剑,葛维春. 影响输电线路行波故障测距精度的主要因素分析[J]. 电网技术, 2007, 31(2): 28-36.
- [4] 季涛. 基于暂态行波的配电线路故障测距研究[D]. 济南: 山东大学, 2006.
- [5] 骆敬年,颜延纯. 基于行波原理线路故障测距的误差分析及解决措施[J]. 华东电力, 2006, 34(10): 31-33.
- [6] 于盛楠,杨以涵,鲍海. 基于 C 型行波法的配电网故障定位的实用研究[J]. 继电器, 2007, 35(10): 1-4.
- [7] 文远芳. 高电压技术[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2001.
- [8] 张兆宁,董肖红,潘云峰. 基于小波变换模极大值去噪方法的改进[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(2): 9-12.

(下转第 35 页)

13、14、16、17 的入度均为 2 ,而保护 13、14 的保护重要度最小 , $BPS = \{23, 1, 2, 3, 4, 19, 20, 29, 30, 28, 13\}$ 或者 $\{23, 1, 2, 3, 4, 19, 20, 29, 30, 28, 14\}$,并同时更新三类矩阵。⑥若把保护 13 选为断点 ,保护 9、10、17、24 的入度均为 1 ,以化简原则 2 更新三类矩阵 ,保护 15、18 的出度均为 1 ,以化简原则 3 更新三类矩阵 ,出现自环顶点 14、25 ,将其选为断点 ,以化简原则 4 更新三类矩阵 ,网络只存在顶点 16 ,保护归属矩阵为空 ,算法结束 , $MBPS = \{23, 1, 2, 3, 4, 19, 20, 29, 30, 28, 13, 14, 25\}$ 。同理 ,若把 14 选为断点 ,得到的 MBPS 是相同的。

表 1 算例系统中所有保护的重要度

保护	重要度	保护	重要度	保护	重要度	保护	重要度
1	0.149 8	11	0.126 5	21	0.218 2	31	0.117
2	0.149 8	12	0.235 9	22	0.288 5	32	0.054 5
3	0.079 5	13	0.110 4	23	0.224 6	33	0.169 3
4	0.087 3	14	0.110 4	24	0.146 5	34	0.083 3
5	0.181 2	15	0.141 7	25	0.218 2	35	0.130 2
6	0.181 2	16	0.271 5	26	0.327 6	36	0.117
7	0.070 5	17	0.162 1	27	0.327 6	37	0.054 5
8	0.133 0	18	0.265 1	28	0.169 2	38	0.152 4
9	0.290 6	19	0.397 9	29	0.083 2		
10	0.290 6	20	0.397 9	30	0.130 1		

6 结 语

提出基于网络化简和保护三类矩阵求取 MBPS 计算方法 ,解决了平行线路判据问题 ,弥补了已有算法的不足。基于矩阵运算 ,效率高效 ,能够实时反映

网络拓扑结构的变化 ,符合电力系统实际情况。最后通过算例分析 ,证明所提算法的有效性和可行性。

参考文献

- [1] 刘丹 ,吕飞鹏. 基于网络化简和配合关系的最小断点集计算方法[J]. 电力系统自动化 ,2008 ,32(16) : 24 - 27.
- [2] 李运坤 ,吕飞鹏 ,陈新 ,等. 基于节点重要度估计的多组同基最小断点集选取方法[J]. 电力系统自动化 ,2010 ,12(34) : 58 - 60.
- [3] 曹一家 ,陈晓钢 ,孙可. 基于复杂网络理论的大型电力系统脆弱线路识别[J]. 电力自动化设备 ,2006 ,26(12) : 1 - 5 ,31.
- [4] 乐阳 ,龚健雅. 最短路径算法的一种高效率实现[J]. 武汉测绘科技大学学报 ,1999 ,24(3) : 209 - 212.
- [5] 王亮 ,刘艳 ,顾雪平 ,等. 综合考虑节点重要度和线路介数的网络重构[J]. 电力系统自动化 ,2010 ,34(12) : 29 - 33.
- [6] LIN Henming ,JOU Jingyang. On Computing the Minimum Feedback Vertex Set of a Directed Graph by Contraction[J]. IEEE Trans on Computer - aided Design of Integrated Circuits and Systems ,2000 ,19(3) : 295 - 307.
- [7] Donghua Ye ,Jing Ma ,Zengping Wang. A Novel Method for Determining Minimum Break Point Set Based on Network Reduction and Relays Incidence Matrix[C]. Critical Infrastructure (CRIS) ,2010 5th International Conference on 2010: 1 - 5.

作者简介:

张向亮(1987) ,硕士 ,主要研究方向为电力系统继电保护。

(收稿日期:2013 - 11 - 11)

(上接第 5 页)

- [9] 胡广书. 现代信号处理教程[M]. 北京:清华大学出版社 ,1999.
- [10] 何书元. 应用时间序列分析[M]. 北京:北京大学出版社 ,2003: 139 - 143.
- [11] 任震. 小波分析及其在电力系统中的应用[M]. 北京:中国电力出版社 ,2003.
- [12] 葛哲学 ,陈仲生. Matlab 时频分析技术及其应用[M]. 北京:人民邮电出版社 ,2006.

- [13] 董新洲 ,贺家李 ,葛耀中. 小波变换在行波故障检测中的应用[J]. 继电器 ,1998 ,26(5) : 1 - 4.

作者简介:

郑莹莹(1986) ,硕士研究生 ,研究方向为现代信号处理与电力系统故障信号分析;
舒 勤(1958) ,教授 ,研究方向为现代信号处理与智能电网。

(收稿日期:2013 - 12 - 16)

变压器微水在线控制与延长变压器寿命技术的研究

尧 广¹ 李利红² 曾明贵¹ 熊 攀¹ 王 勇¹

(1. 国网泸州供电公司 四川 泸州 646000; 2. 国网四川省电力公司检修公司 四川 成都 610041)

摘 要: 变压器是各种电力设备中比较昂贵且最重要的设备之一,其稳定运行对于保障电网安全意义重大,而变压器的寿命主要是由绝缘材料的性能决定的。首先阐述了影响变压器寿命的因素以及老化特征量,然后对影响变压器寿命的主要因素微水进行分析,介绍了基于分子筛吸附技术的变压器微水在线控制系统,该系统可以去除变压器中微水,达到延长变压器寿命的目的。

关键词: 微水; 绝缘材料; 分子筛; 变压器寿命延长

Abstract: In power system, transformer is one of the most important equipments, its safety operation is significant to ensure the security of power grid, and the service life of transformer is decided by the life of insulating materials. Firstly, the factors that influence the life of transformer and the aging characteristics of insulating materials are described, and then the micro-water as the main factor affecting the life of transformer is analyzed. The online control system of micro-water in transformer based on molecular sieve adsorption technology is introduced, which can remove the micro-water in transformer so as to prolong the service life of transformer.

Key words: micro-water; insulating material; molecular sieve; extension of transformer life

中图分类号: TM285 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)02-0006-04

0 引 言

众所周知,油浸式变压器的寿命主要是由绝缘材料的老化程度决定的。据统计,因各种类型的绝缘故障引起的事故约占全部变压器事故的 85% 以上^[1-3]。根据国外理论计算及实验研究数据表明,当油浸式变压器始终保持在干燥状态且温度持续在 95 ℃,理论寿命将可达 400 年^[4]。而制造厂的设计要求和技术指标,一般把变压器的预期寿命定位 30 年,运行实例表明,维护很好的变压器,实际寿命能达到 50 ~ 70 年^[5]。因此,保持变压器的正常运行并加强对绝缘系统的合理维护,可以有效地保证变压器具有较长的使用寿命。

变压器油中微水含量是影响变压器绝缘强度的最重要因素,油的绝缘强度将随油中含水量的增加而快速下降。监测变压器油中微水含量,不仅可以防止变压器绝缘系统的绝缘强度降低至危险水平,同时可以对变压器整体绝缘状况进行评估^[6-9]。近年来,对变压器微水含量在线监测的研究日益受到重视,微水在线监测设备逐步在电力系统中投入使

用。但是目前国内集变压器微水在线监测与处理的设备在电力系统运用还非常少,下面介绍了变压器微水在线监测与处理系统在国网泸州供电公司的运行情况,研究了分子筛吸附技术在控制变压器油的微水含量,提高绝缘性能、延长寿命方面的作用。为减少员工工作量、提高变压器的智能化水平等方面提供了有益的参考。

1 微水对变压器绝缘性能的影响

变压器的绝缘性能主要是靠变压器油和绝缘纸的共同作用。纯净干燥的变压器油极易吸潮。水在变压器油中有两种存在形式:悬浮状态和溶解状态。一般而言,变压器油中水分含量的增加,会使得绝缘油的击穿电压逐渐降低,从而影响绝缘油的绝缘特性。此外,由于绝缘纸的主要组成是纤维素,分子式为 $(C_6H_{10}O_5)_n$,其中 n 为聚合度,表示纤维素是由多少个葡萄糖基构成,一般新绝缘纸的聚合度为 1 200 ~ 1 800。干燥绝缘纸的强度主要取决于纤维的状况、强度及其化学键,绝缘性能稳定。由于纤维素分子结构中存在氢氧根,即羟基,而纤维素的无定形区,链分子中仅有部分羟基形成氢键,而其余均以游

基金项目:四川省电力公司 2013 科技项目(5219991308C5)

离羟基存在。由于羟基是极性基团,易于吸附极性的水分子,在水份存在的情况下,极易与吸附的水分子形成氢键结合,因此绝缘纸和纸板的吸湿能力比变压器油大得多。与此同时,由于纤维素大分子的葡萄糖基以 β -苷键联结,使纤维素大分子对水解作用的稳定性降低,在酸或高温条件下与水作用时,可使苷键断裂,纤维素大分子链长度降低,从而使固体绝缘发生降解。因此纤维绝缘材料中所含水分越多,纤维素水解速度越快,即绝缘纸的老化速率越快,从而严重危及绝缘纸优异的绝缘性能,对变压器的绝缘系统造成致命的破坏^[10,11]。相关资料表明:含水量为1%的绝缘纸的老化速率是含水量为0.1%绝缘纸的10倍;在变压器运行温度下,含水量为4%的绝缘纸的老化速率是含水量为0.5%的绝缘纸的20倍;绝缘纸中水份含量每增加0.5%,纤维素绝缘的寿命缩短为原来的一半。

此外,水是强极性液体,易向高场强区聚集,因此在变压器最危险的高场强区反而聚集了大量的水分,但其介电常数比油和纸高得多,所以当变压器负荷发生突变时,就极易形成极性通道,导致变压器发生故障的概率大大增加。另外,固体绝缘含水量增加,会增加损耗和漏电流,从而使变压器发热,运行温度升高,加速绝缘材料的老化,降低变压器使用寿命。

综上所述,水分是决定变压器油绝缘性能的重要因素,被认为是变压器油纸绝缘老化的“头号杀手”。因此如何检测和控制变压器油中水分含量是保证变压器安全运行,延长使用寿命的关键措施。

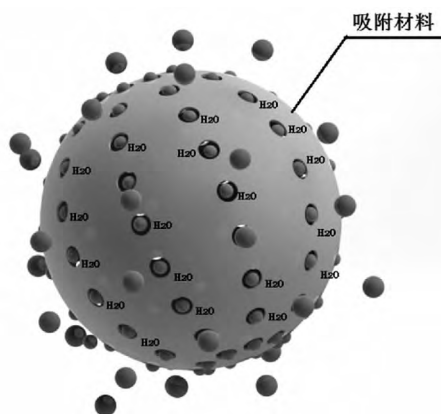


图1 分子筛晶体微观结构

2 分子筛吸附的基本原理

分子筛是一种包含有精确和单一的微小孔洞的

材料,可用于吸附气体或液体,通常分子筛分子由铝硅酸盐矿组成。晶体具有蜂窝状的结构(如图1所示),晶体内的晶穴和孔道相互沟通,并且孔径大小均匀、固定,与通常分子的大小相当。只有那些直径比较小的分子才能通过孔道被分子筛吸附,而构型庞大的分子由于不能进入孔道,则不被分子筛吸附。特定的分子筛对水有较强的吸附能力,即使在很低的分压或温度下仍有相当高的吸附容量,一个分子筛能吸附高达其自身重量22%的水分。具有吸附容量高、吸附速度快、热稳定性好、操作循环稳定、与液体接触不碎裂等特性。

分子筛吸附小于它孔径的分子,通过选用合适的分子筛类型,除水以外的所有流体成分都可以不被吸附,免除了共吸附的问题。由于没有这种共吸附的作用,更加提高了吸水性能。同时,由于分子筛具有优良的再生特性,水合的分子筛在特定的条件下活化时迅速脱水,活化后的晶体又可以可逆地吸水,循环再利用。

3 变压器微水在线控制实例

为了保障老旧变压器的安全稳定运行,延长重负荷变压器的运行年限,国网泸州供电公司从美国引进基于分子筛吸附技术的变压器微水在线监测与控制系统,其工作原理如图2所示。

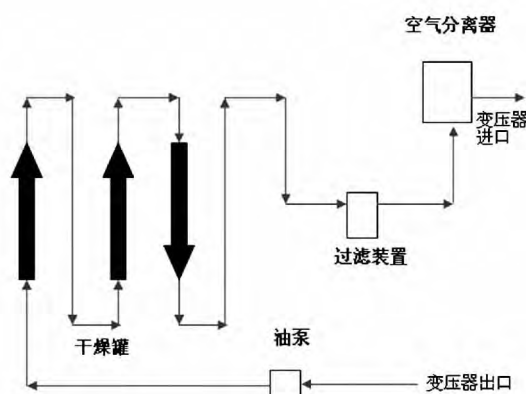


图2 微水在线控制系统原理图

该系统由3个(根据需求)干燥罐组成,每个干燥罐中含有一种专门设计的高吸附性材料。当变压器油从干燥罐中流过的时候吸除其中的溶解水分,变压器绝缘材料中的水分随着油循环通过干燥罐时基本上被吸收;与此同时,由于该分子筛的孔径仅适合水分子通过,而气体分子由于体积大,则不会被吸

附。此外,这种高吸附性分子筛材料只有在温度加热到 180 ℃ 的时候才有水分子释放出来,因此吸附性能稳定,且能循环利用。



图 3 微水在线控制系统现场图

通过前期对 1 号主变压器的建模分析、设计和后期制造,2013 年 11 月 16 日,成功安装在泸州 220 kV 杨桥变电站 1 号主变压器(型号: SFPSZ8-120000/220,生产厂家: 保定变压器厂,投运时间: 1998 年 11 月)上并顺利投运,如图 3 所示,截止到目前为止,该系统运行正常。

4 实验结果与分析

国网泸州供电公司试验人员对该系统进行了长期跟踪取样分析,试验结果如下。

4.1 微水含量分析

变压器油的微水含量分析结果如下(注:进口离线数据是指微水在线监测与处理装置的油样入口处的取样分析结果,反应了变压器本体微水的含量;出口离线数据是指在微水在线监测处理装置的油样出口处取样分析的离线测试数据,下同)。

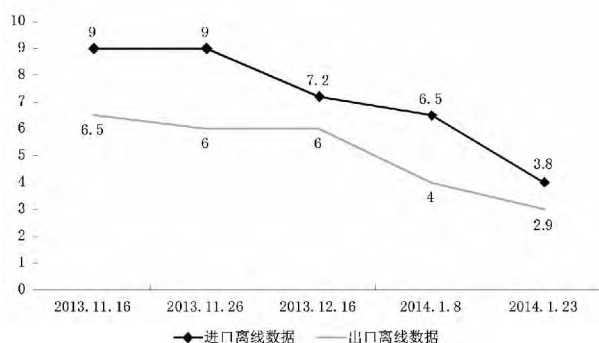


图 4 1 号变压器油微水含量趋势图(单位: mg/L)

从图 4 可以看出,该装置自投运以来,持续在线运行,截止到 2014 年 1 月 23 日,进口离线数据(变

压器本体油微水含量)从最初的 9 mg/L 逐步下降至 3.8 mg/L。经过微水在线监测与处理系统处理过的微水含量从 6.5 mg/L 持续下降至 2.9 mg/L,效果明显;同一时间段内微水处理系统进口与出口初微水含量差从 2.5 mg/L 下降至 0.9 mg/L。根据以上数据可以判断,该变压器微水在线监测与处理系统确实可以缓慢滤除变压器油中的微水。进口和出口微水含量差在逐渐减小,说明该系统中的分子筛吸附剂还在起作用,吸附能力逐渐趋向饱和。

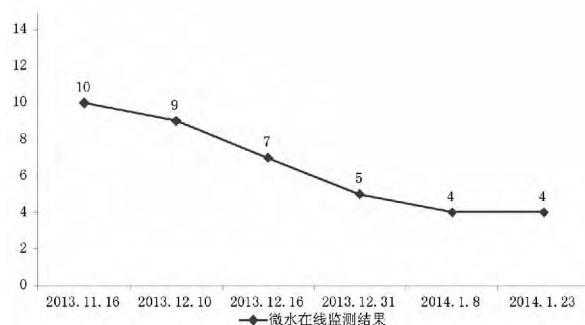


图 5 1 号变压器油微水含量趋势图(单位: mg/L)

从图 5 可以看出,微水在线数据表明,变压器本体微水从安装之日起的 10 mg/L,经过微水在线监测处理系统的处理,不到 2 个月的时间,微水含量下降到约 4 mg/L。与图 4 对比分析,可以看出离线测试数据与在线检测数据基本一致。

4.2 击穿电压结果分析

变压器油击穿电压取样分析结果如图 6 所示。

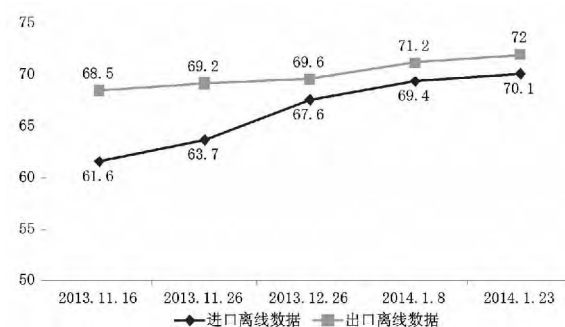


图 6 1 号变压器油击穿电压趋势图

(单位: kV, 间隙距离: 2.5 mm)

从图 6 可以看出,微水在线监测与处理系统进口处变压器油的击穿电压(可代表本体油的击穿电压)从安装之日的 61.6 kV 上升至 70.1 kV,提高了约 8.5 kV,效果明显,间接验证了微水含量的降低;而该系统出口处的击穿电压从 68.5 kV 上升至 72 kV,呈缓慢上升趋势;进出口击穿电压逐渐趋于一致,也说明了分子筛吸附剂逐渐趋于饱和。

4.3 在线滤油系统对油色谱分析的影响

对变压器油中溶解性气体进行色谱分析,是发现变压器潜伏故障的有效手段。为了研究微水在线监测与处理系统对色谱分析的影响,试验人员进行了长期的跟踪对比分析,取样分析试验结果如图 7~12(单位: $\mu\text{L/L}$) 所示。

从变压器油色谱跟踪分析可以看出,通过对比测试发现甲烷含量约为 $20 \mu\text{L/L}$, 乙烯含量约为 $0.7 \mu\text{L/L}$, 乙烷约为 $4.3 \mu\text{L/L}$, 乙炔约为 $0 \mu\text{L/L}$, 氢气为 $3.0 \mu\text{L/L}$ 左右, 总烃在 $25 \mu\text{L/L}$ 左右, 各种成分

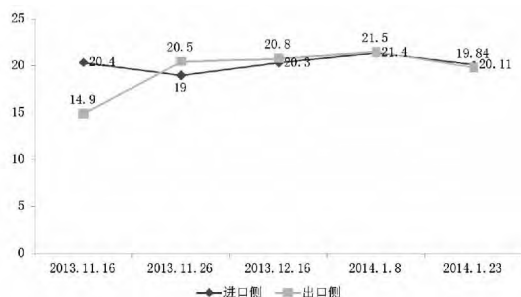


图 7 1号变压器油甲烷趋势图

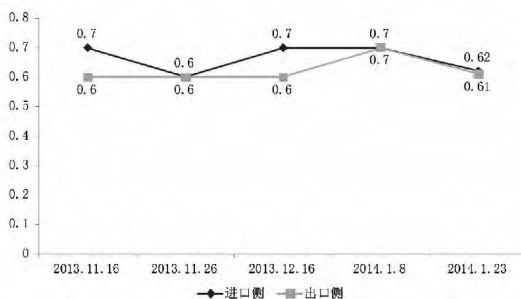


图 8 1号变压器油乙烯趋势图

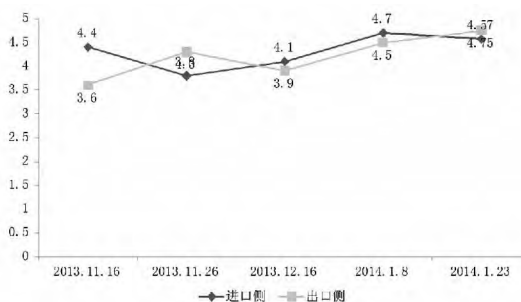


图 9 1号变压器油乙烷趋势图

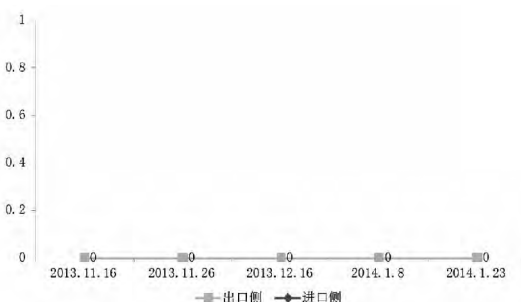


图 10 1号变压器油乙炔趋势图

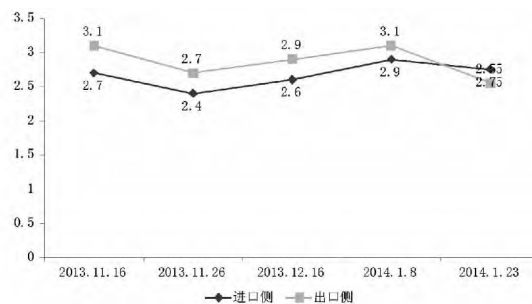


图 11 1号变压器油氢气趋势图

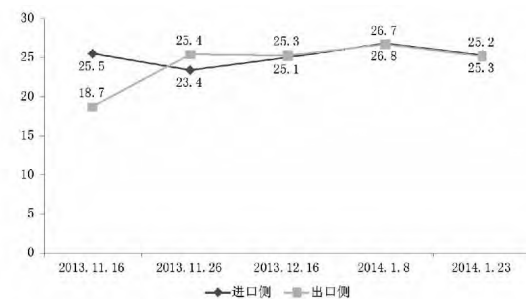


图 12 1号变压器油总烃趋势图

含量均比较稳定。且每一次进口和出口的测试值基本一致,因此可以认为该系统对色谱分析没有影响。

此外,其他试验数据也基本保持不变,具体试验结果如表 1 所示。

表 1 微水在线监测与处理系统投运前后
部分试验结果对比

序号	试验项目	2013.11.16	2014.01.23
1	油中糠醛含量/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	<0.1	<0.1
2	酸值/($\text{mgKOH} \cdot \text{g}^{-1}$)	0.001	0.001
4	水溶性酸(pH 值)	5.9	6.1
5	介质损耗因素 (90℃)/%	0.11	0.09
6	击穿电压/kV	61	62

5 结 论

从以分子筛吸附技术为核心的变压器微水在线监测与控制系统在 220 kV 杨桥变电变电站 1 号主变压器上的运行情况可以得到以下结论:(1) 使用特定的分子筛吸附剂可以有效地将运行变压器油中的微水含量控制在极低水平,使得变压器油击穿电压明显提高,大大减缓了绝缘纸的降解老化速度,起到延长变压器寿命的作用;(2) 使用该技术不会影响色谱分析等其他测试结果,表明该分子筛只吸附水分子,不会吸附其他气体和液体分子;(3) 该系统

(下转第 41 页)

和控制电容器投切,降低网络损耗,改善电压质量。

(4) 计算结果都是基于 A 地区现状电网计算得到,若适当增加电源点、缩短线路的供电半径和更换小截面导线,降损效果更佳。如线路 5 导线型号为 LGJ-50,若将其更换为 LGJ-95 的导线,损耗将在此基础上再减少 50%,而且电压质量也能得到进一步提高。

(5) 实际算例验证了无功电压规划优化对降损及提高电压质量的有效性。在不久的将来,随着配电网自动化控制的不断推进,通过在配电网全网实现无功电压控制,有利于进一步提高全网电压的合格率,降低电网的损耗。

参考文献

- [1] DL/T 686-1999 电力网电能损耗计算导则[S].
- [2] 林海雪. 现代电能质量的基本问题[J]. 电网技术, 2001, 25(10): 5-12.
- [3] 朱桂萍,王树良. 电能质量控制技术综述[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(19): 28-31.
- [4] 廖学琦. 农网线损计算分析与降损措施[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [5] 盛万兴. 配电系统综合节能技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [6] 周强. 中低压线损计算方法与降损措施的研究[D]. 郑

州: 郑州大学, 2009.

- [7] 吴强. 实际配电系统线损分析与降损措施研究[D]. 成都: 四川大学, 2004.
- [8] 刘海峰. 配电变压器经济运行分析[J]. 电力需求侧管理, 2009, 11(5): 48-49.
- [9] 郑琳. 配电变压器的经济运行[J]. 电力需求侧管理, 2006, 8(5): 61-62.
- [10] 夏春燕. 变压器经济运行分析与应用[J]. 变压器, 2007, 44(12): 24-28.
- [11] 江振生. 电力系统调压措施的合理选用[J]. 中国科技信息, 2006(2): 130.
- [12] 许一星,李越冰. 电网电压问题与调整措施[J]. 中国电力教育, 2009(139): 261-262.
- [13] 来美英,来运梅. 电力系统的调压措施[J]. 科技信息, 2006(9): 457.
- [14] 赵俊光,王主丁,张宗盛,等. 基于节点补偿容量动态上限的配电网无功规划优化混合算法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(23): 69-74.
- [15] Q/GDW 462-2010 农网建设与改造技术导则[S].

作者简介:

张 迺(1987), 主要从事管理降损研究;

胡晓阳(1991), 硕士研究生, 主要从事配网降损与无功优化研究。

(收稿日期: 2013-12-24)

(上接第 9 页)

运行稳定可靠,减少了试验人员工作量,提高了供电可靠性和智能化水平,可在电力系统中推广。

参考文献

- [1] 朱德恒,谈克雄. 电绝缘诊断技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [2] 严璋. 油浸电力变压器固体绝缘老化的诊断及其应用[D]. 西安: 西安交通大学, 2003.
- [3] 尚勇,钱政,杨敏中,等. 高电压设备绝缘老化及状态维修的实现[J]. 高电压技术, 1999, 25(3): 40-42.
- [4] 宋伟. 变压器绝缘老化与寿命评估[D]. 济南: 山东大学, 2005.
- [5] 申翰林. 基于回复电压法的油浸式变压器状态检测关键技术的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- [6] 朱德恒,严璋,谈克雄. 电气设备状态监测与故障诊断技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.

- [7] 王昌长,李福琪,高胜友. 电力设备的在线监测与故障诊断[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [8] C. G 瓦修京斯基,崔立君,杜思田,等译. 变压器的理论与计算[M]. 北京: 机械工业出版社, 1983.
- [9] Schuert P J, Nevin J H. A Polyimide-based Capacitive Humidity Sensor[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1985, 32(7): 1220-1223.
- [10] 王洪亮,周利军,吴广宁. 不同含水量对油纸绝缘老化速率影响的研究[C]. 第十届全国工程电介质学术会议论文集, 2005.
- [11] 刘敏. 不同含水量对油纸绝缘老化速率的影响[J]. 绝缘材料, 2008, 41(3): 40-42.

作者简介:

尧 广(1983), 工学硕士, 工程师, 研究方向为高电压与绝缘技术。

(收稿日期: 2013-11-04)

利用无源滤波器抑制励磁涌流 引发谐波过电压可行性分析

滕予非 汤 凡 魏 巍 李 甘 丁理杰 张 华

(国网四川省电力公司电力科学研究院 四川 成都 610072)

摘 要: 针对西南某藏区电网,对利用无源滤波器抑制励磁涌流引发谐波过电压风险的可行性进行了探讨。首先,分析了在该工况下无源滤波器的设计原则,并利用 PSCAD/EMTDC 软件对滤波器的效果进行了校核。其次,探讨了无源滤波器投入对弱联系电网孤网后的高频高压风险的影响,并提出了相应的抑制措施。

关键词: 无源滤波器; 励磁涌流; 过电压

Abstract: The feasibility on harmonic overvoltage caused by the suppression of inrush current with passive filter is discussed aiming at a Tibetan power grid in Southwest China. Firstly, the design principle of passive filter which is utilized to suppress harmonic overvoltage is proposed. And the filtering effect is checked by PSCAD/EMTDC. The influence on self-excitation of the filter is also proposed, and the corresponding suppression measures are introduced.

Key words: passive filter; inrush current; overvoltage

中图分类号: TM864 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)02-0010-04

0 引 言

随着中国电力系统的发展以及经济水平的提高,送电网络逐渐地向边远无电地区延伸。但由于这些无电地区负载较小,且往往远离负荷中心,在建设初期,这些地区与主网之间往往仅通过一回联络线相连,而且该联络线的距离一般都较长。联络线这种轻载长线的特性,为低次谐波的传播与放大提供了极好的条件。

根据传输线理论^[1,2],对于空载长线路,当其距离与输电波的 $1/4$ 波长相等时,在线路末端谐波电压可能会被严重放大,从而造成严重的电压畸变,导致设备损毁。因此对于低次谐波而言,当输电线路距离接近 300~750 km 时,2~5 次谐波则有在末端放大的危险。此时,如果在系统对空载变压器进行合闸操作,其注入的励磁涌流^[3,4]则可能在系统末端产生较大的过电压^[5]。

2013 年中国西南某藏区电网出现了因励磁涌流的注入,而在电网末端产生谐波过电压的事件。根据录波数据,此次事件中系统末端 35 kV 母线的电压瞬时值达到了正常情况的 1.9 倍,对设备以及负荷的安全带来了极大的威胁。

在抑制励磁涌流引发谐波过电压的措施方面,存在着从源头治理^[6]以及改变系统网络特性^[1]两种方式。下面以西南某藏区电网为算例,着重分析了通过在系统中增加无源滤波器抑制谐波过电压的思路,探讨了其可行性。

1 研究算例及其谐波过电压风险

1.1 算例系统介绍

利用西南某藏区电网作为算例系统。

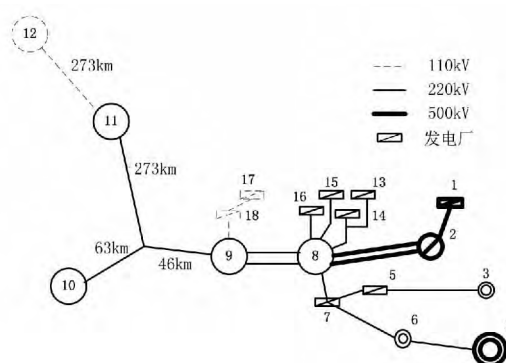


图 1 算例系统

该系统中,11 号母线以及 12 号母线所处的变电站即为边远地区变电站,其与主网(9 号母线以右的系统)之间的最远传输距离接近 600 km,处在 300

~750 km 的范围之内。同时 11 号母线与 12 号母线的总下网负荷仅有 2 MW 左右。因此,母线 9 ~ 母线 12 的联络线具有明显的轻载长线路的特性。一旦从 9 号母线注入低次谐波,在 12 号母线的低压侧则会出现明显的电压畸变,甚至出现谐波过电压。

1.2 算例系统谐波过电压仿真分析

利用 PSCAD/EMTDC 软件对图 1 所示系统进行电磁暂态仿真分析,仿真结果验证了以上判断。以在 1 号母线对 550 MVA 空载变压器进行合闸操作为例,可以得到在枯期小方式下,12 号母线 35 kV 侧的电压瞬时值波形如图 2 所示。

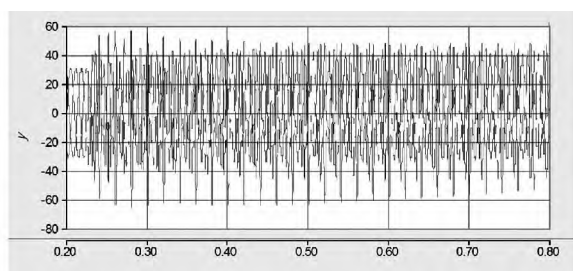


图 2 12 号母线 35 kV 侧的电压瞬时值波形

由图 2 所示,此时 12 号母线 35 kV 侧的电压瞬时值接近 2.0 倍,远远超过了系统允许的范围,设备损毁风险较高,需要采取措施进行抑制。

2 无源滤波器设计原则

为了抑制励磁涌流引发的谐波过电压,需要在系统中装设无源滤波器。根据规划,考虑到未来还会有部分 110 kV 变电站从 11 号母线上网,为了提高适应性,特将滤波器装设在 11 号母线的低压侧。以下将对滤波器的设计原则进行探讨。

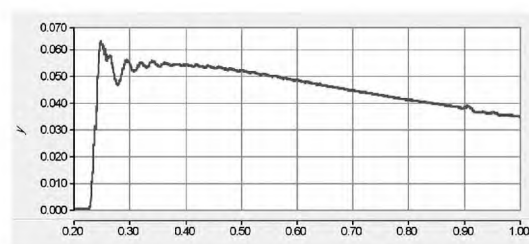
2.1 滤波器谐振点选择

考虑到励磁涌流中主要含有 2、3、4、5 次谐波,因此滤波器的设计主要为 2、3、4、5 次各次的单调谐滤波器。根据常规的设计方法,滤波器的调谐频率往往会低于目标频率,如 1.9、2.8 次等。如此可以防止滤波器电容器使用时间较长时,其介质材料会退化,从而导致的电容值下降,谐波频率升高。

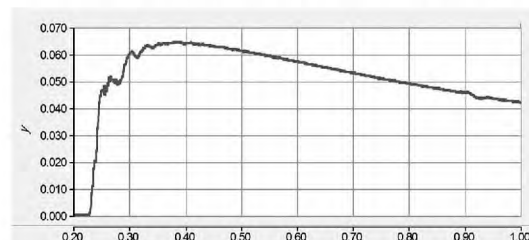
这样设计的前提是将交流电网等效为一个纯电感,但是这样的设计方式在图 1 所示的地区电网中可能具有较大的风险。

以 3.9 次频率为滤波器的调谐频率,在 11 号母线 35 kV 侧增加滤波器前后,流入母线 11 ~ 母线 12

输电线路的 4 次谐波电流有效值如图 3 所示。



(a) 增加滤波器前流入 11-12 线路的 4 次谐波电流



(b) 增加滤波器后流入 11-12 线路的 4 次谐波电流

图 3 4 次谐波电流有效值

由图 3 可知,在增加滤波器后流入 11 ~ 12 线路的 4 次谐波电流反而有增大的趋势。分析其原因,主要是由于谐波频率超过了滤波器谐振频率,因此滤波器呈感性。但是,由于图 1 所示地区电网从 11 号母线往里看,11 ~ 12 线与 12 号变电站则主要呈容性。因而出现了谐波电流的放大情况。

为了避免该情况的出现,最好能够保证滤波器能够在谐波下呈现容性阻抗,因此在弱联系电网中,滤波器的调谐频率可能需要高于目标频率。

2.2 滤波器容量选择

滤波器设计中,滤波器容量关系到电容值的选择,因此也直接关系到设备选型与滤波效果。

根据分析,滤波器容量主要跟以下两个因素有关。首先是滤波器的品质因素 Q 。

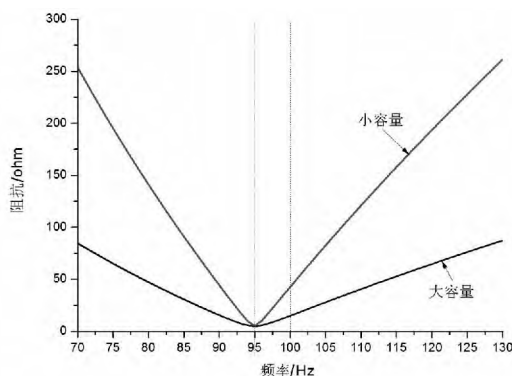


图 4 不同容量下 2 次谐波单调谐

滤波器的不同频率下的阻抗

图 4 所示是在两个不同容量的 2 次谐波单调谐

滤波器的不同频率下的阻抗。由图 4 可知,两个不同容量的滤波器在谐振频率下阻抗是相同的,但是由于滤波器设计起来有频差,因此两个滤波器的效果就会有所差异。如图可知,在相同频差的情况下,容量越小的滤波器其滤波效果就越差。

第二是电容上的压降。

由于滤波器的容量主要是通过滤波器上的电容值进行计算,因此在一定的谐波电流下,滤波器容量与电容器上的电压降落呈反比。这一点可以通过以下的推导表示。

假定滤波器母线上的电压为该电压等级的额定电压,则滤波器的容量可以通过式(1)进行计算。

$$Q = U_N^2 \omega C \quad (1)$$

当流过滤波器的谐波电流大小为 I_h ,谐波角频率为 ω_h 时,电容器上的压降为

$$U_c = \frac{I_h}{\omega_h C} \quad (2)$$

由此,可以得到

$$U_c = \frac{I_h}{\omega_h} \frac{U_N^2 \omega}{Q} = \frac{U_N^2 I_h}{nQ} \quad (3)$$

其中 n 为谐波次数。

由此可见,如果滤波器容量太小,那么电容器的额定电压就需要选择很大,从而抬高造价。

3 滤波器设计与效果

对 1.2 节所述工况中流进 11~12 线路的电流进行谐波分析,得到的结果如图 5 所示。由此可以发现,谐波中 3、4、5 次明显占优,同时也存在着少量的 2 次谐波。因此需要对 3、4、5 次谐波进行单调谐波滤波。

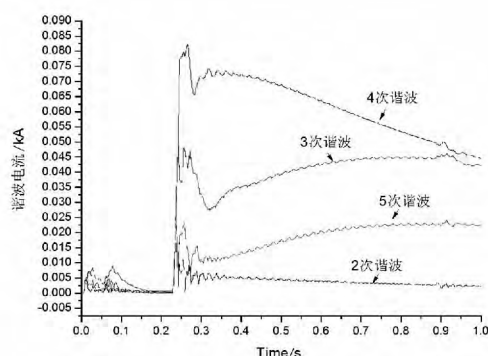


图 5 11~12 线路上电流谐波分布

根据每次谐波的最大值,分配滤波器各支路的容量。同时使得可以将滤波器总容量设计得接近并

小于 20 Mvar。

为了尽量保证每个滤波器上电容有类似的压降,设计了滤波器参数如表 1 所示。

表 1 滤波器参数设计

滤波次数	C	L	R
3	8.789 59E-06	0.118 891	4.0
4	2.109 5E-05	0.027 419	2.0
5	8.789 59E-06	0.043 181	3.0

当在 11 号母线 35 kV 侧采用如表 1 所示的滤波器,并投入 20 MVA 的低抗以维持稳态电压时,如发生 1 号母线对 550 MVA 空载变压器进行合闸操作,12 号母线 35 kV 侧三相电压瞬时值如图 6 所示。

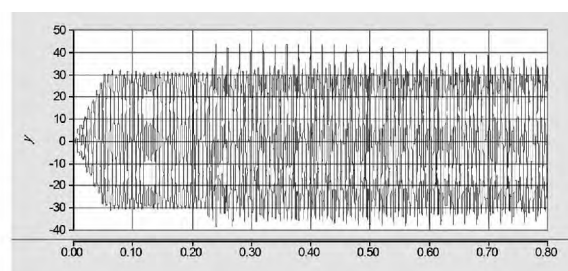


图 6 滤波器后石渠变电站 35 kV 电压瞬时值

对比图 2 与图 6 可知,采用设计的滤波器后 12 号母线的电压有了明显的好转,过电压情况得到较好的抑制。而对滤波器电容、电感上的压降进行仿真,可以得到仿真结果如图 7、图 8 所示。

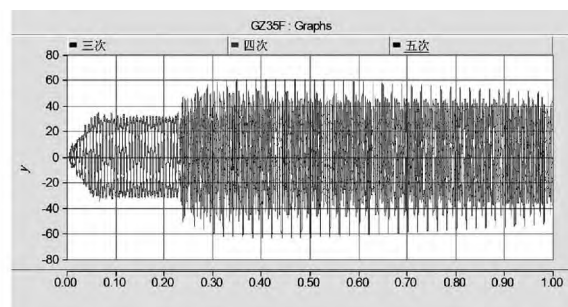


图 7 滤波器电容上的压降

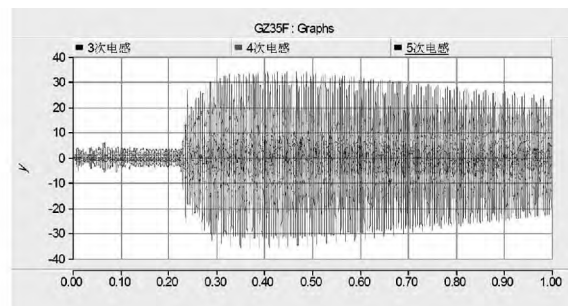


图 8 滤波器电感上的压降

由图 7、图 8 可知,在该仿真工况下,电容器上达到的最大峰值电压为 65 kV,电感为 35 kV,在选

型上必须比低容、低抗选择的额定电压要大。

4 滤波器对孤网后高周高压风险的影响

由于滤波器的加入,在基频下增加了容性无功,虽然在基频情况下增加了低抗以抵消容性无功,但是当电网孤网情况频率升高后,低抗已经无法完全补偿电容,因此对孤网系统的高周高压风险可能有恶化作用。

另一方面,由于滤波器中增加了电阻性元件,增加了有功性负荷,故对高周高压风险也有抑制作用。

图 9 所示是在母线 8~母线 9 线路 N-2 后,有无滤波器两种情况下 11 号母线 220 kV 侧的电压有效值。

由图 9 可知,在增加如表 1 所示滤波器后,由于增加了容性元件,恶化了孤网系统的高周高压风险,系统电压在故障过程中有较为明显的增加,从而引发过电压保护。

为了抑制滤波器对自励磁的影响,需要考虑在高周以及基波高压时切除容性滤波装置。因此可以考虑以下两种途径。

方法 1: 高周切滤波器,整定方式与发电机相同。即在频率高于 51.5 Hz 时,延时 0.5 s 切除滤波器。

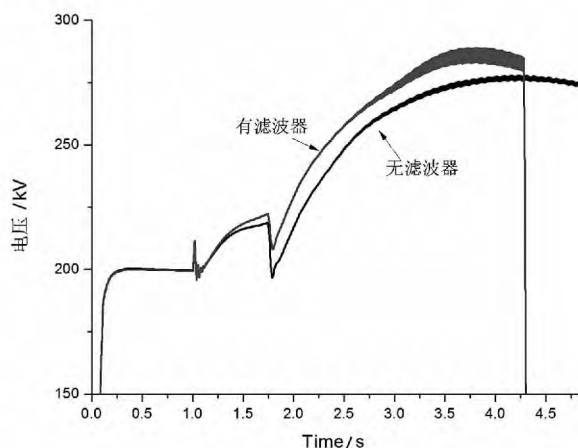


图 9 增加滤波器前后母线 8~母线 9 线路 N-2 故障中 11 号母线 35 kV 电压有效值

方法 2: 高压切滤波器。即在滤波器上配置灵敏度较高的基波过电压保护,如可设置为 1.2 p.u.,延时 0.5 s 切除变压器。

以上两种措施的效果如图 10 所示。

由图 10 可知,采用高周、高压两种策略均可以

较好地抑制滤波器对自励磁的恶化影响。同时可以

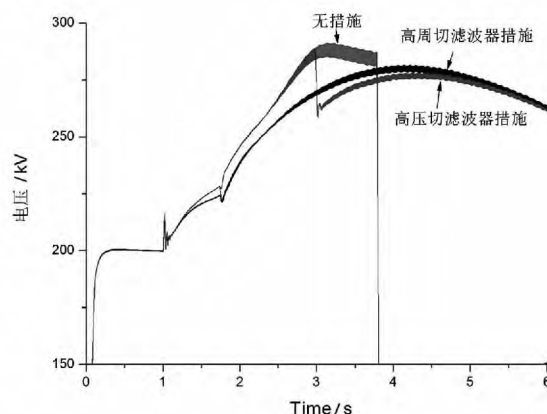


图 10 抑制措施效果图

发现高周策略由于启动时间较早,因此效果更为明显。

5 结 论

以西部某藏区电网为例,探讨了利用无源滤波器抑制励磁涌流引发谐波过电压风险的可行性,可以有以下结论。

1) 仿真结果表明,在弱联系电网中通过增加无源滤波器确实可以对励磁涌流引发谐波过电压风险进行有效的抑制。

2) 滤波器设计时滤波器的容量以及谐振频率十分关键。滤波器的容量决定了滤波器在有频差时的滤波效果同时也会影响一定谐波电流下电容器上的压降。滤波器容量越大,在相同频差下滤波效果越好,而在相同电流下电容的压降也越小。

3) 滤波器的谐振频率决定了滤波器在谐波下的无功特性,由于弱联系电网呈现容性状态,为了防止谐波放大,最好能够保证滤波器在谐波下也呈现容性阻抗,因此在弱联系地区中滤波器的调谐频率可能需要高于目标频率。

4) 滤波器对弱联系电网孤网运行后的高周高压风险的影响方面,一方面滤波器提供了容性功率恶化了电网孤网运行后的高周高压风险,另一方面滤波器上的电阻也增加了有功负荷有利于抑制该风险。但仿真结果表明,在装设无源滤波器后,当系统因故障孤网时,过电压的幅值往往会高于装设之前。

5) 采用高周、高压两种策略均可以较好地抑制滤波器对电网孤网运行后的高周高压风险的恶化影

(下转第 80 页)

因所导致的事故分析,主要从开关柜的运行维护、定期轮换、系统接地方式以及发电厂停电事故应急预案的良好执行等方面提出整改防治措施,避免类似事故的再次发生,尽可能保证全厂停电情况下的人员以及各类设备的安全。

1) 改善开关室及柜内运行环境:改善开关室及柜内运行环境,必要时在开关室内配置大功率除湿设备,安装空调。定期对开关室通风及除湿设备进行检查,特别是在雨季和霉雨气象情况下对室内设备除湿效果的监测和检查,确保开关室的通风及除湿设备运行正常。

加强开关柜的运行维护,当开关柜内断路器退出运行时,及时将该开关柜内的除湿加热装置投入运行。

2) 强化设备定期轮换制度:严格执行设备定期轮换制度,认真执行运行规程,确保设备安全可靠地投入运行,避免发生因某一设备长期处于备用状态而出现受潮、积污等降低设备绝缘水平的现象。

3) 完善 35 kV 系统运行方式:综合考虑发电厂运行环境以及设备运行维护情况,为避免再次发生类似系统谐振过电压事故,建议对该发电厂 35 kV 系统(不接地系统)的消弧设计方式进行修改,只保留经消弧线圈接地方式运行,取消消弧消谐装置。

4) 落实发电厂停电事故应急预案:为保证由于各种因素引发的全厂停电事故情况下的人员及设备安全,有必要从组织机构层面明确人员职责范围,定

(上接第 13 页)

响。同时可以发现高周策略由于启动时间较早,因此效果更为明显。

参考文献

- [1] 周佩朋,项祖涛,杜宁,等.西北 750 kV 电网合空变导致青藏直流闭锁故障分析[J].电力系统自动化,2013,37(10):129-133.
- [2] 种芝芝,栗小华,刘宝宏.西北电网主变充电引起青藏直流闭锁的原因分析及对策[J].电力建设,2013,34(3):88-91.
- [3] BRUNKE J H, FROHLICH K J. Elimination of Transformer Inrush Current by Controlled Switching —— Part 1: Theoretical Consideration [J]. IEEE Trans. on Power Delivery 2001,16(2):276-280.
- [4] BRUNKE J H, FROHLICH K J. Elimination of Trans-

former Inrush Current by Controlled Switching —— Part 2: Application and Performance Considerations [J]. IEEE Trans on Power Delivery 2001,16(2):281-286.

4 结 语

35 kV 高压开关柜是发电厂的重要设备之一,其运行状态对发电厂乃至电力系统的安全可靠运行有着重大影响。

通过对这起 35 kV 开关柜绝缘缺陷导致主变压器开关跳闸引起全厂停电的事件原因进行分析,就开关柜运行维护、轮换制度、35 kV 系统接地方式以及发电厂停电事故应急预案的全面执行等方面提出整改及防治措施,供各发电厂作为参考,希望可以对预防类似事故再次发生起到一定的作用。

参考文献

- [1] 戚永康.浙江省火力发电厂用电高压开关柜事故分析[J].浙江电力,1997(2):6-10.
- [2] 朱雪松.几起典型的 220 kV 变电站 35 kV 开关柜故障及其防治对策[J].湖州师范学院学报,2011(33):217-219.
- [3] 朱根良.浅议中压开关柜事故调查中的故障分析[J].高压电器,2002,38(5):62-63.
- [4] 崔成恕,高华.金属封闭开关设备的发展浅析[J].高压电器,2003,39(2):18-22.
- [5] 张聘,高丕俭.防范全厂停电事故[J].电力安全技术,2005(7):44-45. (收稿日期:2013-11-29)
- [6] POVH D, SCHULTZ W. Analysis of Overvoltage Caused by Transformer Magnetizing Inrush Current [J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1978, 97(4): 1355-1365.
- [7] 谢达伟,洪乃刚,傅鹏.一种变压器空载合闸励磁涌流抑制技术的研究[J].电气应用,2007,26(3):34-38.

作者简介:

滕予非(1984),博士,工程师,研究方向为电力系统及其新型输电的分析与控制;

汤凡(1983),硕士,助理工程师,研究方向为电力系统稳定与控制;

魏巍(1984),博士,工程师,研究方向为电力系统稳定与控制。 (收稿日期:2013-12-16)

影响 BZT 装置正确动作的原因分析及 自适应改进措施

王 红 ,常喜强

(新疆电力调度控制中心 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘 要: 电网中备用电源自动投入装置(简称备自投或 BZT)可以提高供电可靠性和连续性,在生产实际中得到广泛应用。但是,随着电网中新设备的接入 BZT 正常运行受到了影响。首先介绍了 BZT 装置基本工作原理及其分类;其次分析了影响 BZT 装置正确动作的主要因素——分布式电源(DG)的接入、与安自装置功能冲突以及备自投后主变压器过负荷等。最后,针对 DG 接入问题提出了主供电源跳开时联切 DG 的方案,针对安自装置与 BZT 功能冲突问题提出了电压不平衡启动判据,针对主变压器过负荷问题提出了基于功率负荷的自适应 BZT 方案,具有较强的实用性。

关键词: 备自投; 分布式电源; 安自装置; 负荷; 自适应

Abstract: Automatic throw-in devices of stand-by power can improve the reliability and continuity of power supply system, and it is widely used in the actual production. However, with grid integration of new devices, the operation of automatic throw-in device of stand-by power is affected. Firstly, the basic working principle of automatic throw-in device and its classification are introduced. Secondly, the main factors that affect the right action of automatic throw-in device are analyzed, that is, the integration of distributed generation (DG), the conflict with automatic safety control devices and the overload of main transformer etc. Finally, for DG integration, the scheme is proposed that DG is jointly cut when the main supply power jumps; for the conflict of automatic safety control device with automatic throw-in device, the startup criterion of voltage unbalance is proposed; for the overload of main transformer, the adaptive automatic throw-in device based on power load is proposed, which has a strong practicality.

Key words: automatic throw-in device of stand-by power; distribution generation; automatic safety control devices; load; adaptive

中图分类号: TM762 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2014)02-0014-04

0 引 言

备用电源自动投入装置(简称备自投或 BZT)是电力系统中为了提高供电可靠性而装设的自动装置^[1]。目前,中国 110 kV 及以下电压等级电网多为开环运行^[2-4]。对处于电网终端的变电站,为了提高供电可靠性和经济性,其进线多为两路——互为备用或一备一用。近年来,随着能源需求和新能源技术的发展,以风电、光电为代表的分布式电源(distributed generation,简称 DG)接入电网以及系统接线和运行方式等因素的影响,BZT 常常不能正确动作^[5-10]。

首先介绍了 BZT 装置基本工作原理及其分类;其次分析了影响 BZT 装置正确动作的主要因

素——分布式电源的接入与安自装置功能冲突以及备投后主变压器过负荷等。最后,针对 DG 接入问题提出了主供电源跳开时联切 DG 的方案、针对安自装置与 BZT 功能冲突问题提出了电压不平衡启动判据、针对主变压器过负荷问题提出了基于功率负荷的自适应 BZT 方案,得出一些有益结论。

1 备自投装置的原理及分类

备自投装置是一种当工作电源因故障断开后,能自动且迅速地将备用电源投入到工作,保证对用户不间断供电的一种自动装置。BZT 采用交流不间断采样方式采集信号并实时进行傅里叶法变换,进而准确判断电源状态,并经一定延时来切换电源进线。

目前,中国电网中 BZT 常用方式主要有进线

BZT 方式和母联分段 BZT 方式以及主变压器 BZT 方式,且均以微机型 BZT 为主,以图 1 为例来说明。

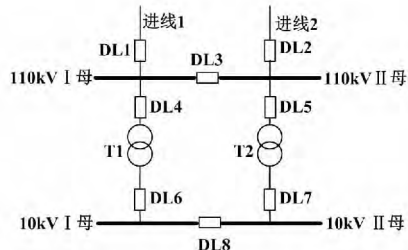


图 1 典型备自投接线方式

1) 进线 BZT 方式

进线 BZT 方式中,图 1 中 DL2、DL8 断开,其他断路器合上。正常运行方式下,进线 1 处于工作状态,进线 2 备用。当 BZT 检测到变电站 110 kV I 母失压且主供开关 DL1 无电流,在整定时间内,主供电源进线对侧重合闸重合不成功。此时,若进线 2 有压,则备自投装置启动,迅速跳开 DL1,合上 DL2。

2) 母联分段 BZT 方式

母联分段 BZT 方式下一般无备用进线 2。图 1 中,DL8 断开,其他断路器合上。即正常工作时 2 台变压器各母线均投入,分段断路器断开,10 kV 的两段母线互为备用。当 10 kV 母线的某一进线电源因故障断开后且重合不成功,则 BZT 启动,跳开故障线路且 DL8 自动投入。

3) 主变压器 BZT 方式

主变压器备自投方式下 T1 工作,T2 备用。DL1、DL3、DL4、DL6、DL8 合上,其他断路器断开。当变压器 T1 发生故障,10 kV I 母失压,则 BZT 启动,跳开 DL4、DL6,合上 DL5、DL7。

2 影响备自投正确动作的主要因素

2.1 DG 接入对 BZT 的影响

如图 2 所示,以 110 kV 终端变电站为例,进线 L1 运行,L2 备用,即 DL1、DL3、DL4、DL6、DL8、DL9 在合位,DL2 在分位。DG 从 110 kV 母线侧接入变电站,以下分两种情况讨论,当变电站主供电源线路故障时 DG 对 BZT 的影响。

(1) DL1 对侧开关无重合闸功能

当电源进线 L1 发生故障,DL1 对端保护动作跳闸且不重合,在没有 DG 情况下,此时 110 kV I 母失压,备自投满足启动条件,迅速启动跳开 DL1,合上 DL2,恢复对负荷供电。但当 DG 接入时,在电源进

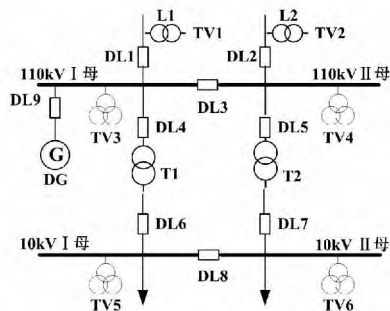


图 2 含 DG 的变电站接线图

线消失后,DG 继续与电网连在一起对负荷送电,将形成一个单独供电的短时孤岛。导致 110 kV I 母、II 母上仍有电压且高于备自投检无压定值(一般为 $0.3U_e$),备自投不启动。

(2) DL1 对侧开关有重合闸功能

当 DG 未接入时,进线 L1 发生瞬时性故障时,DL1 对侧跳开后,经一段时间延时重合闸检无压重合,恢复供电,备自投不投运。若进线发生永久性故障,DL1 跳开后重合不成功,此时备自投检无压启动,跳开 DL1,合上 DL2。在这个过程中,备自投时间整定必须躲过重合闸动作时间。当 DG 接入时,瞬时性和永久性故障下,备自投检无压均失效,从而不启动,即备用电源无法可靠供电。

2.2 BZT 与安自装置的功能冲突的影响

电网中安自装置主要有低频、低压解列装置、振荡(失步)解列装置、切负荷装置、自动低频、低压减负荷装置、大小电流联切装置等。当系统中频率或电压低于电网下限时,即系统有功或无功不足时,其将可靠切除部分负荷,使系统频率或电压恢复稳定。为了保证电网的稳定,中国 220 kV 变电站内开始大量安装安自装置,其对 110 kV 线路 BZT 的投退将产生影响。

如图 3 220 kV 站 I 安装有低周减载装置,同时 A 站内安装有进线 BZT 装置。当系统有功不足时,要求 220 kV 站 I 处低周减载装置动作以切除负荷线路 1,此时 A 站处 BZT 装置检测到母线无压且主供开关无电流,满足启动条件,BZT 装置将会误动,即 BZT 与低周减载装置之间发生了功能冲突。在实际运行中,BZT 装置应能区分线路是因故障时保护动作跳开,还是因安自装置动作跳开。

2.3 过负荷对 BZT 装置的影响

如图 4 所示为典型的两线路主变压器组运行方式,配置主变压器 BZT 或分段 BZT。若系统中两台

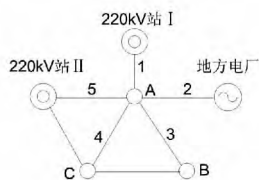


图 3 典型电网结构图

主变压器容量大小不同或单台主变压器容量小于全站负荷,此时,其中 1 台主变压器发生故障时,BZT 的动作将全部负荷切换到另 1 台主变压器上,易造成单台主变压器过负荷。同时,此时若闭锁 BZT 会产生甩掉一半负荷的问题。

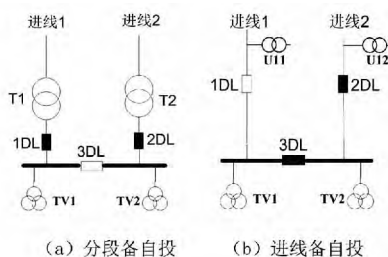


图 4 两线路主变压器组接线图

1) 分段 BZT 过负荷问题

如图 4(a) 所示,当主变压器 1(或 2)断电时,BZT 投入跳开 1DL(或 2DL),主变压器 2(或 1)将承担 2 台主变压器的负荷,将出现过负荷问题,过负荷保护装置可能会动作,造成全站失电。若此时,BZT 闭锁则将甩掉一半负荷。

2) 进线 BZT 过负荷问题

如图 4(b) 所示,若故障前由进线 1 带全站负荷,且进线 1 出自 1 台大容量变压器。当进线 1 失电时,BZT 将跳开 1DL 投入 2DL,若线路 2 出自 1 台小容量变压器,则将出现小容量主变压器过负荷。此时,若闭锁 BZT 则会产生全站失电问题。

3 备自投自适应运行方式逻辑策略

3.1 适应 DG 接入的备自投逻辑改进

当电源进线故障时,为快速可靠地切除 DG,选取以下两种解决方案。

1) 主供电电源进线安装光纤纵差保护。当主供电电源进线发生故障时,线路两侧保护跳闸的同时,联跳 DG,BZT 检无压启动,这样可以缩短 BZT 的投入时间。

2) 在进线断路器(即图 2 中 DL1)处加装具有

检电压、电流以及功率方向等功能的装置。系统正常运行时,DL1 的功率流向为线路到母线。当主供电电源故障时,DG 将向故障点提供一定短路电流,DL1 上功率流向将发生变化。当主供电电源线路因断线等其他原因使 DL1 对侧开关跳开,DL1 上有电压但无电流。所以,若 DL1 处功率流向发生变化或 110 kV 母线有压但 DL1 上无电流,则迅速跳开 DL1,同时联切 DG。

上述两种方法的思路都是故障时联跳 DG,具体实现方法如下。

为确定 DG 在 DL2 闭合前已经切除。这里是基于南瑞继保 RCS-9653BZT 中的动作逻辑来改进。

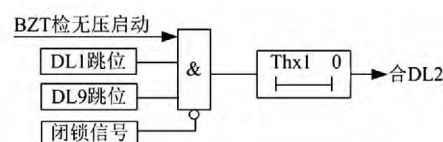


图 5 基于 RCS-9653 的部分逻辑改进

逻辑框图如图 5 所示,在 BZT 出口动作与门处加一输入条件——DG 出口断路器 DL9 跳位。在此条件下,经延时继电器一定时间延时后为 DL2。若故障清除,母线电压恢复,DL9 经检同期合闸。

3.2 适应安自装置的备自投逻辑改进

当进线两端变电站同时装有安自装置和 BZT 时,若线路因低周减载跳开,则 BZT 应该闭锁,保证负荷可靠切除。

通过比较变电站母线电压数值大小的对称性,来区分线路切除是因为本身故障还是因为安自装置动作。

具体实现方法如下。

令则 $u_{\varphi\max} = \max(|U_a|, |U_b|, |U_c|)$ 则

$$u_{\varphi\min} = \min(|U_a|, |U_b|, |U_c|) \quad (1)$$

$$u_{\varphi\max} = \max(|U_{ab}|, |U_{bc}|, |U_{ca}|) \quad (2)$$

$$u_{\varphi\min} = \min(|U_{ab}|, |U_{bc}|, |U_{ca}|) \quad (3)$$

$$k_1 = u_{\varphi\min} / u_{\varphi\max} \quad k_2 = u_{\varphi\min} / u_{\varphi\max} \quad (4)$$

BZT 是否投入的判据如下:若 $k_1 < k_{1set} \cup k_2 < k_{2set}$,即图 3 中 110 kV 输电线路 1 发生故障。在此情况下,开放 BZT 一段时间,这段时间内 BZT 按原有动作逻辑动作。若上述条件不满足,则为外部 110 kV 输电线路故障,此时 BZT 装置闭锁,保证负荷可靠切除。BZT 装置必须在电压不平衡启动判据输出为 1 时才能启动,BZT 电压不平衡启动判据的逻辑如图 6 所示。

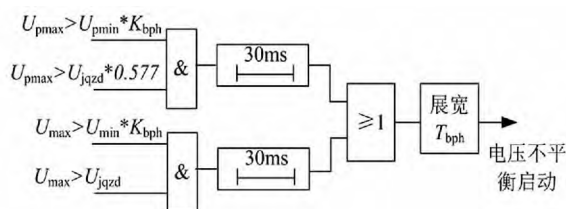


图 6 BZT 电压不平衡启动判据逻辑

3.3 适应负荷情况的备自投逻辑改进

当主供电电源进线因故障而跳开时, BZT 将工作母线接于备用电源上, 此时可能出现负荷超出备用电源容量的情况, 备用电源或设备可能会因过负荷而使继电保护装置动作, 进而扩大停电范围。这与使用 BZT 的初衷相违背。针对上述问题, 提出一种基于功率负荷自适应的 BZT 方案。

图 7 所示为基于功率负荷自适应的 BZT 方案流程。

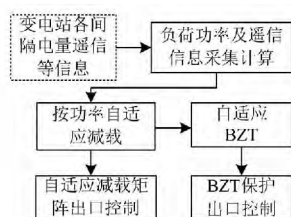


图 7 基于功率负荷的自适应 BZT 方案

2 台主变压器的负荷功率及遥测信息通过变电站二次侧采样接口来采集并转换成一次侧有功功率 (P_1 、 P_2) 及无功功率 (Q_1 、 Q_2)。

故总视载功率为

$$S = \sqrt{(P_1 + P_2)^2 + (Q_1 + Q_2)^2} \quad (5)$$

为使 BZT 动作后, 主变压器在规定负荷容量内运行。需要根据 BZT 投入前的负荷分布情况, 选择性地切除部分负荷, 直到主变压器容量不过载。

若减载次数为 n 次, 则各出线的负荷功率按 n 轮减载顺序逐次减负荷, 直到满足要求。

第一轮减载后, 系统所剩总负荷为

$$P_{n1} = P_1 + P_2 - P_{j1} \quad (6)$$

$$Q_{n1} = Q_1 + Q_2 - Q_{j1} \quad (7)$$

$$S_{n1} = \sqrt{(P_{n1} + Q_{n1})^2} \quad (8)$$

第 n 轮减载后, 系统所剩总负荷为

$$P_{in} = P_1 + P_2 - (P_{j1} + P_{j2} + \cdots + P_{jn}) \quad (9)$$

$$Q_{in} = Q_1 + Q_2 - (Q_{j1} + Q_{j2} + \cdots + Q_{jn}) \quad (10)$$

$$S_{in} = \sqrt{(P_{in} + Q_{in})^2}$$

其中, 第 n 轮需要减去的有功、无功如下。

$$P_{jn} = \sum_{x=1}^m P_{lx} \quad Q_{jn} = \sum_{x=1}^m Q_{lx} \quad (11)$$

其中 l_x 和 m 分别为被减载线路间隔、每次减载所选低压出线间隔数。

已知备用主变压器容量为 S_1 , 分别将每一轮负荷减载后的总视载功率与主变压器容量分别作比较。

BZT 投入运行的逻辑条件如下。

1) 若总负荷 $S < S_1$, 则减载装置不用减载, BZT 直接投入运行。

2) 若总负荷且 $S > S_1$ 且 $S_{(n-1)} > S_1$, $S_m < S_1$, 则需要进行 n 次减载, 直至第 n 次减载后的容量 S_m 满足条件则不需要减载。若不满足则继续减负荷, 直至满足条件为止。此时, BZT 装置可将负荷投入到备用主变压器。

4 结论与展望

分析研究了 DG 接入、安自装置与 BZT 功能冲突、过负荷等多种情况下 BZT 装置的不足之处。针对 DG 接入问题提出了主供电电源跳开时联切 DG 的方案, 针对安自装置与 BZT 功能冲突问题提出了电压不平衡启动判据, 针对主变压器过负荷问题提出了基于功率负荷的自适应 BZT 方案。上述方案提高了 BZT 装置的可靠性, 具有较强的实用性。

参考文献

- [1] 杨忠礼, 赵慧光, 张光衡. 影响备自投正确动作原因分析[J]. 电力系统保护与控制 2008 36(21): 97-98, 101.
- [2] 刘若溪, 张建华, 李更斌. 地区电网备自投在线投退控制策略(二) 考虑备用电源侧可用供电能力的备自投控制策略[J]. 电力自动化设备 2011 31(4): 13-16.
- [3] 张丽丽, 侯有韬. 备自投装置在双母线接线方式下的改进[J]. 电力系统保护与控制 2008 36(17): 90-91.
- [4] 王锐, 李钊, 许元戎. 高压电网自适应式站间实时自控备自投装置的研制[J]. 继电器 2007 35(19): 45-49.
- [5] 张鑫. 计及主变保护的备自投装置改进方案[J]. 电力系统保护与控制 2009 37(3): 91-92.
- [6] 马力, 宋庭会, 库永恒. 防止母线 PT 断线引起备自投不正确动作的研究与改进[J]. 继电器 2008 36(2): 79-81.
- [7] 刘延乐, 刘文颖, 王传起, 等. 电网备自投自适应建模方法研究[J]. 电力系统保护与控制 2012 40(6): 40-45.

(下转第 77 页)

5) 由于长期没有进行倒母操作,隔离开关传动部分没有有效运动,传动部分因长期不操作造成积污、锈蚀和卡涩,最终出现操作卡涩、分闸、合闸拒动的现象。

6) 本系列的 GW16A 型隔离开关由于在连接轴内渗入水分,造成齿轮和齿条锈蚀,导致隔离开关分合闸不到位、卡涩、不同期等现象。

4 预防措施

为了防止公司同系列 GW16A 型隔离开关发生同类型问题,建议采取以下预防措施。

1) 针对防水功能差的原因,对防水罩与触指接触部分、螺栓连接处、顶杆滚轮防水罩部分涂抹防水胶,并在触指座挖开两个排水孔,这样水分在受热后变成水蒸气从排水孔排出。

2) 从锈蚀的原理角度,主要是控制或避免铁发生电化学反应:①保持导电管内干燥;②对弹簧表面涂抹二硫化钼锂基润滑脂;③将复位弹簧的轴套更换成镀锌的材质。

3) 检查复位弹簧和夹紧弹簧的时候,务必测量弹簧自由松弛时候的长度,应符合厂家要求,以防弹力不足,导致分合不到位。

4) 加强对 GW16A 型隔离开关红外测温,防止弹簧弹力不足,在状态检修制定计划时,建议对此类型隔离开关不宜延长检修周期,按时进行检修。

5) 重点检查连接轴滚轮的接触是否紧密,滚轮是否磨损,上导电管顶杆露出部分距离是否合适,因为这将决定最终触指的夹紧度。

6) 检修本类型隔离开关时,应手动进行分合,确认无卡涩再做电动分合 5 次,确保分合到位并且同期合格,检修过程中重点检查传动部分是否灵活,密封部分是否失效。

7) 由于本类型隔离开关下导电管无法做到全密

封,或多或少会有水分渗入下导电管内腐蚀拉杆和平衡弹簧,因此检修时应重点关注下导电管作操作是否卡涩、灵活,若出现问题,应及时进行解体处理。

5 结 论

通过对该类型隔离开关的大修及解体检查,发现不少问题是在运行中不能及时发现的,如导弹簧锈蚀断裂、顶杆锈蚀、转动部分卡涩等,这些缺陷都非常容易恶化,造成严重故障。隔离开关机械回路的防尘、防雨能力较差,极易引发机械故障。为防止此类高压隔离开关发生故障,保证安全运行,要在日常巡视操作中注意观察其状况,发现异常及时处理,避免缺陷恶化造成故障。应根据隔离开关运行环境具体运行状况,确定其解体大修年限及小修维护检查项目。只有把握好隔离开关检修维护的关键问题,才能使隔离开关设备的安全运行得到保障。

参考文献

- [1] 朱勇,王雁飞,马庆君. GW16-252 隔离开关拐臂发热原因分析及处理方案[J]. 中国电力教育, 2008(s1): 166-167.
- [2] 孙亚辉. GW16 型隔离开关的改造原因分析[J]. 华中电力, 2011, 24(6): 21-22.
- [3] 柳舜水,金勇. 高压隔离开关接触电阻超标原因分析及改造[J]. 内蒙古电力技术, 2012, 30(2): 86-88.
- [4] 肖辉,吴兴斌,曾祥君. GW16/17 型隔离开关在运行中出现的问题及解决方案[J]. 长沙理工大学报: 自然科学版, 2005, 20(3): 18-19.
- [5] 孟辉,李杰. GW16、GW17 型隔离开关缺陷处理[J]. 东北电力技术, 2006(3): 30-32, 33.

作者简介:

李运涛(1968),高级技师,现从事变电检修管理工作;

刘同杰(1984),硕士,现从事变电检修工作。

(收稿日期:2013-11-04)

(上接第 17 页)

[8] 秦贵锋,王明,张进. 智能变电站自适应备自投应用[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(6): 111-115.

[9] 汤大海,杨合民,刘春江,等. 一种自适应的扩大内桥备自投装置[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(15): 107-111.

[10] 赵家庆,霍雪松,钱科军,等. 基于功率负荷自适应的

备自投实现方法[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(3): 50-53.

作者简介:

王红(1959),工程师,研究方向为电力系统调度与控制。

(收稿日期:2013-10-11)

光伏电站与电气化铁路集中接入地区电网稳定性研究

胡仁祥¹, 白生荣¹, 常喜强², 罗金玉¹

(1. 国网吐鲁番供电公司, 新疆 吐鲁番 838000; 2. 国网新疆电力公司, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘要:就“十二五”期间新疆吐鲁番鄯善地区 220 kV 变电站同时接入大规模光伏电站和电气化铁路, 针对两者运行特点, 从理论上分析了光伏电站与电铁牵引负荷集中接入地区电网对稳定运行带来的一些新问题, 并搭建了新疆吐鲁番电网模型, 采用 PSASP 仿真分析的方法, 对电铁牵引负荷与光伏电站集中接入地区电网对稳定性的影响进行了分析和评估。

关键词:光伏电站; 电气化铁路; 集中接入; 仿真; 稳定性

Abstract: Xinjiang Turpan 220 kV substation in Shanshan area will be integrated with large-scale photovoltaic power stations and electrified railway during the "Twelfth Five Year Plan". Aiming at both operating characteristics, some new problems influencing the stable operation of district power grid brought by the concentrated integration with photovoltaic power stations and electrified railway traction load are analyzed theoretically, and the model for Xinjiang Turpan power grid is established. Using the simulation analysis with PSASP, the influences of concentrated integration with electrified railway traction load and photovoltaic power station on the stability are analyzed and evaluated.

Key words: photovoltaic power station; electrified railway; concentrated integration; simulation; stability

中图分类号: TM712 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)02-0018-04

0 引言

随着世界能源危机和全球气候变暖等问题的日益突出, 发展可再生能源已成迫切需要, 其中太阳能光伏发电是再生能源利用的重要形式之一^[2]。现今光伏发电技术取得迅速发展, 许多大规模光伏电站并网运行, 其接入到电力系统的位置多与太阳能资源有关。在光伏电站周围也伴随有铁路的穿越, 铁路的快速发展, 得到电网的不断支持, 电气化铁路得到了迅速的应用和推广。电网企业往往根据电网情况, 在合适的地点接入了光伏电站, 又同时接入了电气化铁路牵引站。目前, 在太阳能资源丰富的新疆, 随着大规模光伏电站的建成投运和兰新电气化铁路的改造建设, 部分地区出现了光伏电站与电气化铁路集中接入电网的情况。光伏电站是一种不稳定电源, 其出力的间隙性、波动性和不可控性对电网有较大影响。同时电铁牵引负荷具有非线性、单相、冲击特性, 在电力机车的运行过程中, 也同样对电网产生较大的影响^[7]。当光伏电站与电铁牵引负荷集中接入地区电网后, 它们在运行过程中既能相互

影响, 又会共同影响电网安全稳定运行。

1 光伏发电系统^[2, 4]

基于换流器并网的三相光伏发电系统由光伏阵列、逆变器及交流电路组成。其中, 交流电路由滤波器和变压器组成。系统组成结构如图 1 所示。

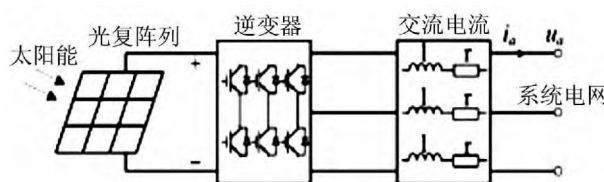


图 1 三相光伏发电系统组成

1.1 光伏阵列模型

光伏阵列由大量光伏组件组成, 其输出电流为

$$I_p = MI_t - MI_0 \left[\exp \left(\frac{q \left(NV + \frac{I_p R_s N}{M} \right)}{NAkT_p} \right) - 1 \right] - \left[\frac{NV + \frac{I_p R_s N}{M}}{\frac{NR_{sh}}{M}} \right] \quad (1)$$

式中, V 、 I_p 为光伏阵列输出电压和电流; k 为波尔兹曼常数; q 为电荷常数; I_1 为单位光伏组件产生的光电流; I_0 为二极管反向饱和电流; A 为光伏组件的理想因子; R_s 、 R_{sh} 为单位光伏组件的串联合并联阻抗; N 为光伏组件串的串联数; M 为光伏组件串的并联数; T_p 为电池表面温度。

1.2 逆变器模型

采用基于电压源逆变器的光伏并网系统, 根据图 1 由 KCL 和 KVL 得到一组方程。

$$\begin{bmatrix} \frac{di_a}{dt} \\ \frac{di_b}{dt} \\ \frac{di_c}{dt} \end{bmatrix} = -\frac{1}{l} \begin{bmatrix} r & & \\ & r & \\ & & r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \frac{1}{l} \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} & \frac{2}{3} & \frac{1}{3} \\ \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} + \frac{u}{l} \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\theta = \omega t - \delta \quad (3)$$

$$u = U_c / 2 \quad (4)$$

式中 u_a 、 u_b 、 u_c 为交流母线电压基波分量; i_a 、 i_b 、 i_c 为逆变器三相输出电流; r 、 l 为电阻、电抗; ω 为系统基波角速度; U_c 为逆变器输出电压的基波分量; δ 为 u 和 U_c 之间的相角差。

1.3 光伏发电系统控制模型

光伏发电系统控制方框图如图 2 所示。三相光伏发电系统采用电流和电压协调控制结构, 电压控制单元 (AVR) 利用光伏阵列电压与参考值的差值为输入信号, 确定电流控制单元电流输入信号。电流控制单元 (ACR) 实现逆变器与系统电流的跟踪控制。锁相环节 PLL 实现电网电压相位的跟踪, 为逆变器提供控制信号。最大功率跟踪 (MPPT) 负责最大功率点的确定, 完成 PWM 调制以控制逆变器。

2 电气化铁路供电系统

牵引供电系统^[5]主要由牵引变电所、分区亭及牵引电网组成。牵引网额定电压为 25 kV 单相, 最高运行电压为 27.5 kV。牵引变电所高压侧一般接于 110 kV 或 220 kV 电力系统。牵引变电所主变压器低压侧一相接地, 另外两相为两侧单相供电臂的电源。为了减轻高压侧三相不平衡度, 铁路全线所

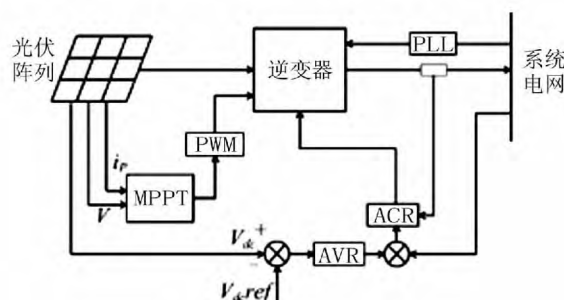


图 2 光伏发电系统控制方框图

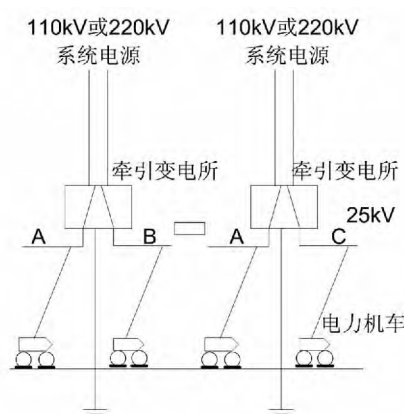


图 3 典型牵引供电系统间图

有牵引变电所主变压器低压侧轮转换接地, 牵引供电系统两个牵引变电所之间的供电臂在中间设立分区亭, 正常情况下断开运行, 事故情况下, 合闸后可作为两所的相互备用电源。

由于 220 kV 系统的短路容量大于 110 kV 系统的短路容量, 接入高电压等级时, 电铁冲击负荷对接入点的电压影响要小于接入低电压等级^[9]。新疆电网的兰新电气化铁路牵引站都是通过接入 220 kV 变电站接入。

3 电铁负荷对系统无功需求

在电力机车准备进入牵引变电站的供电范围之前, 牵引变基本处于空载状态; 当电力机车滑进牵引变的供电臂时, 立刻需要牵引变提供与电力机车匹配的有功和无功功率; 而电力机车离开牵引变的供电范围时, 牵引变又迅速进入空载状态; 对系统无功表现为明显的阶梯状动态无功功率需求^[9]。图 4 所示为典型电气化铁路牵引站的无功变化波形。从图 4 中可看出电铁负荷的无功功率表现为明显的阶梯状态。

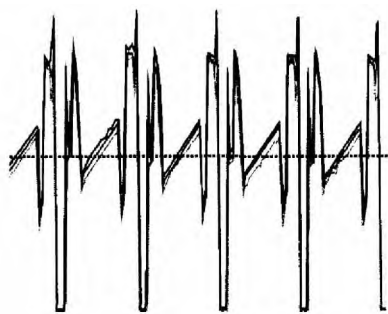


图 4 典型电气化铁路牵引站无功功率波形

4 光伏电站与电铁集中接入地区电网仿真分析

“十二五”期间新疆吐鲁番鄯善红山口地区首座通过 220 kV 升压站点对网并网接入光伏发电电站。9 座光伏电站(180 MWp) 升压后,通过 LGJ-2×300 导线 9.6 km 接入新疆主网 220 kV 柯柯亚变电站,同时兰新铁路 220 kV 巴哥牵引站、连木沁牵引站也接入 220 kV 柯柯亚变电站,接入系统示意图如图 5 所示。

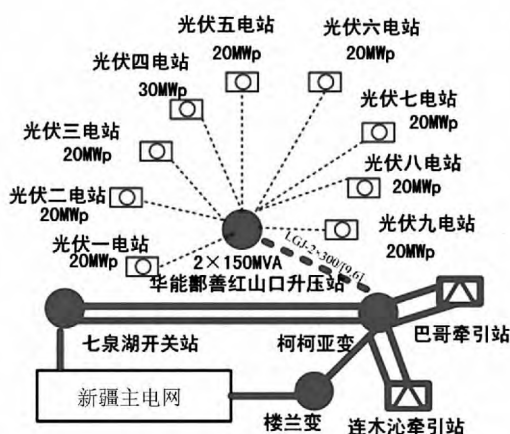


图 5 光伏电站与牵引站集中接入
220 kV 柯柯亚变电站示意图

在电力系统综合分析程序 PSASP 中搭建该地区电网模型。两座电铁牵引负荷共计 20 MW,光伏电站出力共计 170 MW 的情况下进行仿真分析。

4.1 光伏电站对电铁牵引站的影响

光伏电站受乌云、日照扰动,光伏出力的有功、无功会有波动,这样会造成系统的潮流变化,各节点电压波动。当光伏电站受到云彩、日照扰动时巴哥牵引站高压母线电压波动的仿真曲线如图 6 所示。

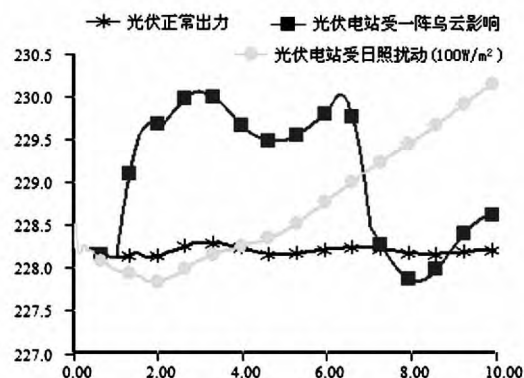


图 6 不同扰动下 220 kV 巴哥牵引站高压母线电压

由图 6 可以看出,光伏电站受不同扰动下,牵引站母线电压存在不同程度的波动,扰动幅值到 2 kV 左右。电压的波动会直接影响电力机车的运行状态,造成机车电力电子器件频繁受到冲击,缩短其使用寿命,加大电力机车注入电网的负序电流和谐波^[7]。

4.2 电铁牵引站对光伏电站的影响

电铁牵引负荷随着运行状况的不同会对系统造成不同程度的冲击,引起光伏电站的出力 and 汇集站电压的波动。光伏电站未受扰动而电铁负荷运行时光伏电站输出的有功功率和汇集站电压变化的仿真曲线如图 7 和图 8 所示。

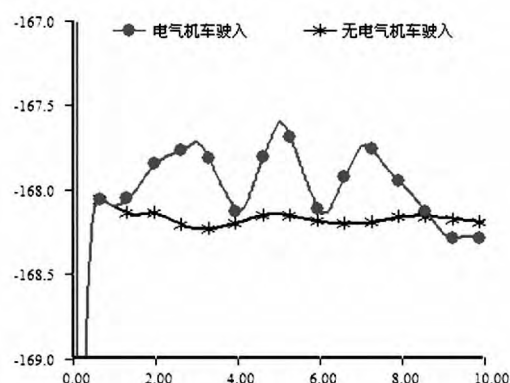


图 7 电气机车运行时光伏联络线

(红山口变电站—柯柯亚变电站)有功波动

从图 7 和图 8 中可以看出,电气机车运行时,光伏电站有功出力减少,而无功出力增加,以补偿机车的部分无功消耗,对电网可起到一定的电压调节作用。

从图 8 和图 9 中进一步可以看出,电气机车驶入,使得光伏汇集站电压下降,光伏电站自动调节无功出力,以提高汇集站母线电压。光伏电站无功出力波形与汇集站电压波形,波动曲线几乎一致,相位

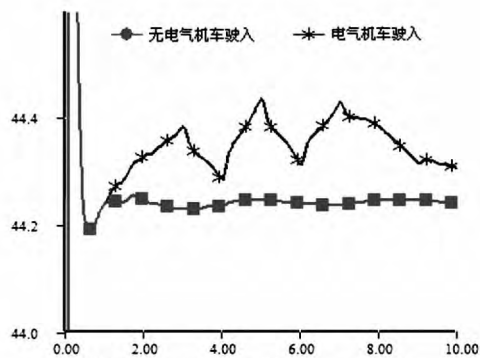


图 8 电气机车运行时光伏联络线
(红山口变电站—柯柯亚变电站) 无功波动

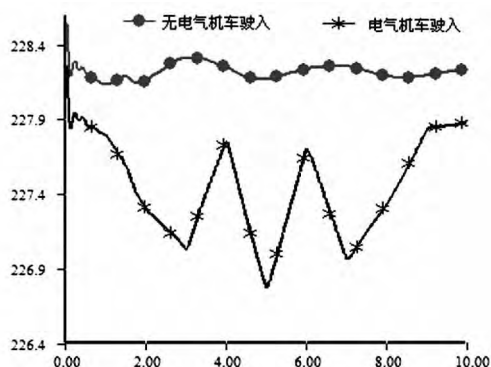


图 9 电气机车运行时光伏汇集站母线电压波动

相反。

4.3 光伏电站与电铁集中接入对电网的影响

光伏电站出力受运行、日照扰动、切机等影响,不同影响下,光伏电站的输出功率有所波动,将对系统造成一定的冲击,如果此时再叠加上电铁牵引负荷对系统的冲击,将进一步恶化地区电网的稳定水平。电气机车运行前后光伏电站受不同扰动时集中接入点电压波动仿真曲线如图 10 至图 12 所示。

由图 10 至图 12 可以看出,电铁牵引负荷未接入地区电网时由于光伏电站受各因素影响,将引起接入点电压波动;而当光伏电站与电气化铁路集中

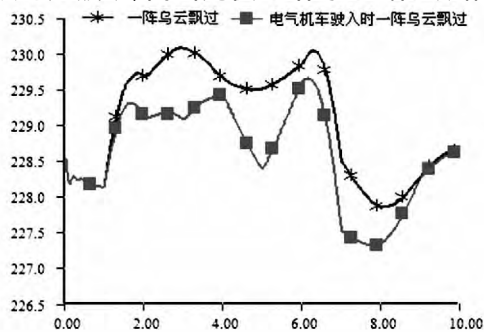


图 10 一阵乌云飘过时集中接入点母线电压波动

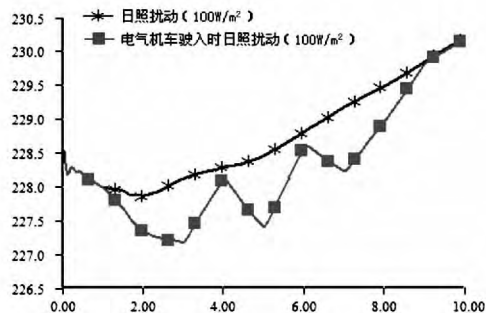


图 11 日照扰动时集中接入点母线电压波动

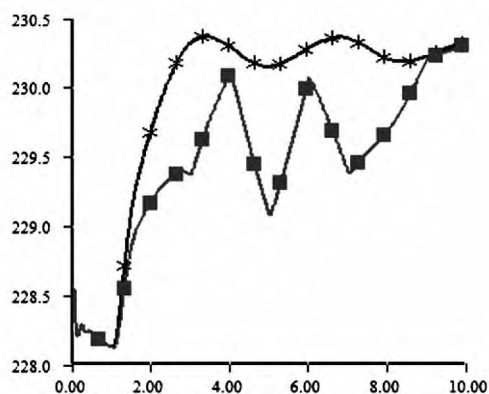


图 12 稳控动作切除 4 座光伏电站时集中
接入点母线电压波动

接入地区电网后,在电铁牵引负荷运行时光伏电站受不同因素扰动将引起集中接入点电压的大幅波动。

5 结 论

光伏电站本身就是不稳定电源,其运行特性受云彩、日照等影响较大,当电铁牵引负荷接入后,电力机车在运行过程中会造成光伏电站出力的波动,加大光伏配套电力元件故障的概率,从而加剧了对地区电网稳定性的影响。

为了减小电铁牵引负荷运行时光伏电站的影响,一方面应在电气化铁路牵引站装设 SVC 或者 SVG 补偿滤波装置,选取阻抗匹配平衡接线的牵引变压器,采取换相接线的措施来抑制电铁负荷的谐波和负序电流;另一方面应对光伏电站 PCC 点处的谐波进行检测,如果原有的滤波装置不能有效滤除电铁牵引负荷产生的具有独特序量规律的谐波,应注意更新滤波装置。

(下转第 61 页)

- 闪、防雨闪措施研究[J]. 中国电力, 2005, 38(12): 24 - 28.
- [2] 王镔. 直流悬式系列瓷绝缘子设计性能及应用[J]. 电瓷避雷器, 2010(1): 13 - 18.
- [3] 国家电网公司. 特高压直流换流站支柱绝缘子设计[R]. 北京: 国家电网公司, 2007.
- [4] 赵峰, 张福增, 杨皓麟, 等. 复合支柱绝缘子在高海拔区直流污闪与污雨闪性能[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2009, 49(10): 1581 - 1584.
- [5] 周泽存. 高电压技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [6] 冯慈璋. 工程电磁场导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [7] 施围. 高电压工程基础[M]. 北京: 机械出版社, 2006.
- [8] 盛剑霓. 工程电磁场数值分析[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1991.
- [9] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 236 - 239.
- [10] 卢明, 杨庆, 阎东, 等. 复合绝缘子伞型结构对电场分布的影响[J]. 电瓷避雷器, 2011(1): 1 - 5.
- [11] 李名加. 10 kV 合成绝缘子沿面电场分布计算及其憎

水性变化因素分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2002.

- [12] 王黎明, 张楚岩, 任贵清, 等. 特高压交流复合绝缘子伞裙结构的优化设计[J]. 高电压技术, 2009, 35(10): 2335 - 2339.
- [13] 乐波, 马为民, 郑劲. 特高压直流场外绝缘方案的研究[J]. 电力建设, 2006, 31(1): 1 - 5.
- [14] 刘振亚. 特高压直流输电技术研究成果专辑[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [15] 中国南方电网公司. ± 800 kV 直流输电技术研究[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [16] 中华人民共和国国家技术监督局. GB/T 16927. 1 - 1997, 高电压试验技术[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.

作者简介:

许安(1958), 高级工程师, 从事电力系统过电压防护的研究;

何大猛(1988), 硕士研究生, 研究方向为电气设备电磁分析与电力系统过电压防护。

(收稿日期: 2013 - 10 - 24)

(上接第 21 页)

针对光伏电站出力不稳定的问题, 现在已经有大量的研究和试验工作进行光功率预测, 目的是为了经济调度, 确保电网的安全稳定运行。但在电气化铁路接入后, 仅仅进行光功率的预测是不够的。所以在平时电网调度运行过程中, 应加强光伏电站、电网、铁路三个部门的相互协调与合作, 将光功率预测结果与电气化铁路的列车运行图结合起来, 综合考虑这两方面因素对电网进行调度, 从而确保电网的安全稳定运行。

参考文献

- [1] 张晓薇, 李振国. 电气化铁路接入电力系统 220 kV 和 110 kV 供电电压等级的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(17): 13 - 16.
- [2] 王厂贵. 并网光伏发电系统综述(上)[J]. 太阳能, 2008(2): 14 - 17.
- [3] 姚金雄, 张涛. 牵引供电系统负序电流和谐波对电力系统的影响及其补偿措施[J]. 电网技术, 2008, 32

(9): 61 - 65.

- [4] 方廷, 韩郁, 张岚. 一种多逆变器太阳能光伏并网发电系统的组群控制方法[J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(7): 57 - 60.
- [5] 熊丽霞. 浙赣电气化铁路牵引负荷特性分析[J]. 江西电力, 2009, 33(2): 27 - 29.
- [6] 韦钢, 吴伟力. 分布式电源及其并网时对电网的影响[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 36 - 40.
- [7] 韩柳, 谈顺涛. 电气化铁路对电网的影响及对策[J]. 江苏电机工程, 2005(3): 8 - 11.
- [8] 周小涵. 电气化铁路谐波在公用电网的渗透研究[J]. 四川电力技术, 2009, 32(4): 41 - 43.
- [9] 卢志海, 厉吉文, 周剑. 电气化铁路对电力系统的影响[J]. 继电器, 2006, 32(11): 33 - 36.
- [10] 栗时平, 刘贵英. 静止无功功率补偿技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006: 69 - 93.

作者简介:

胡仁祥(1987), 硕士, 从事电网调度运行。

(收稿日期: 2013 - 10 - 24)

基于层次分割的电网灾难性事故风险模糊评估法

田立伟, 肖先勇

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 提出一种基于层次分割的电网灾难性事故风险模糊评估高效算法。该方法采用考虑安防装置的层次分割策略, 综合利用枚举法和模拟法的优点, 避免了模拟法对无故障状态的无效抽样, 克服了由此可能造成的抽样空间狭窄。算法采用可信性测度度量故障发生可能性, 无需构造复杂抽样密度函数, 在保证计算精度的前提下提高计算效率。通过对 IEEE 24 节点测试系统的仿真并与现有方法比较, 证明方法计算速度快, 算法合理, 可有效识别最可能的事故序列。

关键词: 灾难性事故; 可信性测度; 层次分割; 风险评估

Abstract: Based on hierarchy partition, an efficient risk fuzzy assessment method for catastrophic accident of power grid is proposed. This method uses the hierarchy partition strategy which takes the security devices into consideration. It can avoid fault-free state sampling in each space and overcome the possible narrowness of sampling space by taking advantage of enumeration method and simulation method. The credibility measure is adopted to describe the fault possibilities, so it is no need to construct complex sampling density function, which can improve both analysis speed and calculation accuracy. The IEEE 24-bus reliability test system is used in simulation, compared with some traditional methods, the results show that the proposed method is faster and more reasonable and it can identify the most possible accident sequences more efficiently.

Key words: catastrophic accident; credibility measure; hierarchy partition; risk assessment

中图分类号: TM711 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)02-0022-05

0 引言

近年来, 多起电网大停电事故给社会、经济带来了严重影响, 电网灾难性事故风险已成为全球关注焦点。中国也曾多次发生大面积停电事故, 随着电网规模的增大, 每次大停电事故造成的平均负荷损失也随之增大。电网风险评估是极富挑战性的任务^[1]。电网的运行状态与行为具有多样性、复杂性和不确定性等特点, 风险的存在是必然的。及时、准确地识别最可能诱导灾难性事件事故序列, 确保电网经济安全运行已成为当前中国电网面临的迫切问题, 对系统调度运行和决策等, 具有重要意义^[2]。

现有电网风险评估方法主要有: 状态枚举法^[3-4]和蒙特卡罗模拟法^[5-6]。前者概念清晰, 计算精度高, 但计算量随故障阶数和系统复杂性的增加而急剧增加。基于故障概率截取的枚举法^[7], 通过舍去发生概率小的事件, 减少计算量, 但随着电网复杂性的增加, 故障阶数越高, 故障概率越小, 被舍去

的小概率事件可能因丢失了关键信息而导致评估结果失准。模拟法是一种典型的多因素敏感性分析方法, 适用于复杂系统, 计算效率随精度要求的提高而降低。但系统大部分是正常状态和低阶故障状态, 为了更多地抽取高阶故障状态, 在抽样过程中需要大量抽样来保证结果的准确性, 导致计算效率变低。为有效利用枚举法和模拟法的优点, 分割思想是一种有效的解决途径^[8-9]。

基于分割的思想可抽象为问题归约法, 通过归约, 把复杂问题分解成不同层次的、比原有问题更简单的问题, 然后分别分析子问题, 并通过一定关系联系起来, 得到问题的分析评估结果。文献[10]在可靠性评估中提出了分层重要抽样的思想; 文献[11]采用分层均匀抽样方式, 避免了构造抽样函数的复杂性。但电网灾难性事故大多由后果严重的稀少事件诱导, 对稀少事件进行抽样, 必然面临确定最优抽样密度函数的问题, 影响评估结果。而电网本质上运行在不确定的环境中。重要设备的随机停运引起系统潮流转移, 恶劣的气候环境和过负荷等条件又

导致元件故障率的增加,最终形成大停电事故。电网灾难性事故风险受多种因素影响,具有复杂不确定性。文献[12]基于可信性测度提出了电网灾难性事故模糊模拟评估方法,为复杂不确定性的刻画和模拟提供了参考。

这里提出基于层次分割的电网灾难性事故风险模糊评估方法。利用数学上随机性与模糊性的统一性原理^[13],将电网灾难性事故的复杂不确定性转化为模糊性,在现有电网连锁性故障风险的复杂不确定性模糊模拟方法的基础上^[14],采用考虑保护、安控和自动装置的分割策略对状态空间进行层次分割。该方法能综合状态枚举法和模拟法的优点,克服构造抽样函数、可能造成抽样空间狭窄等问题,在保证计算精度的前提下提高计算效率。对 IEEE 24 节点测试系统的仿真表明,该方法所得结果正确、可信,计算时间较短。

1 系统状态空间层次分割策略

现代电力系统已配置了较完备的保护、安防、安控和自动装置,这些装置直接影响系统状态,尤其对第一、二阶低阶状态空间有重要影响,因此,对系统状态进行空间分割时必须考虑安防装置等的影响。以系统状态空间的特点和风险分析方法的适用条件为划分依据,提出基于故障阶数的全局分割与基于故障状态的高阶状态空间局部分割策略,通过层次分割同时提高结果准确性和计算效率。基本策略如图 1。

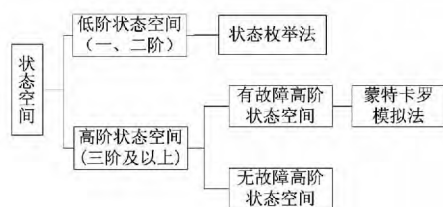


图 1 状态空间层次分割策略

设 Ω 为全体系统状态构成的空间,风险指标 $R(X)$ 为

$$R(X) | X \in \Omega = \sum_{x \in \Omega_1} R(X) + \sum_{x \in \Omega_2} R(X) \quad (1)$$

式中 Ω_1 为低阶故障系统状态组成的空间; Ω_2 为高阶故障系统状态所组成的空间; $R(X)$ 为风险测度。

枚举法计算精度高,对低阶故障状态空间 Ω_1 的所有系统状态进行枚举评估,以确保信息的完备

性和准确性。状态枚举公式如下^[15]。

$$(P_1 + Q_1) \cdots (P_i + Q_i) \cdots (P_N + Q_N) \quad (2)$$

式中 P_i 和 Q_i 分别是第 i 元件正常和故障的概率测度; N 为系统元件数。

对高阶故障,枚举法的计算量大大增加,而模拟法适于复杂情况分析评估,故高阶故障状态空间 Ω_2 选择用模拟法分析。同时,为更有效地保证抽样效果,避免无效抽样对计算效率和精度的影响,在 Ω_2 内将各阶故障再进一步进行局部分割,分割为有故障状态子空间 Ω_k 和无故障状态子空间 Ω_0 。对于 Ω_0 有 $\sum_{x \in \Omega_0} R(X) = 0$,无需抽样,因此,

$$R(X) | X \in \Omega_2 = \sum_{x \in \Omega_k} R(X) + \sum_{x \in \Omega_0} R(X) = \sum_{x \in \Omega_k} R(X) \quad (3)$$

从以上理论分析来看,利用所提出的全局和局部层次分割策略,能在保证精度的同时,减少计算量。

2 风险评估原理及指标

2.1 评估原理

连锁故障是引起电网灾难性事故的主要原因,表现为一系列元件连锁反应跳闸,最终发展为频率或电压崩溃,甚至电网解列。电网的最主要变量之一是负荷,连锁故障发展为灾难性事故的过程中,当电网电压或频率发生变化时,采取的操作经常与负荷有关。因此,是否发生灾难性事故可用电网丢负荷程度来判定。在仿真中,若事故引起丢负荷超过 20% 或电网潮流不收敛的情况,判定该事故为灾难性事故^[16]。

电网灾难性事故的物理传播过程可以简单描述为以下 3 点:①某线路发生初始故障,保护动作,故障线路被切除;②初始故障后引起电网潮流改变,与故障线路相连线路的保护形成误动集,其中的某些保护可能以一定“测度”触发隐性故障,对应线路被切除;③重复上述过程,故障连续发生,且危害达到一定程度时,就可能引发电网灾难性事故。

由以上分析可知,连锁性故障是否会发展为灾难性事故受初始故障和故障的后续发展等的影响。不同初始故障会引起一系列不同反应,产生不同后续故障,这里以 $N-1$ 故障为初始故障,采用隐性故障模型作为灾难性事故传播机制^[17]。根据当前故障线路搜索下一阶全部可能发生隐性故障的线路,

以每条线路故障可信性测度大小为抽样依据,产生随机数进行抽样选择出故障线路。

2.2 风险指标

通过电网灾难性事故风险评估,分析电网实际运行中存在的风险,得到表征系统风险的指标。风险指标定义为故障发生可能性和严重程度的综合度量^[15],表达式如式(4)所示。

$$R(X) = Cr(X) \cdot Sev(X) \quad (4)$$

式中 $R(X)$ 为研究对象风险值; $Cr(X)$ 为可信性测度; $Sev(X)$ 为事故严重性指标。下面依次说明可信性测度和事故严重性指标。

2.2.1 基于可信度的模糊模拟

在低阶故障状态枚举分析的基础上,高阶故障状态空间采用模糊模拟评估法,用“模糊性”描述灾难性事故的不确定属性,可信性测度刻画故障发生可能性,区分“容易”和“不容易”发生故障的支路。

根据不确定性理论^[18],并结合文献[12]提出的可信性测度成立需满足的公理化条件,可知,主观上认为可能性为 1 时最容易发生隐性故障。当线路保护都不可能发生隐性故障时,可能性为 0,该故障最不容易发生。当故障传播至某一阶段时,认为至少有一个故障是最容易发生的,该故障可认为具有最大的可能性。可能性测度的基本思想是,灾难性事故 X 包含 i 个事件,即 $X_1 \sim X_i$ 同时发生才诱导的电网灾难性事故 X 为

$$X = \cup (X_1 \cap X_2 \cap \dots \cap X_i) \quad (5)$$

只有 $X_1 \sim X_i$ 中发生可能性最小的事故发生时,才会引发电网灾难性事故 X 。与概率测度需满足的可列可加条件相比,该条件无需建立在不同事件互不相关的基础上。详见文献[12,18]。

电网灾难性事故 X 的可信性测度为

$$Cr(X) = 0.5 \cdot (Pos(X) + Nec(X)) \quad (6)$$

其中,

$$Nec(X) = 1 - Pos(\bar{X}) \quad (7)$$

式中 $Pos(X)$ 为故障发生的可能性测度; $\bar{X}$ 为 X 的补集; $Nec(X)$ 为必要性测度,反映 $\bar{X}$ 的不可能程度。

可信性测度在 $[0, 1]$ 中取值,故障必然发生时,取值为 1,必然不发生时,取值为 0,故障发生的可信性随测度增加而增大。 $Cr(X)$ 值越大,故障发生可能性越大,模拟时被抽取的概率也越大。

2.2.2 严重性指标

电网中有多种因素影响元件运行状态,这里以

模糊隶属函数度量严重性指标,由失负荷、母线电压、支路过载、机组有功和无功出力 5 种指标构成。详见文献[12]。

严重性指标为

$$Sev = \prod_{i=1}^5 Sev_i \quad (8)$$

式中 $Sev_1 \sim Sev_5$ 分别代表各组成因素的严重性指标,且 $Sev_i \in [0, 1]$,1 表示最严重,取值在 $[0, 1]$ 上增加,代表严重性增加。

3 算法流程

算法流程如图 2 所示。

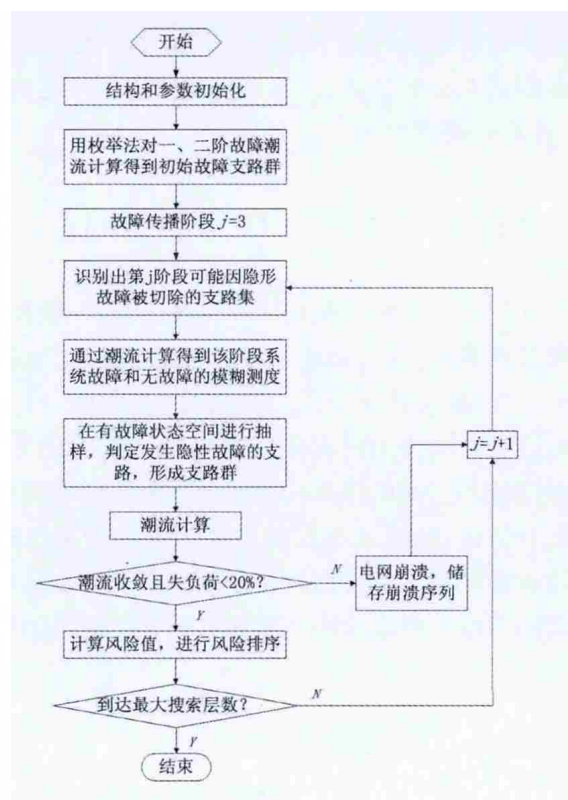


图 2 算法流程图

4 算例分析

利用提出的基于状态空间层次分割与模糊模拟的电网灾难性事故风险评估法(方法 1)对 WSCC IEEE 24 节点测试系统进行评估,以计算时间、方差、灾难性事故序列和计算效率为方法比较指标,与状态枚举法(方法 2)和现有模糊模拟法(方法 3)进行比较。

选用式(4)计算风险测度值。方法 1 的计算时

间为枚举法与蒙特卡罗模拟法的计算时间之和。为比较 3 种方法的计算效率,定义方法 1 对方法 3 的相对计算效率^[5 9]为

$$\eta_i = (\beta_i^2 t_i)^{-1} / (\beta_3^2 t_3)^{-1} \tag{9}$$

式中 t 为方法 3、1 的计算时间; β 为方法 3、1 的方差系数。

在仿真分析中,有以下两点说明。

①由于枚举法没有方差系数问题,故仅计算方法 1 的计算效率即可。②计算 $N-1$ 事故风险评估,以验证该方法的准确性,计算 $N-k$ 事故风险评估,以验证该方法的计算效率。

用 MATLAB 进行仿真,计算环境为 1 台 CPU 为 2.6 GHz,内存为 2.00 GB,系统为 Windows7 的电脑。

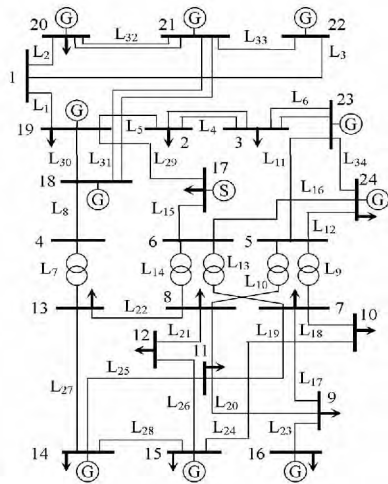


图 3 IEEE 24 节点标准测试系统

图 3 所示 IEEE 24 节点测试系统^[20]。系统由 1 台同步调相机、10 台发电机组、5 台变压器、24 条母线和 33 条输电线路组成。表 1 为不同方法所得 N

表 1 $N-1$ 事故风险排序

方法 1		方法 2		方法 3	
事故	$R(X)$	事故	$R(X)$	事故	$R(X)$
8	350.9	8	478.2	8	388.3
7	301.0	7	413.2	7	320.2
13	198.5	13	294.4	13	210.5
9	168.4	9	257.0	29	175.1
29	151.3	29	225.1	9	150.5
23	120.4	23	198.3	23	136.3
11	115.2	11	177.1	10	120.6
10	108.3	10	151.1	11	105.4
6	102.9	6	134.0	6	101.6
24	98.4	24	118.9	34	95.7

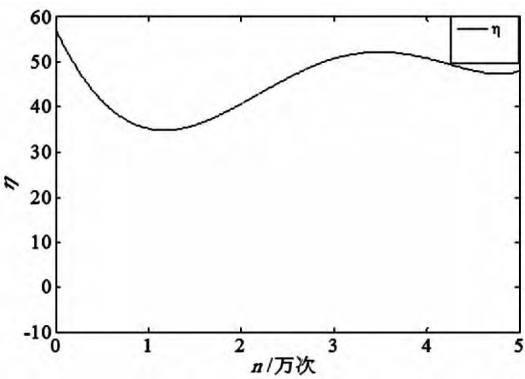


图 4 计算效率曲线

-1 事故风险评估结果,表 2 为 $N-k$ 事故风险评估结果,其中方法 1 和方法 3 的抽样次数分别为:1 000 次、5 000 次、10 000 次和 50 000 次。图 4 为方法 1 相对方法 3 的效率曲线。

表 2 使用不同方法计算的系统风险指标

指标	方法 1				方法 2	方法 3			
	1 000	5 000	10 000	50 000		1 000	5 000	10 000	50 000
计算时间 t/s	1.633 1	5.436 8	10.307	50.747	381.390	25.476	130.331	261.405	1342.768
方差 β	1.697 8	0.531 9	0.281 2	0.058 8	—	3.283 1	0.688 6	0.349 2	0.079 2
$K=3$	{ L5 , L4 , L6 }				{ L5 , L4 , L6 }	{ L5 , L4 , L6 }			
$K=5$	{ L8 , L30 , L5 , L4 , L6 }				{ L8 , L30 , L5 , L4 , L6 }	{ L8 , L30 , L5 , L4 , L6 }			
风险序列	{ L7 , L27 , L22 , L21 , L26 , L24 , L18 }				—	{ L7 , L27 , L22 , L21 , L26 , L24 , L18 }			
	{ L4 , L5 , L30 , L8 , L7 , L27 , L22 }					{ L7 , L22 , L27 , L25 , L19 , L18 , L24 }			
	{ L27 , L7 , L22 , L21 , L26 , L24 , L18 }					{ L7 , L27 , L22 , L14 , L10 , L21 , L20 }			
	{ L7 , L22 , L27 , L25 , L19 , L18 , L24 }					{ L7 , L27 , L22 , L14 , L10 , L20 , L21 }			
	{ L4 , L5 , L29 , L15 , L13 , L18 , L24 }					{ L27 , L7 , L22 , L21 , L26 , L24 , L18 }			
	{ L7 , L27 , L22 , L14 , L10 , L21 , L20 }								
	{ L7 , L27 , L22 , L14 , L10 , L20 , L21 }								
	{ L7 , L27 , L22 , L14 , L10 , L20 , L21 }								

分析表 1 和表 2 中风险序列,可知,所提方法所得风险序列与方法 2、3 所反映的变化规律一致,证明方法在 IEEE 24 节点系统中应用正确。

分析表 2 和图 4 可得出以下结论。

①方法 1 的计算效率比方法 3 高。

②对比方法 1 和方法 3 的计算结果可知,以抽样 50 000 次结果计算,方差 β 指标的相对差别是 34.69%。这说明方法 1 计算的结果具有较高的精度。

③从计算时间看,方法 1 相比方法 2、3 具有极高的计算效率,其计算时间约是方法 3 的 26.5 倍,方法 2 的 7.5 倍。方法 1 具有极高计算效率的根本原因是用枚举法评估低阶故障状态,并避免了蒙特卡罗模拟法的无故障抽样,增加了抽样的有效性。

④分析表 2 中风险序列,可以看出方法 1 在有限的工作量中得到了更丰富的故障序列。

5 结 论

提出了一种基于层次分割和模糊模拟评估的电网灾难性事故风险评估高效算法。通过仿真分析,证明该算法合理、正确,在复杂电网风险评估中具有一定的推广价值。结论如下:①较高的计算效率和精度。算法对系统状态空间的层次分割,避免了枚举法在复杂系统中“维数灾难”问题,和蒙特卡罗模拟法对无故障状态进行无效抽样的缺点,有效提高了计算效率和精度。②抽样序列更有效。通过对不同电网仿真分析表明,该算法不舍弃初始小概率故障序列,在有限的工作量中能获得更丰富的序列。③以可信性度量故障发生可能性,无需构造复杂抽样函数,以隐性故障模型刻画故障传播机制,考虑故障发生顺序,更符合实际。

参考文献

- [1] M. Vaiman(Lead), K. Bell. Risk Assessment of Cascading Outages: Methodologies and Challenges [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 631-641.
- [2] 田世明,陈希,朱朝阳,等. 电力应急管理平台研究[J]. 电网技术, 2008, 32(1): 26-30.
- [3] 高亚静,周明,等. 基于马尔可夫链和故障枚举法的可用输电能力计算[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(19): 26-30.
- [4] 魏远航,刘思革,苏剑. 基于枚举抽样法的城市电网风险评估[J]. 电网技术, 2008, 32(18): 62-66.
- [5] 谢绍宇,王秀丽,王锡凡,等. 自适应重要抽样技术在发输电系统可靠性评估中的应用[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(5): 13-17.
- [6] 周阳洋. 重要抽样法在概率潮流中的应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- [7] 刘海涛,孙元章,程林,等. 计及多状态元件模型的系统状态快速排序技术[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(1): 16-21.
- [8] He J, Sun Y, Kirschen D S, et al. State Space Partitioning Method for Composite Power System Reliability Assessment [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2010, 4(7): 780-792.
- [9] 何剑,孙华东,刘明松. 基于扩展状态空间分割法的含风电场电力系统运行备用风险评估[J]. 电网技术, 2012, 36(3): 257-263.
- [10] 王晓滨,郭瑞鹏,曹一家,等. 用于系统可靠性评估的各阶故障独立重要抽样算法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(16): 24-31.
- [11] 黄江宁,郭瑞鹏,赵舫,等. 电力系统可靠性评估中的分层均匀抽样法[J]. 电力系统自动化, 2012(20): 19-24.
- [12] 马超,肖先勇,杨洪耕,等. 电网灾难性事故不确定性评价测度体系与模型[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(10): 118-125.
- [13] 李洪兴. 不确定性系统的统一性[J]. 工程数学学报, 2007, 24(1): 1-21.
- [14] 马超,肖先勇,袁志坚,等. 电网连锁性故障发生可能性的模糊模拟评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 77-84.
- [15] 李文沅. 电力系统风险评估: 模型方法和应用[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 67-69.
- [16] Hazra J, Sinha AK. Identification of Catastrophic Failures in Power System Using Pattern Recognition and Fuzzy Estimation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(1): 378-387.
- [17] 杨明玉,田浩,姚万业. 基于继电保护隐性故障的电力系统连锁故障分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010(9): 1-5.
- [18] 刘宝碇,彭锦. 不确定理论教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 74-128.
- [19] 肖刚,李天托. 系统可靠性分析中的蒙特卡洛方法[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [20] IEEE RTS Task Force of APM Subcommittee. The IEEE Reliability Test System - 1996 [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(3): 1010-1020.

作者简介:

田立伟(1989), 硕士研究生, 研究方向为电力系统连锁故障风险评估;

肖先勇(1968), 教授, 博士生导师, 研究方向为电能质量分析与控制等。 (收稿日期: 2013-01-09)

风电场宏观选址综合决策方法的研究

陶奕衫¹ 闫广新¹ 王建军² 马 乐² 张同宇²

(1. 新疆电力设计院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 国网昌吉供电公司, 新疆 昌吉 831100)

摘 要: 针对目前风电场选址方案评估决策中指标体系不全面以及主观确定方案等问题, 提出了基于层次分析法和灰色关联分析法相结合主客观综合地选择出合适的风电场场址。首先综合考虑了风能、联网、地质、交通与施工等确定了风电场宏观选址现场各指标, 再采用改进的层次分析法确定各指标权重, 最后利用灰色关联度分析法结合各指标权重, 达到了从主客观角度综合分析确定风电场宏观选址。并选取新疆 3 个风区选址方案进行了分析, 验证了该方法的可行性, 从而为风电场科学投资提供了理论依据。

关键词: 层次分析法; 灰色关联度; 主客观; 宏观选址

Abstract: Aiming at the incomplete indexes system and subjective scheme of wind farm macro-siting, the method based on the combination of analytic hierarchy process (AHP) and grey correlation is proposed to select the appropriate wind farm macro-siting objectively and subjectively. Firstly, the wind sources, the grid integration, the geology, transportation and construction are comprehensively considered to determine the various indicators of the wind farm macro-siting, and then the improved AHP is adopted to determine the each index weight. At last, the grey correlation combined with the weight is utilized to determine the wind farm macro-siting. The comprehensive decision of three schemes for selecting wind farms in Xinjiang is analyzed and the reasonable analysis results are attained. The research results might provide a scientific basis for investment decision.

Key words: analytic hierarchy process (AHP); grey correlation; objective and subjective; macro-siting

中图分类号: TK621 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)02-0027-04

0 引言

风电场宏观选址是风电建设项目的首要任务, 亦决定了整个风电场投资的经济效益; 对风电场进行前期考察综合判断现场各指标对风电场影响成为了研究的焦点, 为判断选址方案的优劣提供了参考。文献[1-3]评价了风电场宏观选址的风能资源; 文献[4]采用 ArcGIS 分析 SRTM(shuttle radar topography mission) 提取选址区域起伏度、坡度两个地形参数; 文献[5]利用地理信息系统(geographic information system, GIS) 技术评价了风电场交通条件, 现实条件下风电场宏观选址应考虑风能、联网、交通运输和施工、地质和地貌条件以及其他因素^[6-7]; 文献[8]列举了选址影响因素, 并未采用任何方法对选址方案进行评估决策; 文献[9, 10]采用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP) 对风电场宏观选址评估分析, 但选址决策结果依赖于专家意见, 没有能

够充分利用客观数据。

针对上述问题, 首先利用层次分析法^[9, 10] 将风电场选址现场所要考虑各因素划分成有序的递阶层次结构, 再采用三标度法构造判断矩阵提高收敛速度、一致性以及归一化专家构建判断矩阵的权重向量的期望作为各指标权重, 最后利用灰色关联度分析法在“小样本、贫信息”下确定各方案与理想方案的关联程度^[11, 12], 从主、客观角度综合分析决策, 选择出合适风电场场址, 为风电场宏观选址提供了理论依据。

1 综合决策方法

1.1 改进的层次分析法

层次分析法是美国运筹学家 T. L. Saaty 在 20 世纪 70 年代中期提出的一种系统化、层次化分析的方法。但不能很好处理不确定因素, 不同专家对构造的判断矩阵有不同的认可, 判断矩阵经常出现不

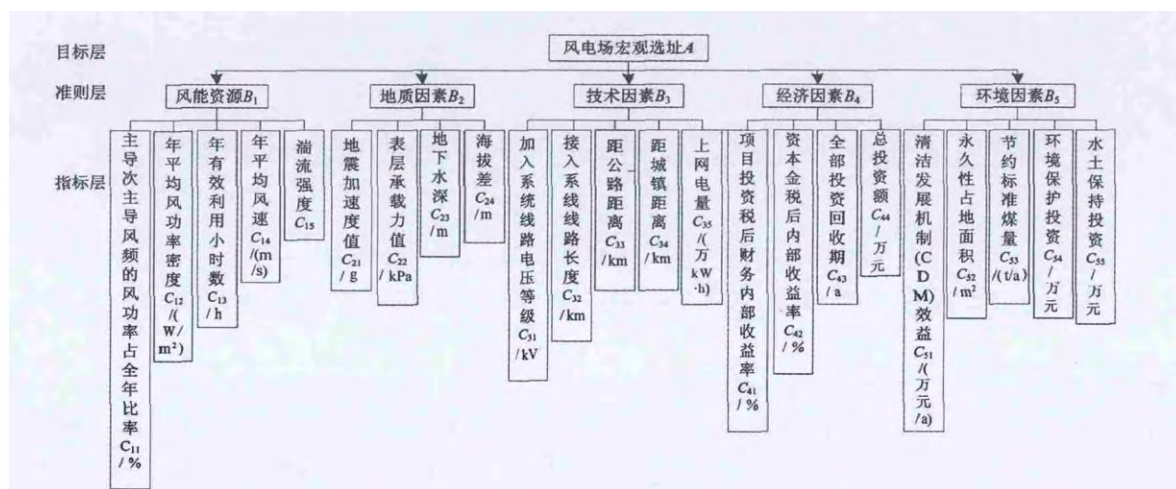


图 1 递阶层次结构

注: B_1 各项数据于测风塔 70 m 处采集; 年有效利用小时数 C_{13} 为风速介于 3 ~ 25 m/s 的时间; 湍流强度 C_{12} 为 10 min 内风速随机变化幅度大小; 上网电量 C_{35} 根据当地实际状况由 WAsP 计算得出; 清洁发展机制(CDM) 效益为在国际碳交易市场中相对于火电厂, 风电场发相同电量减排的 CO_2 以 80 元/t 价格出售获取的效益; 节约标准煤量 C_{53} 以每度电耗标准煤 350 g 计风电场每年按所发电量可节约标准煤量, 也间接体现减排 CO 、 SO_2 等污染物的量; 环境保护投资 C_{54} 包含风电场水环境保护、生活污水与垃圾处理、大气环保、环境监测、环境监理等费用; 水土保持投资 C_{55} 包含工程措施、植物措施以及临时措施投资等费用。

一致性的情况^[13]等不足之处, 采用有别于传统层次分析法 1 ~ 9 标度的三标度法构造判断矩阵来提高收敛速度和一致性; 归一化各专家判断矩阵形成权重向量的期望, 作为各指标的权重。

采用改进 AHP 包含以下步骤。

(1) 确定风电场宏观选址递阶层次结构

综合考虑利用谷歌地球(Google Earth, GE) 统计分析选址现场交通、并网、施工技术条件等, 以及考虑风能、地质、经济以及对环境影响等因素, 确定了图 1 所示风电场选址的递阶层次结构。

(2) 求解准则层某子准则权重过程

①建立比较矩阵 A

专家采用三标度法两两比较指标的相对重要性得出如下比较矩阵 A。

$$A = (a_{ij}) = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & \cdots & a_n \\ a_1 & a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_2 & a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_n & a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式(1)中 $a_1 \sim a_n$ 为各个指标;

$$a_{ij} = \begin{cases} 2 & a_i \text{ 比 } a_j \text{ 重要} \\ 1 & a_i \text{ 与 } a_j \text{ 同等重要} \\ 0 & a_j \text{ 比 } a_i \text{ 重要} \end{cases}$$

为指标 a_i 与指标 a_j 之间的比较结果。

②构造判断矩阵 C

$$C = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & \cdots & a_n \\ a_1 & a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_2 & a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_n & a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\text{式(2)中 } \rho_{ij} = \begin{cases} \left[\frac{r_i - r_j}{r_{\max} - r_{\min}} (k_m - 1) + 1 \right]^{-1} & r_i \geq r_j \\ \frac{r_j - r_i}{r_{\max} - r_{\min}} (k_m - 1) + 1 & r_i < r_j \end{cases}$$

$$r_i = \sum_{j=1}^n a_{ij} \quad k_m = r_{\max} / r_{\min} \quad r_{\max} = \max\{r_1, r_2, \cdots, r_n\} \quad r_{\min} = \min\{r_1, r_2, \cdots, r_n\}$$

③求解权重向量及检验一致性

采用特征向量法求判断矩阵 C 的最大特征值 $\lambda_{\max}$ 及对应特征向量 W 为权重向量。然后将 $\lambda_{\max}$ 引

入相容性指标 $CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$ 检验判断矩阵的一致性。

当 $CI < 0.1$ 认为判断矩阵一致性符合要求; $CI \geq 0.1$ 判断矩阵一致性不符合要求, 修改比较矩阵, 重新计算并一致性检验, 直到满足要求^[14]。

④确定各指标权重

归一化 m 个专家判断矩阵形成的权重向量 $\bar{W}$

$$= \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m W^{(k)}$$
 得各指标权重, 即

$$w_i = \frac{\bar{w}_i}{\sum_{i=1}^m \bar{w}_i} \quad (3)$$

式中, $W^{(k)} = (w_1^k w_2^k \cdots w_n^k)$ $k=1, 2, \cdots, m$; m 为参与专家人数; $W^{(k)}$ 为第 k 个判断矩阵形成的权重向量; $\bar{W}$ 为权重向量的期望; w_i 为第 i 个指标权重。

1.2 灰色关联度分析法

灰色关联分析法基于邓聚龙教授提出的灰色系统理论^[15], 利用几何原理比较分析理想方案各指标与实际方案各指标间的关联度, 判断各方案与理想方案偏差程度, 关联度越大表明越接近理想方案。同时结合 AHP 法确定对风电场的宏观选址起直接影响关联度和评估决策结果的权重, 从而对风电场宏观选址完全从客观角度进行决策。

具体步骤如下。

(1) 均值化处理

采用公式 (4) 均值化处理由评估方案数 m 与指标层指标 n ($C_{11} \sim C_{55}$) 构成数组 $x(m \times n)$ 。

$$x'_i(j) = \frac{x_i(j)}{\bar{x}_i} \quad \bar{x}_i = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_i(j) \quad (4)$$

式中 $x_i(j)$ 为在第 i 种方案下第 j 个指标值; $\bar{x}_i$ 为期望值; $x'_i(j)$ 为均值化的值。

(2) 求各指标关联系数

$$\xi_i(j) = \frac{\Delta(\min) + \rho \Delta(\max)}{\Delta_i(j) + \rho \Delta(\max)} \quad (5)$$

式中 $\xi_i(j)$ 为第 j 个指标关联系数; $\Delta_i(j) = |x'_0(j) - x'_i(j)|$; $x'_0(j)$ 为理想方案中第 j 个指标值; $\Delta(\max) = \max_i \max_j \Delta_i(j)$; $\Delta(\min) = \min_i \min_j \Delta_i(j)$; ρ 为分辨系数, 取值区间为 $[0, 1]$, 参考文献^[16]去除主观因素优化得到 $\rho = 0.69$ 。

(3) 确定各方案灰色关联度

由 AHP 确定各指标权重以及公式 (5) 得各指标关联系数, 综合决策得出各评价方案的灰色关联度。

$$\gamma_i = \sum_{j=1}^n \alpha_j \xi_i(j) \quad (6)$$

式中 γ_i 为第 i 种评价方案与理想方案的关联度。

具体综合决策流程, 如图 2。

2 算例分析

选取具有优良风能资源的新疆 9 大风区中额尔齐斯河河谷、十三间房、哈密三塘湖—淖毛湖等风区, 对装机容量均为 49.5 MW 风电场宏观选址进行综合

决策。以上 3 种方案简称为方案 1、方案 2、方案 3。

通过搜集测风塔资料、现场调研、利用 GE 遥感影像等多种渠道确定风电场选址现场客观指标值, 如表 1。

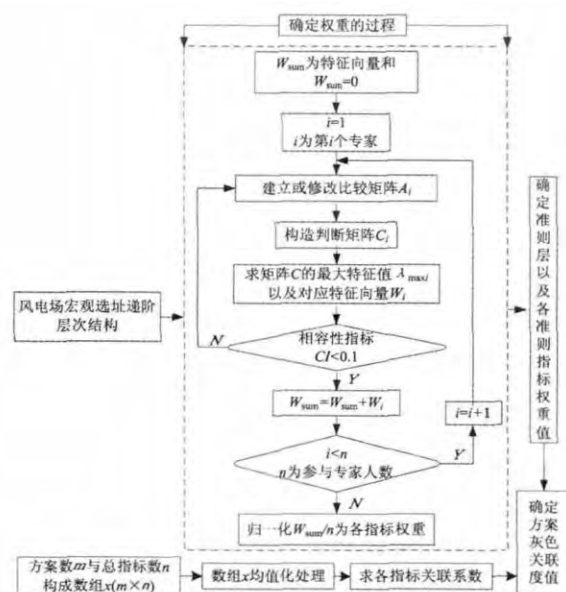


图 2 综合决策流程图

表 1 3 种方案指标数据

准则层	指标	方案 1	方案 2	方案 3
风能资源 B_1	C_{11}	57.65	97.3	82.2
	C_{12}	416.15	772.18	525.06
	C_{13}	5 689	6 343	6 936
	C_{14}	6.19	9.58	6.49
	C_{15}	0.112	0.095	0.102
地质因素 B_2	C_{21}	0.05	0.10	0.10
	C_{22}	130	270	280
	C_{23}	3.5	12	15
	C_{24}	50	80	90
	C_{31}	110	110	110
技术因素 B_3	C_{32}	25	7.5	15
	C_{33}	0.2	5	2
	C_{34}	25	55	17
	C_{35}	11 484.0	10 584.5	9 438.1
	C_{41}	7.12	7.38	7.18
经济因素 B_4	C_{42}	8.94	10.58	9.56
	C_{43}	11.17	11.94	11.11
	C_{44}	48 379.04	42 350.97	42 739.99
	C_{51}	741.6	684.4	456.9
	C_{52}	8.50	18.55	6.66
环境因素 B_5	C_{53}	3.93	3.70	3.32
	C_{54}	204	30	52
	C_{55}	90.6	80.1	207.9

2.1 确定指标权重

本项目共有 3 位专家参与, 根据公式 (1) ~ (3) 确定各指标权值 $\alpha = (0.032, 0.032, 0.039, 0.037,$

0.053, 0.046, 0.043, 0.039, 0.039, 0.071, 0.053, 0.031, 0.035, 0.044, 0.033, 0.031, 0.038, 0.063, 0.045, 0.036, 0.043, 0.060, 0.057)。

2.2 灰色关联度分析

根据公式(4)~(5)确定各指标关联系数矩阵

0.408	0.408	0.408	0.408	0.408	1.000
1.000	1.000	0.592	1.000	1.000	0.408
0.644	0.499	1.000	0.431	0.626	0.408
0.408	0.408	1.000	1.000	0.408	1.000
0.912	0.726	0.479	0.408	1.000	0.408
1.000	1.000	0.408	1.000	0.617	0.648
0.766	1.000	0.408	0.408	0.905	0.408
0.408	0.611	1.000	1.000	0.408	1.000
1.000	0.408	0.473	0.526	1.000	0.914
1.000	0.817	1.000	0.408	0.894	
0.774	0.408	0.647	1.000	1.000	
0.408	1.000	0.408	0.845	0.408	

结合改进 AHP 确定权重 α 以及公式(6)可得 3 种选址方案与理想方案的灰色关联度 $\gamma = [0.671, 0.755, 0.691]$ 。结果表明,方案 1 与理想方案的关联度最小,方案 2 比方案 3 关联度较为冗余,因此基于风能资源、地质因素、技术因素、经济因素以及环境因素的风电场宏观选址综合决策,方案 2 为最优方案。

3 结 论

综合考虑风电场风能资源、地址条件、联网、施工以及交通等多方面因素,确定了风电场现场宏观选址指标体系,采用改进 AHP 与灰色关联度分析法相结合从主客观角度综合决策风电场宏观选址。并对新疆 3 大风区拟建 49.5 MW 风电场宏观选址进行算例分析,最终得出了科学、合理的结论。

当然,实际风电场宏观选址要考虑更多方面的因素,综合决策考虑所有因素不现实、也不科学,因此如何从众多因素中挑选出主导因素成为下一个研究的内容。

参考文献

[1] Lee A H I, Chen H H, Kang H Y. Multi-criteria Deci-

sion Making on Strategic Selection of Wind Farms [J]. Renewable Energy 2009, 34(1): 120-126.

- [2] 邓院昌, 余志. 基于参考风电机组的风电场宏观选址资源评价方法[J]. 太阳能学报 2010, 31(11): 1516-1520.
- [3] 谢建明, 邱毓昌. 大型风力发电场选址与风力发电机优化匹配[J]. 太阳能学报 2001, 22(4): 465-472.
- [4] 邓院昌, 余志, 钟权伟. 风电场宏观选址中地形条件的分析与评价[J]. 华东电力 2010, 38(8): 1244-1247.
- [5] 邓院昌, 余志, 周卉. 风电场宏观选址中交通条件的一种评价方法[J]. 华东电力 2010, 38(2): 281-284.
- [6] 中华人民共和国发展与改革委员会[2003] 1430 号. 风电场场址选择技术规定[Z]. 北京: 2003.
- [7] 宫靖远. 风电场工程技术手册[M]. 北京: 机械工业出版社 2004.
- [8] 风电场选址与风机优化排布实用技术探讨[J]. 电力科学与工程 2010, 26(3): 1-4.
- [9] 云丽萍. 风电场选址优化的模糊综合评价研究[D]. 北京: 华北电力大学 2008.
- [10] 邓院昌, 宁洪涛, 王铁强. 基于 GIS 的风电场宏观选址综合评价方法及应用[C]. 中国可持续发展论坛暨中国可持续发展学术年会 2007.
- [11] 邓聚龙. 灰色理论基础[M]. 武汉: 华中科技大学出版社 2002.
- [12] 刘思峰, 党耀国, 方志耕. 灰色系统理论及其应用[M]. 北京: 科学出版社 2004.
- [13] 赵云飞, 陈金雷. 层次分析法及其在电力系统中的应用[J]. 电力自动化设备 2004, 24(9): 85-87.
- [14] 李晓辉, 张来, 李小宇, 等. 基于层次分析法的现状电网评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制 2008, 36(14): 57-61.
- [15] 邓聚龙. 灰色理论基础[M]. 武汉: 华中科技大学出版社 2002: 35-76.
- [16] 吕锋. 灰色系统关联度之分辨率系数的研究[J]. 系统工程理论与实践 1997, 17(6): 49-54.

作者简介:

陶奕彩(1971), 工程师, 从事电力系统规划设计工作;
闫广新(1981), 工程师, 从事电力系统规划设计工作;
王建军(1986), 工程师, 从事高压试验工作;
马 乐(1987), 工程师, 从事高压试验工作;
张同宇(1987), 工程师, 从事电力营销工作。

(收稿日期: 2013-11-06)

基于保护矩阵和网络化简的最小断点集计算新方法

张向亮 徐文 姚强

(国网景德镇供电公司, 江西 景德镇 333000)

摘要: 针对基于网络化简和保护配合关系的最小断点集 (MBPS) 计算方法所出现的多组同基 MBPS 问题, 提出了一种基于保护三类矩阵 (即保护重要度矩阵、保护归属矩阵、保护关联矩阵) 和网络化简的 MBPS 求取方法, 并以保护归属矩阵来解决网络的平行线路判据问题。该方法先形成保护三类矩阵, 再以化简步骤对其进行动态调整, 并按照断点选取原则选取断点, 能够获取最优 MBPS。最后通过算例验证了该算法的可行性和有效性。

关键词: 最小断点集; 网络化简; 保护矩阵; 保护重要度矩阵; 保护归属矩阵; 保护关联矩阵

Abstract: Aiming at the problems of multi-group with the same cardinal number which emerges in a method for determining minimum break point set (MBPS) based on network reduction and coordination relationships of relays, a method for determining MBPS based on three types of relay matrix (relay-importance matrix, relay-belong matrix, relay-incidence matrix) and network reduction is proposed, and the relay-belong matrix is used to solve the criterion of parallel lines in grid. Firstly, this method needs to form three types of relay matrix, then adjust them dynamically according to the simplification steps, and select the break points according to break points selecting rules, which can obtain the optimal MBPS. Finally, the feasibility and validity are proved with the example of simulation.

Key words: minimum break point set (MBPS); network reduction; relay matrix; relay-importance matrix; relay-belong matrix; relay-incidence matrix

中图分类号: TM771 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)02-0031-05

0 前言

求取最小断点集是复杂环网方向保护整定计算的核心问题。已有计算方法^[1-2]一次计算只能随机得到最小断点集 (minimum break point set, MBPS) 的一个解, 此解具有多样性问题。断点整定原则具有特殊性, 不与相邻保护配合整定, 存在误动的可能, 若断点保护在系统中处于较重要位置, 则系统故障时, 其误动会对系统安全稳定运行产生较大影响。故在确保断点集基数最小的前提下, 尽量选取重要度低的保护作为断点, 以减小故障时断点对系统的影响。基于网络化简和保护配合关系的 MBPS 求取方法^[1], 平行线路判据是其算法核心之一, 由于在网络化简过程中仅依赖动态的保护配合关系, 没有能够有效利用网络节点支路拓扑联接信息, 对平行线路判别存在缺陷, 在实际应用中对某些大型复杂网络无法求出 MBPS。文献[2]提出从多组同基 MBPS 中选取最优解的解决方法, 但是所提指标不

能全面衡量保护重要度, 存在局限性, 且需利用文献[1]的方法求出多组 MBPS 之后再基于选优指标从中选取一组, 算法较为复杂, 计算量较大, 平行线路判据问题也未解决。故有必要对文献[1]、文献[2]中的算法进行改进和完善。

以节点重要度和线路介数评估保护重要度, 形成保护三类矩阵, 以保护归属矩阵判断平行线路, 以保护关联矩阵计算保护入度和出度, 以保护重要度矩阵作为选取断点的依据之一, 以化简步骤对其进行动态调整, 并按断点选取原则选取断点, 通过算例可获取最优 MBPS。

1 保护矩阵

1.1 保护重要度矩阵

形成该矩阵之前需评估各保护重要度, 下面综合节点重要度和线路介数进行衡量。

1.1.1 节点重要度

节点 k 的重要度定义为^[2]

$$I(k) = 1 - \frac{\eta(G)}{\eta(G(k))} \quad (1)$$

式中 $\eta(G)$ 为网络 G 的凝聚度; $\eta(G(k))$ 为节点 k 收缩后所得网络 $G(k)$ 的凝聚度。

为了将节点重要度和下节的线路介数综合应用于评估保护在系统中的重要度,需对其进行归一化处理,使之具有可参照性。将节点 k 的重要度与所有节点的重要度之和的比值定义为节点 k 的归一化重要度为

$$\tilde{I}(k) = \frac{I(k)}{\sum_{i=1}^n I(i)} \quad (2)$$

式中 $I(k)$ 与 $I(i)$ 分别为节点 k 、节点 i 归一化前的重要度。

1.1.2 线路介数

最短电气路径和最短电气距离的概念见文献[3],使用有权电网模型中的边权连接矩阵,利用 Dijkstra 最短路径算法可以找出网络中任意两节点之间的最短电气路径^[4]。

介数^[5]反映了边在整个网络中的作用和影响力,其值为网络中经过该边的最短路径个数。将线路 s 的介数 $\beta(s)$ 定义为电网中经过该线路的最短电气路径个数为

$$\beta(s) = \sum_{i \in V \text{ 且 } i \neq j} N_{ij}(s) \quad (3)$$

式中 $N_{ij}(s)$ 为任意节点 i 与节点 j 之间最短电气路径经过线路 s 的次数。

将线路 s 的介数与所有线路的介数之和的比值定义为线路 s 的归一化介数为

$$\tilde{\beta}(s) = \frac{\beta(s)}{\sum_{r=1}^m \beta(r)} \quad (4)$$

式中 $\beta(s)$ 、 $\beta(r)$ 分别为线路 s 、线路 r 归一化前的介数。

1.1.3 保护重要度

为评估保护在系统中的重要度,以节点重要度和线路介数对其进行综合衡量,定义保护 t 的重要度为

$$\lambda(t) = \tilde{I}(k) + \tilde{\beta}(s) \quad (5)$$

式中 $\tilde{I}(k)$ 表示与保护 t 关联的节点 k 的归一化重要度; $\tilde{\beta}(s)$ 表示保护 t 所保护的线路 s 的归一化介数。

与保护关联的节点归一化重要度以及所保护的线路归一化介数越大,则该保护重要度越大。应优

先选择重要度低的保护作为断点,这样能降低断点保护对系统稳定运行的影响。

由式(3)、(4)、(5)算出全网各保护的重要度,组成保护重要度矩阵 I 。

$$I = [t_1 \quad t_2 \quad \cdots \quad t_v \quad \cdots \quad t_n]^T \quad (6)$$

式中 t 为保护重要度; v 为编号; n 为保护总数。

1.2 保护归属矩阵

保护归属矩阵用于描述保护关联节点和支路,且其元素随网络化简而动态调整。该矩阵行号为节点编号,列号为线路编号。若保护 r 在节点 n 和线路 l 交汇处,则第 n 行第 l 列为 r ;若 n 与 l 间无直接拓扑连接,则第 n 行第 l 列为 0。图 1 的保护归属矩阵为

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 & 4 & 5 \\ 6 & 0 & 7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 8 & 9 & 10 \end{bmatrix}$$

1.3 保护关联矩阵

保护关联矩阵用于描述保护间的相互配合关系,且其元素也随网络化简而动态调整。该矩阵元素定义如下。

$$\begin{cases} a_{ij} = 1 & \text{保护 } i \text{ 需与保护 } j \text{ 配合} \\ a_{ij} = 0 & \text{保护 } i \text{ 不需与保护 } j \text{ 配合} \end{cases} \quad (7)$$

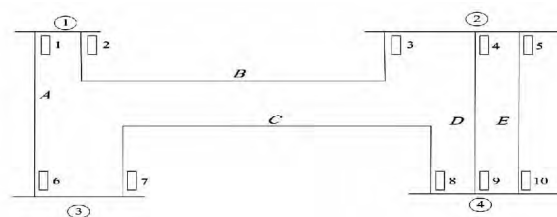


图 1 简单电力系统

根据定义,图 1 的保护关联矩阵如下。

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

保护 i 的入度(In-degree)等于依赖于保护 i

的后备保护个数,其出度(Out - degree)等于保护 i 依赖的主保护个数。该矩阵第 i 行所有元素之和即为其出度,简称 Od ,第 i 列所有元素之和即为其入度,简称 Id 。从上面的保护关联矩阵可知:保护 5 的 Od 为 2, Id 为 2。

2 网络化简

2.1 化简原则

对应于有向图的网络化简原则^[1 6]并基于保护三大矩阵,对网络进行化简,其化简原则和顺序如下。

①对于 Id 或 Od 为 0 或被选为断点的保护,把保护三大矩阵中与其关联的元素置 0。终端线路首端保护出度为 0,将其选为断点。②对于 Id 为 1 的保护 t ,若保护关联矩阵的第 t 列的非 0 元素在第 j 行且 $t \neq j$,则把保护关联矩阵第 t 行元素赋予第 j 行,并将第 t 行全赋 0,保护重要度矩阵第 t 个元素置 0,保护归属矩阵中为 t 的元素替换为 j 。③对于出度为 1 的保护 t ,保护关联矩阵的第 t 行的非零元素在第 j 列且 $t \neq j$ 。把保护关联矩阵第 t 列元素赋予第 j 列,并将第 t 列全赋 0,保护重要度矩阵第 t 个元素置 0,保护归属矩阵中为 t 的元素替换为 j 。④对于保护 t ,若保护关联矩阵第 t 行第 t 列为 1,将其选为断点,并把保护三大矩阵中与保护 t 关联元素置 0。

2.2 平行线路优化^[1 7]

定义 1 电网拓扑图中直接连接两个母线节点的 2 条及以上的线路称为平行线路。

定义 2 对于平行线路两端的保护,任意一端的所有保护构成的集合称为一组平行线路保护对。

定义 3 在同一条母线上,两组及以上平行线路保护对构成强关联平行线路保护组。

定义 4 对于两组平行线路保护对,其所在两母线间仅由一条线路相连,称其为弱关联平行线路保护组。

为解决文献[1]平行线路判据问题,提出以归属矩阵判断网络平行线路、平行线路保护对、强关联平行线路保护组、弱关联平行线路保护组。

从归属矩阵中归纳平行线路判据:两列或多列

任意同行元素或同为 0,或同不为 0(至少一行),则对应的线路为平行线路。但是仍有问题,如图 2 所示。图 2(a)、(b)的保护归属矩阵分别如下所述。

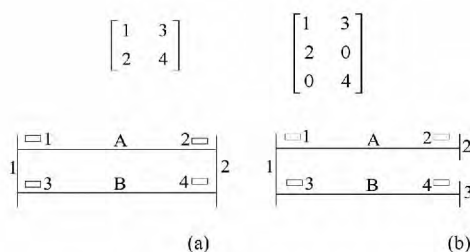


图 2 比较图

图 2(a) 线路 A 和 B 平行,而图 2(b) 线路 A 和 B 不平行。若图 2(a)、(b) 中的保护 2、4 均被选为断点,按化简原则,两个归属矩阵为

$$\begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

以上述判据判断图 2(a)、(b) 中的线路均为平行线路,但图 2(b) 线路实际不平行。故有必要纠正该判据,加一个化简原则:平行线路上的保护被选为断点或者被删除则归属矩阵对应位置的元素为 -1。故平行线路的判据为在归属矩阵中,两(多)列有两行同不为 0 且同不为 -1,或者一行同不为 0 且同不为 -1 而另一行同为 -1,则这些列对应的线路为平行线路。

按此原则化简,则图 2(a)、(b) 的归属矩阵为

$$\begin{bmatrix} 1 & 3 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

以纠正后的判据判断:图 2(a) 线路平行,而图 2(b) 线路不平行。

其他概念判据如下。

平行线路保护对判据:由上述判据求出平行线路,其中同行非 0 且非 -1 元素对应的保护构成一组平行线路保护组。

强/弱关联平行线路保护组判据:以平行线路保护对所在行号为依据,若有两组或多组平行线路保护对在保护归属矩阵中非 0 且非 -1 元素对应行号相同,则其构成一组强关联平行线路保护组;若有两组平行线路保护对在保护归属矩阵中非 0 且非 -1 元素所在行号不同,且两行中同列非 0 且非 -1 元

素仅有一组相同,则其构成一组弱关联平行线路保护对。

3 断点选取原则

①原则 1: 把终端线路首端保护选为断点。②原则 2: 把强关联平行线路保护组中的所有保护选为断点并更新平行线路保护对。③原则 3: 把 I_d 最大的平行线路保护对选为断点,若存在多组,则把保护重要度之和最小的一组选为断点并更新平行线路保护对。④原则 4: 把弱关联平行线路保护组中的一个平行线路保护对选为断点(按原则 3 选取),若存在多组,则考虑所关联母线所包含的保护个数最小的一组,若此时有多组该类平行线路保护组,则考虑保护重要度之和最小的一组,再按上述方法选择断点,并更新平行线路保护对。⑤原则 5: 选择 I_d 最大的保护为断点,若最大 I_d 的保护有多个,则选取重要度最大的保护为断点。

4 算法步骤

这里算法步骤如下: ①根据式(2)、(4)、(5)计算全网各保护的重要度。②形成保护归属矩阵、保护关联矩阵、保护重要度矩阵并初始化 BPS 为空集。③若存在 $Od=0$ 的保护,则运用原则 1 将其选为断点。④简化网络并更新保护三大矩阵。⑤若保护归属矩阵为空(即不包含非 0 且非 -1 元素),则结束。⑥若无平行线路,则运用原则 5 添加新断点到 BPS,再转至步骤④。⑦若存在强关联平行线路保护组,运用原则 2 添加新断点到 BPS。⑧若存在平行线路保护对而存在强关联平行线路保护组,则运用原则 3 添加新断点到 BPS。⑨若存在弱关联平行线路保护组,运用原则 4 添加新断点到 BPS 并转至步骤④; 否则直接转至步骤④。

5 算例分析

系统接线及保护分布如图 3 所示。基于所提计算方法,可求解该网络的最优 MBPS。

根据公式(5)算出网络中 38 个保护的重要度,如表 1 所示。根据系统接线图可得初始的保护重要

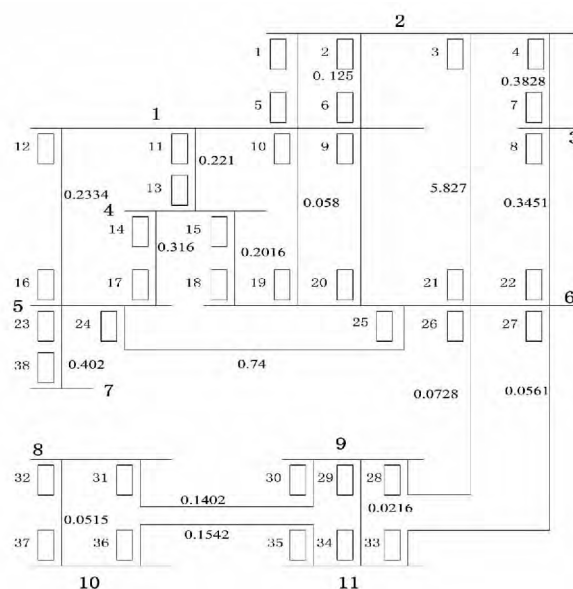


图 3 算例系统

度矩阵、保护归属矩阵、保护关联矩阵,并设置 $BPS = \{\}$ 。

①保护 23 的 $Od=0$, 将其选为断点并同步更新保护三类矩阵, $BPS = \{23\}$; 保护 7、8、31、32、36、37 的入度均为 1, 以化简原则 2 更新三类矩阵; 化简后, 平行线路保护集为 $\{1, 2\}$ 、 $\{5, 6\}$ 、 $\{3, 4\}$ 、 $\{21, 22\}$ 、 $\{9, 10\}$ 、 $\{19, 20\}$ 、 $\{29, 30\}$ 、 $\{34, 35\}$ 其中 $\{1, 2\}$ 、 $\{3, 4\}$ 构成一组强关联平行保护对, 将保护 1、2、3、4 选为断点, 同时更新三类保护和平行线路保护集合, $BPS = \{23, 1, 2, 3, 4\}$ 。②这时, 平行线路保护集为: $\{9, 10\}$ 、 $\{19, 20\}$ 、 $\{29, 30\}$ 、 $\{34, 35\}$ 。其中 $\{19, 20\}$ 、 $\{29, 30\}$ 构成弱关联平行保护对, 根据断点选取原则 4 选保护 19、20 作为断点, 并更新三类保护和平行线路保护集合, $BPS = \{23, 1, 2, 3, 4, 19, 20\}$ 。③这时, 平行线路保护集为: $\{29, 30\}$ 、 $\{34, 35\}$ 。保护 11、12 的入度为 1, 以化简原则 2 更新三类矩阵; 保护 29、30、34、35 的入度均为 2, 但是 $\{29, 30\}$ 的保护重要度之和的平均值小于 $\{34, 35\}$ 的, 故选 29、30 作为断点, 更新三类矩阵, $BPS = \{23, 1, 2, 3, 4, 19, 20, 29, 30\}$ 。④此时, 不存在平行线路, 保护 33 的入度为 0, 按化简原则 1 更新三类矩阵; 保护 34、35 的入度为 1, 以化简原则 2 更新三类矩阵, 保护 27 的出度为 1, 再以化简原则 2 更新三类矩阵, 出现自环顶点 28, 将其选为断点, 以化简原则 4 更新三类矩阵, $BPS = \{23, 1, 2, 3, 4, 19, 20, 29, 30, 28\}$ 。⑤此时, 网络中无平行线路, 按原则 3 选择断点。保护

13、14、16、17 的入度均为 2 ,而保护 13、14 的保护重要度最小 , $BPS = \{23, 1, 2, 3, 4, 19, 20, 29, 30, 28, 13\}$ 或者 $\{23, 1, 2, 3, 4, 19, 20, 29, 30, 28, 14\}$,并同时更新三类矩阵。⑥若把保护 13 选为断点 ,保护 9、10、17、24 的入度均为 1 ,以化简原则 2 更新三类矩阵 ,保护 15、18 的出度均为 1 ,以化简原则 3 更新三类矩阵 ,出现自环顶点 14、25 ,将其选为断点 ,以化简原则 4 更新三类矩阵 ,网络只存在顶点 16 ,保护归属矩阵为空 ,算法结束 , $MBPS = \{23, 1, 2, 3, 4, 19, 20, 29, 30, 28, 13, 14, 25\}$ 。同理 ,若把 14 选为断点 ,得到的 MBPS 是相同的。

表 1 算例系统中所有保护的重要度

保护	重要度	保护	重要度	保护	重要度	保护	重要度
1	0.149 8	11	0.126 5	21	0.218 2	31	0.117
2	0.149 8	12	0.235 9	22	0.288 5	32	0.054 5
3	0.079 5	13	0.110 4	23	0.224 6	33	0.169 3
4	0.087 3	14	0.110 4	24	0.146 5	34	0.083 3
5	0.181 2	15	0.141 7	25	0.218 2	35	0.130 2
6	0.181 2	16	0.271 5	26	0.327 6	36	0.117
7	0.070 5	17	0.162 1	27	0.327 6	37	0.054 5
8	0.133 0	18	0.265 1	28	0.169 2	38	0.152 4
9	0.290 6	19	0.397 9	29	0.083 2		
10	0.290 6	20	0.397 9	30	0.130 1		

6 结 语

提出基于网络化简和保护三类矩阵求取 MBPS 计算方法 ,解决了平行线路判据问题 ,弥补了已有算法的不足。基于矩阵运算 ,效率高效 ,能够实时反映

网络拓扑结构的变化 ,符合电力系统实际情况。最后通过算例分析 ,证明所提算法的有效性和可行性。

参考文献

- [1] 刘丹 ,吕飞鹏. 基于网络化简和配合关系的最小断点集计算方法[J]. 电力系统自动化 ,2008 ,32(16) : 24 - 27.
- [2] 李运坤 ,吕飞鹏 ,陈新 ,等. 基于节点重要度估计的多组同基最小断点集选取方法[J]. 电力系统自动化 ,2010 ,12(34) : 58 - 60.
- [3] 曹一家 ,陈晓钢 ,孙可. 基于复杂网络理论的大型电力系统脆弱线路识别[J]. 电力自动化设备 ,2006 ,26(12) : 1 - 5 ,31.
- [4] 乐阳 ,龚健雅. 最短路径算法的一种高效率实现[J]. 武汉测绘科技大学学报 ,1999 ,24(3) : 209 - 212.
- [5] 王亮 ,刘艳 ,顾雪平 ,等. 综合考虑节点重要度和线路介数的网络重构[J]. 电力系统自动化 ,2010 ,34(12) : 29 - 33.
- [6] LIN Henming ,JOU Jingyang. On Computing the Minimum Feedback Vertex Set of a Directed Graph by Contraction[J]. IEEE Trans on Computer - aided Design of Integrated Circuits and Systems ,2000 ,19(3) : 295 - 307.
- [7] Donghua Ye ,Jing Ma ,Zengping Wang. A Novel Method for Determining Minimum Break Point Set Based on Network Reduction and Relays Incidence Matrix[C]. Critical Infrastructure (CRIS) ,2010 5th International Conference on 2010: 1 - 5.

作者简介:

张向亮(1987) ,硕士 ,主要研究方向为电力系统继电保护。

(收稿日期:2013 - 11 - 11)

(上接第 5 页)

- [9] 胡广书. 现代信号处理教程[M]. 北京:清华大学出版社 ,1999.
- [10] 何书元. 应用时间序列分析[M]. 北京:北京大学出版社 ,2003: 139 - 143.
- [11] 任震. 小波分析及其在电力系统中的应用[M]. 北京:中国电力出版社 ,2003.
- [12] 葛哲学 ,陈仲生. Matlab 时频分析技术及其应用[M]. 北京:人民邮电出版社 ,2006.

- [13] 董新洲 ,贺家李 ,葛耀中. 小波变换在行波故障检测中的应用[J]. 继电器 ,1998 ,26(5) : 1 - 4.

作者简介:

郑莹莹(1986) ,硕士研究生 ,研究方向为现代信号处理与电力系统故障信号分析;
舒 勤(1958) ,教授 ,研究方向为现代信号处理与智能电网。

(收稿日期:2013 - 12 - 16)

降低 10 kV 配电网损耗及提高供电质量措施

张 迺¹; 胡晓阳²; 胡建川³; 王主丁²

(1. 国网重庆市电力公司长寿分公司, 重庆 401220;

2. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400030;

3. 国网重庆南川区供电有限责任公司, 重庆 408400)

摘要: 电能作为现代社会最依赖的能源, 降低电能损耗、提高电能质量至关重要。10 kV 及以下配电网损耗占整个网络损耗的绝大部分, 具有相当大的降损节能潜力。首先, 介绍了线损产生原因及降低电能损耗、提高电压质量的措施。然后, 对 A 地区现状公用线路进行分析。以某 35 kV 变电站为例, 对其 10 kV 馈线进行了潮流计算分析, 找出电网存在的问题, 并提出相应的具体措施。最后, 采用一种无功电压综合优化方法对变电站多条 10 kV 馈线进行无功补偿计算, 验证了无功规划优化在降损和提高电压质量上的可行性和有效性。

关键词: 配电网; 电能质量; 降损措施; 潮流分析; 无功补偿

Abstract: It is very important to reduce the electric energy loss and improve the power quality since electric energy is mostly relied on by modern society. The energy loss from 10 kV and below distribution networks accounts for most of the losses from an entire network, which means a distribution network has a great potential of loss reduction and energy saving. Firstly, the reasons of loss and the measures to reduce losses and improve voltage quality are presented. Then, a number of power lines in area A are analyzed. Taking 35 kV substation for example, the load flow of 10 kV feeders is calculated and analyzed, the existing problems of distribution networks are found out, and the corresponding solving measures are put forward. Finally, the feasibility and validity to reduce losses and improve voltage quality are demonstrated by reactive compensation for 10 kV feeders from 35 kV substation.

Key words: distribution network; power quality; loss-reducing measures; load flow analysis; reactive compensation

中图分类号: TM714 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)02-0036-06

0 引言

现代社会中, 电能是一种使用最广泛的能源。在全球能源日益紧张的今天, 各国都充分认识到了提高电能质量、降低电能损耗的重要性。

线损率^[1]是反映配电网运行的重要指标, 经常作为对电网企业的考核或同业对标指标。衡量电能质量的主要指标包括电压、频率和波形^[2,3], 其中又以电压质量问题最为普遍。对配电网线损的构成和电压质量进行分析, 制定可行的降损及提高电能质量措施, 并积极加以实施就显得十分必要。目前线损的研究主要集中在理论线损计算方面, 以线损为目标的无功优化、配电网网络重构、补偿电容安装位置的确定等问题。电能质量的研究内容主要包括电压偏差、频率偏差、电压波动与闪变、三相电压不

平衡等, 下面主要对电压偏差方面进行研究。

对配电网线损产生的原因进行分析, 总结出线损主要由电阻、磁场以及管理三个方面导致; 提出降低配电网损耗以及提高电能质量的措施。以某 35 kV 变电站为例, 对其 10 kV 馈线进行了潮流计算, 找出 A 地区电网存在的问题, 并提出相应的具体措施。采用一种无功电压综合优化方法对变电站的多条 10 kV 馈线进行无功补偿计算, 验证了无功规划优化在降损和提高电压质量上的可行性和有效性。

1 线损产生原因及降损措施

1.1 线损产生原因

电力网中线损的产生原因, 归纳起来主要有三个方面的因素, 即电阻作用、磁场作用和管理方面^[4,5]的因素。

(1) 电阻作用

电能在电网传输过程中,电流克服电阻的作用引起导体温升和发热,称为电阻损耗。

(2) 磁场作用

由于磁场的作用,在电气设备的铁心中产生磁滞和涡流现象,使铁心产生温升和发热,称为励磁损耗。

(3) 管理方面的因素

电力企业管理水平落后,制度不健全,致使工作中出现的如用户违章用电和窃电;计量表配备不合理等造成误差损失。

1.2 降损技术措施

(1) 线路经济运行

1) 按经济电流运行,当线路负荷电流达到经济负荷电流 I_{jj} 时,线路达到最佳线损率。

经济负荷电流的计算公式^[6]为

$$I_{jj} = \sqrt{(\sum_{i=1}^n \Delta P_{0i}) / 3K^2 R} \quad (1)$$

其中 ΔP_{0i} 为线路上每台变压器的空载损耗 kW ; K 为线路负荷曲线形状系数^[1]; R 为线路总等值电阻。

此时的最佳线损率为

$$\Delta A_{sj} = \frac{2K \times 10^{-3}}{U_e \cos \varphi} \sqrt{R \sum_{i=1}^m \Delta P_{0i}} \times 100\% \quad (2)$$

其中 U_e 为线路的额定电压 kV ; $\cos \varphi$ 为线路负荷功率因素。

2) 增加并列线路运行^[7]

增加并列线路指由同一电源至同一受电点增加一条或几条线路并列运行。

① 增加等截面、等距离线路并列运行后的降损节电量计算式为

$$\Delta(\Delta A) = \Delta A (1 - \frac{1}{N}) \quad (3)$$

其中 ΔA 为原来一回线路运行时的损耗电量 kWh ; N 为并联运行线路的回路数。

② 在原导线上增加一条不等截面导线,此时的降损节电量计算式为

$$\Delta(\Delta A) = \Delta A (1 - \frac{R_2}{R_1 + R_2}) \quad (4)$$

其中 R_1 为原线路导线电阻 Ω ; R_2 为增加线路导线电阻 Ω 。

(2) 变压器经济运行^[7-10]

1) 单台变压器的经济运行

单台变压器运行时,当空载损耗和负载损耗相

等时,此时运行效率最高,最经济,此时的负载系数为

$$K_F = \sqrt{\Delta P_0 / \Delta P_k} \quad (5)$$

此时变压器的经济负荷为

$$S = K_F \times S_N \quad (6)$$

其中 ΔP_0 为变压器的空载损耗 kW ; ΔP_k 为变压器的负载损耗 kW ; S_N 为变压器的额定容量 kVA 。

2) 多台变压器的经济运行

① 多台同容量

当变电站有多台相同型号的双绕组变压器并列运行时,应分别计算变压器的临界负荷,确定不同负荷情况下应当投运的变压器台数。

临界负荷计算式如下。

$$S_C = \sqrt{n(n-1) \frac{\Delta P_0}{\Delta P_k F} S_N} \quad (7)$$

其中 n 为并列运行的变压器台数; F 为变电站总负荷的损失因数。

若变电站的总负荷为 S_{max} ,当 $S_{max} > S_C$ 时, n 台并列运行最经济;反之,则 $n-1$ 台运行最经济。

② 多台不同容量

当变电站有多台不同型号的双绕组变压器时,计算出各种组合方式下的临界负荷表,然后再根据变电站的负荷选择最经济的组合方式。

每两种组合方式的临界负荷可按式(8)计算。

$$S_{c(ij)} = \sqrt{(\Delta P_{0i} - \Delta P_{0j}) / [\frac{\sum P_{ki}}{(\sum S_{Ni})^2} - \frac{\sum P_{kj}}{(\sum S_{Nj})^2}] / F} \quad (8)$$

其中 $\Delta \sum P_{0i}$ 、 $\Delta \sum P_{0j}$ 为第 i 种及第 j 种组合方式并列变压器组的总空载损耗 kW ; $\sum P_{ki}$ 、 $\sum P_{kj}$ 为第 i 种和第 j 种组合方式并列变压器组的总额定短路损耗 kW ; $\sum S_{Ni}$ 、 $\sum S_{Nj}$ 为第 i 种和第 j 种组合方式并列变压器组的总额定容量 kVA 。

(3) 网络改造

更换配电网中残旧线路、小截面线路可以降低线路损耗;更换高损耗配电变压器降低配电变压器损耗。

(4) 增加电源点

随着经济的发展和用电负荷的不断增长,原有 10 kV 配电网的负荷越来越重,如果维持这种较低电压等级的电网长距离供电的状态,不但电压质量很难保证,线损电量也会很大。在负荷较重,供电线

路过长的地方考虑增加电源布点,能缩短线路供电半径,有效地降低线损。

(5) 无功补偿降损

电力系统中由于动态变化的非线性负荷的存在,引起系统有功和无功的快速变化导致系统电压波动和闪变以及供电电压波形的畸变。如果无功储备不足将会导致电网电压水平降低,这就需要对电网或用户进行无功补偿以提高电压质量,降低系统的损耗。此外,无功补偿也有益于电压质量的提高。

1.3 降损管理措施

(1) 加强电能计量管理

配备合理的计量装置,以使用户或出线用电负荷较小时也能准确计量。

(2) 加强用电营业管理

一要加强防窃电管理;二要加强抄表核收工作的质量管理和工作责任心,建立健全抄表核收工作制度。

(3) 开展线损理论计算工作

通过对配电网线损的定期计算,对每个元件的功率损失和电能损耗加以掌握,并与实际统计所得的线损值比较分析,从而明确损耗的构成情况,积极地采取措施,将线损降至合理水平。

(4) 完善线损管理考核机制

在原有分线分台区线损考核的基础上,结合目前线损发展的新形势,进一步理顺基础资料,强化抄表管理,使分线分台区线损统计更加准确。

2 提高电压质量措施

(1) 适当的调压

常用的调压方法有:利用发电机调压;改变变压器变比调压;并联补偿无功设备调压;串联电容器调压^[11-13];SVR 馈线自动调压。根据电网实际情况,选择合理的调压措施,保证电压质量。

(2) 增加电源点

适当增加电源点,优化电网结构。新建变电站的新出线可转移现有线路的部分负荷,不仅降低损耗,还能保证电压质量。

(3) 加强电压质量管理

一要加强电压质量的监测管理。实现电压质量系统分析,为提升电压管理和提高电压合格率奠定坚实基础。二要加强线路设备巡视。做到对线路

设备异常情况及时掌握。三要开展电压指标分析,推动配电网低电压台区改造。

3 无功电压综合优化措施

配电网的无功优化可分为规划优化和运行优化。

1) 配电网的无功规划优化,是指在满足系统各种约束(包括功率平衡、电压质量等)的前提下,调节分布式无功电源的功率以及变压器的分接头和变压器分接头等,确定无功补偿装置的最佳装设地点和最优补偿容量,降低网络损耗,改善电压质量。

2) 配电网的无功运行优化,是指在现有无功补偿设备的基础上,根据负荷的变化,通过调节分布式无功电源的出力、电容器组运行投切和变压器分接头等,降低网络损耗并提高电压合格率。无功运行优化需要配电网的自动化配合,通过监测本地的电压以及有功功率、无功功率等来调节变压器的档位以及电容器的开关,从而使电压以及无功功率处于合理的范围内。

这里采用一种无功电压综合优化措施,保证电压质量的同时降低损耗。其基本无功优化程序基于遗传算法、节点优化编号和辐射状配电网特点,采用一种将确定性方法和随机性方法进行有机组合的配电网无功规划优化混合算法。该算法通过综合考虑经济效益和电压约束,提出一种动态确定节点补偿容量上限的有效方法^[14],将其用于初始种群的生成,可自动确定补偿节点总数及各补偿节点补偿组数的上限值。

4 配电网线路分析及潮流计算

4.1 线路分析

A 地区有 110 kV 变电站 2 座,35 kV 变电站 9 座,10 kV 线路 46 条,配电变压器 1 746 台,总容量为 188.85 MVA。

1) 供电半径

46 条 10 kV 公用线路主干长度超过 15 km 的有 14 条,主干超过 10 km 的有 27 条,大部分线路供电半径过长。

2) 配电变压器数量

A 地区 10 kV 公用线路装接配电变压器容量主

要集中在 8 MVA 以内;共有 4 条线路装接配电变压器容量超过了 15 MVA,均为城区线路,负荷较重,所带配电变压器容量大。其余线路装接配电变压器容量较低的主要原因是农村供电线路负荷以居民为主,住户较少,供电区域分散,负荷密度较小,并且现有 10 kV 线路导线截面以 50、70 为主,限制了线路的配电变压器装接容量。

3) 线型分析

A 地区架空线路截面主要为 50 (mm)² 和 70 (mm)²。

《农网建设与改造技术导则》规定^[15]:县城、城乡结合部和集镇供电区新建与改造 10 kV 线路主干线线径统一为 240 (mm)²,农村区域 10 kV 线路主干线路线径不小于 95 (mm)²。A 地区城区现有 10 kV 公用线路主干导线截面小于《导则》要求的共有 6 条,农村地区现有 10 kV 公用线路主干导线截面小于 95 (mm)² 有 30 条,普遍导线截面过小。

4.2 潮流计算

以 A 地区某 35 kV 变电站为算例,对其 10 kV 馈线进行潮流分析。该变电站有 6 条 10 kV 馈线,其基本信息如表 1 所示。

表 1 馈线基本信息

线路名称	主干线型 /mm ²	主干长度 /km	装接配变	
			台数	容量 /kVA
线路 1	LGJ-70	1.573	9	1 515
线路 2	LGJ-95	15.32	64	4 680
线路 3	LGJ-70	28.1	33	3 705
线路 4	LGJ-70	18.506	150	7 210
线路 5	LGJ-50	13.603	33	1 640
线路 6	LGJ-70	9.77	101	5 865

采用美国加州 WLSL 星能电气有限公司和重庆星能电气有限公司开发的《CEES 供电网计算分析辅助决策软件——潮流计算子系统》进行建模和潮流计算,得出各馈线最大负荷电流运行方式下的电压损耗及线损情况,如表 2 和表 3 所示。

表 2 馈线电压损耗情况

线路名称	首端电压 /kV	末端电压 /kV	电压损耗 百分比 /%
线路 1	10.59	10.5	0.85
线路 2	10.59	10	5.57
线路 3	10.58	9.02	14.74
线路 4	10.54	7.42	29.60
线路 5	10.6	9.84	7.17
线路 6	10.57	9.25	12.49

表 3 馈线系统损耗情况

线路名称	线路有功 损耗 /kW	变压器有功 损耗 /kW		总损耗 /kW	损耗率 /%
		铁耗	铜耗		
线路 1	16.21	21.37	26.02	63.6	4.15
线路 2	57.66	11.79	29.6	99.05	6.62
线路 3	166.82	24.96	15.42	207.2	12.91
线路 4	539.63	32.06	24.11	595.8	24.40
线路 5	79.29	22.73	20.78	122.8	10.38
线路 6	148.89	32.58	14.73	196.2	11.07

由表 2 可知,线路 4、线路 3、线路 6 电压损失较严重,电压损失百分比分别为 29.60%、14.74%、12.49%。其中,线路 4 电压损失最为严重,末端电压仅为 7.42 kV。线路 4、线路 3、线路 6、线路 5 有功损耗分别达到 24.4%、12.91%、11.07%、10.38%。

5 存在问题及解决措施

经过对 A 地区电网的 46 条公用线路进行潮流计算,找出存在的线损和电压问题,同时结合 A 地区实际,提出了降损和提高电能质量的综合措施。

5.1 存在主要问题

A 地区配电网主要存在两个问题,一是无功补偿不足。目前 A 地区配电网的无功补偿主要是采用变电站集中补偿方式,配电线出口的功率因数一般能满足要求,但 10 kV 线路的功率因数却较低。为此在当前的情况下,应加强对客户无功补偿装置的管理,使客户无功补偿装置切实发挥作用。二是线路供电半径长,导线截面过小。一、二期农网改造时,因投入改造资金少,为了扩大改造面,导致电网改造的标准低,供电半径长,导线型号小,变压器容量小,变压器布置不合理,供电质量和供电可靠性低,线损高,现已远远不能满足居民用电负荷发展的需要。

5.2 解决措施

(1) 加强无功补偿

A 地区配电网的无功补偿主要是采用变电站集中补偿方式,这对降低配电网线损的效果不明显,应加强低压的无功补偿。通过潮流计算,适当增加低压无功补偿能有效降低线损,提高电压质量和功率因素。

(2) 更换导线、高耗能变压器,降低电阻,降低损耗

部分线路已经超过经济电流密度运行,需要进行改造换线工程,降低损耗。补偿前线损率超过

10% 的 4 条线补偿后仍然有 1 条线线损率高于 10% ,即线路 4 ,其线型为 LGJ - 70 ,导线截面过小 ,应将主干线路更换为 LGJ - 95 线型。

(3) 改造不合理台区 ,降低配电损失

该变电站部分 10 kV 线路的负荷较大 ,所带配电变压器过多。在个别地区 ,低压线路过长且布局不合理。因此 ,改造不合理的配电变压器台区是很有必要的。同时 ,注意解决配电变压器过载问题。

(4) 适当增加电源布点 ,缩短线路供电半径

目前 ,该变电站有 4 条线的线路长度都超过了《农网建设与改造导则》要求的 15 km。如 10 kV 线路 4 供电半径达 20 km ,总长度达 80.94 km。可以考虑在该变电站附近增加电源布点 ,缩短供电半径 ,降低线路损耗 ,提高电压质量。

(5) 加强线损管理和理论线损计算

一要加强抄表的管理 ,确保实际反应线损;二要定期召开各级线损分析会 ,对线损率突升、损失电量突增的异常事件进行分析 ,查明原因 ,落实降损措施和责任单位;三要做好理论线损计算 ,认真梳理电网基本资料 ,分析电网各类元件的损耗情况 ,根据理论分析结果制定节能降损的技术措施计划。

6 无功规划算例

采用《CEES 供电网计算分析辅助决策软件——无功补偿子系统》进行无功规划优化 ,确定的部分无功补偿装置的装设地点和补偿容量如表 4 所示。

表 4 无功补偿安装地点和容量

线路名称	无功补偿点	额定电压 /kV	配变容量 /kVA	补偿容量 /kvar
线路 3	配变 28 低压侧	0.4	630	360
	配变 29 低压侧	0.4	500	320
	配变 6 低压侧	0.4	100	90
	配变 7 低压侧	0.4	80	60
	配变 23 低压侧	0.4	100	60
线路 5	配变 34 低压侧	0.4	80	60
	配变 52 低压侧	0.4	80	60
	配变 54 低压侧	0.4	80	60
	配变 57 低压侧	0.4	80	60
线路 6	配变 7 低压侧	0.4	315	110
	3 支线 22 号杆	10	-	700

补偿前后的线损及馈线功率因素如表 5 所示。

表 5 补偿前后线损和功率因素对比

线路名称	线损电量 / (MWh · a ⁻¹)		线损率 /%		功率因素	
	补偿前	补偿后	补偿前	补偿后	补偿前	补偿后
线路 3	365.7	258.3	11.57	8.46	0.83	0.97
线路 5	194.4	155.3	10.38	6.82	0.84	0.97
线路 6	341.1	252.2	11.07	7.4	0.83	0.98

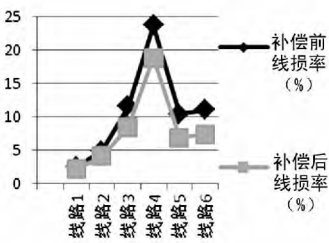


图 1 补偿前后的线损率对比

此次无功补偿多在配电变压器低压侧补偿 ,且大部分在大容量配电变压器的低压处补偿。补偿后电压较低的线路 4、线路 3、线路 6 的末端电压分别提高到 9.4 kV、9.66 kV 和 9.59 kV。补偿前线损率超过 20% 有 1 条 ,即线路 4 ,线损率达到 23.73% ,补偿后线损率降低到 18.81%。线损率在 10% ~ 20% 之间的有 3 条 ,分别为线路 3、线路 6、线路 5 ,线损率分别达到 11.57%、11.07%、10.38% ,补偿后线损率分别降低到 8.46%、7.4%、6.82% ,4 条线的年总降损收益为 26.44 万元 ,节能效果显著。验证了无功补偿规划优化的可行性和有效性 ,降低了线损 ,保证了电压质量。

7 结论与展望

(1) 线损方面 ,措施分为降损技术措施和降损管理措施。技术措施包括线路经济运行、变压器经济运行、网络改造、增加电源点、无功补偿降损;管理措施包括加强电能计量管理、加强用电营业管理、开展线损理论计算工作、完善线损管理考核机制。

(2) 电压质量方面 ,措施有适当调压(包括 SVR 调压) ,增加电源点 ,无功补偿 ,加强电压的监测及指标分析 ,加强线路设备巡视。

(3) 无功电压综合措施 ,结合无功规划优化和运行优化 ,自动确定无功补偿装置的最佳装设地点和最优补偿容量 ,自动调节有载调压变压器分接头

和控制电容器投切,降低网络损耗,改善电压质量。

(4) 计算结果都是基于 A 地区现状电网计算得到,若适当增加电源点、缩短线路的供电半径和更换小截面导线,降损效果更佳。如线路 5 导线型号为 LGJ-50,若将其更换为 LGJ-95 的导线,损耗将在此基础上再减少 50%,而且电压质量也能得到进一步提高。

(5) 实际算例验证了无功电压规划优化对降损及提高电压质量的有效性。在不久的将来,随着配电网自动化控制的不断推进,通过在配电网全网实现无功电压控制,有利于进一步提高全网电压的合格率,降低电网的损耗。

参考文献

- [1] DL/T 686-1999 电力网电能损耗计算导则[S].
- [2] 林海雪. 现代电能质量的基本问题[J]. 电网技术, 2001, 25(10): 5-12.
- [3] 朱桂萍,王树良. 电能质量控制技术综述[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(19): 28-31.
- [4] 廖学琦. 农网线损计算分析与降损措施[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.
- [5] 盛万兴. 配电系统综合节能技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [6] 周强. 中低压线损计算方法与降损措施的研究[D]. 郑

州: 郑州大学, 2009.

- [7] 吴强. 实际配电系统线损分析与降损措施研究[D]. 成都: 四川大学, 2004.
- [8] 刘海峰. 配电变压器经济运行分析[J]. 电力需求侧管理, 2009, 11(5): 48-49.
- [9] 郑琳. 配电变压器的经济运行[J]. 电力需求侧管理, 2006, 8(5): 61-62.
- [10] 夏春燕. 变压器经济运行分析与应用[J]. 变压器, 2007, 44(12): 24-28.
- [11] 江振生. 电力系统调压措施的合理选用[J]. 中国科技信息, 2006(2): 130.
- [12] 许一星,李越冰. 电网电压问题与调整措施[J]. 中国电力教育, 2009(139): 261-262.
- [13] 来美英,来运梅. 电力系统的调压措施[J]. 科技信息, 2006(9): 457.
- [14] 赵俊光,王主丁,张宗盛,等. 基于节点补偿容量动态上限的配电网无功规划优化混合算法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(23): 69-74.
- [15] Q/GDW 462-2010 农网建设与改造技术导则[S].

作者简介:

张 迺(1987), 主要从事管理降损研究;

胡晓阳(1991), 硕士研究生, 主要从事配网降损与无功优化研究。

(收稿日期: 2013-12-24)

(上接第 9 页)

运行稳定可靠,减少了试验人员工作量,提高了供电可靠性和智能化水平,可在电力系统中推广。

参考文献

- [1] 朱德恒,谈克雄. 电绝缘诊断技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [2] 严璋. 油浸电力变压器固体绝缘老化的诊断及其应用[D]. 西安: 西安交通大学, 2003.
- [3] 尚勇,钱政,杨敏中,等. 高电压设备绝缘老化及状态维修的实现[J]. 高电压技术, 1999, 25(3): 40-42.
- [4] 宋伟. 变压器绝缘老化与寿命评估[D]. 济南: 山东大学, 2005.
- [5] 申翰林. 基于回复电压法的油浸式变压器状态检测关键技术的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- [6] 朱德恒,严璋,谈克雄. 电气设备状态监测与故障诊断技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.

- [7] 王昌长,李福琪,高胜友. 电力设备的在线监测与故障诊断[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [8] C. G 瓦修京斯基,崔立君,杜思田,等译. 变压器的理论与计算[M]. 北京: 机械工业出版社, 1983.
- [9] Schuert P J, Nevin J H. A Polyimide-based Capacitive Humidity Sensor[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1985, 32(7): 1220-1223.
- [10] 王洪亮,周利军,吴广宁. 不同含水量对油纸绝缘老化速率影响的研究[C]. 第十届全国工程电介质学术会议论文集, 2005.
- [11] 刘敏. 不同含水量对油纸绝缘老化速率的影响[J]. 绝缘材料, 2008, 41(3): 40-42.

作者简介:

尧 广(1983), 工学硕士, 工程师, 研究方向为高电压与绝缘技术。

(收稿日期: 2013-11-04)

基于模糊滑模变结构的直流伺服系统控制器设计

冉 鸿 陈 静 罗 洪

(国网重庆武隆县供电有限责任公司 重庆 408500)

摘 要: 针对直流伺服系统中参数时变性和外部扰动等造成的电机模型变化,设计了一种采用滑模变结构控制策略来控制直流伺服电机的方法,并且对系统稳定性进行了分析。为了削弱抖振,采用模糊控制方法将切换控制模糊化。对所设计的模糊滑模变结构控制系统进行仿真表明,采用模糊控制能大大削弱系统抖振,另外对具有电机参数大范围摄动的系统,滑模变结构控制系统具有较强的鲁棒性和快速性。

关键词: 模糊控制; 滑模变结构; 直流伺服电机

Abstract: Aiming at the change of motor model caused by time variation of parameters and external disturbances in DC servo-system, a control strategy based on sliding mode variable structure is designed to control DC servomotor, and the system stability is analyzed. In order to weaken the chattering, the fuzzy control method is used to fuzzy the switching control. Then, the simulation of the designed control system with fuzzy sliding mode variable structure shows that the fuzzy control can greatly weaken the chattering of the system, and for motor parameter perturbation system, the control system with sliding mode variable structure has a stronger robustness and fast response.

Key words: fuzzy control; sliding mode variable structure; DC servomotor

中图分类号: TM762 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)02-0042-03

0 引 言

滑模变结构控制近年来已被广泛应用于处理一些复杂的线性系统、非线性系统、时变、多变量耦合等确定性和不确定性系统,可使系统获得良好的动态品质。而对于高性能的直流伺服系统,一般要求精度高、无超调、响应速度快且鲁棒性好^[1-3]。针对直流伺服系统的要求,采用滑模变结构控制方法。但是,滑模变结构控制在本质上的不连续开关特性,会引起系统的一种抖振现象,严重时,影响系统正常运行,还可能激发系统未建模部分。

模糊控制是近年来发展比较迅速的智能控制策略的分支之一,它不依赖于被控对象的精确数学模型,能够克服非线性因素的影响,对调节对象的参数变化具有较强的鲁棒性,在很多不确定的复杂模型场合得到了成功的应用。

基于以上优点,采用模糊控制和滑模变结构控制相结合的复合控制方法。并且针对直流伺服系统设计了模糊滑模控制器,该控制器具有较强的鲁棒性,并能大大削弱系统的抖振。

1 滑模变结构控制器设计

直流伺服系统的结构框图如图 1 所示,虽然在多数情况下常把电机的参数看成常数,但实际当转速在大范围内变化时,电机的参数并非常数,而滑模控制正好对参数的变化不太敏感,故使用这种控制方式来控制电机具有很大的优越性。

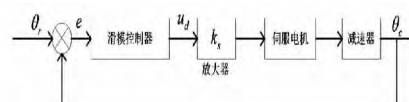


图 1 直流伺服系统的结构框图

1.1 直流伺服系统及其数学模型

直流电机的等效电路如图 2 所示, μu_d 为电枢两端电压; e_a 为电枢回路反电动势; r_a 为电枢回路总电阻; L_a 为电枢绕组电感; k_e 为电势常数; k_t 为转矩常数; J 为转动惯量; $k_e' = \frac{60}{2\pi} k_e$ 。

由图 2 可得直流伺服电机的传递函数为

$$\frac{\omega(s)}{u_d(s)} = \frac{1/k_e'}{(T_m s + 1)(T_e s + 1)} \quad (1)$$

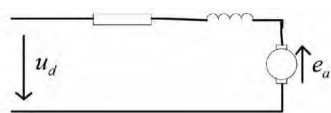


图 2 直流电机的等效电路图

式中 $T_m = \frac{r_a J}{k_t k_e}$ 为电机的机械时间常数; $T_e = \frac{L_a}{r_a}$ 为电机的电气时间常数。

通常,因电枢绕组的电感很小,以致电气时间常数 T_e 很小,而电机电枢转子又有一定的转动惯量,机械时间常数 T_m 就比电气时间常数大得多,所以往往可略去电机的电气过渡过程,电机的传递函数可写为

$$\frac{\omega(s)}{u_d} = \frac{1/k_e}{T_m s + 1}$$

则整个直流伺服系统中广义对象的传递函数为

$$\frac{\theta(s)}{u_d} = \frac{k_s i}{k_e s (T_m s + 1)} \quad (2)$$

式中 k_s 为功放系数; i 为减速器减速比。

选择状态变量为

$$x_1 = \theta_r - \theta_c, \dot{x}_1 = x_2$$

设系统负载为零;系统的给定角位移为阶跃信号,有 $\dot{\theta}_r = \ddot{\theta}_r = 0$ 系统的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{cases} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_1 & -a_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -b \end{pmatrix} u \quad (3)$$

其中 $a_1 = 0$, $a_2 = \frac{1}{T_m}$, $b = \frac{k_s i}{k_e T_m}$, $T_m = \frac{J r_a}{k_e k_t}$ 。

1.2 滑模变结构控制的基本问题

设有一个系统

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = f(x, u, t) & x \in R^n, u \in R^m \\ y = h(x) & y \in R^L, n \geq m \geq L \end{cases}$$

确定一个切换函数矢量 $s = s(x)$, $s \in R^m$, 求解控制函数为

$$u_i = \begin{cases} u_i^+(x) & s_i(x) > 0 \\ u_i^-(x) & s_i(x) < 0 \end{cases}$$

其中, $u_i^+(x) \neq u_i^-(x)$ ($i = 1, \dots, m$) 使得

(1) 滑动模态存在;

(2) 满足可达性条件: 在切换面 $s_i(x) = 0$ ($i = 1, \dots, m$) 以外的状态点都将于有限时间内到达切换面;

(3) 滑模运动的稳定性。

满足该 3 个条件的控制叫做滑模控制变结构控

制^[1]。

1.3 切换函数 s 的选取

滑模变结构位置控制器设计包括滑动面设计和滑模控制律设计,直流伺服系统为常系数二阶系统,取切换函数为

$$s = cx_1 + x_2, \quad c > 0$$

1.4 控制量 u 的求取

变结构控制设计的目标是靠切换面和控制量的选取来保证的,切换面的选取影响系统的稳定性,而控制量的选取主要确定滑动模态的存在性和可达性。因此,求取控制量时,必须满足滑动模态存在性和可达性,即使 $sd_s/d_t > 0$ 成立^[4]。采用模糊控制策略,其控制量的形式为

$$u = u_{eq} + ku_{ss} \quad (4)$$

K 为模糊系数。

系统处于滑模面上有 $\dot{s} = 0$ 即

$$\frac{ds}{dt} = c\dot{x}_1 + \dot{x}_2 = 0 \quad (5)$$

将式(3)代入式(5)可得等效控制为

$$u_{eq} = \frac{1}{b}(c - a_2)x_2 \quad (6)$$

为抑制不确定性和外加干扰,确保系统鲁棒性,选择切换控制为

$$u_{ss} = \frac{1}{b}\eta \text{sign}(s) \quad \text{其中 } \eta > 0 \quad (7)$$

1.5 系统稳定性分析

为了使系统正常启动滑动模态,要求运动点在有限的时间内到达切换面 $s = 0$ 。根据可达条件 $s\dot{s} < 0$,令李雅普诺夫函数为

$$V(x) = \frac{1}{2}s^2 > 0, \quad s \neq 0 \quad (8)$$

对时间 t 求导数可得

$$\begin{aligned} \dot{V}(x) &= \frac{1}{2}s\dot{s} \\ \dot{V}(x) &= s(c\dot{x}_1 + \dot{x}_2) \end{aligned} \quad (9)$$

将式(3)和式(4)代入式(9)得

$$\dot{V}(x) = -k\eta|s| \quad (10)$$

据以上分析,当 $k > 0$, $\eta > 0$ 时, $\dot{V}(x) < 0$, 则滑模变结构控制在李雅普诺夫意义下是渐进稳定的。

2 模糊控制器设计

根据滑模控制原理,滑模控制器由等效控制和

切换控制两部分组成,即 $u = u_{eq} + ku_{ss}$,通过模糊系数 k 将切换控制模糊化。当 $k=0$ 时,此时控制律只由等效控制项构成,当 $k \neq 0$ 时,此时控制律等效控制和切换控制构成,通过模糊输出 k 实现切换控制项 u_s 的模糊化,从而有效地降低抖振。

2.1 模糊化

模糊控制器的输入变量为 S , $S = \beta s$,其论域为 $[-1, 1]$ 输出变量为 k ,其论域为 $[-1, 1]$,则在各自论域上划分为不同的语言变量为

$$L(s) = \{N, Z, P\}$$

$$L(k) = \{N, Z, P\}$$

输入变量 S 和输出变量 k 的隶属度函数分别如图 3、图 4。

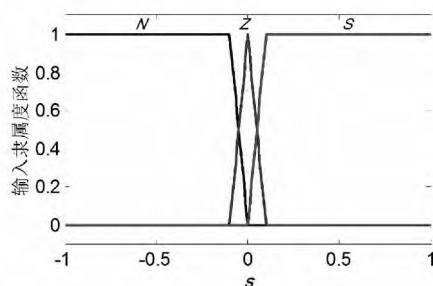


图 3 输入变量 S 的隶属度函数

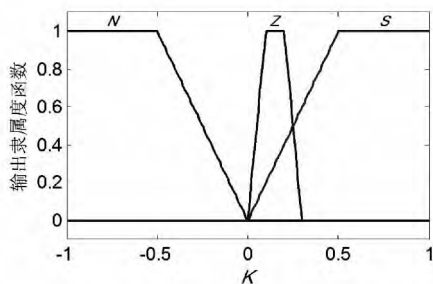


图 4 输出变量 k 的隶属度函数

2.2 模糊规则

模糊推理采用单输入单输出的一维模糊控制器结构。模糊控制规则的设计原则为:保证滑模存在和可达性条件 $s\dot{s} < 0$ 成立^[4]。

模糊推理规则为

If s is N then k is P

If s is Z then k is Z

If s is P then k is N

对上述规则按 Mamdani 推理方法进行推理,便可得到 k 输出信号。

2.3 反模糊化

为了获得准确的控制量,这里采用面积重心法进行反模糊化。它是取隶属度函数曲线与横坐标围

成面积的重心为模糊推理的最终输出值,即

$$k_0 = \frac{\int_K ku_k(k) dk}{\int_K u_k(k) dk}$$

这样,通过模糊推理可得到 k 的大小。

3 仿真与结论

为了验证上述模糊滑模控制器,对直流伺服系统进行仿真。使用 Matlab/Simulink 搭建仿真模型。

直流伺服系统各参数为: $k_s = 20$, $\dot{\mu} = 0.1$, $r_a = 0.9 \Omega$, $J = 0.5$, $k_e = 0.103$ 。由此求得系统状态方程的各系数为: $a_1 = 0$, $a_2 = 2.16$, $b = 4.35$ 。若选 $c = 8$, $\eta = 125$ 。

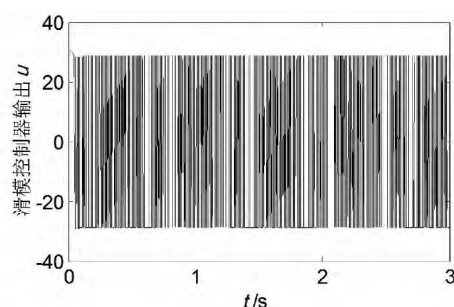


图 5 传统控制下控制输入 ($k=1$)

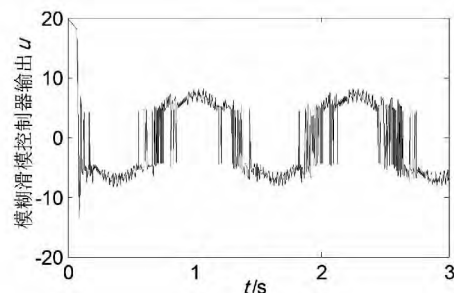


图 6 模糊切换控制时控制输入 ($k=1$)

由图 5 在传统滑模控制下,其控制器输出 u 处于高频振荡。由图 6 可知,采用模糊控制对切换控制模糊化,其模糊滑模控制器输出的抖振大大被削弱,进而对于直流伺服电机的控制将更加平稳。

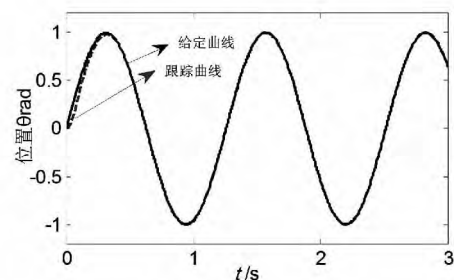


图 7 模糊滑模控制时的位置跟踪 ($k=1$)

(下转第 85 页)

参考文献

- [1] GB 12348 - 2008 ,工业企业厂界环境噪声排放标准 [S].
- [2] 中国环境监测总站.《工业企业噪声排放限值及测量方法》讨论稿[R].
- [3] 金庆先. 背景噪声在边界噪声测量中的影响及修正[J]. 中国环境监测 2000 ,16(2) : 110.
- [4] 杨云,王庭佛. 关于噪声测试中背景噪声修正方法的探讨[J]. 噪声与振动控制 2000(1) : 24 - 26.
- [5] 戴建红. 工业企业厂界噪声监测过程中的问题探讨[J]. 中国环境监测 ,2006 ,22(2) : 34 - 36.
- [6] 彭守礼,杨捷. 背景噪声的测量和用于修正计算的问题分析及建议[J]. 环境导报 ,1997 ,14 (5) : 17 - 19.
- [7] 徐建平,翁祖峰. 厂界噪声背景值修正[J]. 环境监测管理与技术 2005 ,17(6) : 46.

- [8] 林汉杰,方俊雄. 厂界噪声背景值修正问题的讨论[J]. 中国环境监测 2001 ,17(2) : 54 - 56.
- [9] 敖春. 如何实施工业企业厂界噪声的规范性监测[J]. 环境科学与技术 2003 ,26(B12) : 10 - 11.
- [10] GB/T 3222. 11 - 2006 ,声学环境噪声的描述、测量与评价第 1 部分: 基本参量与评价方法[S].
- [11] ISO1996) 1: 2003 ,Acoustics - Description , Measure - ment and Assessment of Environmental Noise ,Part 1: Basic Quantities and Assessment Procedures [S].
- [12] 马大猷. 噪声控制学[M]. 北京: 北京科学出版社 , 1987.

作者简介:

叶春燕(1983), 硕士研究生, 工程师, 主要从事电磁环境监测及治理工作。

(收稿日期: 2013 - 12 - 15)

(上接第 44 页)

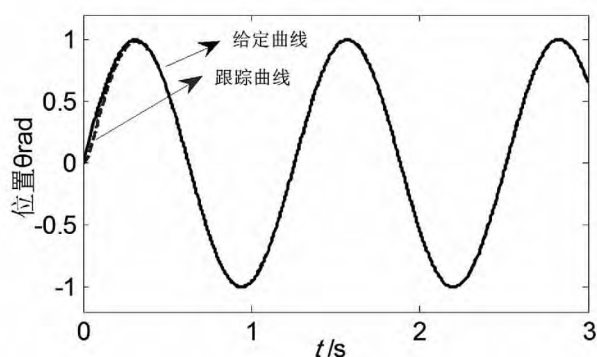


图 8 参数扰动 50% 时模糊滑模控制的位置跟踪

由图 7 可知,采用模糊滑模控制直流伺服电机能很好地响应给定位置,且响应速度快,几乎无稳态误差。由图 8 可以看到,当有电机参数扰动 50% 时,模糊滑模变结构控制系统能适应系统参数的变化,响应时间很快,并能很快跟踪上,由此可见,所设计的模糊滑模控制系统具有较强的鲁棒性。

4 结 语

通过对直流伺服系统分析,并对其设计了滑模变结构控制策略,设计方法简单,易于实现。从仿真分析可知,滑模变结构控制能较强抑制参数扰动,自适应强。另外合理地选择切换函数和控制律参数,

滑模变结构控制系统具有快速性好、无静差的优良动态性能,而且系统参数摄动时,具有很好的鲁棒性。并且采用模糊滑模控制大大减弱了系统的抖振现象。

参考文献

- [1] 王丰尧. 滑模变结构控制[M]. 北京: 机械工业出版社出版,1995.
- [2] 杨树兴,李擎,苏中,等. 计算机控制系统——理论、技术与应用[M]. 北京: 机械工业出版社,2007.
- [3] 李晓秀,章兢. 滑模变结构控制及其在直流伺服系统中的应用[J]. 湖南工程学院学报: 自然科学版,2004 , 14(3) : 5 - 7.
- [4] 安树,杨新霞. 无刷直流电动机模糊滑模变结构控制的研究[J]. 计算机仿真 2010 ,27(4) : 172 - 175.
- [5] 黄飞. 永磁同步电机位置伺服系统的滑模控制[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版,2011 ,30(4) : 860 - 863.
- [6] 张涌松,舒志兵. 基于永磁同步电机的滑模变结构仿真研究[J]. 机床与液压 2008 ,36(7) : 288 - 292.

作者简介:

冉 鸿(1975), 电气工程师, 研究方向为电力系统自动化、清洁能源与并网技术;

罗 洪(1972), 电气工程师, 研究方向为清洁能源与并网技术。

(收稿日期: 2013 - 11 - 07)

精简监控系统遥测越限告警信号量

袁建党 易炳星 李 军 聂文萍 王 亮 李敏瑞
(国网乌鲁木齐供电公司 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘 要: 在电网调控中,精简监控系统告警信号量对提高监盘质量和监盘效率至关重要。从现场数据的采集、监控系统的运行和限值的设定三个方面分析了造成监控系统遥测越限告警信号量大的关键因素。针对部分区域变电站电压频繁越限的情况,设置变电站母线电压差异化限值;对变电站设备电流在限值附近频繁抖动的情况,通过对设备电流越限加延时予以解决。通过整改,遥测越限告警信号量明显减少,大大提高了监盘质量和监盘效率。

关键词: 电网调控; 监控系统; 遥测; 差异化

Abstract: In the dispatching and control of power grid, the simplification of the alarm signals in monitoring system is very important to improve the quality and efficiency of the monitoring. The key factors in monitoring system that cause the large amount of out-of-limit alarm signals are analyzed as viewed from the data acquisition, the operation of monitoring system and the setting of limit value. Aiming at the frequent out-of-limit of voltage, the limit value of differentiation for busbar voltage in the substation is set up. And aiming at substation equipment current frequently jittering near the limit value, it is solved through the method of time delay at out-of-limit. After the rectification, the number of the out-of-limit alarm signals is decreased significantly, and the quality and efficiency of monitoring are improved greatly.

Key words: dispatching and control of power grid; monitoring system; telemetering; differentiation

中图分类号: TM734 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)02-0045-03

电网调控是电网调度、设备监控和事故处理的指挥中心。加强监控的运行管理是保障电网安全运行的重要环节。随着调度、监控业务的融合,监控信息接入不规范、信号量大,特别是监控系统越限信号频发,严重干扰监控员对电网的监视,影响到调控快速、准确的事故处理^[1]。如何尽可能地减少无效信号的频发,提高监盘效率是调控人员亟需解决的问题。针对上述问题,一些专家学者也做了许多研究分析及探索。对于监控系统上传的大量遥测数据和信号,研究的焦点大多放在现场设备的采集上^[2-4]。文献[2]对监控系统中遥测数据的精度进行了讨论,并建议加强数据的后期统计及分析。对于目前使用的监控系统,遥测数据的种类和现场采集精度已满足安全生产要求。还有一些学者通过建立在线监测的专家系统来对信号进行处理^[5-7],文献[5]建立了一个变电站告警信息专家系统知识库,实现对单个或关联的多个告警事件进行推理判断,给出故障或异常发生的原因及处理措施,但一个优秀专家系统的建立一直是一个难点,没有得到很好的解决,操作起来也存在一定的困难。

以国网乌鲁木齐供电公司电力调度控制中心的监控系统为研究对象,通过分析大量的遥测信号,找出造成遥测越限告警信号量大的关键因素。针对部分区域电压频繁越限的情况,通过设置变电站母线电压差异化限值来解决;对变电站设备电流在限值附近频繁抖动的情况,通过对设备电流越限加延时予以处理。通过整改,遥测越限告警信号量明显减少,大大提高了监盘质量和监盘效率。

1 现状分析

1.1 现状概述

工作人员调取 2011 年 10 月至 2012 年 2 月监控系统的告警信号量,日均告警信号量达 44 449 条,其中遥测越限告警信号量 36 762 条,占比 82.7%。监控人员每天要从这大量的信号中提取有效的数据,以便及时准确地掌握电网实时运行数据。经过分析,其中有大量的信号是监控人员无需处理的,这些信号将直接影响到对重要信息的提取。

1.2 原因分析

遥测越限告警信号是系统通过采集现场运行数据与系统中设定的限值进行比较,超出限值范围,即发遥测越限告警信号。因此,查找原因要从现场数据的采集、监控系统的运行、限值的设定三方面入手。

工作人员调阅了电流互感器、电压互感器等现场采集设备的参数及运行状况,均符合要求。目前,所使用的监控系统为南瑞 OPEN3000 系统,从系统运行记录来看,该系统运行平稳、正常。

对于限值的设定,分为电压限值和电流限值。

经过排查,系统中的电压限值均按照《乌鲁木齐电业局电压质量及无功电力管理规定》(220 kV: 235.4 ~ 213.4 kV; 110 kV: 117.7 ~ 106.7 kV; 35 kV: 37.45 ~ 33.95 kV) 执行,但是,进一步分析发现,某些变电站的电压经常处于越上限运行状态,如图 1 所示。

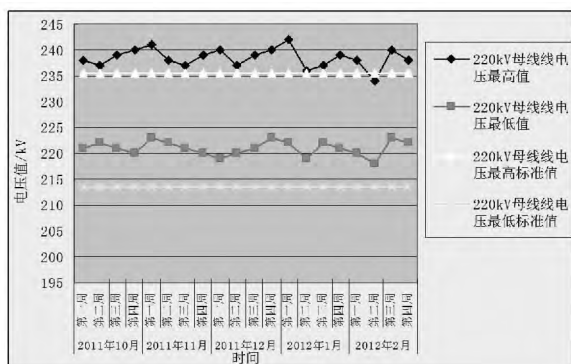


图 1 达风变电站 220 kV 母线线电压越限情况

这种情况下,系统会频繁发越限信号。经过统计,共有 11 座变电站的母线电压频繁越限,占遥测越限告警信号量的 64.9%。出现这种情况的原因是由于乌鲁木齐地区电网属于送端电网,且周边有诸多大型发电厂,省公司要求乌鲁木齐地区电网电压长期高位运行,在这种背景下,大量的电压越限信号是监控人员无需处理的。

对于电流限值的设定,系统是按照地区电网年度运行方式和设备参数计算得到的。经过排查,设备参数的上报及时准确,限值随设备参数的变化也得到了及时的更新。但是,通过对信号量大的设备电流进行分析发现,一些设备的电流在限值附近频繁抖动,如图 2 所示。

监控系统中设备电流越限发信机理是一旦超过限值 0 s 发越限信号,恢复至限值内 0 s 发复归信号,电流在限值附近的频繁抖动造成越限信号的频

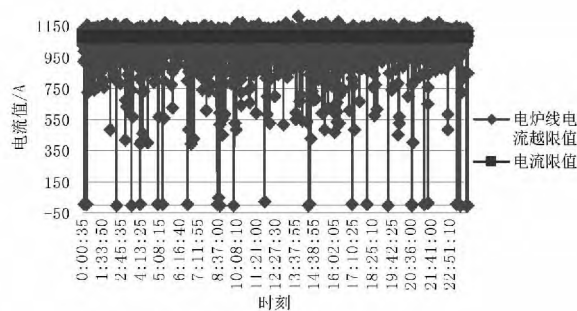


图 2 某日 24 小时内电炉线电流抖动图
发动作和复归,占总越限告警信号量的 25.8%。

2 整改措施

2.1 电压限值的调整

通过上述对电压频繁越限原因的分析,采取有针对性的措施,设置变电站母线电压差异化限值。根据省公司要求及各变电站电压运行情况,对 11 个频繁越限变电站进行差异化电压限值调整。

表 1 为部分变电站调整后的电压限值。

经过调整后的电压越限情况如图 3。

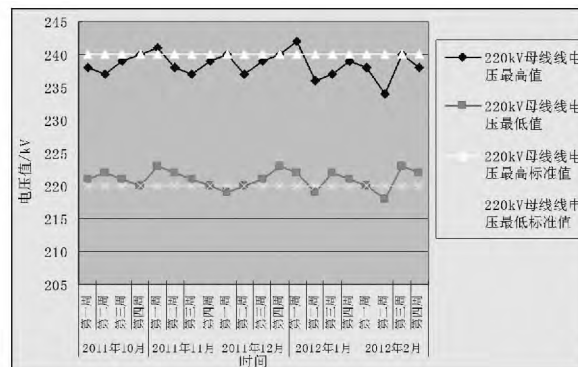


图 3 限值调整后达风变电站 220 kV
母线线电压越限情况

由图 3 可以看出,达风变电站 220 kV 母线线电压已经很少越限。

2.2 电流限值的调整

经过统计,设备电流越限频繁动作复归具有一定的周期性。图 3 为从越限开始到正常的时间段内,越限信号动作复归次数的统计曲线。

由图 4 可以看出,遥测越限频繁抖动信号在 60 s 内动作、复归占总次数的 98.5%,通过加延时,既能屏蔽绝大部分抖动信号,又不影响设备的正常运行。经相关专业专家讨论,并对加延时进行评估,一致认为设置 60 s 延时方法合理。

表 1 变电站母线电压限值表

变电站设备	线电压上限值 /kV	线电压下限值 /kV	变电站设备	线电压上限值 /kV	线电压下限值 /kV
达风变电站 220 kV I 母	240	220	曙光变电站 35 kV I 母	36	31
头变电站 110 kV I、II 母	125	108	振兴路变电站 110 kV II 段	122	107
三坪变电站 110 kV I 母	122	107	碱梁变电站 110 kV I 母	122	107
曙光变电站 110 kV I 母	124	108	骑马山 110 kV I 母	124	107
曙光变电站 110 kV II 母	124	108	骑马山 110 kV II 母	124	107

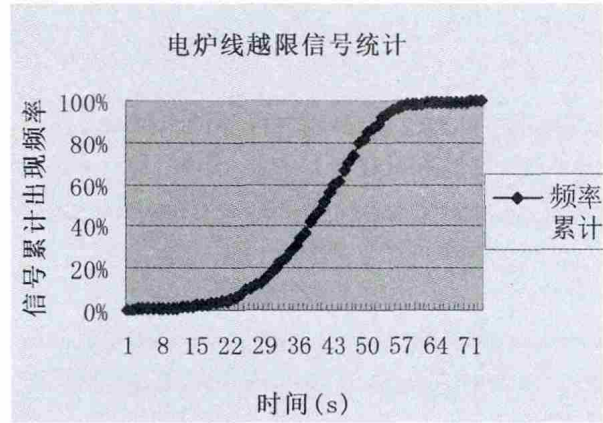


图 4 电炉线越限信号频率曲线

表 2 2012 年 10 月至 2013 年 2 月与 2011 年 10 月至 2012 年 2 月监控系统遥测越限告警信号

日期	遥测越限信号量(条/天)	日期	遥测越限信号量(条/天)
2011. 10. 1	44 730	2012. 10. 1	532
2011. 10. 2	52 625	2012. 10. 2	689
...	...	...	...
2011. 11. 9	61 398	2012. 11. 9	925
2011. 11. 10	57 974	2012. 11. 10	628
...	...	...	...
2011. 12. 13	47 700	2012. 12. 13	399
2011. 12. 14	49 522	2012. 12. 14	568
...	...	...	...
2012. 1. 17	30 612	2013. 1. 17	544
2012. 1. 18	35 642	2013. 1. 18	755
...	...	...	...
2012. 2. 23	37 121	2013. 2. 23	268
2012. 2. 24	39 476	2013. 2. 24	527
...	...	...	...
日均遥测越限告警信号量	36 762	日均遥测越限告警信号量	746

3 效果检查

2012 年 7 月至 9 月,共完成了 14 座变电站设备的限值调整和加延时工作,并对 2012 年 10 月至 2013 年 2 月与 2011 年 10 月至 2012 年 2 月的监控

系统遥测越限告警信号进行对比。

由表 2 可见,通过对监控系统遥测频繁越限告警信号进行整治,日均遥测越限告警信号量由 36 762 条降至 746 条,同比下降 97.97%,大大减轻了监控人员的工作压力,提高了工作效率。在信息整治后一年的时间里,系统运行良好,监控人员始终掌握着电网的实时准确信息。

4 结 语

从减轻工作人员压力,提高监控人员工作效率为出发点,针对遥测越限告警信号量大的问题,详细分析了产生的原因,并提出了有针对性的措施。经过 1 年的运行验证,所提出的解决措施正确有效,大大减少了监控系统遥测越限告警信号量,有效提高了监控人员的工作效率。

参考文献

[1] 秦晓艳. 调控一体化运行管理模式实践分析[J]. 广东科技 2013(12): 92 - 94.

[2] 李杰,李辉. 监控系统中遥信与遥测的问题及建议[J]. 农村电气化 2006(12): 39 - 41.

[3] 金华证,周丽,郑静. 基于在线培训的仿真变电站操作票专家系统[J]. 电力自动化设备 2003 23(1): 45 - 48.

[4] 王锋,朱永利,张涛,等. 基于组件对象模型的变电站操作票专家系统[J]. 电力自动化设备 2003 23(2): 55 - 57.

[5] 董勤伟. 变电站集中监控告警信号在线处理专家系统[D]. 江苏:东南大学 2006.

[6] 何定,王磊,董昕,等. 用于变压器故障诊断的 ANNES[J]. 电力系统及其自动化学报 1994(3): 1 - 7.

[7] 向艳,赵涤之. 专家系统在仿真培训事故诊断与处理中的应用研究[J]. 工矿自动化 2003(3): 13 - 15.

作者简介:

袁建党(1983),硕士,研究方向为电力系统稳定与控制。

(收稿日期:2013 - 11 - 26)

配电网投切无功补偿装置的过电压与抑制分析

庄 琛¹ 姚圣平¹ 陈少卿² 聂鸿宇² 谢同平¹ 黄小琼¹

(1. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室 重庆 400044;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院 四川 成都 610072)

摘 要: 目前国内仍主要采用并联电容器组作为无功补偿装置,投切并联电容器组产生的操作过电压会威胁设备的安全运行。利用 PSCAD/EMTDC 软件对某变电站 10 kV 系统进行了仿真建模,对其投切无功补偿装置过程中可能出现的各种过电压特点进行了分析。并研究了串联电抗率的变化对过电压和涌流的影响与抑制,仿真结果表明,实际中改变串联电抗率对过电压的抑制效果并不明显,但对于涌流有较好的抑制作用。

关键词: 过电压; 无功补偿; PSCAD/EMTDC; 并联电容器; 串联电抗率

Abstract: At present, shunt capacitor groups are the main devices of reactive compensation in domestic power system. The overvoltage generated by the switching operation will threaten the safety operation of equipment. The simulation model of 10 kV substation system is established with PSCAD/EMTDC software, and several kinds of overvoltage characteristics generated in the process of switching operation of reactive compensation devices are analyzed. The focus is on the suppression effect on overvoltage and inrush current related to different series reactance rates. The simulation results show that changing series reactance rate has not obvious effect on the overvoltage, but it has a significant reduction on overcurrent.

Key words: overvoltage; reactive compensation; PSCAD/EMTDC; shunt capacitor; series reactance rate

中图分类号: TM864 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)02-0048-04

0 引 言

随着电网容量的迅速增大,和对电能质量要求的不断提高,电力系统中无功补偿和电压稳定的重要性愈加凸显。目前,并联电容器作为主要的无功补偿装置在各级电力系统中,特别是配电网系统,获得了广泛的应用^[1]。电容器频繁的投切操作,真空断路器的大面积应用,使得并联电容器组的操作过电压问题有了一些新的特性^[2]。由此带来的操作过电压威胁设备绝缘,已经成为影响电网运行可靠性的重要因素。因此,有必要对并联电容器组的操作过电压及其保护措施进行深入研究。

针对配电网变电站的具体情况,无功补偿装置一般安装在其低压母线侧。针对变电站 10 kV 母线侧的并联电容器投切,通过理论分析和 PSCAD/EMTDC 软件的仿真建模,深入研究了无功补偿并联电容器组投切过程中,不同类型过电流和过电压的暂态特性。同时,针对并联电容器上的串联电抗,研究了串联电抗率的变化对过电压和涌流的影响与抑

制效果。实验结果表明,增加串联电抗率对过电压影响不大,但可以有效抑制投切过程中的涌流作用,从而保证了电力系统设备的安全可靠运行。

1 投切过电压分析

电力电网中的电容、电感元件均为储能元件。当有操作或故障使其工作状态发生变化时,将产生振荡性的过渡过程^[3]。如果在电网状态发生突变的瞬间,电网中这些储能元件表征能量值的初始值与新状态的稳定值两者不一致时,则在过渡过程之中电网的响应将出现暂态分量,暂态分量通常表现为强阻尼的高频振荡特征。

因为电网负荷是变动的,随之电网中无功功率的消耗也是经常变化的,要保持电网电压稳定,需随负荷的变化改变并联电容器的投入量,因而大型补偿电容器组一般分为若干组,并随负荷变化分组投入^[4-6]。在投切并联电容器组时会出现两个问题:一是投入电容器的瞬时会产生很大的涌流电流;二是切除电容器时因断路器的重燃会产生比较严重过

电压^[7]。

1.1 投合电容器过电压

设并联补偿电容器三相完全同期合闸,则此时三相电路可用单相电路代替,如图 1。

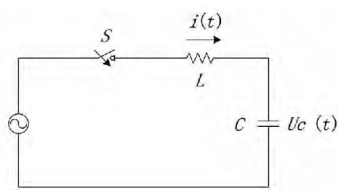


图 1 电容器合闸等值电路

在图 1 中 L 为电源的等效内电感, U_{NC} 为补偿电容器 C 的残留电压, 电源电势 $e(t) = E_m \cos(\omega t)$ 。不计回路损耗电阻, 合闸后电容器 C 上电压 $U_c(t)$ 为

$$U_c(t) = U_{cm} \cos(\omega t) - (U_{cm} - U_{NC}) \cos(\omega_1 t)$$

其中 U_{cm} 为电容器稳态电压幅值, 即

$$U_{cm} = \frac{E_m}{1 - (\omega/\omega_1)^2}$$

其中 ω 为工频角频率, $\omega_1 = 1/\sqrt{LC}$ 为上述回路的自振角频率, 通常 $\omega_1 \gg \omega$, 因此 $U_{cm} \approx E_m$ 。

当并联电容器的极板上留有反极性残压时, 即 $U_{NC} = -E_m$, 合闸后电容器电压最大值可达 $3E_m$ 。一般情况下并联电容器都接有放电线圈, 因此在断路器合闸前残压 U_{NC} 已经很小, 近似为 0, 所以在此情况下并联电容器合闸可能出现的最大电压为 $2E_m$ 。

1.2 切除电容器过电压

当开关断开电流熄灭后, 电容器组上的残存电荷在短时间内无法释放, 电容器组上将残留直流电压^[8], 假如开关弧隙绝缘恢复的速度低于恢复电压增长的速度, 一旦真空开关的电气恢复强度不能承受加于其上的暂态恢复电压, 将发生重击穿, 引起电磁振荡, 产生重燃过电压。

1.2.1 无故障单相重燃

过电压主要出现在并联电容器组的中性点与地之间, 并联电容器极间一般没有比较高的过电压出现。重燃相过电压并不是最高的, 往往是通过中性点传递至不重燃的两相中的一相, 成为过电压的最高相。即使是单相重燃(在小于 $1/4$ 周期内重燃)时, 在非重燃相中的一相也会出现过电压, 过电压最高相可达 $5 \sim 6$ 倍 E_m 。

1.2.2 带故障单相重燃

中性点不接地电网允许发生单相接地后持续带

故障运行 2 h, 因此有可能遇到在单相接地时要开断电容器组。母线侧单相接地时, 开断电容器组时产生的单相重燃过电压要比无故障开断的情况下要高, 可达 $7 \sim 8$ 倍 E_m 。

1.2.3 二相重燃

如 A 相电容器为首先断开相, 则 C 相电容器上所产生的过电压最高, 由于单相重燃时回路的振荡频率很高, 因此中性点对地电容上的电压在很短时间内上升, 结果会立即导致 C 相断口重燃, 形成两相重燃。

2 仿真模型的建立与分析

PSCAD/EMTDC 软件是目前在电力系统中广泛使用的电磁暂态仿真程序, 具有模拟复杂电力系统的功能, 并且提供强大的元件模型库及有效的用户图形界面。利用 PSCAD/EMTDC 软件进行了投切并联电容器的过电压分析模型, 并对模型进行了研究分析。

以 110 kV 某变电站为例, 其仿真系统结构图如图 2 所示。

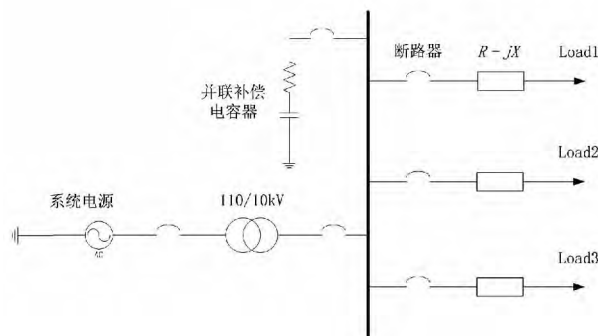


图 2 变电站仿真系统结构图

其中, 主要仿真元件有: 110 kV 系统电源、主变压器、并联补偿电容器组、串联电抗器等。

变压器为 YN - d11 接线的三绕组变压器, 变比为 110/10。并联补偿电容器组的额定容量为 4 800 kvar, 计算得每相实际电容值为 $51 \mu\text{F}$, 联结方式为星接。串联电抗器的电感值 1 mH, 串联电抗率 $(X_L/X_C) 0.5\%$ 。模型中断路器采用时控理想开关, 开断后在电流过零时熄弧。

2.1 并联电容器合闸过电压仿真分析

如表 1 所示, 对其不同合闸相角进行仿真分析, 假设 $t=0$ 时刻 A 相电压达到最大值, 仿真得出不同

相位(即不同时刻)的过电压。

表 1 不同相位下 相间电压及相对地电压值

合闸角 /(°)	合闸时间 /ms	极间电压 /p. u.	相对地电压 /p. u.
0	0	1.81	1.81
15	0.833 3	1.81	1.81
30	1.666 6	1.75	1.75
45	2.500 0	1.80	1.80
60	3.333 3	1.93	1.93
75	4.166 6	1.77	1.77
90	5.000 0	1.72	1.72
105	5.833 3	1.92	1.92
120	6.666 6	1.87	1.87
135	7.500 0	1.69	1.69
150	8.333 3	1.75	1.75
165	9.166 6	1.84	1.84
180	10.000	1.81	1.81

从表 1 中的电压数值可以看出,由于中性点零电位的牵制,三相电容器的极间电压基本维持在 1.8 p. u. 左右,小于 10 kV 电容器极间操作冲击绝缘水平 2.56 p. u.,基本不存在威胁电容器绝缘的过电压。而相对地过电压由于中性点电位为零,与极间电压数值相同,且相对地过电压绝缘水平较高,因此也不会威胁电容器的相间绝缘。所以可以得出,当断路器能保证三相同步合闸时,电容器组的合闸过电压基本不会对电容器绝缘造成威胁。

2.2 并联电容器分闸过电压仿真分析

同期分闸单相重燃实验,三相对地电压与极间电压分别如图 3、图 4 所示,经计算可得最大相对地电压为 3.35 p. u.,最大极间电压为 1.37 p. u.。

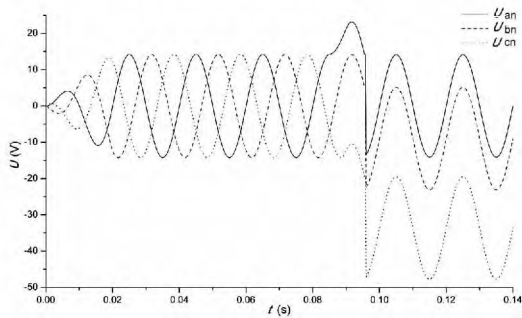


图 3 单相重燃相对地电压波形图

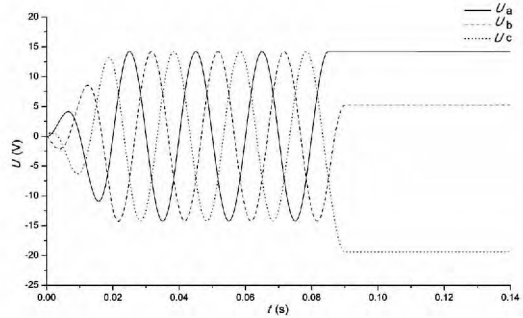


图 4 单相重燃极间电压波形图

结果表明,与三相同步分闸不重燃仿真结果相比较,电容器电流与电容器极间电压均未发生变化,主要原因是在 B、C 相断开情况下,A 相断路器重燃并不能形成通路。但是电容器中性点通过 A 相电弧与电源相连,中性点电位发生偏移,导致各相电容器相对地过电压。

同期分闸两相重燃实验,设置 A 相断路器重燃,导致 C 相在其电压峰值时刻也发生重燃,三相对地电压、极间电压、相电流分别如图 5、图 6、图 7 所示。

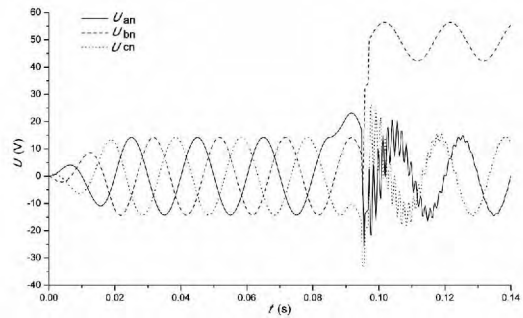


图 5 两相重燃相对地电压波形图

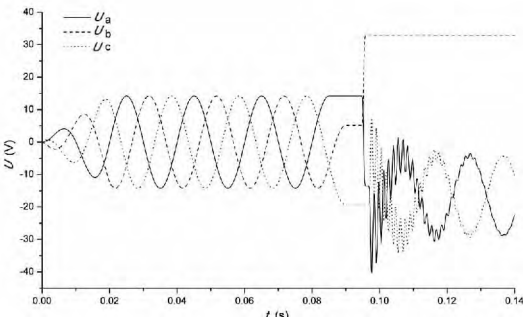


图 6 两相重燃极间电压波形图

由仿真结果分析可知,两相重燃后,极间电压最大值达到了 2.24 p. u.;相对地电压最大值为 4.05 p. u.。同时,重燃后伴随着高幅值高频率的电流冲击对电容器具有相当大的破坏力,幅值倍数为

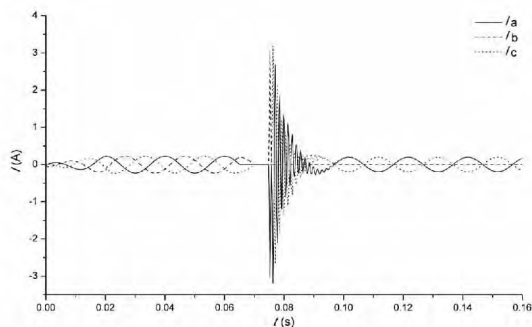


图 7 两相重燃相电流波形图

12.8 p. u.。

由上述实验可知,无论是同期分闸单相重燃还是两相重燃,电容器极间过电压都相对较低,其中两相重燃时的极间电压接近绝缘水平,有一定的危险;而相对地会产生较高的过电压,超过 3 p. u. 以上,会威胁到设备的安全运行。同时,在断路器重燃时系统振荡比较剧烈,会出现很大的过电流,具有较大的危害,但持续时间较短,随着系统阻尼的作用会衰减到额定值附近。

2.3 串联电抗率对过电压与过电流的影响

同时,可以通过增加串联电抗率来抑制涌流。因此对串联电抗对过电压和过电流的影响进行了相应的分析,串联电抗率即感抗与容抗的比值 X_L/X_C 。这里准备从 0%、2%、4%、6%、10% 这几种电抗率来观察不同电抗率对并联电容器操作过电压以及电流抑制的影响,表 2 列出了不同电抗率情况下的电感值。

表 2 电抗率与电感值

电抗率 /%	0	2	4	6	10
电感值 /mH	0	4	8	12	20

首先仿真分析了不同串联电抗率对过电流的影响,由图 8 可知:10 kV 无功补偿系统中,串联电抗器有显著的限流作用。观察曲线可以发现,增大电抗率能有效地降低电容器的合闸电流,电抗率为 10% 时的涌流大小减小到 0% 时的 1/3。

由前述分析可知,并联电容器组的操作过电压主要是分闸重燃过电压。假设三相断路器分闸后发生单相重燃,前面模拟了不同电抗率时的操作过电压,结果见图 9。

从图中可以看出,两种操作情况下的电容器组过电压值都与电抗率有关,电容器的操作过电压值大致随电抗率的增大而上升,但是上升幅度不大,说

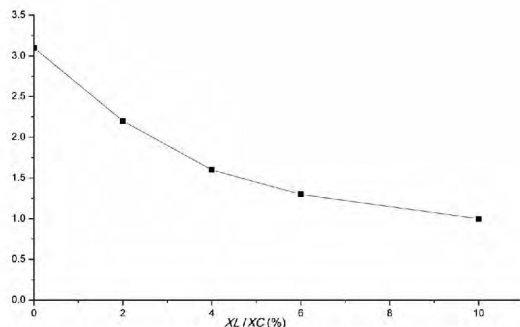


图 8 不同电抗率下的涌流值

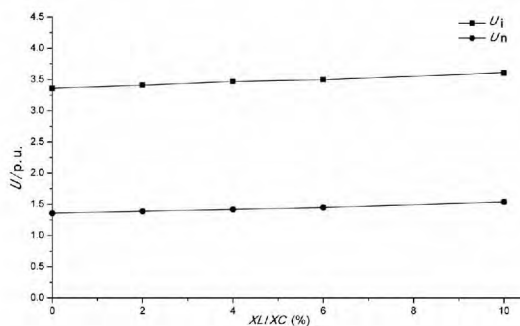


图 9 不同电抗率下的操作过电压值

明电抗率对电容器操作过电压值的影响程度不高。

抑制电力系统中的过电压最常用的方法还是通过装设避雷器,目前主要采用金属氧化物避雷器(MOA)。相关研究与实验均表明,采用 MOA 对无功补偿设备投切过电压具有良好的抑制效果,在此不再赘述。

3 结 语

简要介绍了投切并联电容器的暂态过程和产生过电压的基本原理,并采用 PSCAD/EMTDC 软件对配电网投切无功补偿设备的暂态过程进行了仿真分析,得到以下结论。

1) 并联电容器投合闸的分析表明 0° 到 180° 的合闸相角变化对过电压大小基本没有影响,合闸过电压也基本保持在绝缘水平之内,不会对设备造成危害。

2) 并联电容器同期分闸单相重燃和两相重燃的仿真分析表明,其极间电压也相对较低,其中两相重燃时的极间电压接近绝缘水平,有一定的危险。两种情况下的对地电压都较高,需要进行过电压的抑制与保护措施。

(下转第 74 页)

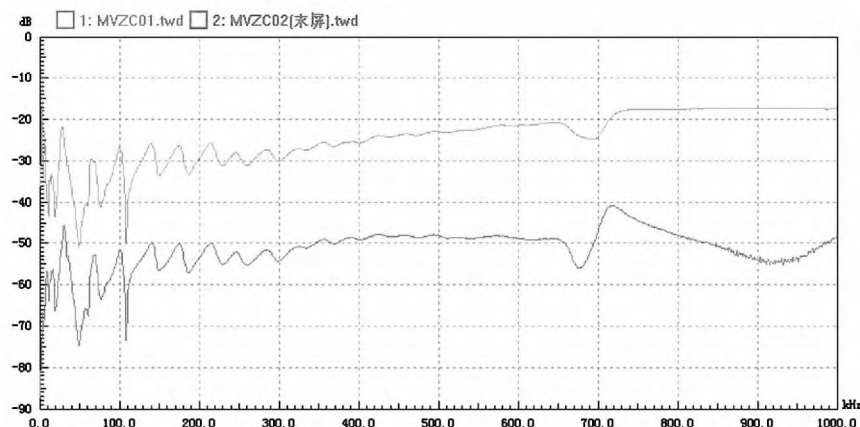


图 4 某 500 kV 主变压器 220 kV 中压侧 C 相套管首端及末屏接线两种方法测试结果比较
(上部曲线为首端接线测试结果,下部曲线为末屏接线测试结果)

号的接线方法,丝毫不会影响对绕组变形的判断和灵敏度。而绕组变形频率响应法的重点分析区段正是 1 到 600 kHz^[1],在这个重点分析区段两种接线方法各个极值点即波峰、波谷对应频率和对应幅值具有一致性和对应性的关系,因此用通过套管末屏接线取扫描输出信号的接线方法替代通过套管首端接线取扫描输出信号的接线方法具有显著的现实性、可行性。

4 结 论

基于试验结果,用套管末屏接线取扫描输出信号的方法替代套管首端接线取扫描输出信号的方法具有显著的现实性、可行性,推广这种新工艺可以避免高空作业环节,减少危险点,简化现场操作过程,节约操作时间,提升工作效率。

(上接第 51 页)

3) 串联电抗率对过电压没有太大影响,但可以有效抑制过电流的大小,防止其对设备造成较大损害。

参考文献

- [1] 陈慈萱. 电气工程基础[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [2] 张要强, 唐明贵, 胡选, 等. 35 kV 系统投切无功补偿兼滤波装置引发重燃过电压[J]. 电气安全, 2001, 30(23): 27-30.
- [3] 陈鹏云, 苏梓铭, 鲁铁成, 等. 无功补偿装置电磁暂态仿真计算[J]. 电力电容器与无功补偿, 2010, 31(5):

参考文献

- [1] 罗军川, 张星海. 电力变压器反事故措施解析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [2] 张琛. 变压器绕组变形测试方法及应用[J]. 变压器, 2007, 44(2): 35-37.
- [3] 朱维路, 贾永江, 杜深慧. 电力变压器绕组短路轴向稳定性分析[J]. 变压器, 2010, 46(9): 17-19.
- [4] 尹克宁. 变压器设计原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [5] 天威保变电器股份有限公司. 变压器试验技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [6] 天威保变电器股份有限公司. 电力变压器手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.

作者简介:

杨 洋(1982), 从事高电压输变电设备状态诊断的研究。
(收稿日期: 2014-01-06)

40-45.

- [4] 涂轶昀. 基于 PSCAD /EMTDC 软件的超高压线路操作过电压研究[J]. 上海电力学院学报, 2009, 25(4): 32-38.
- [5] 卢向东, 赵成勇. 基于 VSC-HVDC 的线路过电压抑制策略研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(3): 25-30.
- [6] 沈黎明. 变电站补偿电容器投切过电压的仿真与测试[D]. 北京: 华北电力大学, 2009: 30-35.
- [7] 王永源. 并联电容器组中电容器损坏特征与过电压保护研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010: 30-34.
- [8] 梁思聪, 王维庆, 张新燕, 等. 基于 PSCAD /EMTDC 软件的空载线路工频过电压分析[J]. 华东电力, 2009, 37(2): 15-23.

(收稿日期: 2013-11-26)

考虑波形起始点的特高压变电站雷电入侵过电压分析

梁 玲, 肖先勇

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要: 变电站雷电入侵过电压是特高压输变电工程的重要课题。为研究工频电压对变电站雷电侵入波过电压的影响, 考虑雷电入侵时刻工频电压的波形起始点对雷电入侵过电压的影响, 以某 1 000 kV 特高压 GIS 变电站为例, 采用电磁暂态仿真程序 ATP/EMTP 建模研究了不同波形起始点对应的雷电侵入波过电压, 并根据波形起始点的分布概率, 研究了雷电侵入波过电压的分布规律, 提出以 90° 波形起始点为依据进行雷电侵入波过电压计算和绝缘配合的建议。

关键词: 特高压变电站; 工频电压; 波形起始点; 雷电入侵过电压; 分布规律; 绝缘配合

Abstract: Lightning invading overvoltage of substation is an important issue of UHV power transmission project. In order to study the influence of power-frequency voltage on lightning invading overvoltage of substation, taking a 1 000 kV UHV GIS substation for example and considering the impact of point on wave of power-frequency voltage on lightning invading overvoltage of substation at the time of the lightning invasion, the electromagnetic transient simulation program ATP/EMTP is used to establish the model and study the lightning invading overvoltage corresponding to different point on wave, and according to the distribution probability of the point on wave, the distribution law of lightning invading overvoltage is studied. It is suggested that the point on wave of 90° waveform can be a basis for lightning invading overvoltage calculation and insulation coordination.

Key words: UHV substation; power-frequency voltage; point on wave; lightning invading overvoltage; distribution law; insulation coordination

中图分类号: TM861 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)02-0052-04

0 引 言

特高压电网是中国解决资源分布与需求不平衡的必然选择之一。长距离大容量输电是建设特高压电网的主要目的。通过特高压电网可优化资源配置, 提高经济效益^[1-4]。继中国 1 000 kV 晋东南—南阳—荆门特高压交流试验示范工程投入运行后, 首条同塔双回路特高压交流输电工程——“皖电东送”工程也于 2013 年 9 月 25 日投入商业化运营, 标志着中国已经进入特高压电网时代。

特高压输电系统已成为发展必然, 但涉及的诸多问题在不断进行工程示范和实践的过程中, 仍值得开展更加深入的研究, 其中, 特高压变电站的雷电过电压是特高压输电系统安全稳定运行的主要危害之一。特高压变电站又是交流电力系统的枢纽, 它的安危维系着电力系统能否安全可靠的运行, 因此

必须要有安全可靠的防雷措施。

特高压变电站内各设备的雷电过电压保护以及绝缘配合(确定绝缘水平)取决于雷电过电压计算数据^[5]。对于 1 000 kV 的特高压线路, 工频电压对雷电过电压的影响足以威胁到绝缘的安全, 不容忽视^[6]。而国内现有的计算雷电过电压和绝缘配合的相关文献也只能定性地说明工频过电压对雷电过电压有影响。文献[6]根据日本的统计数据提出的计算方法缺少中国的实践证明。文献[7]提出工频电压与雷电过电压进行线性叠加的方式来研究工频电压对雷电过电压产生的影响。但因雷电流和工频电压的频谱和时间特征不同, 故这种方法也不能作为工程上定量的计算方法。

为了得到更符合实际的特高压变电站雷电入侵过电压, 将根据对雷电流侵入时工频电压瞬时值的细化研究, 提出雷电侵入波电压波形起始点的概念, 以此来准确刻画考虑工频电压的特高压变电站雷电

入侵过电压,为完善国内相关规程提供参考。

1 系统雷击仿真模型的建立

1.1 雷击方式与雷击点的选择

雷击变电站的方式:①直击雷;②雷击中输电线路并且在线上传播到变电站(即雷电入侵波)。实践表明,只要按照规程安装避雷针、避雷线以及接地装置的电站,对直击雷的防护是安全且可靠的。特高压线路的绝缘水平很高,雷击跳闸率以及绝缘子闪络造成线路短路事故概率很小。但由于塔高和走廊面积等因素,雷电入侵的现象更易出现,而变电站内设备的绝缘水平要比线路低,因此该方式更易对变电站内设备造成损害。

雷击输电线路的方式又分为反击和绕击。反击和绕击时线路的工频电压对绝缘子闪络电压都会有影响。反击时,杆塔会较大概率地对极性相反的工频导线放电;绕击时,极性与雷电流相反的导线将会提前形成下行先导,增大绕击概率。在工频电压的影响方面,反击和绕击的效果一致,因此下面只选择雷电反击进行研究。

近区雷击是变电站内电气设备的主要威胁之一,因此在计算变电站的雷电入侵过电压时,把 2 km 进线段和变电站统一考虑,才比较符合实际^[8]。研究表明,中国设计的输电线路中,1 号杆塔和变电站门型构架距离较近,而且门型构架的冲击接地电阻比其他杆塔小,雷击 1 号杆塔塔顶时,反射波从门型构架处又经过地线很快返回 1 号杆塔,使 1 号杆塔塔顶电位降低,减小了雷电入侵过电压。而 2 号、3 号杆塔距门型构架相对较远,过电压也较高。因此将把雷击点选在 2 号杆塔。系统模型图见图 1。

1.2 仿真模型

以某特高压 GIS 变电站为例,选择合理的雷电流模型、杆塔模型、进线段架空线路模型、绝缘子闪络模型、避雷器模型以及参数的确定。

1.2.1 雷电流模拟

雷电流的波形可用双指数的标准冲击波模拟。根据中国防雷保护的建议,本次计算取 $2.6/50 \mu\text{s}$ 的双指数波进行防雷保护的计算。中国现行标准推荐雷电流幅值分布的概率 P 为 $\lg P = -\frac{I}{88}$,式中 I 为

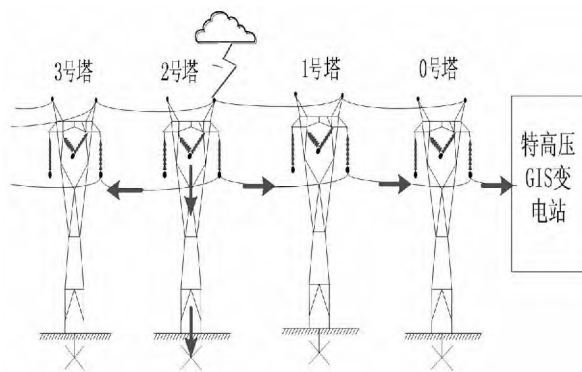


图 1 系统等值模型

雷电流值 kA ; P 为幅值大于 I 的雷电流概率。综合考虑中国 500 kV 变电站运行经验以及 1 000 kV 特高压变电站的重要性,这里选取幅值 250 kA 的负极性雷电流,雷电通道波阻抗为 300 Ω 。

1.2.2 进线段模拟

采用除了基于 EMTP 的多波阻抗模型来对杆塔进行仿真计算^[9-11],如图 2 所示。参考 DL/T-1997《交流电气装置的接地》,杆塔冲击接地电阻按照 10 Ω 计算;门型构架冲击接地电阻按 7 Ω 计算。

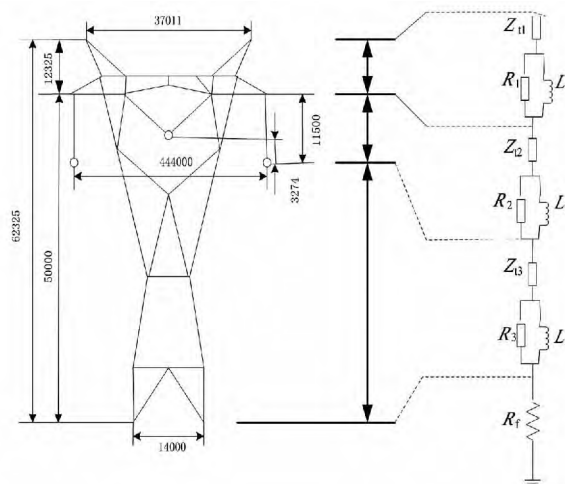


图 2 进线段酒杯塔模型

进线段架空线路用随频率变化的非线性线路参数模型“JMarti”模拟。

绝缘闪络的判据用相交法^[12],当绝缘子串上雷电过电压波形与绝缘子串伏秒特性曲线有交点时,绝缘子串闪络,否则就不闪络。绝缘子串闪络模型见图 3,52 号器件是比较器,将绝缘子串两侧探测的过电压与其用函数编辑的已知绝缘子伏秒特性比较;64 号器件是控制开关的输出,当绝缘子串过电压波形与它的伏秒特性曲线相交时,判据部分输出一个电平给控制开关,控制开关部分保持该输出,绝缘子串闪络。

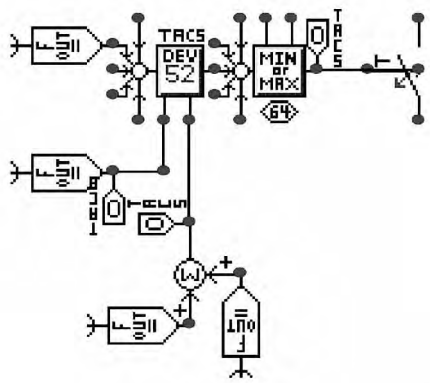


图 3 绝缘子串网络模型

1.2.3 避雷器模型

ATP-EMTP 用分段线性函数模型模拟避雷器的伏安特性,计算中采用额定电压为 828 kV 的避雷器,其伏安特性如表 1 所示。

表 1 采用的避雷器的伏安特性

名称	数	值
电流 /A	0.008 2 000 10 000 20 000	
电压 /kV	1 114 1 460 1 553 1 620	

1.2.4 1 000 kV GIS 变电站的电气主接线图

1 000 kV 特高压 GIS 变电站的等效电路图如图 4 采用双断路器双母接线方式,仅考虑一回出线(L1)和一台主变压器(T)运行,出线接至双断路器串,主变压器经临时接线连接两条母线。

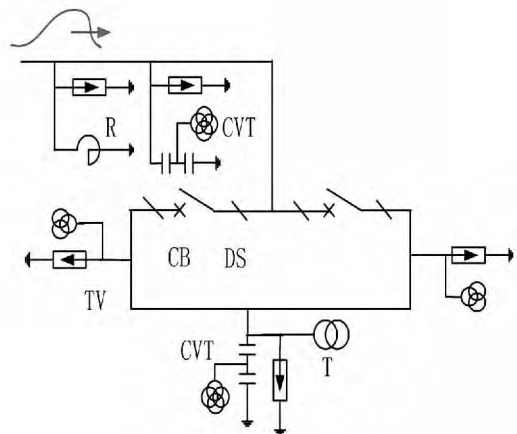


图 4 1 000 kV 特高压 GIS 变电站的电气主接线图

1.2.5 变电站内电气设备参数

由于雷电入侵波的高频特性,站内设备可粗略等效为冲击入口电容。变电站内设备入口电容如表 2 所示。

表 2 站内设备等值入口电容

设备名称	等值电容/pF
主变压器(T)	5 000
电压互感器(CVT)	5 000
高压电抗器(R)	4 000
断路器(CB)	300
电流互感器(CT)	80
GIS 隔离开关(DS)	80
套管(BG)	150
母线隔离开关(DS)	150
支柱绝缘子(PS)	150
避雷器(LA)	20

2.1 雷电入侵过电压波形起始点

在过去的变电站雷电入侵波分析中,大都没有考虑工频电压对雷击的影响(即认为雷击时工频分量 $U_g = U_m \sin \varphi$ 的 φ 为 0°),或者只是简单的幅值叠加考虑。为了将频谱特征和时间特征不同的雷电侵入波和工频电压进行叠加,提出雷电过电压波形起始点的概念。定义雷击产生过电压时的相应工频电压相位角为雷电过电压波形起始点,分别设定输电线路 A 相雷电过电压波形起始点为 0° 、 90° 、 270° 三种极端情况,对 250 kA 的负极性雷电流雷击杆塔反击导线 A 相进行仿真。

2.2 仿真结果与分析

对于幅值 250 kA 的负极性雷电流击中 2 号杆塔 A 相导线反击闪络后,变电站内主要设备在不同波形起始点的雷电入侵过电压见表 3。

表 3 各设备在不同波形起始点的过电压比较 /kV

波形起始点	高压电抗器 REA	主变压器 T	进线 CVT	母线 TV
0°	1 837	1 430	1 359	1 387
90°	2 108	1 700	1 678	1 675
180°	1 598	1 110	1 124	1 178

从表 3 可以看出 A 相导线反击闪络后,在不同雷电过电压波形起始点下,电站各设备的过电压值差异较大,设备的过电压保护裕度需要根据雷电过电压波形起始点的不同进行修订,重点考虑变电站的核心设备变压器。

图 5、6、7 为主变压器(T)上不同波形起始点的过电压波形曲线图。

从过电压波形可以看出,在不同的雷电过电压波形起始点情况下,工频电压与雷电过电压的叠加并不是简单的线性叠加,这是因为雷电波的频率远

2 仿真与分析

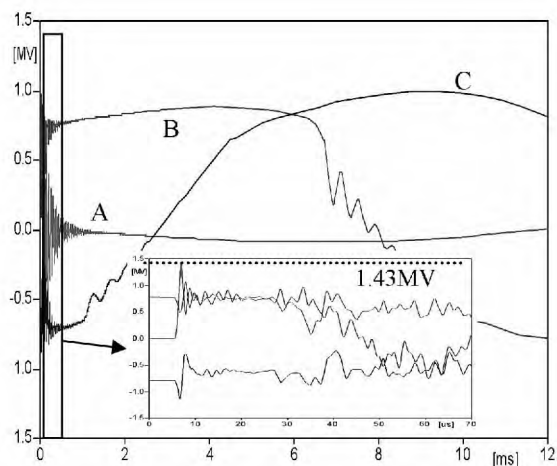


图5 波形起始点为 0° 主变压器上过电压波形

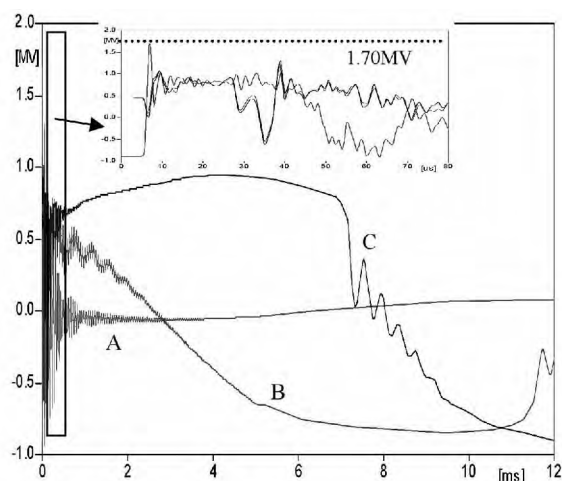


图6 波形起始点为 90° 主变压器上过电压波形

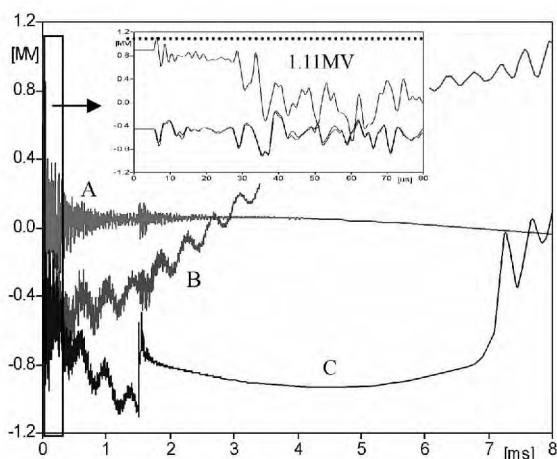


图7 波形起始点为 270° 主变压器上过电压波形
大于工频,在输电线路雷击波按照线路分布参数特性传播时,在不同的波阻抗间存在折反射情况。

由于雷电冲击放电具有一定的随机性,对于雷电反击、绕击具体的放电波形起始点只能按照概率统计。通过仿真分析得出:当发生负极性雷击时,由于三相绝缘子两端电压不同以及导体的下行

先导产生原理,导体在正极性下发生绕击与反击概率都较负极性的大,而且概率随幅值的增大而增大。一般情况下交流线路在运行时受到雷击的概率是以相电压最大时的波形起始点为均值的正态分布。所以,当雷击输电线路时,通常都发生在与雷电极性相反的最大电压导线相,比如在发生负极性雷击时,雷击时刻导线电压的波形起始点主要集中在 90° 附近。这基本符合与日本的统计结果(交流导体在工频电压为正时被负极性雷击中的次数比工频电压为负时更多)^[14]。

在发生反击时,波形起始点为 0° 时的击穿相主变压器过电压波形与不考虑工频叠加基本一致,波形起始点为 90° 击穿相主变压器上过电压幅值增加了近300 kV,而波形起始点为 90° 发生雷电闪络的概率较大,推荐将波形起始点为 90° 时雷电入侵过电压值作为绝缘配合参考值。

3 结 论

1) 只有考虑波形起始点才能得到更符合实际的雷电入侵过电压。特高压线路反击、绕击的工频电压波形起始点分布基本一致,都是在 90° 位置概率最大。将波形起始点为 90° 时雷电入侵过电压值作为变电站设备绝缘配合参考值,可以减少变电站的雷电故障率。

2) 在进行工频电压与雷电侵入波的叠加时,由于两者频率特性的不同,不能简单地线性叠加,需要根据高频雷电波的分布参数特性,对雷电波的折反射进行逐步计算。

3) 导线电晕、变电站内部元件波阻抗差异等因素都对雷电侵入变电站的过电压波形产生复杂的影响,要研究出更准确的工频电压下雷电过电压叠加规律还需要对导线加入电晕模型,并对电站各设备的暂态分布参数模型做更细致的研究。

参考文献

- [1] 舒印彪,张文亮.特高压输电若干技术关键技术研究[J].中国电机工程学报,2007,27(31):1-6.
- [2] 张运洲,李晖.中国特高压电网的发展战略论述[J].中国电机工程学报,2009(22):1-7.
- [3] 曹祥麟.EMTP在特高压交流输电研究中的应用[J].高电压技术,2006,32(7):64-68.

(下转第71页)

4 结 论

主要对高压开关柜局部放电引起的 TEV 信号特点进行了仿真分析,取得如下结论。

1) 检测点 TEV 信号的强度随激励源脉冲宽度的增加而迅速减小;脉冲宽度越窄,检测到的 TEV 越强,亦即放电过程越快,则 TEV 检测法检测能力越强。

2) 激励源脉冲幅值越高,检测到的 TEV 越强,亦即放电强度越激烈,则 TEV 检测法检测能力越强。

参考文献

- [1] LEIJON M, MING L, HOFF P. SF₆ Gas Pressure Influence on Acoustical Signals Generated by Partial Discharges in GIS[C]//7th ISH Conference, 1991: 75.
- [2] 邵涛,周文俊,朱宜飞,等.特高频法检测 GIS 局部放电的试验研究[J].高电压技术,2001,27(3):15-16.

(上接第 55 页)

- [4] 刘振亚.特高压交流输电系统过电压与绝缘配合[M].北京:中国电力出版社,2008.
- [5] GB/Z 24842-2009,1 000kV 特高压交流输变电工程过电压和绝缘配合[S].
- [6] 陈水明,王威,于化鹏,等.计及工频电压的特高压变电站雷电入侵过电压分析[J].高电压技术,2010,36(8):1852-1857.
- [7] 周远翔,李震宇,梁曦东,等.工频电压对输电线路雷击跳闸率的影响[J].高电压技术,2007,33(9):61-65.
- [8] 刘渝根,刘伟.500 kV 变电站雷电侵入波研究[J].重庆大学学报:自然科学版,2000(03):17-19.
- [9] 张永记,司马文霞,张志劲.防雷分析中杆塔模型的研究现状[J].高电压技术,2006,32(7):93-97.
- [10] 袁兆祥,李琥,项玲.杆塔模型对特高压变电站反击波过电压的影响[J].高电压技术,2008,34(5):867-872.
- [11] Yamada T, Mochizuki A, Sawada J, et al. Experimental Evaluation of a UHV Tower Model for Lightning

- [3] 黎大健,梁基重. GIS 中典型缺陷局部放电的超声波检测[J].高压电器,2009,45(1):72-75.
- [4] 岳桂芳.局部放电产生原因及分析[J].机械工程与自动化,2005,(4):105-107.
- [5] 宋杲,崔景春,袁大陆.2004 年高压开关设备运行统计分析[J].电力设备,2006,7(2):10-14.
- [6] 刘云鹏,王会斌,王娟.高压开关柜局部放电 UHF 在线检测系统的研究[J].高压电器,2009,45(1):15-17.
- [7] 关永刚,钱家骊.射频法在高压开关柜局放检测中的应用研究[J].高压电器,2001,37(5):1-3.
- [8] 王娟.基于 UHF 的高压开关柜局部放电在线监测的研究[D].保定:华北电力大学,2007.
- [9] KYRKJEEIDE A S S, LARSEN V. Acoustic Insulation Analyzer for Periodic Condition Assessment of Gas Insulated Substations[C]//Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: 919-924.

作者简介:

邵 菲(1982),从事配电工程设计等方面研究工作。

(收稿日期:2013-11-12)

Surge Analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(1): 393-402.

- [12] Rizk F A M. Modeling of Transmission Line Exposure to Direct Lightning Strokes [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(4): 1983-1997.
- [13] GU D, ZHOU P, DAI M, et al. Comparison and Analyses on Over-voltage and Insulation Coordination of UHV AC Transmission System Between China and Japan [J]. High Voltage Engineering, 2009(6): 003.
- [14] Takami J, Okabe S. Characteristics of Direct Lightning Strokes to Phase Conductors of UHV Transmission Lines [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1): 537-546.

作者简介:

梁 玲(1988),硕士研究生,主要研究方向为电力系统过电压;

肖先勇(1968),教授,从事电力系统方面的科研和教学工作,研究方向为电能质量及其控制、过电压与电磁暂态。

(收稿日期:2013-11-15)

直流支柱绝缘子电场影响因素分析

许 安¹, 何大猛², 刘守豹¹

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院 四川 成都 610072;

2. 西安交通大学电气学院, 陕西 西安 710049)

摘 要: 直流支柱绝缘子是换流站支撑、固定高压设备, 保证电气外绝缘的重要设备。为对直流支柱绝缘子特性影响因素进行分析, 针对 ± 500 kV 德阳换流站支柱绝缘子放电故障, 使用有限元分析软件并结合现场实际, 用 2D 直流场计算雨水、污秽和消防水管对直流支柱绝缘子电场分布的影响情况。结果显示: (1) 污秽的存在使得场强增大 1.20 倍; (2) 雨滴的存在使得场强增大 1.71 倍; (3) 消防管道、污秽和雨滴共同存在使得场强增大 2.42 倍, 并且消防管道的对应位置场强增大 5 倍。电场的增大容易引起放电故障的发生, 这对今后直流换流站相关设备的外绝缘优化设计、结构优化、运行维护和故障分析具有重要理论参考意义。

关键词: 直流支柱绝缘子; 电场强度; 有限元法; 直流电场

Abstract: The DC post insulator is an important equipment to support and fix high-voltage equipment, and ensure the electric external insulation in converter station. In order to analyze the influencing factors of DC post insulator characteristics and aiming at the discharge fault of post insulator in Deyang Converter Station, the finite element analysis software is used and combined with the actual situation, the influences of raindrop, grime and fire main on the electric field distribution of DC post insulator are calculated with 2D DC field. The research results show that the electric field increases by 1.20 times when it grimed, and increases by 1.71 times when raining. It increases by 2.42 times when there are grime, raindrop and fire main, and the electric field increases by 5 times in the place corresponding to the fire main. The discharge phenomenon is more likely to be occurred when the electric field increases. The research data and conclusions provide a theoretical reference for the future optimal design of external insulation, the structural optimization, the operation maintenance and the fault analysis of the relevant equipment in DC converter station.

Key words: DC post insulator; electric field intensity; finite element method; DC field

中图分类号: TM861 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)02-0056-06

0 引 言

高压直流输电工程由于具有输送容量大、输送距离远等优点, 在中国得到了迅速发展, 其设备的绝缘可靠性十分重要。在特高压直流输电中大量使用支柱绝缘子, 在很大程度上决定系统的绝缘水平和安全可靠性。然而近几年来, 由于高压直流支柱瓷绝缘子的设计、制造质量、安装和运行检修等原因, 导致电力系统频繁发生支柱绝缘子断裂和污闪严重事故, 其绝缘结构设计成为生产、设计中的重点和难点之一^[1-4]。因此, 开展支柱绝缘子外绝缘特性分析意义重大。

2013 年 6 月 29 日夜间德阳地区大暴雨, 23:50 换流站极 I (正极运行) 支柱绝缘子发生放电现象

为: 极 I 直流极母线 1 号支撑绝缘子瓷瓶底部与支撑构架结合处有放电迹象(支撑绝缘子由 4 节瓷瓶组成, 总长 8.4 m), 底部瓷瓶已形成放电圈, 与平行的消防管道形成间歇性的贯穿放电通道。

次日 2 时, 站内下雨情况稍小, 1 号支撑绝缘子上部出现沿瓷瓶表面间断性闪络放电迹象(闪络长度达 1.5 节瓷瓶), 一次闪络放电持续时间约 1.5 s。4 时站内雨势转为中雨, 1 号支撑绝缘子上部(大约 1.5 节瓷瓶范围)沿支柱瓷瓶表面有零星放电闪络出现, 进行视频记录, 底部瓷瓶未见放电圈及放电通道, 上部瓷瓶仍有零星放电点。4:30 现场放电现象已消失, 如图 1 所示。

针对放电故障情况, 应用有限元分析软件分析计算了暴雨、污秽、下端消防水管等对电场分布的影响, 为直流支柱绝缘子的绝缘设计、结构优化、运行

维护和故障分析提供可靠的理论参考数据。



图 1 支柱绝缘子放电后的图片

1 计算原理

直流场因其周围空间存在带电粒子,一般应按照直流离子场计算,但由于所分析的故障时刻,支柱绝缘子处于大风、大雨环境,粒子流的影响可基本消除,所以通过分析直流支柱绝缘子的运行条件可知,在正常工作时,其均压环和管母部分电场为直流传导电场,其余部分电场为静电场,满足静电场条件。电位函数 $\varphi(x, y, z)$ 都满足 Laplace 方程,对应的边值问题为

$$\begin{cases} \nabla^2 \varphi = 0 \\ \varphi_{\text{高电位}} = U \quad \varphi_{\text{低电位}} = 0 \\ \varphi|_{\text{边界}} = 0 \end{cases}$$

式中, U 为电极上施加的电压。

在不同绝缘材料和导电媒质的分界面满足的衔接条件分别为

$$\begin{cases} \varphi_1 = \varphi_2 \\ \varepsilon_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial n} = \varepsilon_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial n} \end{cases} \quad \begin{cases} \varphi_1 = \varphi_2 \\ \gamma_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial n} = \gamma_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial n} \end{cases}$$

式中, ε 为绝缘材料的介电常数; γ 为导电媒质的电导率。分别采用直流场和静电场分析方法,可以得到直流支柱绝缘子的电场特性。

三维静电场 Laplace 方程式的等价变分问题可以描述为

$$\begin{cases} F(\varphi) = \int \frac{\varepsilon}{2} \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2 \right] dx dy dz = \min \\ \varphi|_k = U_k \end{cases}$$

应用有限元技术将计算场域剖分为若干个子域后,其泛函极值可以表示为

$$F(\varphi) = \sum_{e=1}^{Ne} F_e(\varphi) = \sum_{e=1}^{Ne} \int_{ve} \frac{\varepsilon}{2} \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2 \right] dx dy dz = \min$$

其中, Ne 为剖分单元总数。对每个单元应用数学变换,并最终整理为一个统一的矩阵方程为

$$[K][\varphi] = 0$$

其中, $[K]$ 为系数矩阵; $[\varphi]$ 为剖分单元节点的待求电位矩阵。求得电位值后,单元内的场强可由电位的导数获得为

$$E = -\nabla \varphi \quad \text{即}$$

$$\begin{cases} E_x = -\frac{\partial \varphi}{\partial x} = -\sum_{i=1}^m \frac{\partial \psi_i}{\partial x} \varphi_i \\ E_y = -\frac{\partial \varphi}{\partial y} = -\sum_{i=1}^m \frac{\partial \psi_i}{\partial y} \varphi_i \\ E_z = -\frac{\partial \varphi}{\partial z} = -\sum_{i=1}^m \frac{\partial \psi_i}{\partial z} \varphi_i \end{cases}$$

其中, ψ_i 为形状函数; m 为单元节点数。将以上方程中的介电常数 ε 换为电导率 γ 就得到直流电场有限元方程,采用直流场计算外界因素对场强分布的影响。

2 支柱绝缘子表面电场影响分析

2.1 基准验算模型介绍

由于使用 3-D 建模结构复杂,计算量巨大,故使用简化的轴对称模型进行定性分析。在故障发生时德阳换流站为暴雨天气,因此需要用 2-D 直流传导电场进一步计算降雨、污秽层和消防管道等因素对电场分布的影响。

根据四川地区污秽等级分布图可知德阳换流站的污秽等级为 D 级,结合《电力系统污区分级与外绝缘选择标准》,可以得到其污秽的电导率,并实测德阳雨水的电导率,认为陶瓷和空气的导电性极差,则电导率取极小的数值,各材质的电导率如表 1 所示。2-D 轴对称模型如图 2 所示。

表 1 各材质的电导率 $/(s \cdot m^{-1})$

空气	陶瓷	水滴	污秽层	不锈钢
$1e-9$	$1e-8$	0.01	0.05	1 100 000

上金具的电位为 1 V,下金具的电位为 0 V,从图 7 计算结果可以看出,金具的棱角部分及金具与电介质结合的部分是场强较大区域,进行场强控制应该重点关注这些区域。

2.2 雨水对电场分布的影响

在图 2 的基础上,建立降雨的改进模型,如图 4

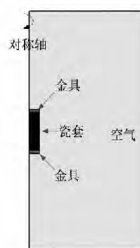


图 2 基准计算模型

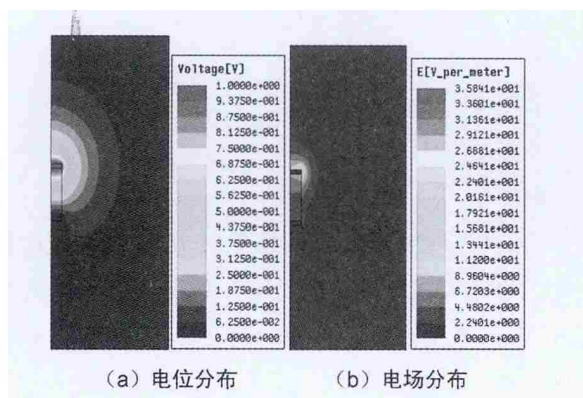


图 3 基准模型电位、电场分布云图

所示,其中空气区域部分的圆点表示水滴,用以模拟降雨。

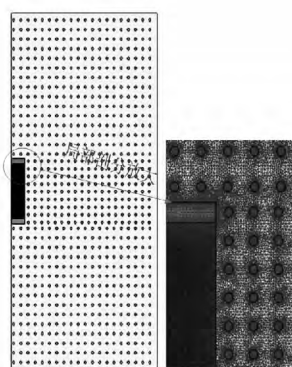


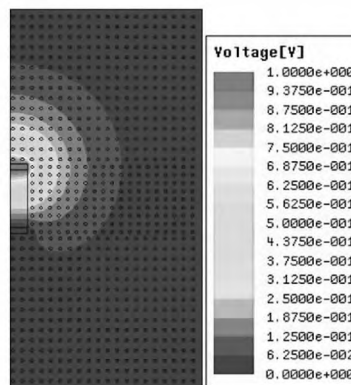
图 4 降雨模型及其剖分

从图 5 可知,雨滴的存在改变了空间电导率和介质的分布,使电场最大值由 35.84 V/m 增大至 61.05 V/m,比无雨滴情况增大 1.71 倍。

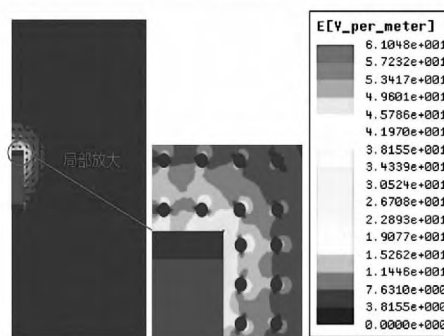
若空气质量较差,则雨水的电导率就会增大。进一步考虑雨水电导率变为 1 s/m 时对电场的影响,如图 6 所示。对比图 5 发现,雨水电导率从 0.05 增大到 1 s/m,电场从 61.05 V/m 增大到 61.06 V/m,变化极小,说明雨水电导率达到一定数值后,在增大电导率对电场的影响不明显。

2.3 污秽层对电场分布的影响

在图 2 的基础上,建立污秽改进模型,如图 7 所示,其中瓷套和金具右侧矩形带表示导电膜,用以模



(a) 电位分布



(b) 电场分布

图 5 有雨滴情况下电位、电场分布云图

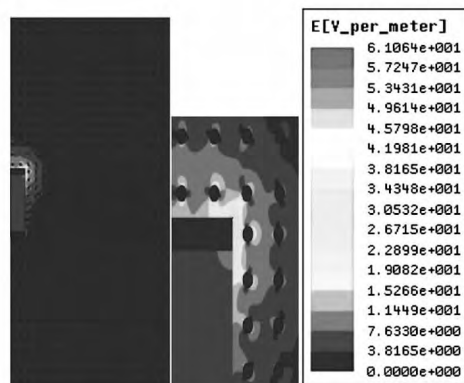


图 6 雨水电导率为 1 s/m 时电场分布云图
拟污秽层。

从图 8 可知,污秽的存在改变了空间电导率的分布,使得电场最大值由 35.84 V/m 增大至 42.98 V/m,比无污秽情况下增大 1.20 倍。

对比图 8 的结果,可以知道当污秽的电导率增大到 1 s/m 时,电场强度增大到 48.72 V/m,增大了 13.36%,这说明污秽电导率变化对电场分布有一定的影响。

2.4 雨水和污秽层共同对电场分布的影响

结合图 4 和图 7,建立降雨和污秽层共同存在的改进模型,如图 10 所示。

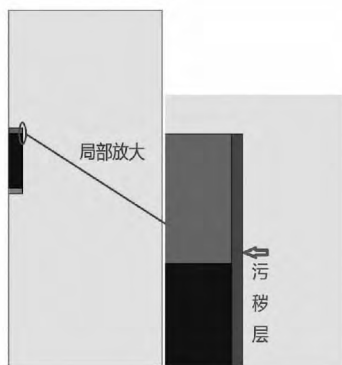
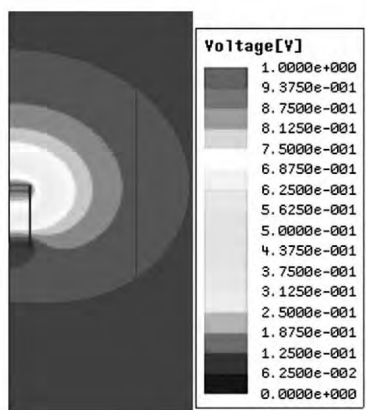
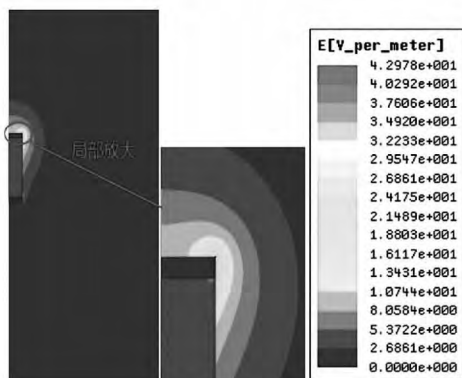


图 7 污秽改进模型图



(a) 电位分布



(b) 电场分布

图 8 有污秽情况下电位、电场分布云图

从图 11 可知,雨滴和污秽共同的存在改变了空间介电常数和电导率的分布,使得电场最大值由 35.84 V/m 增大至 75.40 V/m,比基本模型情况下增大 2.10 倍,由此说明雨滴和污秽共同存在会使得电场分布明显畸变。此外,污秽膜存在,底端电场有增大现象,且随着污秽电导率的增大场强也明显变大,这样底端容易形成电荷累积。

2.5 消防水管存在对电场分布的影响

德阳换流站实际运行时,高压电抗器支柱绝缘

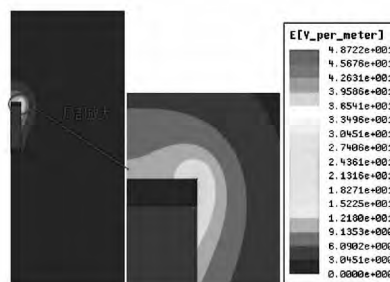


图 9 污秽电导率增大时,电场分布云图

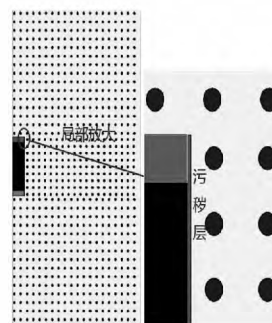
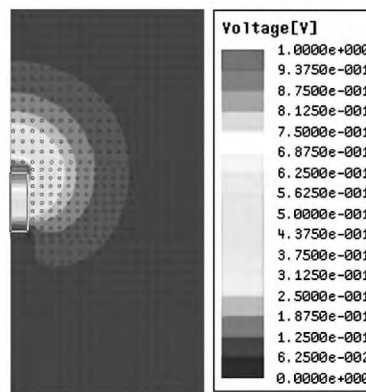
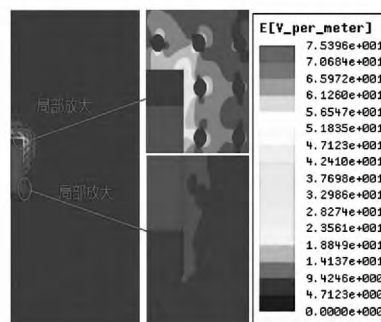


图 10 污秽和雨滴共存的改进模型图



(a) 电位分布



(b) 电场分布

图 11 污秽和雨滴共存情况下电位、电场分布云图
子最下端瓷瓶旁边有消防水管通过,且消防管道处于零电位,如图 12 所示。

从图 13 可知,消防管道的存在使得低电位抬高,改变了空间电场分布,使得电场最大值由 35.84

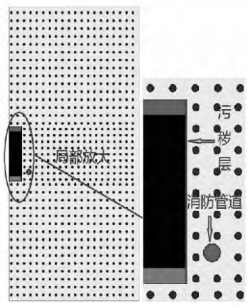


图 12 消防管道影响改进模型图

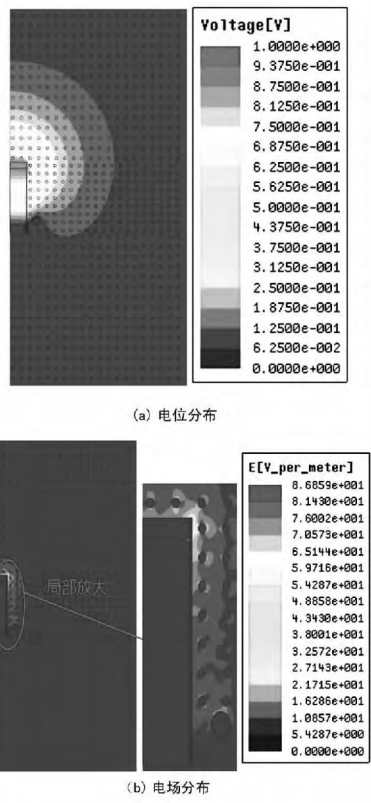


图 13 消防管道存在情况下电位、电场分布云图
V/m 增大至 86.86 V/m ,比基本模型情况下增大 2.42 倍 ,此外 ,计算了如果仅仅是消防管道的影响 ,电场只比基准模型增大 1.45 倍。

表 2 各种情况下消防管道及相应位置电场最大值

		/($\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$)	
计算项目	管道对应位置电场	计算项目	管道表面电场
基本	1.15	基本 + 管道	7.98
污秽	1.8	污秽 + 管道	12.1
雨水	2.3	雨水 + 管道	13.15
污秽 + 雨水	3.12	污秽 + 雨水 + 管道	15.68

从表 2 可以看出 ,在各种情况下 ,消防管道的存在都明显地影响电场分布 ,使得管道所在位置电场

发生急剧变化 ,尤其是在污秽和雨水共同存在情况下 ,最大电场可以增大到 15.68 V/m ,比同样天气没有消防管道情况增大 5 倍 ,比干燥无污染情况增大 2 倍 ,比干燥、无污染且没有消防管道时对应位置的场强增大了 13.6 倍。

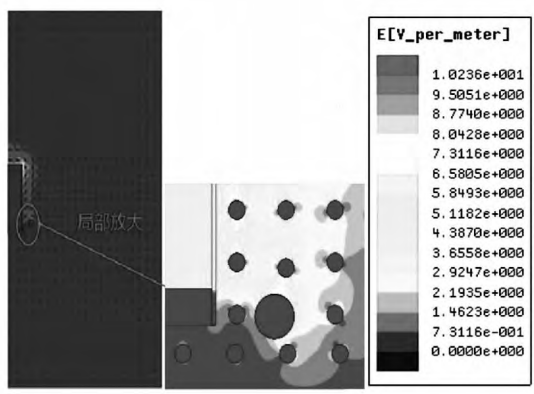


图 14 消防管道高度降低后电场分布云图

如果把消防水管降低到下法兰水平高度以下 ,那么消防水管表面电场强度将降低到 8.04 V/m ,降低了接近 2 倍 ,改善效果非常明显 ,如图 14 所示。

3 结论与建议

①场计算结果从理论上解释了暴雨和污秽情况下支柱绝缘子表面电场剧增的原因 ,其结果为 :暴雨使得电场强度增大 1.71 倍 ,污秽使得场强增大 1.20 倍 ,雨水和污秽共同存在时使得场强增大了 2.42 倍 ,这样就增大了直流支柱绝缘子在暴雨和污秽严重天气情况下发生放电的概率。

②消防管道的存在 ,使得地电位抬高 ,影响空间电场分布 ,尤其是在暴雨和污秽严重的天气情况 ,消防管道表面电场急剧增大 ,且明显高于周围场强 ,容易引起瓷套对其放电。

③为防止类似故障发生 ,尤其是保证运行方式改变情况下极Ⅱ不发生类似故障 ,建议对极Ⅰ和极Ⅱ高压电抗器支柱绝缘子采取在适当位置加装大伞裙的方式进行调爬处理 ,其大伞尺寸大 ,能挡住雨水溅落到下面伞裙 ,从而减小了雨水对电场分布的影响。为防止高压电抗器支柱绝缘子下端放电 ,相关接地管道和部件若靠近瓷瓶 ,则应布置在支架水平高度以下。

参考文献

[1] 关志成 ,高海峰 ,周军 ,等 .高海拔地区 750 kV 线路防污

- 闪、防雨闪措施研究[J]. 中国电力, 2005, 38(12): 24 - 28.
- [2] 王镔. 直流悬式系列瓷绝缘子设计性能及应用[J]. 电瓷避雷器, 2010(1): 13 - 18.
- [3] 国家电网公司. 特高压直流换流站支柱绝缘子设计[R]. 北京: 国家电网公司, 2007.
- [4] 赵峰, 张福增, 杨皓麟, 等. 复合支柱绝缘子在高海拔区直流污闪与污雨闪性能[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2009, 49(10): 1581 - 1584.
- [5] 周泽存. 高电压技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [6] 冯慈璋. 工程电磁场导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [7] 施围. 高电压工程基础[M]. 北京: 机械出版社, 2006.
- [8] 盛剑霓. 工程电磁场数值分析[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1991.
- [9] 赵晓君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 236 - 239.
- [10] 卢明, 杨庆, 阎东, 等. 复合绝缘子伞型结构对电场分布的影响[J]. 电瓷避雷器, 2011(1): 1 - 5.
- [11] 李名加. 10 kV 合成绝缘子沿面电场分布计算及其憎

水性变化因素分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2002.

- [12] 王黎明, 张楚岩, 任贵清, 等. 特高压交流复合绝缘子伞裙结构的优化设计[J]. 高电压技术, 2009, 35(10): 2335 - 2339.
- [13] 乐波, 马为民, 郑劲. 特高压直流场外绝缘方案的研究[J]. 电力建设, 2006, 31(1): 1 - 5.
- [14] 刘振亚. 特高压直流输电技术研究成果专辑[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [15] 中国南方电网公司. ± 800 kV 直流输电技术研究[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [16] 中华人民共和国国家技术监督局. GB/T 16927. 1 - 1997, 高电压试验技术[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.

作者简介:

许 安(1958), 高级工程师, 从事电力系统过电压防护的研究;

何大猛(1988), 硕士研究生, 研究方向为电气设备电磁分析与电力系统过电压防护。

(收稿日期: 2013 - 10 - 24)

(上接第 21 页)

针对光伏电站出力不稳定的问题, 现在已经有大量的研究和试验工作进行光功率预测, 目的是为了经济调度, 确保电网的安全稳定运行。但在电气化铁路接入后, 仅仅进行光功率的预测是不够的。所以在平时电网调度运行过程中, 应加强光伏电站、电网、铁路三个部门的相互协调与合作, 将光功率预测结果与电气化铁路的列车运行图结合起来, 综合考虑这两方面因素对电网进行调度, 从而确保电网的安全稳定运行。

参考文献

- [1] 张晓薇, 李振国. 电气化铁路接入电力系统 220 kV 和 110 kV 供电电压等级的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(17): 13 - 16.
- [2] 王厂贵. 并网光伏发电系统综述(上)[J]. 太阳能, 2008(2): 14 - 17.
- [3] 姚金雄, 张涛. 牵引供电系统负序电流和谐波对电力系统的影响及其补偿措施[J]. 电网技术, 2008, 32

(9): 61 - 65.

- [4] 方廷, 韩郁, 张岚. 一种多逆变器太阳能光伏并网发电系统的组群控制方法[J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(7): 57 - 60.
- [5] 熊丽霞. 浙赣电气化铁路牵引负荷特性分析[J]. 江西电力, 2009, 33(2): 27 - 29.
- [6] 韦钢, 吴伟力. 分布式电源及其并网时对电网的影响[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 36 - 40.
- [7] 韩柳, 谈顺涛. 电气化铁路对电网的影响及对策[J]. 江苏电机工程, 2005(3): 8 - 11.
- [8] 周小涵. 电气化铁路谐波在公用电网的渗透研究[J]. 四川电力技术, 2009, 32(4): 41 - 43.
- [9] 卢志海, 厉吉文, 周剑. 电气化铁路对电力系统的影响[J]. 继电器, 2006, 32(11): 33 - 36.
- [10] 栗时平, 刘贵英. 静止无功功率补偿技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006: 69 - 93.

作者简介:

胡仁祥(1987), 硕士, 从事电网调度运行。

(收稿日期: 2013 - 10 - 24)

110 kV 零值瓷绝缘子电场仿真分析研究

白 欢¹ 陈洪波¹ 黄道春²

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院 四川 成都 610072; 2. 武汉大学 湖北 武汉 433000)

摘 要: 瓷绝缘子长期运行后其绝缘性能和机械性能下降, 容易产生零值、低值绝缘子, 严重时会导致输电线路外绝缘发生闪络, 发生电网停电事故。利用相关仿真分析软件, 对 110 kV 直线猫头塔绝缘子上的无零值绝缘子和不同部位劣化绝缘子进行钢脚和铁帽的电位自由度耦合, 以模拟在实际情况下的零值绝缘子, 通过在电位分布云图、等位线分布图、电场分布云图、电位分布和电场分布曲线等方面的对比分析, 分析不同部位零值绝缘子对绝缘子串空间电场分布特性的影响, 对绝缘子劣质绝缘子的检测提供一定的理论支撑。

关键词: 零值; 绝缘子; 电场仿真; 电场分布

Abstract: The insulating properties and mechanical performance of porcelain insulators are easy to be deteriorated after a long-term operation, which produces low-value or zero-value insulators. A serious grid blackout would happen when the flash-over occurs in the transmission line. With the relevant simulation analysis software, the potential coupling freedom of steel foot and gossan is simulated for the nonzero value insulator and the faulty insulator in different part. The cloud chart of potential distribution, the distribution of equipotential lines, the cloud chart of electric field distribution, and the curves of potential distribution and electric field distribution are compared and analyzed. The influences of the zero-value insulator in different parts on the distribution characteristics of space electric field of insulator string are analyzed, which provides some theoretical support for the faulty insulator detection.

Key words: zero-value; insulator; electric field simulation; electric field distribution

中图分类号: TM211 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)02-0062-06

0 引 言

输电线路绝缘子是保证电网安全运行的重要物质基础, 绝缘子性能的优劣直接是电力系统安全运行的重要因素。瓷绝缘子长期运行后其绝缘性能和机械性能下降, 容易产生零值、低值绝缘子。当瓷绝缘子串中存在零值或低值绝缘子时, 相当于绝缘子串有部分绝缘丧失, 其整体爬电距离相应减少, 绝缘子串的闪络概率大大增加, 严重的时候, 零值绝缘子和低值绝缘子的存在会造成绝缘子炸裂而造成线路掉线, 对电网安全构成严重威胁。

绝缘子串周围电场分布特征信息可用来检测线路中的绝缘子故障^[1], 国内外已经对其开展了相关研究^[2-6]。文献[7]基于模拟电荷法的局部电场逆计算, 提出了检测劣化绝缘子的非接触式电场测量法。文献[8]分析得到了绝缘子劣化对其表面径向和轴向电场分量的影响。可见目前的研究集中在劣

化绝缘子对绝缘子串表面电位分布和沿伞裙外沿处电场分布的影响。基于这些研究成果仿真分析了不同部位零值绝缘子对绝缘子串空间电场分布特性的影响, 对绝缘子劣质绝缘子的检测提供一定的理论支撑。

利用相关仿真分析软件, 对 110 kV 直线猫头塔绝缘子上的无零值绝缘子和不同部位劣化绝缘子进行钢脚和铁帽的电位自由度耦合, 以模拟在实际情况下的零值绝缘子, 通过在电位分布云图、等位线分布图、电场分布云图、电位分布和电场分布曲线等方面的对比分析, 研究零值绝缘子不同部位对绝缘子电场分布的影响, 评估零值绝缘子运行的可靠性。

1 110 kV 直线猫头塔瓷绝缘子串模型

1.1 模型的建立

110 kV 直线猫头塔带中相瓷绝缘子串的整体模型如图 1 所示, 根据对称性建立三维静电场 1/2

模型。整体模型中包括直线猫头杆塔、7 片 XP-70 型瓷绝缘子、导线、上下联接金具等。所有实体被两层空气包围,第一层空气为长 17 m、高 37 m、厚度为 20 m 的长方体,第二层空气为半径 70 m、厚 20 m 的半圆柱体。整体模型在 solidworks 中建立,并导入到 ansys 中进行计算。

建立此模型进行仿真,是为了计算在正常情况下以及在绝缘子串上存在零值绝缘子或劣化绝缘子时,其周围的电场和电位分布情况。

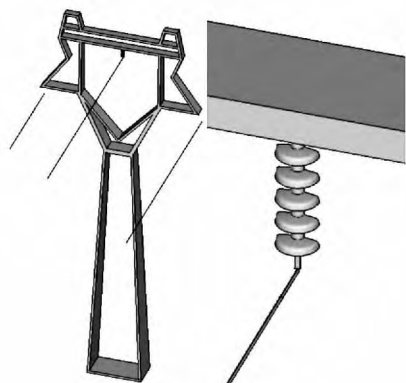


图 1 整体模型图

1.2 模型参数说明

1) 杆塔

110 kV 线路选用 Z3 型直线塔,杆塔尺寸图和 1/2 计算模型图如图 2 所示。

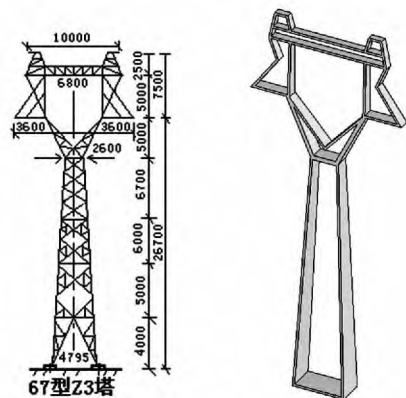


图 2 杆塔尺寸及模型图

2) 绝缘子

绝缘子选用 7 片 XP-70 型瓷绝缘子,绝缘子结构高度为 146 mm,公称直径为 255 mm,绝缘子模型和绝缘子串模型如图 3 所示。

3) 联接金具

上下联接金具在模型中进行了一定的简化,采用了一定长度的长方体来代替。

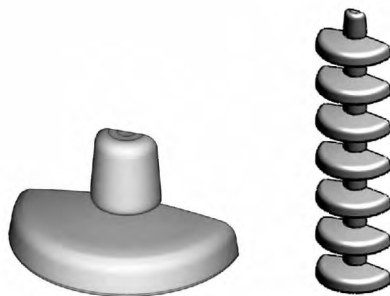


图 3 绝缘子模型图

4) 导线

110 kV 直线塔采用单分裂导线,导线直径为 21.66 mm,模型中导线长度取为 20 m。

5) 加载

对于瓷绝缘子串,根据情况对中相绝缘子串最下端钢脚、导线、联接金具加载高电位 $U_m = 110 \times 1.1 \times \sqrt{2}/\sqrt{3} = 98.796$ kV,另外两相高压端加载电位为 $-0.5U_m$,对最上端绝缘子铁帽、联接金具和杆塔加载 0 电位。在仿真计算中,自高压端编号,分别对绝缘子串上的第 1、4、7 片(即最下端、中间、最上端)绝缘子进行钢脚和铁帽的电位自由度耦合,来模拟在实际情况下的零值绝缘子。而正常情况下良好的绝缘子串,只需对绝缘子串上下相连的铁帽和钢脚进行电位自由度耦合。瓷绝缘子伞裙的介电常数取 6,为减小计算量,低电位相不建立绝缘子而只建立导线。

2 分布云图

下面对是否存在零值绝缘子的 4 种情况进行电位和电场分布云图的对比(自高压端编号,即最下面为第 1 片绝缘子,依次往上,下面不再赘述)。

2.1 电位分布云图

由图 4 可以看出,零值绝缘子其铁帽和钢脚电位相等,绝缘子完全被贯穿,使绝缘子劣化,周围的电位分布发生一定程度的畸变。

2.2 等位线分布图

为了更清楚地看到绝缘子串周围的电位分布情况,下面给出了 4 种情况下的绝缘子串中零值绝缘子周围等位线分布图,如图 5 所示。

从图 5 看出,由于零值绝缘子的铁帽和钢脚完全贯穿,使其基本不承担电压,所以其钢脚和铁帽之间的电位线分布较稀疏。

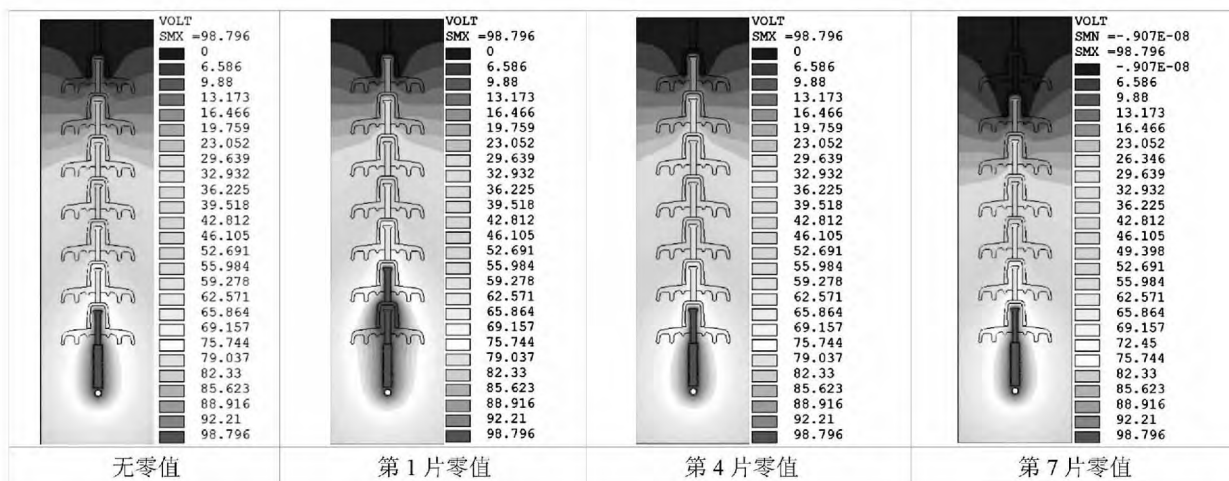


图 4 电位分布局部云图及局部放大云图

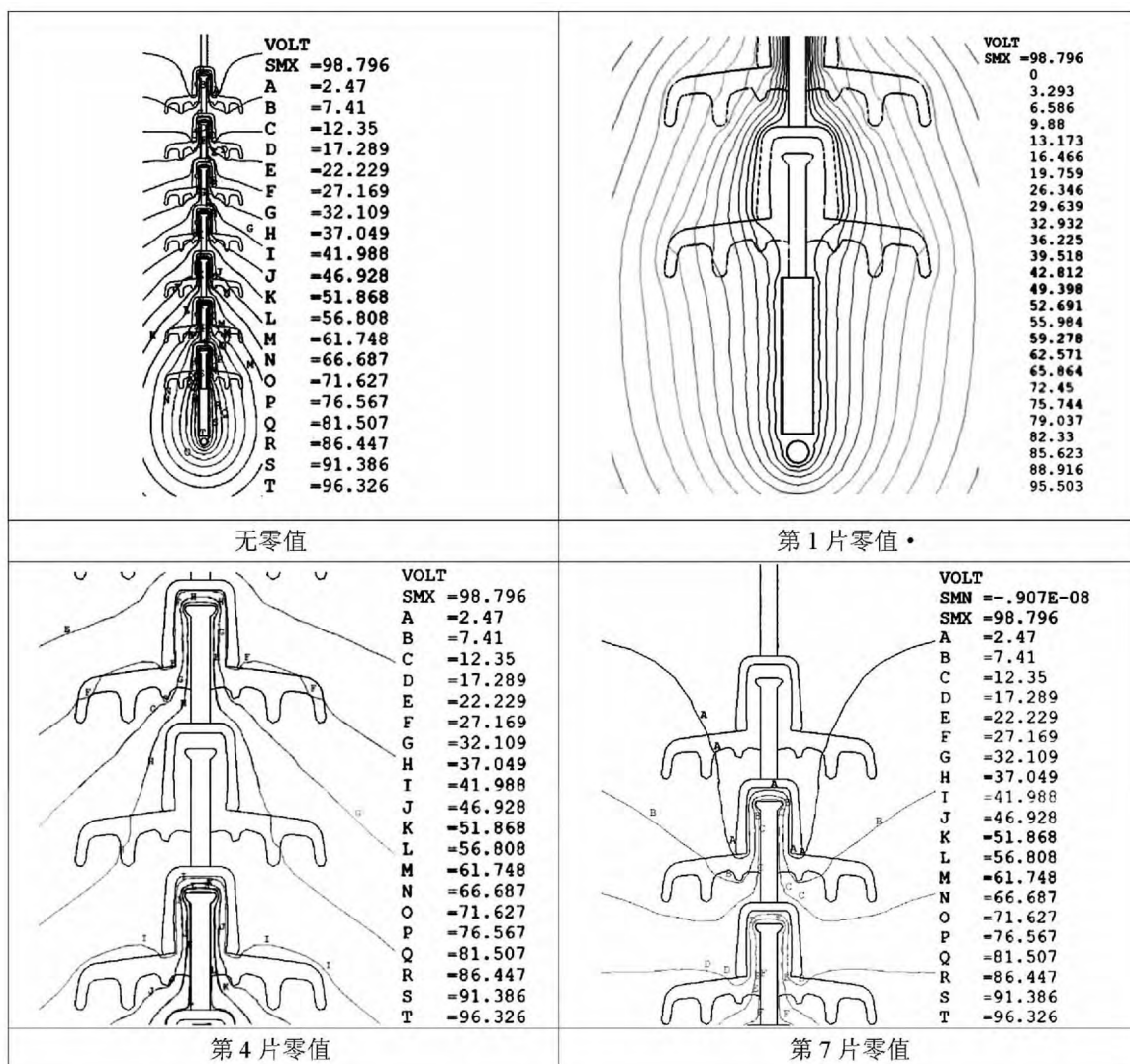


图 5 等位线分布图

2.3 电场分布云图

从图 6 可以看出,当有零值绝缘子时,其附近的电场分布明显发生畸变,而离它较远处的绝缘子附

近的电场与正常时相比则变化不大。

2.4 电位分布曲线对比

下面分别给出 4 种不同零值情况下,在离绝缘

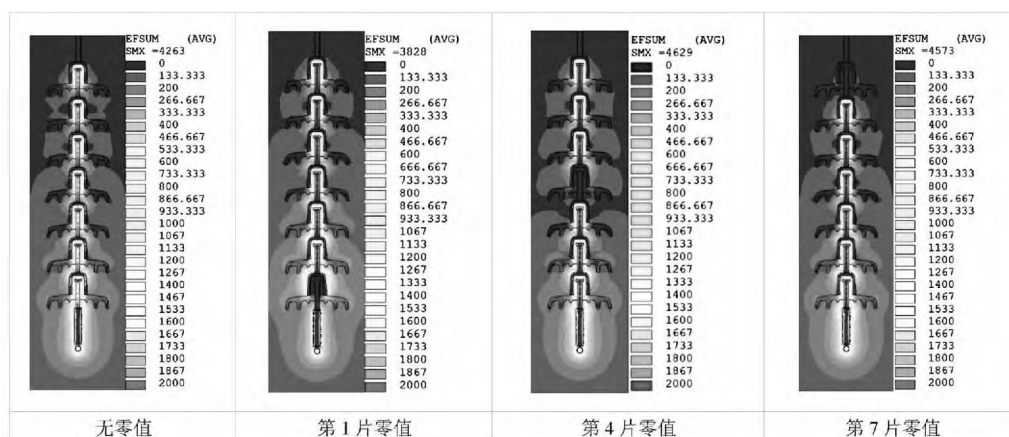
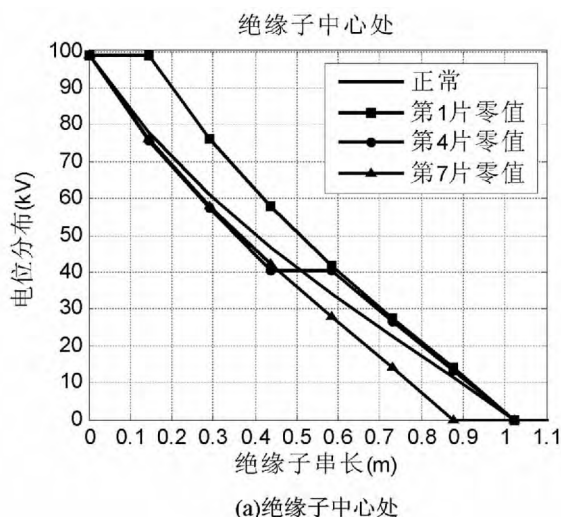


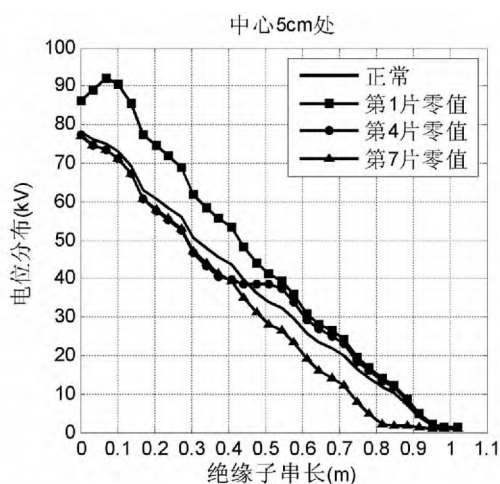
图 6 电场分布局部云图及局部放大云图对比

子中心 0.5、20 cm 处的电位曲线图,如图 7 所示。

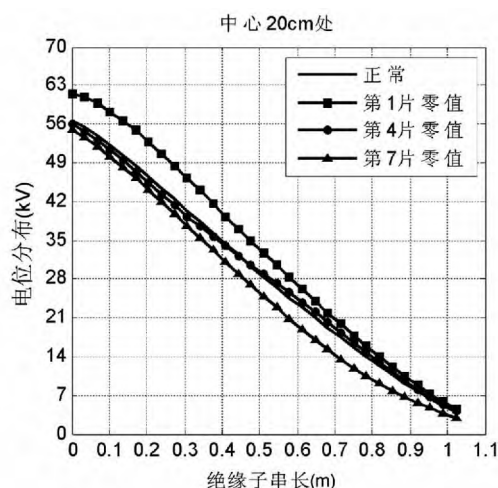
从图 7 可以看出,在距中心 5 cm 处,电位路径穿过了伞裙,因此呈现出一定的非线性。当绝缘子串中出现零值绝缘子时,零值绝缘子附近的电位较正常情况下发生明显畸变,其他绝缘子周围电位的



(a) 绝缘子中心处



(b) 中心 5cm 处



(c) 绝缘子中心 20cm 处

图 7 电位分布曲线图

变化要明显小于零值绝缘子附近的电位变化,说明零值绝缘子的存在严重影响了零值绝缘子附近的电位分布;当零值绝缘子出现在高压端附近时,零值绝缘子附近电位的变化幅值要比其出现在其他位置时的变化大,离绝缘子中心越远,电位的变化越不明显,说明当存在零值绝缘子时,距离绝缘子中心越远,对其电位的影响越小。

下面从不同的零值位置和离绝缘子中心位置 d 来分析其电位变化率。计算式为 $\sigma = (V' - V) / V$, 其中 V' 为零值后的各绝缘子处的电位值, V 为正常情况下各良好绝缘子处的电位值。

图 8 为当 d 为 5 cm、20 cm 时各绝缘子附近的电位变化率。

从图 8 中可以看出当高压端出现零值绝缘子时,绝缘子周围的电位都比正常电位值大;当低压端出现零值绝缘子时,绝缘子周围的电位都比正常电位值小。零值绝缘子位于低压端时,零值绝缘子周围

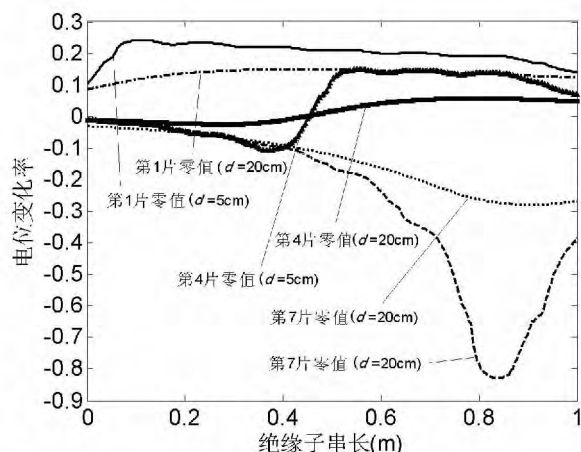


图 8 零值绝缘子对电位变化率的影响

表 1 含有 1 片零值绝缘子时的最大电位变化百分比

	/%				
d / cm	5	12.75	15	20	25
第 1 片零值	24.1	18.5	17.0	14.8	13.2
第 4 片零值	14.8	9.3	7.8	5.6	4.3
第 7 片零值	82.8	42.5	36.0	27.9	23.2

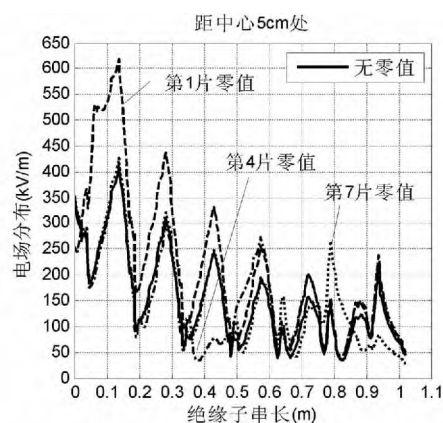
电位变化率最大; 零值位于高压端时电位变化率次之; 零值位于中间时, 电位变化率最小。离绝缘子中心的距离越远, 电位变化率越小, 同样表明随距离的增加, 零值绝缘子对电位改变的影响越小。

表 1 所示为第 1、4、7 片分别为零值绝缘子时在离绝缘子中心不同距离处等径上的最大电位变化百分比, 最大值都出现在零值绝缘子附近。

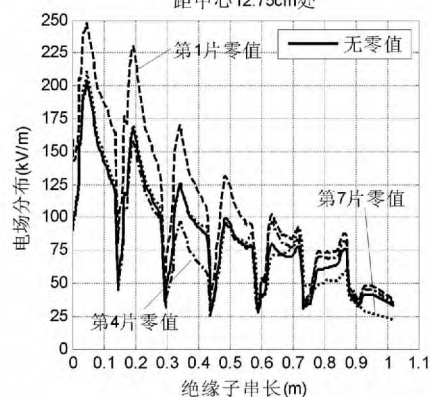
综上所述可知: 当绝缘子串中出现零值绝缘子时, 零值绝缘子附近的电位分布会发生变化, 对其他绝缘子附近的电位也有一点影响。当高压端出现零值绝缘子时, 转移到其他绝缘子上的电压较多, 影响较大, 但电位畸变率却不是最大; 当低压端出现零值绝缘子时, 由于其基数小, 故其电位变化率最大; 而当绝缘子串中间位置出现零值绝缘子时, 对其他绝缘子的影响最小, 电位变化率也最小。而距绝缘子中心越远, 零值绝缘子对其点位分布影响越小。

3 电场分布曲线对比

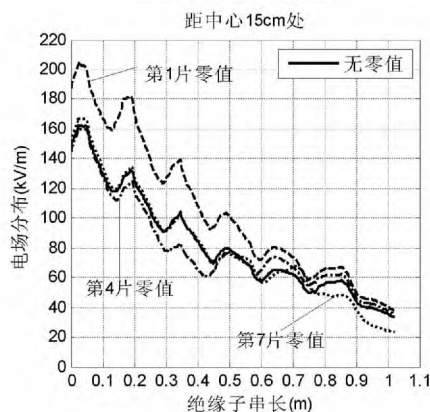
下面分别给出 4 种不同零值情况下, 在离绝缘子中心 5、12.75、15、20 cm 处的电场分布曲线图, 如图 9 所示。



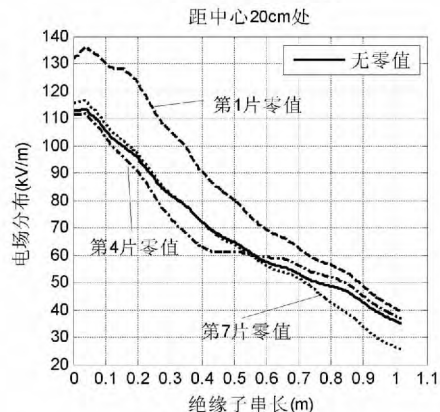
(a) 距中心 5cm 处



(b) 距中心 10cm 处



(c) 距中心 15cm 处



(d) 距中心 20cm 处

图 9 电场分布曲线图

从图 9 可以看出 ,距中心 5 cm 和 12.75 cm 时 ,即路径同时穿过绝缘子和空气时 ,电场分布变化剧烈 ,说明绝缘子处的电场与空气中电场的场强值相差很大。当绝缘子串中出现零值绝缘子时 ,零值绝缘子附近的电场会发生明显的变化。零值绝缘子位于高压端时对于电场幅值影响最大。距绝缘子中心越远 ,零值绝缘子对该处的电场值影响越小。

下面给出在距绝缘子中心 12.75 cm(伞裙边沿)处不同位置零值绝缘子对整串绝缘子的电场畸变率 ,分别在 5、12.75、15、20 cm 含有 1 片零值绝缘子时的最大电场变化百分比 ,如表 2 所示。

表 2 含有 1 片零值绝缘子时的最大

<i>d</i> /cm	电场变化百分比				/%
	5	12.75	15	20	
第 1 片零值	153.0	23.8	41.2	28.9	
第 4 片零值	174.2	41.5	22.1	13.1	
第 7 片零值	310.2	60.2	32.0	26.5	

由于 $d = 5\text{ cm}$ 小于伞裙半径 ,在伞裙的上、下表面可能会产生较大的电场畸变率。由表 2 可看出 ,当高压端或低压端出现零值绝缘子时 ,电场的变化率都较大;而当绝缘子串中间位置出现零值绝缘子时 ,对其他绝缘子的影响最小 ,电场变化率也较小。

综上所述:高压端的绝缘子劣化时 ,整串绝缘子中各绝缘子位置处的空间电场变化明显;当劣化绝缘子位于中部和低压端时 ,其他绝缘子位置处的电场变化较小。随着离绝缘子中心距离的增大 ,零值绝缘子对空间电场的影响越小。

4 小 结

1) 当绝缘子串中出现零值绝缘子时 ,会对其附近的电位和电场分布产生影响 ,而对较远处的其他绝缘子附近的电位和电场分布影响较小。随着离绝

缘子中心距离的增大 ,产生的影响越来越小。

2) 由于零值绝缘子的存在 ,使电压发生转移 ,在零值绝缘子伞裙下方 ,电位和电场值比正常值要低 ,而在伞裙上方又比正常值要高 ,变化在零值绝缘子处过渡。

3) 零值绝缘子出现高压端或低压端对电场和电压分布产生的影响比出现在中间位置要大。

参考文献

[1] Kontargyri V T ,Plati L N ,Gonos I F ,et al. Measurement and Simulation of the Voltage Distribution and the Electric Field on a Glass Insulator String [J]. Science Direct , Measurement 2008(41) : 471 – 480.

[2] 袁致川. 沿绝缘子串电位分布的数值算法 [J]. 高电压技术 ,1997 ,23(6) : 69 – 80.

[3] Huo Feng ,Chen Yong ,Cai Wei ,et al. Surface Electrical Field Distribution Simulation and Insulation Characteristics Test of Polluted Insulators [J]. High Voltage Engineering 2008 ,12(12) : 2621 – 2625.

[4] Que Weiguo. Electric Field and Voltage Distributions along Non – ceramic Insulators [D]. Ohio: The Ohio State University ,2002.

[5] Que Weiguo ,Sebo S A. Electric Field and Potential Distributions along Dry and Clean Non – ceramic Insulators [C]. Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference ,Cincinnati ,USA , 2001.

[6] Kaana – Nkusi S ,Alexander P H. Potential and Electric Field Distributions at a High Voltage Insulators Shed [J]. IEEE Trans. on Electrical Insulation ,1988 ,23(2) : 307 – 317.

[7] Birlasekaran S ,Li H J. Detection of Faulty Insulators on Power Transmission Line [C]. Power Engineering Society Winter Meeting ,Singapore 2000.

[8] 陈涛. 基于非接触式的劣化绝缘子检测方法的研究 [D]. 重庆: 重庆大学 2006.

(收稿日期: 2013 – 11 – 07)

高压开关柜中 TEV 信号仿真分析

邵 菲¹ 魏力强² 吴 昊³ 茹满辉⁴

(1. 沈阳电力勘测设计院 辽宁 沈阳 110003;

2. 国网河北省电力公司电力科学研究院 河北 石家庄 050021;

3. 国网辽宁省电力有限公司经济技术研究院 辽宁 沈阳 110006;

4. 国网辽宁省电力有限公司 辽宁 沈阳 110006)

摘 要: 高压开关柜在电力系统中具有重要的地位,但是运行经验表明,局部放电是其绝缘出现损坏的征兆,所以对局部放电进行检测是必要的。局部放电会导致暂态对地电压的产生,据此可对局部放电源进行检测。为掌握瞬态对地电压 (TEV) 信号的特点,通过有限差分法进行了仿真分析,为现场应用提供了理论依据。

关键词: 开关柜; 局部放电; TEV; 仿真

Abstract: High-voltage switch cabinet has an important position in power system, but the operation experiences show that the partial discharge is a sign of its insulation damage, so the partial discharge test is necessary. Partial discharge can lead to the transient voltage, so this method can be used to detect the power supply of partial discharge. In order to master the characteristics of transient earth voltage (TEV) signals, the simulation analysis is carried out by the finite difference method, which provides a guiding significance for field application.

Key words: switch cabinet; partial discharge; transient earth voltage (TEV); simulation

中图分类号: TM864 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)02-0068-04

0 引 言

当高压开关柜发生局部放电时,放电电量先聚集在与放电点相邻的接地金属部分,形成电磁波并向各个方向传播。对于内部放电,放电电量聚集在接地屏蔽的内表面,因此如果屏蔽层是连续时无法在外部检测到放电信号。但实际上,屏蔽层通常在绝缘部位、垫圈连接处、电缆绝缘终端等部位出现破损而导致不连续,这样高频电磁信号就会传输到设备外层。放电产生的电磁波通过金属箱体的接缝处或气体绝缘开关的衬垫传播出去,同时产生一个暂态电压,通过设备的金属箱体外表面而传到地下去,这就是“暂态对地电压”,简称 TEV^[1-4]。

电气设备内部的放电主要有表面放电、内部放电、高压电极的尖端放电、电晕放电等。在放电过程中,由局部放电脉冲产生几千赫到几十兆赫是电磁波,同时在设备金属封闭壳体上产生一个瞬态对地电压 (transient earth voltage, TEV),该信号可以通过特制的电容耦合探测器进行捕捉 (测量方法见图

1),从而获得局部放电的幅值 (dB) 和脉冲频率。

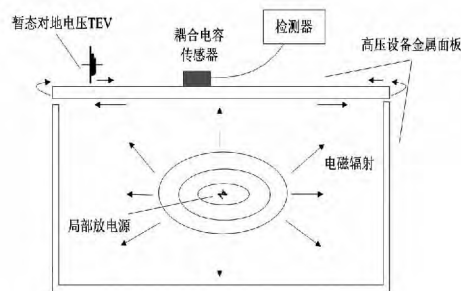


图 1 TEV 检测原理示意图

传统检测方法是测量高压电气设备的放电视在电荷,以 pC 表示放电强度,TEV 则采用对数来表示放电强度。传统的检测方法仅仅对反映放电时的电压变化有比较明显效果,而脉冲实际经过的路径对测量结果没有影响,故传统检测法用于放电点定位难以实现。经过理论研究发现, dB 与 pC 间关系的影响因素多种多样,并且难以量化,因此该方法主要用于横向比较某组检测设备中各设备的实际运行情况,以确定检修设备的优先顺序;该方法也可以对单个设备在时间上进行跟踪测量,找出其放电活动的变化,从而掌握设备的损伤情况。尽管未知因素很

多,然而该方法通过检测放电点附近的脉冲信号,也能灵敏地反应出放电活动的绝对强度^[5-7]。

利用 TEV 测量法在设备外壳上检测局部放电产生的瞬时地电压信号,可在设备运行时对其内部的局部放电情况进行检测,具有较好的抗干扰能力,适用于 10~35 kV 空气绝缘开关柜、充气式 C-GIS 的电缆仓等空气绝缘设备。

1 TEV 信号的产生机理

一般来说,高压电气设备发生局部放电时,电压脉冲在金属壳的内表面传播,最终从接头、盖板等的缝隙处传出,然后沿着金属壳外表传向大地,放电脉冲可以通过电容性探测器检测到。基于暂态地电压原理的局部放电在线检测和定位技术,通过在被检设备的接地金属外壳安装单只电容耦合式探测器即可实现局部放电的幅值和脉冲频率等参数测量工作^[8-9]。

目前,局部放电检测方法常以脉冲电流法的视在放电量来表征局部放电活动的严重程度,然而该方法仅限于应用在电力设备局部放电的离线检测,存在很大的局限性。经过多年的现场应用表明,对于开关柜局部放电的检测,TEV 检测法效果更为理想些。

2 开关柜表面 TEV 仿真建模

2.1 建立物理模型

首先通过 XFDTD 软件来进行物理建模,图 2 所示为高压开关柜 1:1 仿真模型,此开关柜的大小为 850×500×1 600 mm,在高度 1 300 mm 处划分为两个室。开关柜结构密封,在开关柜柜门处,设置 2 mm 的缝隙,以模拟实际开关柜的情况,设置开关柜的材料为钢,划分网格单元的尺寸为 10×10×10 mm。网格划分情况见图 3。

2.2 仿真参数设置

局部放电源可以用高斯脉冲线电流源模拟,线电流相当于多个元电流的串联。高斯脉冲信号的时域形式为

$$I(t) = I_0 \exp\left(-\frac{4\pi(t-t_0)^2}{\tau^2}\right) \quad (1)$$

其中 π 为常数,决定了高斯脉冲的宽度; I_0 为脉冲

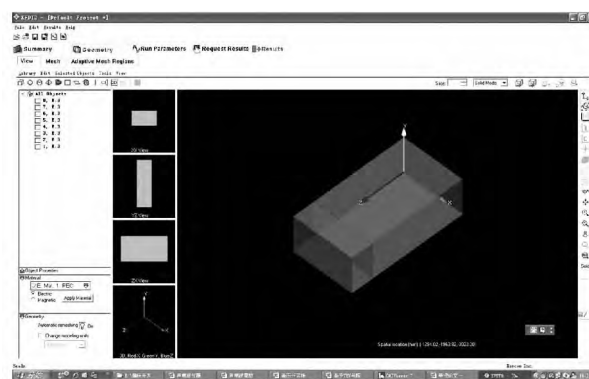


图 2 高压开关柜 TEV 仿真模型

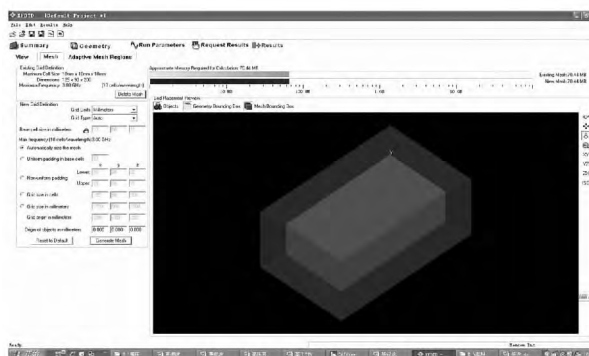


图 3 高压开关柜仿真模型网格划分

峰值,在 $t=t_0$ 时刻,脉冲峰值出现。这里线电流长度设置为 1 cm,线电流源中心施加高斯电流脉冲激励,幅值 1 A,脉冲宽度 1 ns。注入线电流源中心处的高斯电流脉冲后,电流脉冲的放电量可由脉冲波形在 t_1 、 t_2 时间段内的积分确定

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} i(t) dt \quad (2)$$

XFDTD 仿真模型:仿真计算中所用最高频率设置为 3 GHz,利用

$$L_{\max} = \frac{c}{10 \times f} \quad (3)$$

其中 $L_{\max}$ 为最大元胞的尺寸; c 为光速 3×10^8 m/s; f 为激励最高频率,因此 $L_{\max} = 1$ cm/cell。一个完整的元胞尺寸(网格尺寸)为 $1 \times 1 \times 1$ cm,仿真域尺寸为 $125 \times 90 \times 200$ cell,吸收边界条件。采用 Berenger 完全匹配层 PML。PML 是一种特殊的介质层,该层的波阻抗与相邻介质波阻抗完全匹配,因而入射波将无反射地穿过分界面而进入 PML 层。并且由于 PML 为有耗介质,进入 PML 层的透射波将迅速衰减,所以有限几层的 PML 介质能对入射波起到很好的吸收效果。

表 1 激励源脉宽不同时的 TEV 幅值

脉冲宽度 /ns	0.5	1	5	10	15	20
TEV 幅值 /mV	4.119 7	0.657 2	0.007 7	0.003 2	0.002 1	0.001 5

3 仿真结果分析

3.1 激励源脉宽的影响

将激励源设置在开关柜正中 ,点 (425 ,250 , 800) 处。检测点设置在点 (0 ,250 ,800) 处。激励源幅值为 1 A 根据局部放电的特点 ,选择脉冲宽度分别为 0.5 ns、1 ns、5 ns、10 ns、15 ns、20 ns。所测得的结果如表 1 所示。

激励源脉冲宽度不同时 TEV 波形如图 4 所示 ,不同脉冲宽度激励源所对应的 TEV 电压波形如图 5 所示。

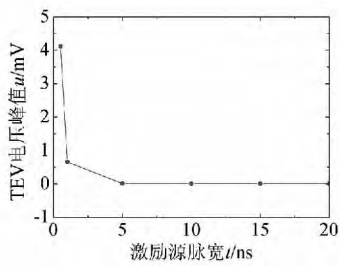


图 4 激励源脉宽对 TEV 幅值的影响

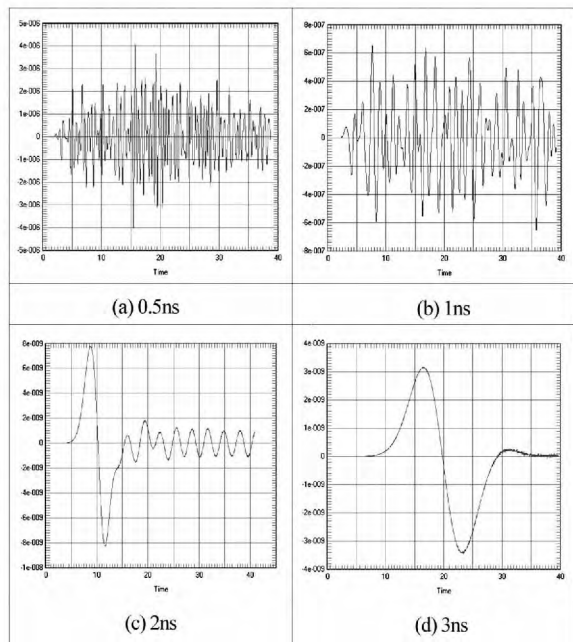


图 5 激励宽度不同时的 TEV 波形

由表 1、图 4 和图 5 可以看出 ,检测点 TEV 的强度随激励源脉冲宽度的增加而迅速减小 ,脉冲宽

度越窄 ,检测到的 TEV 信号越强 ,亦即放电过程越快 ,则 TEV 检测法检测能力越强。

3.2 激励源幅值的影响

现继续将激励源设置在点 (424 ,240 ,790) 处 ,检测点设置在 (0 ,240 ,790) 处 ,激励源脉冲宽度保持为 5 ns 不变 ,幅值分别为 1 A、2 A、3 A 和 4 A。

激励源幅值不同时 TEV 波形如图 6 所示。

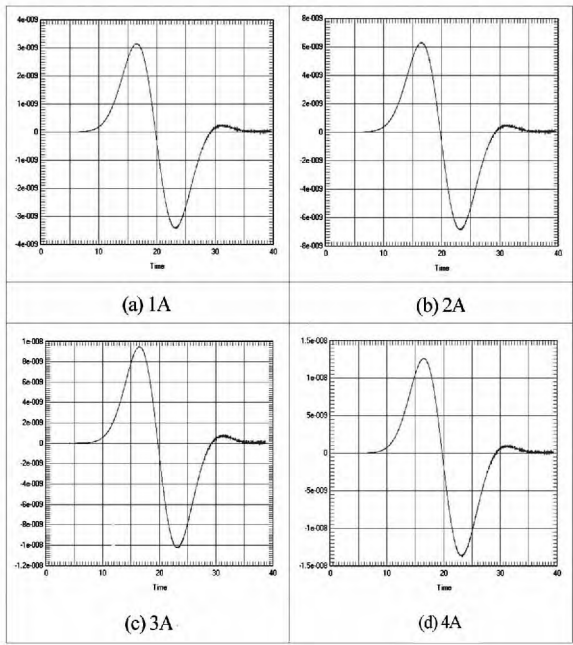


图 6 激励源幅值不同时的 TEV 波形
TEV 幅值与激励源幅值的关系如图 7 所示。

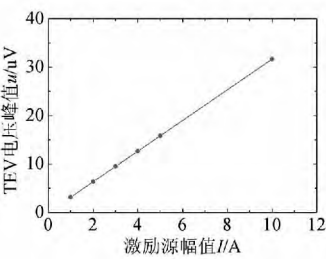


图 7 激励源幅值与 TEV 幅值的关系

由表 1、图 6 和图 7 可以看出 ,检测点处 TEV 电压波形的强度正比于激励源脉冲电流的幅值 ;激励源脉冲幅值越高 ,检测到的 TEV 越强。也就是说 ,TEV 检测法对于放电越激烈的局部放电 ,其检测能力越强。

4 结 论

主要对高压开关柜局部放电引起的 TEV 信号特点进行了仿真分析,取得如下结论。

1) 检测点 TEV 信号的强度随激励源脉冲宽度的增加而迅速减小;脉冲宽度越窄,检测到的 TEV 越强,亦即放电过程越快,则 TEV 检测法检测能力越强。

2) 激励源脉冲幅值越高,检测到的 TEV 越强,亦即放电强度越激烈,则 TEV 检测法检测能力越强。

参考文献

- [1] LEIJON M, MING L, HOFF P. SF₆ Gas Pressure Influence on Acoustical Signals Generated by Partial Discharges in GIS[C]//7th ISH Conference, 1991: 75.
- [2] 邵涛,周文俊,朱宜飞,等.特高频法检测 GIS 局部放电的试验研究[J].高电压技术,2001,27(3):15-16.

(上接第 55 页)

- [4] 刘振亚.特高压交流输电系统过电压与绝缘配合[M].北京:中国电力出版社,2008.
- [5] GB/Z 24842-2009,1 000kV 特高压交流输变电工程过电压和绝缘配合[S].
- [6] 陈水明,王威,于化鹏,等.计及工频电压的特高压变电站雷电入侵过电压分析[J].高电压技术,2010,36(8):1852-1857.
- [7] 周远翔,李震宇,梁曦东,等.工频电压对输电线路雷击跳闸率的影响[J].高电压技术,2007,33(9):61-65.
- [8] 刘渝根,刘伟.500 kV 变电站雷电侵入波研究[J].重庆大学学报:自然科学版,2000(03):17-19.
- [9] 张永记,司马文霞,张志劲.防雷分析中杆塔模型的研究现状[J].高电压技术,2006,32(7):93-97.
- [10] 袁兆祥,李琥,项玲.杆塔模型对特高压变电站反击波过电压的影响[J].高电压技术,2008,34(5):867-872.
- [11] Yamada T, Mochizuki A, Sawada J, et al. Experimental Evaluation of a UHV Tower Model for Lightning

- [3] 黎大健,梁基重. GIS 中典型缺陷局部放电的超声波检测[J].高压电器,2009,45(1):72-75.
- [4] 岳桂芳.局部放电产生原因及分析[J].机械工程与自动化,2005,(4):105-107.
- [5] 宋杲,崔景春,袁大陆.2004 年高压开关设备运行统计分析[J].电力设备,2006,7(2):10-14.
- [6] 刘云鹏,王会斌,王娟.高压开关柜局部放电 UHF 在线检测系统的研究[J].高压电器,2009,45(1):15-17.
- [7] 关永刚,钱家骊.射频法在高压开关柜局放检测中的应用研究[J].高压电器,2001,37(5):1-3.
- [8] 王娟.基于 UHF 的高压开关柜局部放电在线监测的研究[D].保定:华北电力大学,2007.
- [9] KYRKJEEIDE A S S, LARSEN V. Acoustic Insulation Analyzer for Periodic Condition Assessment of Gas Insulated Substations[C]//Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: 919-924.

作者简介:

邵 菲(1982),从事配电工程设计等方面研究工作。

(收稿日期:2013-11-12)

Surge Analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(1): 393-402.

- [12] Rizk F A M. Modeling of Transmission Line Exposure to Direct Lightning Strokes [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(4): 1983-1997.
- [13] GU D, ZHOU P, DAI M, et al. Comparison and Analyses on Over-voltage and Insulation Coordination of UHV AC Transmission System Between China and Japan [J]. High Voltage Engineering, 2009(6): 003.
- [14] Takami J, Okabe S. Characteristics of Direct Lightning Strokes to Phase Conductors of UHV Transmission Lines [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1): 537-546.

作者简介:

梁 玲(1988),硕士研究生,主要研究方向为电力系统过电压;

肖先勇(1968),教授,从事电力系统方面的科研和教学工作,研究方向为电能质量及其控制、过电压与电磁暂态。

(收稿日期:2013-11-15)

电容式套管末屏接线法在绕组变形测试中的应用研究

杨 洋

(国网四川省电力公司检修公司 , 四川 成都 610041)

摘 要: 提出了用套管末屏接线取扫描输出信号的新方法替代套管首端接线取扫描输出信号的旧方法, 对两种方法的原理进行了对比分析, 并通过现场试验验证了其可行性。试验结果表明, 两种接线方法各个极值点即波峰、波谷对应频率和对应幅值具有一致性和对应性的关系, 因此, 新方法代替旧方法具有显著的可行性。

关键词: 变压器; 套管; 绕组变形; 末屏; 频率响应

Abstract: The new method using end shield of bushing to get scanning output signals is proposed to replace the old one which uses the head end of bushing. The theories of two methods are analyzed and compared and the feasibility of the replacement is verified with the field experiments. According to the test results, the corresponding frequencies and amplitudes of extreme points of these two methods have the uniformity and correspondence. Therefore, it is of obvious feasibility to replace the old method with new one.

Key words: transformer; bushing; winding deformation; end shield; frequency response

中图分类号: TM835 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2014)02-0072-03

0 引 言

电力变压器绕组因为短路故障电流冲击、安装过程中的意外冲撞等原因可能会受到机械力或电动力的作用, 从而发生轴向或径向的尺寸变化, 通常表现为绕组局部扭曲、鼓包或移位等特征, 这就是变压器的绕组变形^[1-6]。

绝缘试验和油的试验都难以发现绕组变形, 因此绕组变形构成了潜伏性故障, 从而产生电力变压器安全运行的隐患, 鉴于变压器绕组变形的潜伏性和危害性, 必须积极开展变压器绕组变形工作, 预防事故的发生, 确保变压器的安全稳定运行和绕组状态的在控、可控。目前, 国网四川省电力公司检修公司使用的绕组变形测试方法是频率响应法。常用的变压器绕组变形频率响应的接线方法是扫描输入信号接线夹子接在中性点套管首端即将军帽上部的金属部分, 响应输出信号接线夹子接在高、中压套管首端即将军帽上部的金属部分。

下面将介绍频率响应法的原理, 提出用套管末屏接线取扫描输出信号的新方法替代套管首端接线取扫描输出信号的旧方法, 对新老两种方法进行基于二端口网络的原理比较, 并通过试验验证用新方

法代替旧方法的可行性即两种方法测试结果具有一致性的对比关系。

1 常用的套管首端接线法原理分析

当扫描输入信号 V_i 接线端子接在中性点套管首端即将军帽上部的金属部分, 响应输出信号 V_o 接在高、中压套管首端即将军帽上部的金属部分时, 绕组的等效网络如图 1。

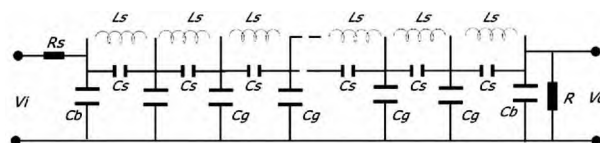


图 1 变压器绕组的二端口等值网络图
(通过套管首端取扫描输出信号)

在图 1 中, C_g 为绕组对地电容, C_b 为套管对地电容, L_s 为线圈每匝电感, C_s 为线圈匝间纵向电容, R_s 为绕组变形测试仪器扫描信号输出电阻, R 为绕组变形测试仪器的匹配电阻, V_i 是扫描输入信号, V_o 是扫描输出信号。如果变压器绕组发生了轴向、径向尺寸变化等变形现象, 势必会引起图 1 中网络的 L_s 、 C_s 、 C_g 等分布参数的变化, 导致传递函数 $H(j\omega)$ 的零点、极点分布发生变化, 从而使得频率响

应曲线发生变化。

2 通过套管末屏接线的绕组变形频率响应测试方法的初步分析

一般而言,扫描输入信号 V_i 接线夹子接在中性点套管首端即将军帽上部的金属部分,响应输出信号 V_o 接线夹子接在高、中压套管首端即将军帽上部的金属部分,与之相应的变压器绕组的等值网络图如图 1。

但如在 500 kV 变压器上用以上方法进行绕组变形频率响应测试,就会牵涉到以下问题:由于变压器器身和高、中压套管的高度,必须进行高空作业,使用高架车来将扫描输入信号 V_i 接线端子接在高压套管将军帽上部的金属部分,并要有人攀爬中压套管实现将扫描输入信号 V_i 接线端子接在中压套管将军帽上部的金属部分,这样一来就带来了高空作业的危险点隐患,并增加了作业时间,降低了作业效率。如果能通过高、中压套管末屏直接取响应输出信号 V_o ,则无疑不再需要高压套管的高架车高空作业以及对中压套管的攀爬,这样就能减少危险点,简化现场操作过程,节约操作时间,提升工作效率。

变压器套管是一个无感电容,响应输出信号 V_o 如不取自高、中压套管首端即将军帽上部的金属部分而是直接取自高、中压套管的末屏,这只是相当于改变了高、中压套管自身的无感电容 C_b 在变压器等值网络中的分布方式,与变压器绕组并联变成了与变压器绕组串联,而无源线性双口网络其它部分不发生任何变化,此时的双口等值网络如图 2。

图 2(通过套管末屏接线取扫描输出信号)中二

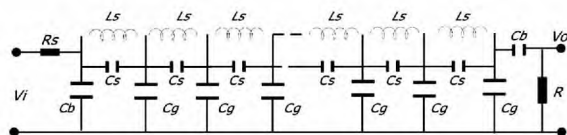


图 2 通过套管末屏取扫描输出信号的变压器

绕组的二端口等值网络图

端口网络的频率响应曲线与图 1(通过套管首端接线取扫描输出信号)中二端口网络的频率响应曲线相比到底会发生什么变化,能否通过用套管末屏接线取扫描输出信号的新方法替代套管首端接线取扫描输出信号的旧方法,将是下面通过试验研究的问题。

3 试验研究及分析

2013 年 5 月,国网四川省电力公司检修公司变电运检中心电气试验人员对某 500 kV 变电站某 500 kV 主变压器的中压侧进行了通过套管末屏接线取扫描输出信号以及通过套管首端接线取扫描输出信号两种不同的接线方法进行了频率响应法绕组变形测试,测试结果如图 3 及图 4。

从图 3 和图 4 可以看出,在 1 到 600 kHz 的区段,图 2(通过套管末屏接线取扫描输出信号)中二端口网络的频率响应曲线与图 1(通过套管首端接线取扫描输出信号)中二端口网络的频率响应曲线相比只是沿着纵坐标轴向下平移了一小段距离,但是二者的波形走向趋势规律是完全一致的,可以建立起对照关系。因此在 1 到 600 kHz 的区段,用图 2 即高、中压套管末屏取扫描输出信号的接线方法,而不是用图 1 即通过高、中压套管首端取扫描输出信

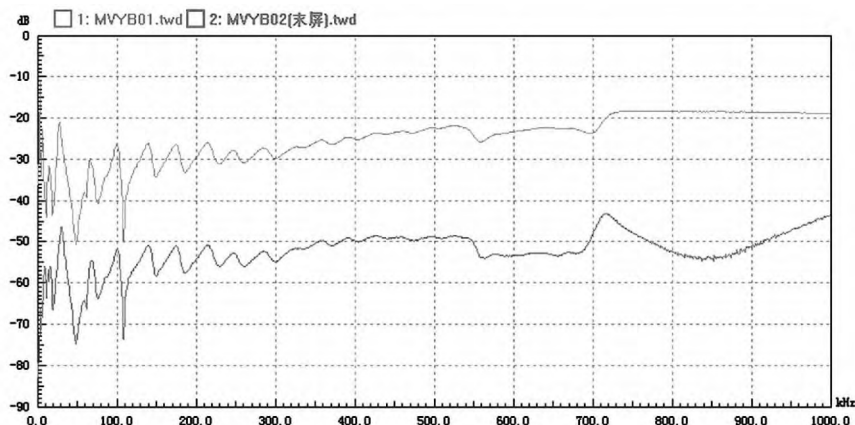


图 3 某 500 kV 主变压器 220 kV 中压侧 B 相套管首端及末屏接线两种方法测试结果比较(上部曲线为首端接线测试结果,下部曲线为末屏接线测试结果)

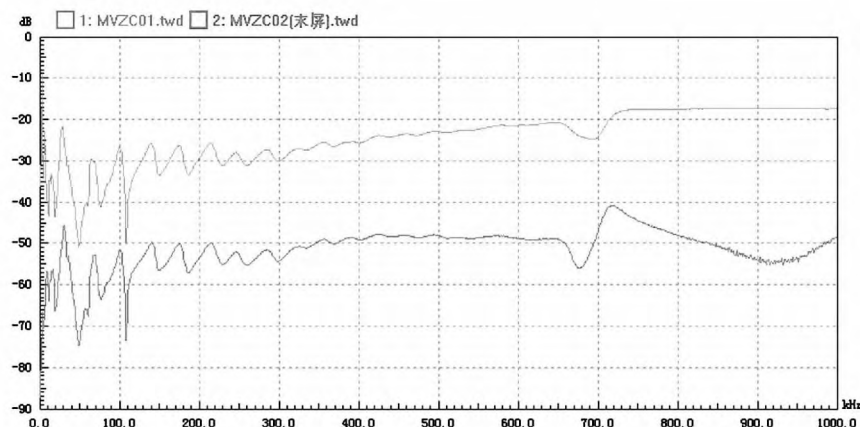


图 4 某 500 kV 主变压器 220 kV 中压侧 C 相套管首端及末屏接线两种方法测试结果比较
(上部曲线为首端接线测试结果,下部曲线为末屏接线测试结果)

号的接线方法,丝毫不会影响对绕组变形的判断和灵敏度。而绕组变形频率响应法的重点分析区段正是 1 到 600 kHz^[1],在这个重点分析区段两种接线方法各个极值点即波峰、波谷对应频率和对应幅值具有一致性和对应性的关系,因此用通过套管末屏接线取扫描输出信号的接线方法替代通过套管首端接线取扫描输出信号的接线方法具有显著的现实性、可行性。

4 结 论

基于试验结果,用套管末屏接线取扫描输出信号的方法替代套管首端接线取扫描输出信号的方法具有显著的现实性、可行性,推广这种新工艺可以避免高空作业环节,减少危险点,简化现场操作过程,节约操作时间,提升工作效率。

(上接第 51 页)

3) 串联电抗率对过电压没有太大影响,但可以有效抑制过电流的大小,防止其对设备造成较大损害。

参考文献

- [1] 陈慈萱. 电气工程基础[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [2] 张要强, 唐明贵, 胡选, 等. 35 kV 系统投切无功补偿兼滤波装置引发重燃过电压[J]. 电气安全, 2001, 30(23): 27-30.
- [3] 陈鹏云, 苏梓铭, 鲁铁成, 等. 无功补偿装置电磁暂态仿真计算[J]. 电力电容器与无功补偿, 2010, 31(5):

参考文献

- [1] 罗军川, 张星海. 电力变压器反事故措施解析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [2] 张琛. 变压器绕组变形测试方法及应用[J]. 变压器, 2007, 44(2): 35-37.
- [3] 朱维路, 贾永江, 杜深慧. 电力变压器绕组短路轴向稳定性分析[J]. 变压器, 2010, 46(9): 17-19.
- [4] 尹克宁. 变压器设计原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [5] 天威保变电器股份有限公司. 变压器试验技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [6] 天威保变电器股份有限公司. 电力变压器手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.

作者简介:

杨 洋(1982), 从事高电压输变电设备状态诊断的研究。
(收稿日期: 2014-01-06)

40-45.

- [4] 涂轶昀. 基于 PSCAD /EMTDC 软件的超高压线路操作过电压研究[J]. 上海电力学院学报, 2009, 25(4): 32-38.
- [5] 卢向东, 赵成勇. 基于 VSC-HVDC 的线路过电压抑制策略研究[J]. 高电压技术, 2008, 34(3): 25-30.
- [6] 沈黎明. 变电站补偿电容器投切过电压的仿真与测试[D]. 北京: 华北电力大学, 2009: 30-35.
- [7] 王永源. 并联电容器组中电容器损坏特征与过电压保护研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010: 30-34.
- [8] 梁思聪, 王维庆, 张新燕, 等. 基于 PSCAD /EMTDC 软件的空载线路工频过电压分析[J]. 华东电力, 2009, 37(2): 15-23.

(收稿日期: 2013-11-26)

GW16A-252DW 型隔离开关拒动故障原因分析及处理

李运涛, 刘同杰

(国网乐山供电公司, 四川 乐山 614000)

摘 要: 针对某局范围内长高 GW16A-252DW 型隔离开关拒动现象, 简单介绍 GW16A-252DW 型隔离开关结构, 结合上下导电管进行解体, 分析故障出现的原因, 并提出了相应的解决方案, 防止拒动故障的再次发生。

关键词: GW16A-252DW; 解体; 拒动

Abstract: Aiming at the failures to operate of GW 16A-252DW disconnecting switch manufactured by Hunan Changgao High Voltage Switchgear Group Co., Ltd, the structure of GW 16A-252DW disconnecting switch is introduced briefly. According to the disassembly of the upper and lower conductive tubes, the causes of the failure are analyzed and the corresponding solutions are proposed, which can avoid the failure to operate again.

Key words: GW16A-252DW; disassembly; failure to operate

中图分类号: TM564 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2014)02-0075-03

0 引言

GW16A-252DW 型单柱垂直断口隔离开关是供 220 kV 高压线路在无载流情况下进行切换, 针对被检修的高压母线及其他电气设备与带电线路进行电气隔离的三极户外高压电器, 也具有载流能力大、占地面积小等特点^[1], 因此大量 GW16A-252DW 隔离开关被应用于 220 kV 变电站母线侧。

该公司(乐山供电公司) GW16A-252DW 主要与母线连接, 针对其多次出现拒动现象, 结合 GW16A-252DW 结构, 通过对其解体分析, 发现多处锈蚀、卡涩, 在详细阐述该隔离开关的结构和制作工艺不足的基础上, 提出了相应的解决方案, 以便减少该现象的继续发生, 保证 GW16A-252DW 隔离开关在公司电网中安全稳定运行。

1 情况概述

220 kV 某变电站始建于 2005 年, 2006 年设备相继投入运行, 目前投入该站运行的 220 kV GW16A-252W 隔离开关 24 台, 多次出现合闸或分闸拒动的现象。

2012 年 6 月 11 日 220 kV 天沫二线 2652 隔离开关出现主刀 B 相与 A、C 两相合闸不一致情况, B

相合闸位置明显滞后于 A、C 两相。

2012 年 6 月 12 日, 220 kV 某站操作人员进行倒母操作, 在合 220 kV 母联 2131 隔离开关时, 出现主刀 B 相动触头卡涩、拒分的情况, 被迫将其合闸, 发现出现三相不同期, 合不到位并出现卡涩的情况。

2 GW16A-252DW 型隔离开关结构

隔离开关主闸刀结构见图 1, 运动过程由两部分运动复合而成, 即折叠运动和夹紧运动^[2]。

1) 折叠运动: 由机构驱动旋转瓷瓶作水平转动, 与旋转瓷瓶相连的一对伞齿轮带动平面双四连杆运动, 从而使下导电管顺时针转动合闸, 逆时针转动分闸, 由于调整螺杆装配与下导电管的铰接点不同, 从而使与调整螺杆上端铰接的操作杆相对于下导电管作轴向位移, 而操作杆上端与齿条固连, 这样齿条的移动便推动齿轮转动, 从而使齿轴固连的上导电管相对于下导电管作伸直(合闸)或折叠(分闸)运动。

2) 夹紧运动: 隔离开关由分闸位置向合闸方向运动的过程中, 并在接近合闸位置(快要伸直)时, 滚轮开始与齿轮箱上的斜面接触, 并沿着斜面继续运动。于是, 与滚轮相联的顶杆便克服复位弹簧的反作用力前推移, 同时动触头座内的对称式滑块增力机构把顶杆的推移运动转换成触指的相对钳夹运

动。当静触杆被夹住后,滚轮继续沿斜面上移 3~5 mm,直至完全合闸,此时夹紧弹簧的力已作用在顶杆上,分闸反之。

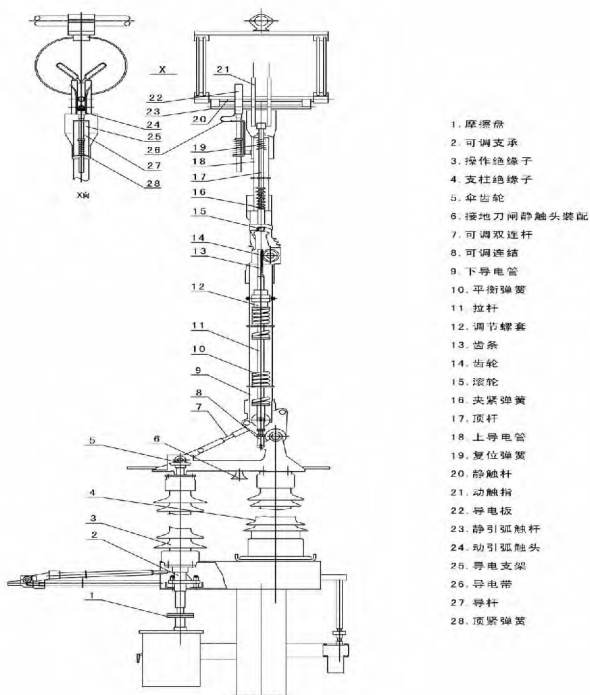


图 1 GW16A-252DW 型隔离开关结构

3 原因分析

3.1 停电后解体检查

针对母联 2131 隔离开关的卡涩、拒动的现象,停电后将本隔离开关上导电臂拆下进行解体。上导电臂主要由夹紧弹簧、复位弹簧、轴套、夹紧滚轮、动触头、顶杆等组成。解体后发现触指座内有水分积存并有积尘,弹簧、轴套大面积锈蚀,其中复位弹簧由于受弹簧压紧力的作用导致其断裂,如图 2、3 所示。



图 2 锈蚀的轴套

3.2 原因分析

针对本隔离开关出现的问题,现做如下分析。

1) GW16A-252W 隔离开关为单柱垂直断口式结构,是湖南长高高压开关集团股份有限公司产品。因



图 3 断裂的复位弹簧

其 2008 年以前产品动触头橡胶顶盖防护不好,动触头座也没有排水孔,因此导致动触头与橡胶顶盖结合处密封性能很不好,容易进水并且没有排水孔,如图 4 所示。



图 4 防水盖没有涂密封胶

2) 大量水分进入上导电管内,于是在轴套、弹簧周围容易形成一层酸性水膜,在水膜的作用下发生电化学腐蚀。如图 5 所示,铁极容易被氧化失去电子,水分子反应生成 OH^- ,而 Fe^{2+} 与 OH^- 生成 $\text{Fe}(\text{OH})_2$,其中氢氧化亚铁非常不稳定,容易与水分子和氧气反应生成 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ 即铁锈。

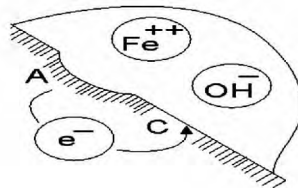


图 5 铁锈生成的原理

3) 当隔离开关在合闸位置时,触指在夹紧状态,分闸时在复位弹簧的作用下顶杆带动触指张开,已经断裂的复位弹簧由于失去能量,不能复位,导致动触指不能张开,因此出现了拒分现象。另由于夹紧弹簧已经锈蚀,复位弹簧的断裂,导致动触头在合闸操作时顶杆推力不够,动触头无法夹紧,造成拒合。

4) 由于实行状态检修,其中隔离开关投运 1 年首检后就没有检修,隔离开关因长期没有检修,造成弹簧、顶杆、轴套无润滑油覆盖并锈蚀,最终造成操作卡涩、拒动的现象。

5) 由于长期没有进行倒母操作,隔离开关传动部分没有有效运动,传动部分因长期不操作造成积污、锈蚀和卡涩,最终出现操作卡涩、分闸、合闸拒动的现象。

6) 本系列的 GW16A 型隔离开关由于在连接轴内渗入水分,造成齿轮和齿条锈蚀,导致隔离开关分合闸不到位、卡涩、不同期等现象。

4 预防措施

为了防止公司同系列 GW16A 型隔离开关发生同类型问题,建议采取以下预防措施。

1) 针对防水功能差的原因,对防水罩与触指接触部分、螺栓连接处、顶杆滚轮防水罩部分涂抹防水胶,并在触指座挖开两个排水孔,这样水分在受热后变成水蒸气从排水孔排出。

2) 从锈蚀的原理角度,主要是控制或避免铁发生电化学反应:①保持导电管内干燥;②对弹簧表面涂抹二硫化钼锂基润滑脂;③将复位弹簧的轴套更换成镀锌的材质。

3) 检查复位弹簧和夹紧弹簧的时候,务必测量弹簧自由松弛时候的长度,应符合厂家要求,以防弹力不足,导致分合不到位。

4) 加强对 GW16A 型隔离开关红外测温,防止弹簧弹力不足,在状态检修制定计划时,建议对此类型隔离开关不宜延长检修周期,按时进行检修。

5) 重点检查连接轴滚轮的接触是否紧密,滚轮是否磨损,上导电管顶杆露出部分距离是否合适,因为这将决定最终触指的夹紧度。

6) 检修本类型隔离开关时,应手动进行分合,确认无卡涩再做电动分合 5 次,确保分合到位并且同期合格,检修过程中重点检查传动部分是否灵活,密封部分是否失效。

7) 由于本类型隔离开关下导电管无法做到全密

封,或多或少会有水分渗入下导电管内腐蚀拉杆和平衡弹簧,因此检修时应重点关注下导电管作操作是否卡涩、灵活,若出现问题,应及时进行解体处理。

5 结 论

通过对该类型隔离开关的大修及解体检查,发现不少问题是在运行中不能及时发现的,如导弹簧锈蚀断裂、顶杆锈蚀、转动部分卡涩等,这些缺陷都非常容易恶化,造成严重故障。隔离开关机械回路的防尘、防雨能力较差,极易引发机械故障。为防止此类高压隔离开关发生故障,保证安全运行,要在日常巡视操作中注意观察其状况,发现异常及时处理,避免缺陷恶化造成故障。应根据隔离开关运行环境具体运行状况,确定其解体大修年限及小修维护检查项目。只有把握好隔离开关检修维护的关键问题,才能使隔离开关设备的安全运行得到保障。

参考文献

- [1] 朱勇,王雁飞,马庆君. GW16-252 隔离开关拐臂发热原因分析及处理方案[J]. 中国电力教育, 2008(s1): 166-167.
- [2] 孙亚辉. GW16 型隔离开关的改造原因分析[J]. 华中电力, 2011, 24(6): 21-22.
- [3] 柳舜水,金勇. 高压隔离开关接触电阻超标原因分析及改造[J]. 内蒙古电力技术, 2012, 30(2): 86-88.
- [4] 肖辉,吴兴斌,曾祥君. GW16/17 型隔离开关在运行中出现的问题及解决方案[J]. 长沙理工大学报: 自然科学版, 2005, 20(3): 18-19.
- [5] 孟辉,李杰. GW16、GW17 型隔离开关缺陷处理[J]. 东北电力技术, 2006(3): 30-32, 33.

作者简介:

李运涛(1968),高级技师,现从事变电检修管理工作;
刘同杰(1984),硕士,现从事变电检修工作。

(收稿日期:2013-11-04)

(上接第 17 页)

- [8] 秦贵锋,王明,张进. 智能变电站自适应备自投应用[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(6): 111-115.
- [9] 汤大海,杨合民,刘春江,等. 一种自适应的扩大内桥备自投装置[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(15): 107-111.
- [10] 赵家庆,霍雪松,钱科军,等. 基于功率负荷自适应的

备自投实现方法[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(3): 50-53.

作者简介:

王红(1959),工程师,研究方向为电力系统调度与控制。

(收稿日期:2013-10-11)

对某 35 kV 开关柜绝缘缺陷造成全厂停电的事故分析

陈海平

(华能海南发电股份有限公司 海南 海口 570105)

摘 要: 分析了一场由于开关柜绝缘缺陷而造成某发电厂全厂停电的事故。首先介绍了事故的发生经过以及现场检查情况。其次,从保护动作行为和相间短路两个方面对事故原因进行了分析。分析表明,开关柜工作环境、断路器绝缘状态以及消弧方式是导致相间短路的可能原因。最后,针对事故原因的分析给出了相应的整改意见,对预防类似事故的发生有一定参考意义。

关键词: 开关柜绝缘; 击穿; 放电; 相间短路

Abstract: An outage accident which is resulted from the insulation defect of a 35 kV switchgear is analyzed. Firstly, the process of the whole accident and the details of onsite inspection are introduced. Secondly, the accident is analyzed in terms of the protection performance and interphase short-circuit. The working environment of the switchgear, the insulation status of circuit-breaker and the manner of the arc suppression are recognized as the key reasons accounting for this accident. In the end, some measures that are helpful for preventing the similar accidents are put forward.

Key words: switchgear insulation; breakdown; discharge; interphase short-circuit

中图分类号: TM855 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2014)02-0078-03

0 引言

厂用电系统是发电厂的重要组成部分,厂用电事故不但会造成主机停役、全厂停电等自身严重的经济损失,还可能破坏电力系统的运行稳定,甚至电网瓦解,而大面积停电又将引起社会不安定。因此,防范全厂停电事故意义重大,而对其危害最大、后果最严重的则是发电厂用开关柜的烧毁事故,虽然有关发电厂对用电系统和设备存在的问题进行了认真分析和试验,并采取了相应的改进和改造措施,起到一定的遏制效果,但各省范围内发电厂用开关柜的烧毁事故仍年年都有发生。据不完全统计,厂用开关柜事故原因主要有以下几类:绝缘缺陷、载流部分过热、开断事故、小动物、误操作以及外部短路等^[1]。

国内的 35 kV 开关柜主要有箱式固定柜 XGN-40.5、手车柜 GBC-40.5、金属铠装柜 KYN-40.5 以及充气柜等种类,其结构形式主要有箱型、间隔型、铠装型 3 种。按绝缘方式划分主要有空气绝缘、固体复合绝缘、气体绝缘等^[2]。近年来,35 kV 高压开关柜广泛应用于变电站、发电厂,其技术在近 10

年来有了较大进步,但在设计、安装和运行维护等方面存在着不同程度的问题,因而事故率比较高。发电厂中开关柜事故起因涉及面较广,而且危害大^[3-4]。

保电网必须保大机组,保机组必须保厂用电。为保证厂用电系统的安全可靠运行,必须努力避免厂用开关柜的损坏事故。因此,下面针对 2012 年 7 月某发电厂发生的一起因 35 kV 高压开关柜故障导致主变压器开关跳闸引起全厂停电的事件进行分析,并提出相应整改措施,为各发电厂的可靠运行提供参考。

1 事故情况

首先对事故发生前的运行环境、操作情况及故障过程进行介绍,然后对事故现场进场勘查并查找故障点。

1.1 事故经过

事件发生前,天气晴,一期 110 kV 主变压器带 35 kV 母线运行,见图 1。事故发生时变电站无操作。

2012 年 7 月 13 日 22 时 01 分,第 3 组风机

因所导致的事故分析,主要从开关柜的运行维护、定期轮换、系统接地方式以及发电厂停电事故应急预案的良好执行等方面提出整改防治措施,避免类似事故的再次发生,尽可能保证全厂停电情况下的人员以及各类设备的安全。

1) 改善开关室及柜内运行环境:改善开关室及柜内运行环境,必要时在开关室内配置大功率除湿设备,安装空调。定期对开关室通风及除湿设备进行检查,特别是在雨季和霉雨气象情况下对室内设备除湿效果的监测和检查,确保开关室的通风及除湿设备运行正常。

加强开关柜的运行维护,当开关柜内断路器退出运行时,及时将该开关柜内的除湿加热装置投入运行。

2) 强化设备定期轮换制度:严格执行设备定期轮换制度,认真执行运行规程,确保设备安全可靠地投入运行,避免发生因某一设备长期处于备用状态而出现受潮、积污等降低设备绝缘水平的现象。

3) 完善 35 kV 系统运行方式:综合考虑发电厂运行环境以及设备运行维护情况,为避免再次发生类似系统谐振过电压事故,建议对该发电厂 35 kV 系统(不接地系统)的消弧设计方式进行修改,只保留经消弧线圈接地方式运行,取消消弧消谐装置。

4) 落实发电厂停电事故应急预案:为保证由于各种因素引发的全厂停电事故情况下的人员及设备安全,有必要从组织机构层面明确人员职责范围,定

(上接第 13 页)

响。同时可以发现高周策略由于启动时间较早,因此效果更为明显。

参考文献

- [1] 周佩朋,项祖涛,杜宁,等.西北 750 kV 电网合空变导致青藏直流闭锁故障分析[J].电力系统自动化,2013,37(10):129-133.
- [2] 种芝芝,栗小华,刘宝宏.西北电网主变充电引起青藏直流闭锁的原因分析及对策[J].电力建设,2013,34(3):88-91.
- [3] BRUNKE J H, FROHLICH K J. Elimination of Transformer Inrush Current by Controlled Switching —— Part 1: Theoretical Consideration [J]. IEEE Trans. on Power Delivery 2001,16(2):276-280.
- [4] BRUNKE J H, FROHLICH K J. Elimination of Trans-

former Inrush Current by Controlled Switching —— Part 2: Application and Performance Considerations [J]. IEEE Trans on Power Delivery 2001,16(2):281-286.

4 结 语

35 kV 高压开关柜是发电厂的重要设备之一,其运行状态对发电厂乃至电力系统的安全可靠运行有着重大影响。

通过对这起 35 kV 开关柜绝缘缺陷导致主变压器开关跳闸引起全厂停电的事件原因进行分析,就开关柜运行维护、轮换制度、35 kV 系统接地方式以及发电厂停电事故应急预案的全面执行等方面提出整改及防治措施,供各发电厂作为参考,希望可以对预防类似事故再次发生起到一定的作用。

参考文献

- [1] 戚永康.浙江省火力发电厂厂用电高压开关柜事故分析[J].浙江电力,1997(2):6-10.
- [2] 朱雪松.几起典型的 220 kV 变电站 35 kV 开关柜故障及其防治对策[J].湖州师范学院学报,2011(33):217-219.
- [3] 朱根良.浅议中压开关柜事故调查中的故障分析[J].高压电器,2002,38(5):62-63.
- [4] 崔成恕,高华.金属封闭开关设备的发展浅析[J].高压电器,2003,39(2):18-22.
- [5] 张聘,高丕俭.防范全厂停电事故[J].电力安全技术,2005(7):44-45. (收稿日期:2013-11-29)
- [5] POVH D, SCHULTZ W. Analysis of Overvoltage Caused by Transformer Magnetizing Inrush Current [J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1978, 97(4): 1355-1365.
- [6] 谢达伟,洪乃刚,傅鹏.一种变压器空载合闸励磁涌流抑制技术的研究[J].电气应用,2007,26(3):34-38.

作者简介:

滕予非(1984),博士,工程师,研究方向为电力系统及其新型输电的分析与控制;

汤凡(1983),硕士,助理工程师,研究方向为电力系统稳定与控制;

魏巍(1984),博士,工程师,研究方向为电力系统稳定与控制。 (收稿日期:2013-12-16)

电力企业厂界噪声监测中背景噪声测量和修正的探讨

叶春燕 兰新生 王志高 周易谦 林巧红 刘 虹

(国网四川省电力公司电力科学研究院 四川 成都 610072)

摘 要: 在电力企业厂界噪声监测工作中,存在背景噪声难以测量和修正的问题。提出了点声源随距离衰减模型,并基于“非同时性”、监测指标、运行工况等对测量方法进行了改进。针对被测噪声和背景噪声的差值小于 3 和不为整数的噪声值、稳态或非稳态的情况进行了修正,对实际工作具有一定的指导作用。

关键词: 厂界噪声; 背景噪声; 修正; 等效声级; 频谱特性分析

Abstract: In the actual boundary noise monitoring of electric power enterprises, the problems exists that the background noise is difficult to be measured and corrected. A sound source level with distance attenuation model is proposed, and the measurement method is improved based on the "non-simultaneity", monitoring indicators, operating condition and so on. Some corrections are carried out for the measured noise and background noise which is less than 3 and for the noise value which is not an integer as well as the steady and unsteady noise, which has a guide meaning for the actual work.

Key words: boundary noise; background noise; correction; equivalent sound level; spectrum feature analysis

中图分类号: X839 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)02-0081-05

0 前 言

在环境纠纷监测、环保设施竣工验收、噪声管理监测中,厂界噪声的测量不可忽略,而其中背景值的测量和修正至关重要。尽管 GB 12348-2008《工业企业厂界噪声排放标准》对背景噪声的处理较为严谨、规范,但在实际监测过程中仍存在一些无法解决的问题。下面将结合实际经验,对背景噪声的测量和修正进行研究探讨,提出了解决方案。

1 背景噪声的测量

1.1 测量方法研究现状

按照 GB 12348-2008 的规定,测量背景噪声应选择被测企业停止对外排放噪声时测定^[1],但实际操作难以实现。根据文献资料,测量背景噪声主要有以下几种方法^[2]。

1) 厂界外环境受稳态噪声源影响,采取被测声源停止工作的状态下,在原厂界噪声监测点位上测该点的背景噪声,这样测出的背景噪声是最真实的。但这种方法需要其他声源改变不太大才行,同时背景值靠人为判断和测定,不够合理和客观。

2) 厂界外环境受非稳态噪声源影响,可在附近寻找不受被测声源影响且其他声源与被测声源测量保持一致的参考点。

3) 前两款条件均无法满足时,建议采用厂界监测值中的累积百分声级 L_{90} 为该点的噪声背景值。但这种方法如果项目建设周期长,背景声源发生变化,监测结果就不具有合理性。

4) 标准规定,测量时段与被测声源测量的时间长度相同。而在实际操作中,无法达到“同时”的要求,必然存在失准^[3,4]。测量数据误差的唯一原因是背景噪声实测误差^[5],而“非同时性”占有主导地位。研究表明,只有当背景噪声为稳态;起伏值在 10 dB 之内或者被测声源比背景噪声高 10 dB 以上,背景噪声测量噪声的失准方可忽略。

1.2 测量方法改进的研究

1.2.1 点声源随距离衰减模型

如果上述方法均不能满足监测结果要求,可考虑点声源随距离衰减模型,当距厂界外 1 m 时^[6]为

$$L_p = L_w - 20 \lg r - 8 \quad (1)$$

式中 L_p 为距离点声源 r 米处的声压级, dB(A); L_w 为点声源的声功率级, dB(A); r 为点声源距测点的距离, m。

通过公式(1)可以计算出随距离衰减的声压

级,这种方法可用于背景值干扰较大或测量值与背景值相近且小于 3 dB(A) 的情况。计算结果如表 1 所示。

表 1 噪声随距离衰减值

离开声源 距离 /m	随距离衰减声级 /dB(A)				
1	110	100	90	80	70
10	90	80	70	60	50
32	80	70	60	50	40
50	76	66	56	46	36
100	70	60	50	40	30
150	66	56	46	36	26
300	60	50	40	30	20
600	54	44	34	24	14
1 000	50	40	30	20	10
1 500	46	36	26	16	6

当厂界外环境受非稳态噪声源影响,可在附近寻找不受被测声源影响且其他声源与被测声源测量保持一致的参考点,它离待测声源的距离可以参照表 1。监测点选取后,可以同步测量其噪声和离声源距离。查找表 1,可得出相应的声压级,即为该点的背景噪声。如在图 1 中,已知 $L_p(1\text{ m}) = 50\text{ dB}$, $L_w = 58\text{ dB}$ 。当 $r = 9\text{ m}$, $L_p(10\text{ m}) = 30\text{ dB}$ 。

1.2.2 测量方法改进

1) 基于“非同时性”考虑

当无法分清厂界噪声和背景噪声各自的贡献时,应同步监测。同时,两者测点应选取在不同地方。当被测噪声和背景噪声值相差在 10 dB 以内时,监测方法改进如下^[7]。

若背景噪声为周期性噪声(周期为 T_1) 时为

①当排放噪声为稳态噪声,背景噪声和排放噪声测点应布设在不同地方(下同);两者测量时间应大于 T_1 ;

②当排放噪声为周期性噪声(周期为 T_2) ,测量时间应取 $\max(T_1, T_2)$;

③当排放噪声为随机噪声 T_x ,测量时间应取 $\max(T_1, T_x)$ 。

若背景噪声为随机噪声(周期为 T_s) 时为

①当排放噪声为稳态噪声,两者测量时间应取 T_s 。 T_s 的时间应遵循 GB 12348-2008。

②当排放噪声为周期性噪声(周期为 T_3) ,测量

时间应取 $\max(T_s, T_3)$;

③当排放噪声为随机噪声 T_x ,测量时间应取 $\max(T_x, T_s)$ 。

2) 基于监测指标的考虑

除标准规定的 Leq ,还应该测量 $L_{\max}$ 、 $L_{\min}$,来说明厂界噪声的特性、波动情况、稳态或非稳态噪声。

3) 基于生产负荷、运行工况的考虑

生产负荷越大、设备运行数量越多,则厂界噪声越大。在实际监测过程中,生产负荷需保证在设计限制的 80% 以上^[8]。

4) 基于测量时间的考虑

对于厂界稳态噪声,测量时间为 1 min;对于周期性噪声,测量时间为整个周期;对于施工场界噪声,测量时间为 20 min^[9]。

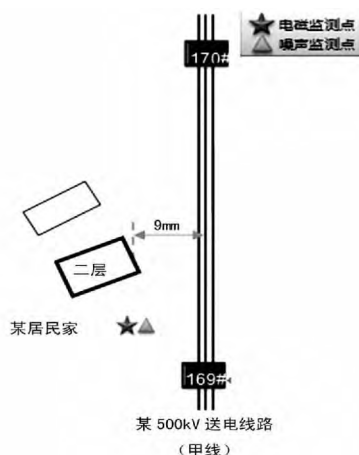


图 1 某 500 kV 送电线路噪声监测示意图

2 背景噪声的修正

按照 GB 12348-2008,背景噪声修正值表见表 2。

表 2 只分析了差值大于 3 dB(A) 时的情况,而且只能为整数,而在实际测量过程中,往往会遇到差值小于 3 dB(A) 或者是小数的情况。

表 2 背景值修正表

差值	修正值
3	-3
4-6	-2
7-9	-1

2.1 修正理论

等效声级^[10]:

表 3 声级差≤3 dB(A) 的修正值表

名称	数 值														
ΔL	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1.0	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
β	-16.4	-13.5	-11.8	-10.6	-9.6	-8.9	-8.3	-7.7	-7.3	-6.9	-6.5	-6.2	-5.9	-5.6	-5.3
ΔL	1.6	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0
β	-5.1	-4.9	-4.7	-4.5	-4.3	-4.2	-4.0	-3.9	-3.7	-3.6	-3.5	-3.3	-3.2	-3.1	-3.0

表 4 声级差>3 dB(A) 的修正值表

名称	数 值														
ΔL	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5	3.6	3.7	3.8	3.9	5.0	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5
β	-2.9	-2.8	-2.7	-2.7	-2.6	-2.5	-2.4	-2.3	-2.3	-1.7	-1.7	-1.6	-1.5	-1.5	-1.4
ΔL	5.6	5.7	5.8	5.9	6.1	6.2	6.3	6.4	6.5	6.6	6.7	6.8	6.9		
β	-1.4	-1.4	-1.3	-1.3	-1.2	-1.2	-1.2	-1.1	-1.1	-1.1	-1.0	-1.0	-1.0		

表 5 某 110 kV 变电站厂界噪声监测

测点	噪声监测 结果(夜间) Leq /dB(A)	背景噪声 监测结果 Leq /dB(A)	测点布置示意图
1	56.52	52.78	
2	57.34	56.54	
3	56.27	55.82	
4	57.50	50.78	
5	57.34	51.23	
6	56.52	51.45	
7	54.03	50.23	
8	53.61	49.79	

备注: 2 号、3 号测点受建筑施工噪声影响。

表 6 2、3 号测点修正后的噪声值

测点	噪声监测结果 Leq /dB(A)	背景噪声				
2	57.34	56.54	55.78	56.27	55.43	57.02
	ΔL	0.8	1.56	1.07	1.91	0.32
	β					-11.8
	修正后噪声值					45.22
3	56.27	55.82	54.46	55.32	56.01	56.21
	ΔL	0.45	1.81	0.95	0.26	0.06
	β					-16.4
	修正后噪声值					39.81

$$Leq = 101g\left(\frac{1}{T} \int_0^T 10^{0.1L_A} dt\right) \tag{3}$$

式中, T 为测量时间段; L_A 为瞬间 A 声级; Leq 为等效声级。

在等时间间隔 Δt 内, 等效声级可用公式(4)表

示为

$$Leg = 101g\left(\sum 10^{0.1/L_A}\right) \tag{4}$$

通过推导, 可求出测量值和背景值之差 ΔL 与修正值 β 之间的关系为

$$\Delta L = -101g(1 - 10^{-0.1\beta}) \quad (5)$$

2.2 差值的几种不同情况

2.2.1 差值小于 3 dB(A) 的情况

通过公式(5)可以求出差值与修正值之间的关系,计算结果见表 3。

从表 3 可以看出,当差值为 3 dB(A) 时,待测噪声和背景噪声实际上相等。当待测噪声值和背景噪声值之差小于 3 dB(A) 时,待测噪声值比背景噪声值要低,其修正值只能用小于测量值 3 来定性表示。

2.2.2 差值为 3.1~3.9; 5.0~5.9; 6.1~6.9 的情况

计算结果见表 4。

2.2.3 背景噪声为非稳态噪声

被测声源为非稳态噪声,测量时段与被测声源测量的时间长度相同。通过计算发现,非稳态噪声的测量时间为 20 min,可以使测量结果的抽样误差小于 0.5 dB(A),满足精度的要求^[11],同时在噪声频谱特性中可以将重复出现的低声级平均值作为背景噪声值来修正。如图 2 所示。

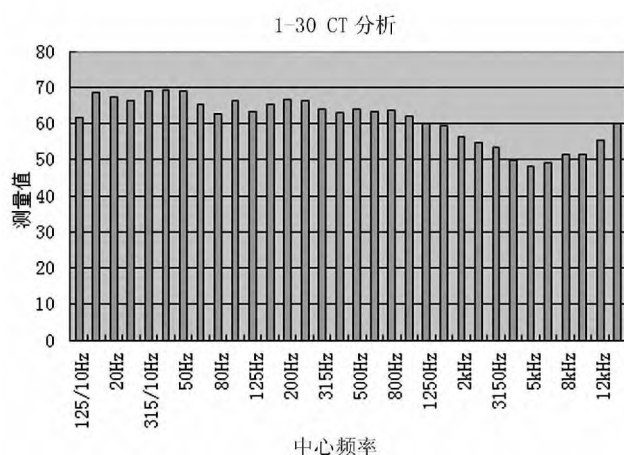


图 2 噪声频谱特性

2.2.4 背景噪声为稳态噪声

被测声源为稳态噪声,应测量 1 min 的等效声级。在噪声频谱特性中也可以将重复出现的低声级平均值作为背景噪声值来修正。当 ΔL 小于 3 dB(A) 时,可增加测量次数,然后修正,取差值最小的一组数据为测量结果。同时,可以用夜间测量代替昼间测量,减少背景噪声的影响,使差值大于 3 dB(A)。举例如下,表 5 为某 110 kV 变电站厂界噪声监测结果。

由于工况在一定的情况下变压器噪声为稳态噪声。在表 5 中 2、3 号测点受建筑施工噪声影响,导

致背景噪声偏大,使得 ΔL 小于 3 dB(A)。因此在 2、3 号测点增加夜间监测次数,通过计算得出修正后的噪声值如表 6 所示。

3 分析讨论

差值不同,背景噪声对环境的影响表现出的差异性较大。

1) 当差值大于 10 dB(A) 时,主要出现在建筑施工噪声和未经治理的噪声源中。这种情况不做修正,测量值即为实际值。

2) 当差值为 3 dB(A) ~ 10 dB(A) 时,这种情况出现在噪声源不强或噪声源经过治理后,在差值为 3.1~6.5 dB(A) 时,应对数据进行修约后查表或直接采用公式计算,其他情况则按表 1 修定。

3) 当差值小于 3 dB(A) 时,应重新监测,如果差值仍然小于 3 dB(A),则应重新选择监测时段,反复测量^[12]。如果这样难以加大 ΔL ,背景噪声的修正值只能定性表示,作为实际值的上限参考值如果超标,则视为背景值太高,无法进行测量。可以背景值代替实际值,并备注说明。或者用式(5)计算。

4) 当背景噪声为非稳态噪声或稳态噪声时,在频谱特征曲线中可以将重复出现的低声级平均值作为背景噪声值来修正。

4 结 论

通过上述的分析讨论,对于背景噪声的探讨结论如下。

1) 当采用常规方法无法达到背景噪声的精度要求时,可考虑点声源随距离衰减模型或将监测方法改进,尽量满足标准所规定的“同时”要求。

2) 当差值小于 3 dB 时,应采取措施降低背景噪声,尽量避免测量值与背景值之差小于 3 dB。

3) 充分利用频谱特性曲线来修正背景噪声值。

4) 对于环境噪声仲裁监测,如果背景值修正后无法达到标准,会引起很大争议,因此建议相关部门重新修订标准,使其更具有科学性、实践性、可操作性。

5) 规范厂界噪声的监测,从测量人员的监测资格、声级计的计量检定合格、操作规范性严格把关,使数据具有真实性和代表性。

参考文献

- [1] GB 12348 - 2008 ,工业企业厂界环境噪声排放标准 [S].
- [2] 中国环境监测总站.《工业企业噪声排放限值及测量方法》讨论稿[R].
- [3] 金庆先. 背景噪声在边界噪声测量中的影响及修正 [J]. 中国环境监测 2000 ,16(2) : 110.
- [4] 杨云 ,王庭佛. 关于噪声测试中背景噪声修正方法的探讨 [J]. 噪声与振动控制 2000(1) : 24 - 26.
- [5] 戴建红. 工业企业厂界噪声监测过程中的问题探讨 [J]. 中国环境监测 ,2006 ,22(2) : 34 - 36.
- [6] 彭守礼 ,杨捷. 背景噪声的测量和用于修正计算的问题分析及建议 [J]. 环境导报 ,1997 ,14 (5) : 17 - 19.
- [7] 徐建平 ,翁祖峰. 厂界噪声背景值修正 [J]. 环境监测管理与技术 2005 ,17(6) : 46.
- [8] 林汉杰 ,方俊雄. 厂界噪声背景值修正问题的讨论 [J]. 中国环境监测 2001 ,17(2) : 54 - 56.
- [9] 敖春. 如何实施工业企业厂界噪声的规范性监测 [J]. 环境科学与技术 2003 ,26(B12) : 10 - 11.
- [10] GB/T 3222. 11 - 2006 ,声学环境噪声的描述、测量与评价第 1 部分: 基本参量与评价方法 [S].
- [11] ISO1996) 1: 2003 ,Acoustics - Description , Measure - ment and Assessment of Environmental Noise ,Part 1: Basic Quantities and Assessment Procedures [S].
- [12] 马大猷. 噪声控制学 [M]. 北京: 北京科学出版社 , 1987.

作者简介:

叶春燕(1983), 硕士研究生, 工程师, 主要从事电磁环境监测及治理工作。

(收稿日期: 2013 - 12 - 15)

(上接第 44 页)

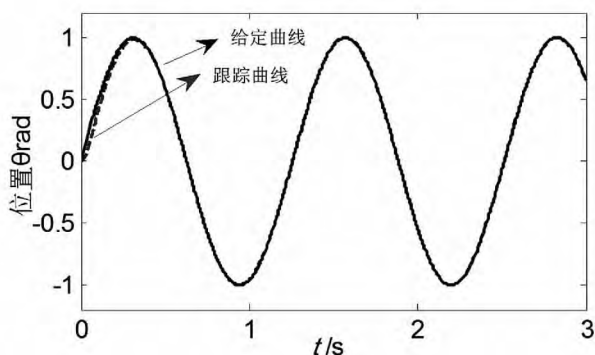


图 8 参数扰动 50% 时模糊滑模控制的位置跟踪

由图 7 可知 ,采用模糊滑模控制直流伺服电机能很好地响应给定位置 ,且响应速度快 ,几乎无稳态误差。由图 8 可以看到 ,当有电机参数扰动 50% 时 ,模糊滑模变结构控制系统能适应系统参数的变化 ,响应时间很快 ,并能很快跟踪上 ,由此可见 ,所设计的模糊滑模控制系统具有较强的鲁棒性。

4 结 语

通过对直流伺服系统分析 ,并对其设计了滑模变结构控制策略 ,设计方法简单 ,易于实现。从仿真分析可知 ,滑模变结构控制能较强抑制参数扰动 ,自适应强。另外合理地选择切换函数和控制律参数 ,

滑模变结构控制系统具有快速性好、无静差的优良动态性能 ,而且系统参数摄动时 ,具有很好的鲁棒性。并且采用模糊滑模控制大大减弱了系统的抖振现象。

参考文献

- [1] 王丰尧. 滑模变结构控制 [M]. 北京: 机械工业出版社出版 ,1995.
- [2] 杨树兴 ,李擎 ,苏中 ,等. 计算机控制系统——理论、技术与应用 [M]. 北京: 机械工业出版社 2007.
- [3] 李晓秀 ,章兢. 滑模变结构控制及其在直流伺服系统中的应用 [J]. 湖南工程学院学报: 自然科学版 2004 , 14(3) : 5 - 7.
- [4] 安树 ,杨新霞. 无刷直流电动机模糊滑模变结构控制的研究 [J]. 计算机仿真 2010 ,27(4) : 172 - 175.
- [5] 黄飞. 永磁同步电机位置伺服系统的滑模控制 [J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版 ,2011 ,30(4) : 860 - 863.
- [6] 张涌松 ,舒志兵. 基于永磁同步电机的滑模变结构仿真研究 [J]. 机床与液压 2008 ,36(7) : 288 - 292.

作者简介:

冉 鸿(1975), 电气工程师, 研究方向为电力系统自动化、清洁能源与并网技术;

罗 洪(1972), 电气工程师, 研究方向为清洁能源与并网技术。

(收稿日期: 2013 - 11 - 07)

绝缘油中溶解气体组分含量的 气相色谱测定(溶解平衡法)浅析

胡仕红¹ 鲁登峰² 王 杰¹ 刘 虹¹

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院 四川 成都 610072;

2. 四川电力设计咨询有限责任公司 四川 成都 610072)

摘 要: 目前绝缘油中溶解气体组分含量的测试基本都采用了气相色谱测定(溶解平衡)法,即机械振荡法,但国家标准、目前的培训教材未对一些关键部分进行说明,导致一部分油务工作人员不能正确理解标准和处理所遇到的问题,降低了测试数据的准确性与可靠性。根据多年的工作经验并结合理论,对油中溶解气体的最小检测浓度、峰的识别与处理、平衡气的加入量、用注射器所取油样在运输过程中产生气泡后的处理等问题进行了阐述,并提出了处理措施,对进一步规范和提高测试水平,有效保证设备的安全运行有一定的意义。

关键词: 气相色谱; 溶解平衡法; 最小检测浓度; 峰的识别与处理; 平衡气的加入量; 气泡的处理

Abstract: At present, the determination of component contents of gases dissolved in insulating oil always uses gas chromatography method (dissolution equilibrium method), that is, mechanical vibration analysis. But there are some key parts are not described in the national standards and the current training materials, which leads to a part of the oil workers can not correctly understand and deal with the problems encountered, and reduce the accuracy and reliability of test data. Based on working experiences and combined with the theory of chromatographic method, the minimum detectable concentration, peak identification and treatment, balance gas volume, the treatment of bubbles caused by sampling with syringe during the transportation are described and the treatment measures are proposed, which is of a certain significance for the further standardization and improvement of the test level, and for ensuring the safe operation of equipment effectively.

Key words: gas chromatography; dissolution equilibrium method; minimum detectable concentration; peak identification and treatment; balance gas volume; processing of bubbles

中图分类号: TM855 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2014)02-0086-05

利用气相色谱法分析绝缘油中溶解气体组分及含量在中国已有多年的使用经验,是充油电气设备出厂检验和运行过程中监督判断设备潜伏性故障的重要手段。目前依据的标准有 GB/T 17623-1998《绝缘油中溶解气体组分含量的气相色谱测定法》、GB/T 7252-2001《变压器油中溶解气体分析和判断导则》。GB/T 17623-1998 侧重于测试方法,GB/T 7252-2001 既有测试方法,又有对测试结果的分析与判断,且重点是对测试结果的分析与判断。

两种标准关于测试方法有统一的部分,也有不统一的部分,同时两种标准都未对一些关键部分进行说明(如油中溶解气体的最小检测浓度的计算、峰的识别与处理、采用溶解平衡法时平衡气的加入量、用注射器所取油样在运输过程中产生气泡后怎样处理等),导致一部分油务工作人员不能正确地

理解和处理,降低了数据的准确性与可靠性。再此,根据多年的工作经验并结合理论对以上等问题进行阐述,以进一步规范和提高油务人员的测试水平,更加有效地保证设备的安全运行。

1 油中溶解气体最小检测浓度的计算及应用

气体在绝缘油中的溶解能力与压力、温度、绝缘油的种类等都有关^[1],不同的油样在相同的压力与温度下对气体的溶解能力可能不相同,相同的油样在不同的压力与温度下对气体的溶解能力也可能不相同,同时由于不同的气体在绝缘油中其溶解系数(奥斯特瓦尔德系数)也不同,因此油中溶解气体的最小检测浓度并不是一个固定值,而是每一个油样

其溶解气体具有不同的最小检测浓度。为此 GB/T 17623-1998 和 GB/T 7252-2001 对色谱仪的性能需达到的要求分别针对出厂设备、运行中设备油中溶解的最小检测浓度作了要求(见表 1)。这点也是很多工作人员容易混淆的地方,认为油中溶解气体的最小检测浓度是一个固定值。从表 1 可以看出,由于新设备油中的含气量比运行设备油中的含气量少,因此对出厂(交接)试验的要求比对运行试验的要求严格,同时对出厂(交接)试验的要求 GB/T 17623-1998 比 GB/T 7252-2001 严格(同时 GB/T 17623-1998 规定运行设备油中 C_2H_2 的最小检测浓度为 $1\mu\text{L/L}$ 也明显不合理,如 1 台 500 kV 变压器在投运前无 C_2H_2 ,而在投运后短时间内产生了 $0.9\mu\text{L/L}$ C_2H_2 ,说明设备异常,但 $0.9\mu\text{L/L}$ 小于 $1\mu\text{L/L}$ 分析人员可以视为未检出)。很明显,色谱仪既然能满足出厂(交接)试验要求,也就肯定能满足运行试验要求,因此在实际工作中可按照 GB/T 17623-1998 出厂(交接)试验的要求执行即可。

表 1 最小检测浓度的规定

气体 组分	最小检测浓度(20℃)/(μL·L ⁻¹)			
	GB/T 17623-1998 ^[2]		GB/T 7252-2001 ^[3]	
	出厂、 交接试验	运行 试验	出厂 试验	运行 试验
C_2H_2	0.1	1	≤0.1	≤0.1
H_2	2	5	≤2	≤5
CO	5.0	25	≤25	≤25
CO_2	10	25	≤25	≤25

那么实验时,如果最小检测浓度满足 GB/T 17623-1998 出厂(交接)试验的要求,当检测结果小于该组分的最小检测浓度时,应舍去,即报告中该组分结果为 0 或未检出,反之,应为检测结果值。

关于油中溶解气体最小检测浓度的计算可采用以下两种方法。

方法 1: 根据定义最小检测量就是指使检测器恰好能产生 2 倍噪音峰高(2N, mV)的进样量。检测量等于样品的浓度($C_{\text{样}}\mu\text{L/L}$)与进样量($V_{\text{样}}\mu\text{L}$)的乘积。设样品检测量为 $C_{\text{样}}V_{\text{样}}$,产生的峰高为 $H_{\text{样}}$,则最小检测浓度($C_{\text{min}}\mu\text{L/L}$)的计算公式为

$$C_{\text{min}} = \frac{C_{\text{样}} V_{\text{样}}}{H_{\text{样}} V_{\text{min}}} 2N$$

当进样体积相等时,即 $V_{\text{样}} = V_{\text{min}}$,则

$$C_{\text{min}} = \frac{C_{\text{样}} 2N}{H_{\text{样}}} \quad (1)$$

例如:一变压器油中经检测分析 C_2H_2 的浓度为 $0.08\mu\text{L/L}$, C_2H_2 的峰高为 0.032 mV ,氢焰检测器的 2 倍噪音为 0.028 ,计算该氢焰检测器对 C_2H_2 的最小检测浓度($\mu\text{L/L}$)并判断 C_2H_2 检测结果的处理。

解:

$$\begin{aligned} C_{\text{min}} &= \frac{C_{\text{样}} 2N}{H_{\text{样}}} \\ &= \frac{0.08}{0.032} \times 0.028 \\ &= 0.07(\mu\text{L/L}) \end{aligned}$$

$0.08\mu\text{L/L} > 0.07\mu\text{L/L}$,因此 C_2H_2 的检测结果应记为 $0.08\mu\text{L/L}$ 。

方法 2: 根据油中溶解气体的计算公式进行计算。当样品的峰高为 2 倍噪音峰高(2N, mV)时的浓度即为最小检测浓度($C_{\text{min}}\mu\text{L/L}$)的计算公式为

$$C_{\text{min}} = 0.929 \times \frac{P}{101.3} \times \left(k_i + \frac{V'_g}{V'_l} \right) \times \frac{C_{is}}{h_{is}} \times 2N \quad (2)$$

$$V'_g = V_g \times \frac{323}{273 + t} \quad (3)$$

$$V'_l = V_l [1 + 0.0008 \times (50 - t)] \quad (4)$$

式中 C_{min} 为油中溶解组分气体的最小检测浓度, $\mu\text{L/L}$; V'_g 为 50°C 、试验压力下平衡气体体积, μL ; V'_l 为 50°C 时的油样体积, μL ; P 为试验时的大气压力, kPa ; k_i 为组分 i 的奥斯特瓦尔德系数, 50°C 时国产矿物绝缘油的气体分配系数; C_{is} 为标气中 i 组分浓度, $\mu\text{L/L}$; h_{is} 为标气中 i 组分的平均峰高; $2N$ 为检测器的 2 倍噪音, mV ; 0.929 为油样中溶解气体浓度从 50°C 校正到 20°C 时的温度校正系数; V_g 为室温 t 、试验压力下平衡气体体积, μL ; V_l 为室温 t 时所取油样体积, μL ; t 为试验时的室温, $^\circ\text{C}$; 0.0008 为油的热膨胀系数, $1/^\circ\text{C}$ 。

以上公式(1)、(2)都与二倍噪音峰高 $2N(\text{mV})$ 有关。所谓噪音(N)指没有给定样品通过检测器而

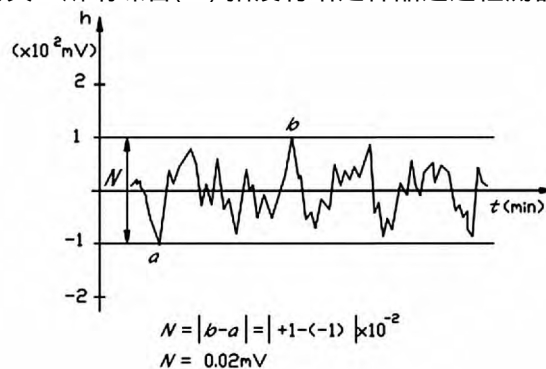


图 1 基线噪音

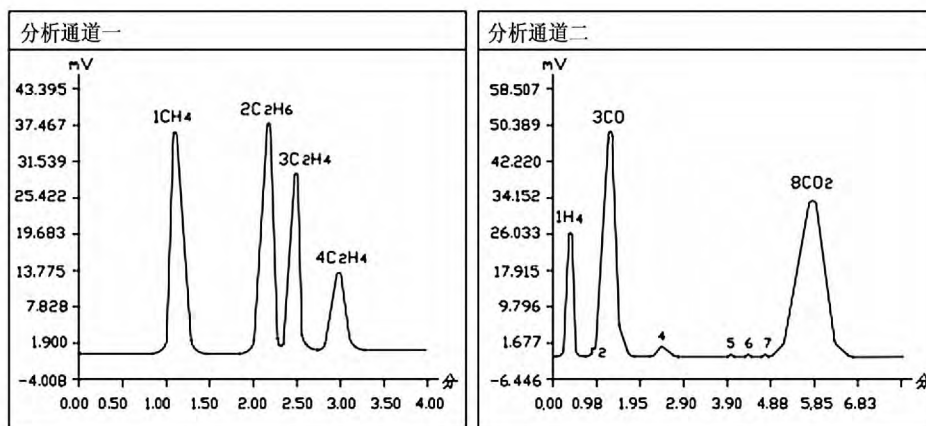


图 2 标气谱图

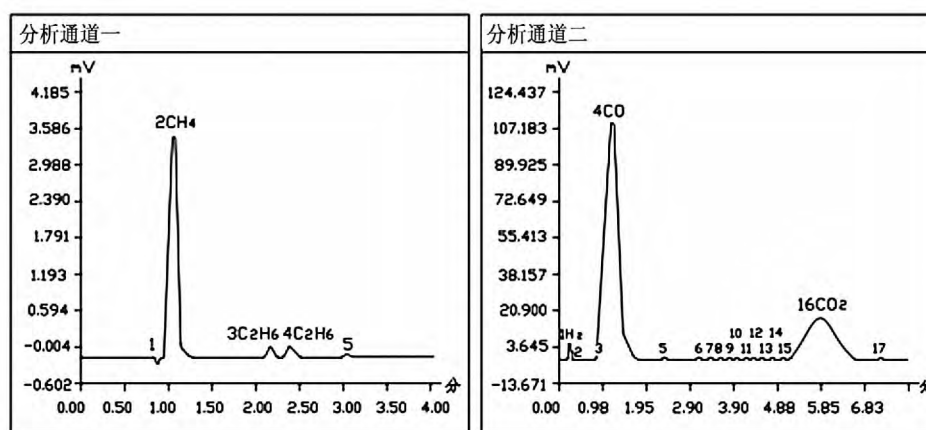


图 3 样品谱图

由仪器本身和工作条件所造成的基线起伏信号,常以 mV 值表示,稳定的基线是一条直线。其值为校正过漂移后,在测量时间内峰的最大值与峰的最小值的差值。

2 峰的识别与处理

对油中溶解气体的气相色谱分析法,GB/T 17623-1998 和 GB/T 7252-2001 都是采用的外标法,即用组成和浓度都已知的标准气体通过检测器后所产生的峰的个数、峰的保留时间、峰的形状、峰的高度等作为参照物,将样品气体通过检测器后所产生的峰的情况进行对比,对保留时间和峰形一致的认为是同一种物质。这就要求固定相与操作条件严格不变,然而在很多情况下操作条件难以绝对恒定,会导致绝对保留时间会有一些变化,同时样品的组分往往比标气的组分要复杂一些,在分析时往往会有重叠峰出现,系统自动识别时会将峰识别错误,因此需要人工进行识别。

当人工进行识别时,首先查看各组分峰是否完全识别,其次根据保留时间和峰形核实各组分峰是否识别正确。核实时,应将样品各组分峰的保留时间与标气各组分峰的保留时间进行对比,如同时增大或同时减小即变化趋势一致,同时峰形一致可以认为是同一物质。当峰形不明显怀疑有重叠峰时,应将所怀疑的峰放大进行确认。

以河南中分的色谱仪(2000B)为例进行说明。

该系统以绝对保留时间对组分进行定性。从图 2、图 3 可以看出,图 3 中 5 号峰未标示,从图形上看,样品 5 号峰所对应的保留时间、峰形与标气 C_2H_2 所对应的保留时间、峰形基本一致,怀疑 5 号峰为 C_2H_2 。1 号峰与 2 号峰像重叠峰,到底哪一个是 H_2 峰无法确定。经查看和核实标气与样品的保留时间如表 1。

从表 1 可以看出通道 1 样品的保留时间与标气的保留时间相比,基本上都增大了 0.010 min,因此确定样品中的 5 号峰为 C_2H_2 。通道 2: 样品 1 号峰与样品 2 号峰的峰形不明显,放大后如图 4。

表 1 标气与样品的保留时间

峰号	通道 1				通道 2		
	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	H ₂	CO	CO ₂
标气保留时间/min	1.038	2.127	2.444	2.937	0.226	0.981	5.654
样品保留时间/min	1.048	2.137	2.458	2.949 (5 号峰)	0.168(1 号峰) 0.224(2 号峰)	0.976	5.650
时间差/min	0.010	0.010	0.014	0.012	-0.058(1 号峰) -0.002(2 号峰)	-0.005	-0.004

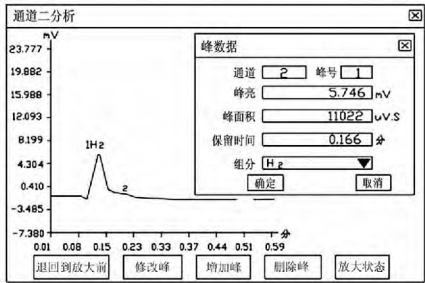


图 4 样品 1 号峰、2 号峰放大后

从图 4 可以看出样品 1 号峰的保留时间与标气 H₂ 的保留时间不一致,而样品 2 号峰的保留时间与标气 H₂ 的保留时间一致,且样品 2 号峰、CO、CO₂ 的保留时间与标气的保留时间相比变化趋势一致,因此确定样品中的 2 号峰为 H₂。则人工确认后各组分峰的情况应为图 5。

3 平衡气的加入

GB/T 17623 - 1998 规定向 40 mL 油中加入 5.0 mL 氮气或氩气,对含气量低的试油,可适当增加注入平衡气的体积,但平衡后气相体积应不超过 5 mL。实际工作中很多分析人员针对不同的油样弄不明白到底该加多少体积的平衡气,对一些异常状况会不处理。比如有时含气量低的油样(小于 1%)即使加了 10 mL 氩气,脱气量也会很小(小于 1 mL)甚至为 0,有时对含气量高的油样即使只加了 5 mL

氮气,脱出气体的体积也会大于 5 mL。实际上在压力一定时,根据物料平衡原理以及气体分配定律可以推出为

$$C_{il}^0 = C_{ig} \left(k_i + \frac{V_g}{V_l} \right)$$

式中 k_i 为 50 ℃、试验压力下溶解气体组分 i 的分配系数; V_g 为 50 ℃、试验压力下脱出气体体积, μL ; V_l 为 50 ℃、试验压力下的油样体积, μL ; C_{il}^0 为 50 ℃、试验压力下溶解气体组分 i 的浓度 $\mu\text{L/L}$; C_{il}^g 为 50 ℃、试验压力下气体组分 i 在气相中的浓度 $\mu\text{L/L}$ 。

当脱出气体的体积 V_g 增大时,气相中组分 i 的浓度会 C_{ig} 减小, k_i 、 V_l 是一恒定值, C_{il}^0 不变。因此当脱气体积很小(小于 1 mL)甚至为 0 时,可以继续加入一定体积的平衡气体再次进行脱气;当脱出气体的体积大于 5 mL 时准确读取体积,可按照正常程序进行试验。

表 2 为同一平行油样(40 mL)分别加入 5 mL、10 mL 平衡气体(氮气)进行脱气分析,计算油中溶解气体含量,两者的结果一致。说明试验时加入平衡气的体积可根据油中含气量的情况进行添加,在保证脱出气体量满足实验分析的情况下,可以多于 5 mL,可以少于 5 mL,只要准确读取气体的体积,不会影响测试的准确度。

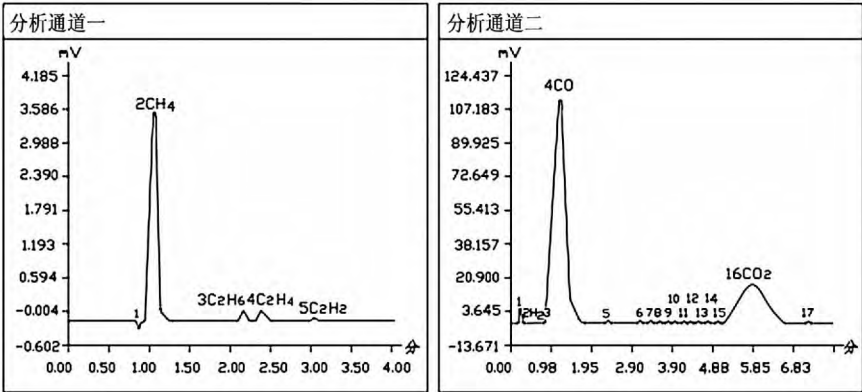


图 5 样品人工确认后各组分峰

表 2 油中加入不同体积的平衡气的试验结果

	油样	脱出气体体积/mL	试验结果/($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)						
			CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	H ₂	CO	CO ₂
1	4 mL 氮气 + 40 mL 油样	4.9	1.16	0.44	0.73	0.08	0.80	1.62	501.18
2	10 mL 氮气 + 40 mL 油样	9.5	1.19	0.42	0.70	0.08	0.67	1.52	492.85

表 3 对气泡不同方式的处理油的试验结果

	油品	脱出气体体积/mL	试验结果/($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)						
			CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	H ₂	CO	CO ₂
1	气泡	3.8	1.46	0.69	0.93	0.12	0.85	3.29	535.60
1'	气泡 + 油样	6.0	1.55	0.70	1.07	0.14	1.64	3.77	561.89
2	油样(排出气泡)	5.2	1.45	0.68	1.06	0.13	1.21	2.55	550.94
3	油样(不含气泡)	4.4	1.42	0.71	1.10	0.14	1.95	4.55	533.44

4 用注射器所取油样在运输过程中产生气泡后的处理

GB/T 17623 - 1998、GB/T 7252 - 2001 要求注射器所取油样不能进入空气,但由于注射器质量等原因,即使在取样时油中无气泡,但在运输过程中由于油温下降体积收缩、震动等原因油样会进入气泡,那么对这种油样怎么处理才能减少试验误差呢?为此特定作了试验进行了探索。

(1) 同一油样用 100 mL 注射器取 80 mL 的油样 3 个。

(2) 取其中 1 个 80 mL 油样,加入 5 mL 空气,室温下用振荡仪振荡 3.5 min,转移出振荡的气体 3.8 mL,将试油的体积调节至 40 mL,接着将一半的气体 1.9 mL 注入该试油中(样品 1),加入 4 mL 氮气并进行脱气分析,同时对剩余的 1.9 mL 气体(样品 1)进行分析,其分析结果见表 3。

(3) 取 1 个 80 mL 油样,加入 5 mL 空气,室温下用振荡仪振荡 3.5 min,转移出振荡的气体,将试油的体积调节至 40 mL,加入 5 mL 氮气(样品 2),50 ℃ 下用振荡仪振荡 20 min,静置 10 min,转移出振荡的气体并对气体进行分析,其分析结果见表 3。

(4) 取 1 个 80 mL 油样,将试油的体积调节至 40 mL(样品 3),加入 5 mL 氮气,50 ℃ 下用振荡仪振荡 20 min,静置 10 min,转移出振荡的气体并对气体进行分析,其分析结果见表 3。

从表 3 可以看出以下 3 点。

1) 气泡中含有油中溶解的故障气体,气泡中故障气体的组分与油样中故障气体的组分相同,将转移出的气泡按油与气体的比值加入油中的试验结果与不含气泡的油样的试验结果基本一致。

2) 油样中进入气泡,在样品处理时将气泡排除

对分析结果的准确度有影响,溶解系数较小的 H₂、CH₄ 其测试值会明显减小,溶解系数较大的 C₂H₄、C₂H₆、C₂H₂ 其测试值无明显变化,且溶解系数越大受到的影响就越小。

3) 当油样中进入气泡时,在样品处理时可先将气泡转移至密封良好的注射器,准确读取气体和试油的体积,将试油体积调节至 40 mL,根据试油的体积、气体的体积按比例将转移出的气体加入试油中,并加入适量的氮气或氩气进行振荡脱气分析,这样可以减小分析误差。

5 结 论

对绝缘油中溶解气体组分含量的气相色谱测定(溶解平衡)法测试过程中遇到的一些问题(而国家标准、已有的培训教材又没有进行阐述)进行了描述和分析,并提出了相应的处理措施,对进一步规范和提高广大油务人员的测试水平,提高测试数据的准确度,保证设备的安全运行具有一定的意义。

参考文献

- [1] 孟玉婵,李荫才,贾瑞君,等.油中溶解气体分析及变压器故障诊断[M].北京:中国电力出版社,2012.
- [2] GB/T 17623 - 1998 绝缘油中溶解气体组分含量的气相色谱测定法[S].北京:中国标准出版社,1999.
- [3] GB/T 7252 - 2001 变压器油中溶解气体分析和判断导则[S].北京:中国标准出版社,2002.

作者简介:

胡仕红(1975),高级工程师,从事电力用油(气)试验及研究工作;

鲁登峰(1973),高级工程师,从事电力系统热工自动化设计、调试工作;

王 杰(1979),工程师,从事电力用油(气)试验及研究工作;

刘 虹(1964),助理工程师,从事电力用油(气)试验及研究工作。(收稿日期:2013-11-07)

四川省新能源发电发展研究

袁 川 黎 岚 刘 洋 金键可 邵 霄
(国网四川省电力公司 四川 成都 610041)

摘 要: 概述了四川省新能源资源的分布情况, 根据调研了解的信息介绍了省内新能源发电发展的最新情况, 结合当前四川省水电发展形势和电网现状及规划分析了省内新能源发电发展面临的问题, 提出了相应的建议。

关键词: 新能源发电; 水电; 发展规划

Abstract: The distribution situation of new energy sources in Sichuan province is introduced. Based on the investigation information, the latest situation of the development of power generation with new energy sources is introduced too. Combined with the developing trend of hydroelectricity and the current status and the planning of power grid in Sichuan province, the problems faced by the development of power generation with new energy source are analyzed, and the corresponding suggestions are proposed.

Key words: power generation with new energy sources; hydroelectricity; development planning

中图分类号: TK01 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)02-0091-04

随着国家节能减排工作的深入推进和能源结构的优化调整, 尤其是在国家提出 2020 年实现非化石能源消费比重提高到 15% 目标的大背景下, 全国新能源开发正呈现加快开发之势, 在四川也掀起了一轮开发投资热潮。新能源发电具有能量密度低、随机性和间歇性等特性, 其集中快速发展将会对四川局部电网造成较大影响。

1 电源装机结构

截止 2012 年年底, 四川全省发电装机容量达到 54 266 MW。其中, 水电 39 320 MW, 占总装机容量的 72.46%; 火电 14 930 MW (含垃圾发电 124 MW), 占总装机容量的 27.51%; 风电 16 MW, 占总装机容量的 0.03%。

2 新能源资源的分布

四川省总体上属新能源资源(风能、太阳能等)贫乏地区, 具备开发价值的资源较为有限, 主要呈现以下特点^[1-2]。

2.1 风能资源

四川省风能资源相对较少, 但局部较集中, 其中以德昌为中心的安宁河谷、茂县为中心的岷江河谷、

丹巴为中心的大渡河谷资源较好, 另外盆地周边部分地区也具有一定潜在开发价值。综合考虑风机技术、电网及运输条件, 预计可开发量 4 000 ~ 5 000 MW。

2.2 太阳能资源

四川属太阳能资源较为贫乏区, 太阳能年辐射总量较小, 且分布极不平衡, 大致以龙门山脉、邛崃山脉和大凉山为界, 东部地区极少, 川西高原相对富集, 是四川省太阳能的主要分布区。

2.3 生物质能资源

四川地域辽阔, 农产品丰富, 是农业大省, 为四川提供了丰富的生物质能资源。

3 新能源发电项目的建设发展情况

根据目前掌握的情况, 省内各有关发电企业投资建设新能源发电项目的积极性较高, 风电的开发速度快于规划目标, 光伏发电项目基本与规划目标一致, 生物质发电项目慢于规划目标。

3.1 风电项目情况

目前全省共有 29 个风电项目纳入国家核准计划, 总装机容量约 1 390 MW, 分别位于凉山、攀枝花、广元和雅安 4 个市州, 目前已有 12 个项目获得核准, 装机容量 5 670 MW。预计纳入核准计划的大

部分风电项目能够在“十二五”期间建成投产。

除此以外,另有尚未纳入核准计划的普格第二期风电场(49.5 MW)和西昌风电场(200 MW)将在“十二五”期间内建成,加上已建成的德昌一期风电场(16 MW),“十二五”期间将有共约 1 654 MW 装机容量的风电场建成。“十三五”期间,全省初步规划新增风电装机容量约 4 322 MW,分别位于凉山、攀枝花、广元和雅安 4 个市州。

3.1.1 凉山州

纳入国家核准计划的风电项目 21 个,总装机容量 1 031 MW,加上尚未纳入核准计划的普格第二期风电场(49.5 MW)和西昌风电场(200 MW)以及已建成的德昌一期风电场(16 MW),“十二五”期间将有共约 1 296.5 MW 的风电场建成。目前,纳入核准计划的项目已有 8 个获得核准,装机容量 390 MW。“十三五”期间规划新增风电装机容量约 3 344.5 MW。

3.1.2 攀枝花市

纳入国家核准计划风电项目 3 个,总装机容量 145 MW,预计均能在“十二五”期间建成。其中 1 个风电场已核准,装机容量 49.5 MW。“十三五”期间规划新增风电装机容量约 180 MW。

3.1.3 广元市

纳入国家核准计划风电项目 3 个项目,总装机容量 115.5 MW,预计均能在“十二五”期间建成。其中 2 个风电场已核准,装机容量 79.5 MW。“十三五”期间规划新增风电装机容量约 200 MW。

3.1.4 雅安市

纳入国家核准计划风电项目 2 个,总装机容量 97 MW,预计均能在“十二五”期间建成。其中 1 个风电场已核准,装机容量 47.5 MW。“十三五”期间规划新增风电装机容量约 497.5 MW。

3.2 光伏发电项目情况

目前全省正在开展前期工作的光伏发电项目共 14 个,装机容量约 405 MW,其中阿坝 1 个、甘孜 5 个、凉山 6 个、攀枝花 2 个,装机容量分别为 30 MW、145 MW、170 MW、60 MW,预计均能在“十二五”期间建成。其中已核准 3 个,装机容量 50 MW。“十三五”期间初步规划新增光伏发电项目装机容量约 850 MW,其中阿坝 100 MW、甘孜 300 MW、凉山 350 MW、攀枝花 100 MW。

3.3 生物质发电情况

四川目前正在开展前期工作的生物质发电项目共 15 个,单个项目装机容量均为 30 MW,总装机容量 450 MW,已核准 6 个,装机容量 180 MW。其中达州、绵阳、凉山、广元地区各有 2 个项目,南充、眉山、巴中、乐山、遂宁、德阳、宜宾地区各有 1 个项目。根据目前开展前期工作的情况,预计“十二五”期间将有 5 个项目建成,装机容量约 150 MW,其他项目将在“十三五”期间建成。

4 新能源发电发展面临的问题

目前,四川电网仅有装机容量 16 MW 的德昌风电场和 124 MW 的垃圾发电项目并网,尚无太阳能发电项目并网。按照新能源发电项目发展建设的情况,预计到“十二五”末,四川新能源发电总装机规模可能达到约 2 405 MW,仅占全省 92 830 MW 规划总装机规模的 2.6%,风电、光伏发电、生物质发电装机分别约为 1 654 MW、405 MW、346 MW。到“十三五”末,四川新能源发电总装机规模可能达到约 8 131 MW,仅占全省 143 GW 规划总装机规模的 5.7%,风电、光伏发电、生物质发电装机分别约为 5 976 MW、1 255 MW、900 MW。

目前,四川省内水电产业正在加快发展,受省内用电增速回落等因素影响,丰水期水电外送受限的问题已经初步显现,预计“十二五”后期将会较为严重,限制了丰水期省内新能源发电的消纳能力。从各地区的情况来看,阿坝、广元、南充、眉山、绵阳、乐山、遂宁、达州、攀枝花等地区的新能源发电项目规模较小,而且靠近负荷中心,基本不存在消纳或送出问题。而凉山、雅安、甘孜地区的新能源项目由于规模较大,远离负荷中心,接入存在一定的困难。尤其是凉山地区风电和光伏发电项目较为集中,加之项目所在地区电网结构薄弱且负荷水平较低,难以实现就地消纳,面临较严重的送出受限问题。四川省新能源发电发展面临的主要问题如下。

(1) 省内水电跨越式发展,丰水期外送受限矛盾凸显,限制了新能源发电的接纳能力。

四川水电资源丰富,理论蕴藏量 143 GMW,技术可开发量 120 GMW。截止 2012 年年底,全省已建成水电装机总容量仅为 39 320 MW。“十二五”后期及“十三五”是四川省水电集中开发、奠定全国三大水电基地的重要时期,省内金沙江、雅砻江、大

渡河三大流域,以及涪江、嘉陵江、岷江、青衣江等中小流域均呈现出全流域开发的局面。预计2015年、2020年全省水电装机容量将分别达到约75 000 MW和116 GW。

经过“十一五”以来的大力建设和发展,四川电网与外省已形成了“三直四交”的交直流联网格局,去年丰水期外送最大电力突破10 GW,外送电量也创新高(较2011年增长114%),但受省内用电负荷增速回落及跨区、跨省特高压外送通道建设推进难度较大等因素的影响,丰水期水电外送受限的问题较为突出。为了实现四川水电清洁能源在全国的优化配置,国家电网正在加快建设 ± 800 kV溪洛渡—浙西特高压直流和申请核准1 000 kV雅安—武汉特高压交流线路。在这两个通道建成以前,如果2013—2014两年用电负荷增速没有大的回升且丰水期来水较好,省内水电仍然会面临较严峻的外送受限问题。另外,如果不提前谋划,尽早实施四川“十三五”的特高压外送通道建设,则“十三五”省内水电外送仍有可能重蹈覆辙。在这样的前提下,省内新能源大规模加快开发将加剧丰水期四川水电外送受限的矛盾,且近期可能会对非水可再生能源发电实施配额保障,四川省丰水期可能面临必须用高价新能源发电而弃质优价廉的水电的尴尬局面。

(2) 四川省新能源资源分布不均,风能、太阳能主要集中在凉山、甘孜、阿坝等地,受地区电网薄弱、电网延伸不足等因素的影响,局部电网短期内难以接纳大规模新能源发电项目并网的矛盾突出。

① 凉山南部220 kV环网尚未形成,短期内难以大规模接纳新能源并网。

根据规划,凉山州南部德昌风电场(507.5 MW)、会东风电场(544.5 MW)、会理风电场(198 MW)、宁南风电场(148.5 MW)、普格风电场(399 MW)均考虑在凉山南部220 kV电网并网,总规模约1 797.5 MW。其中已建成和纳入核准计划的有12个项目,预计“十二五”期间建成投产装机容量约603 MW。此外,在该区域还有4个光伏电站、总装机容量约70 MW,1个30 MW的生物质发电厂也考虑在“十二五”期间接入当地220 kV电网。

目前,由于西昌南、宁南、普格220 kV输变电工程暂未建成,凉山南部220 kV电网为月城—永郎—会理—会东的多站链式串供结构,受电和送出能力均较低(约250 MW),且已有新马、可河等约230 MW统调水电并网,即使考虑当地用电负荷就地平

衡后,也难以大规模接纳新能源并网。

随着普格220 kV输变电工程建设,2015年凉山南部将形成220 kV环网,初步估算能增加约250 MW电源接纳能力,能够一定程度地改善当地新能源发电项目的并网消纳问题。在会东500 kV输变电工程“十三五”初建成后,可以基本解决“十二五”期间该地区风电等新能源接入送出的问题。

根据规划,“十三五”期间该环网还将有德昌风电场、会东风电场、会理风电场、宁南风电场、普格风电场后续开发的共计约1 194.5 MW的风电装机并网,计及“十二五”期间已建成的风电场,该220 kV环网上将总共约有1 797.5 MW的风电并网,加上光伏和生物质发电项目,并网新能源发电项目总容量将达到约1 897.5 MW。“十三五”期间,该地区即便有月城、会东两座500 kV变电站形成手拉手的供电结构,在丰水期小负荷方式下可能也难以接纳如此规模的新能源发电项目。除此以外,还有西昌风电场将在月城500 kV变电站并网,预计“十二五”期间投产200 MW装机、规划“十三五”期间投产600 MW装机,将会加剧这一困难的局面。

② 凉山盐源地区网架薄弱,在盐源500 kV输变电工程建成前不具备大规模的接入能力。

盐源地区目前规划有风电场装机规模约698 MW,已纳入核准计划的项目198 MW;规划光伏电站装机规模约300 MW,已获得路条的项目30 MW;另外还规划了1座30 MW的生物质发电厂。预计盐源地区“十二五”期间建成投产新能源发电装机规模将达到约298 MW,风电、光伏发电装机分别为198 MW、100 MW;“十三五”期间该地区新能源发电装机规模将达到约1 028 MW,风电、光伏发电、生物质发电装机分别为698 MW、300 MW、30 MW。

盐源220 kV输变电工程将于今年建成投产,通过1回220 kV线路长距离接入木里500 kV变电站,送出能力约300 MW。在满足该地区卧罗桥、甲米河、永宁河等电站约250 MW容量送出后,丰水期仅有很小的空间接纳新能源发电。因此,盐源500 kV输变电工程建成前,该地区的新能源发电项目建成后将面临较严重的受限问题。

③ 雅安汉源地区丰水期水电送出需求旺盛,电网难以满足新能源接入消纳需求。

雅安石棉地区水电丰富,主要通过石棉—雅安—蜀州(尖山)500 kV通道,以及新棉—汉源—清音—朱坎220 kV通道送出。其中石棉500 kV变电站汇集有田湾河、大金坪、滨东等电站,总装机容量

约 1 490 MW, 目前丰水期基本能够保证送出。新棉 220 kV 变电站汇集有 220 kV 并网的南桠河、姚河坝、大桥等水电站, 装机容量超过 400 MW, 由于新棉—朱坎 220 kV 通道正常时送出能力仅 450 MW, 丰水期在满足水电送出后的富余空间十分有限。

目前汉源风电场正处于测风阶段, 业主初步规划装机总规模 550 MW, 其中一期工程 47 MW 考虑就近接入汉源 220 kV 变电站, 在丰水期要实现送出需要加大弃水。最终如果考虑以 220 kV 接入石棉 500 kV 变电站, 由于九—石—雅—蜀州(尖山)通道的丰期最大送出限额为 3 700 MW, 随着水电的加快开发, 丰水期送出容量不足的问题已经开始出现, 要满足汉源风电场全部容量消纳存在较大困难。

④甘孜地区电网覆盖不足, 很多地区暂不具备新能源发电项目接入条件, 同时由于线路过长、稳定水平较低等问题, 接纳能力也较为有限。

甘孜地区有 3 个光伏电站正在开展前期工作, 初步考虑其中甘孜县火古龙村光伏电站接入甘孜 220 kV 变电站, 稻城县傍河乡光伏电站接入稻城 110 kV 变电站, 色达县洛若乡光伏一期电站接入色达 110 kV 变电站。此外, 预计还有洛若乡光伏二期电站、理塘光伏电站将在“十二五”期内建成。甘孜地区光伏发电项目装机“十二五”期内将达到约 145 MW, “十三五”将达到 445 MW。

目前, 甘孜 220 kV 变电站采用单回 220 kV 线路临时 T 接供电方案, 由于线路较长, 结构非常薄弱, 需要新都桥 500 kV 输变电工程及甘孜变电站双回 220 kV 线路投产后, 该问题才能得到改善。另外, 稻城、色达 110 kV 变电站规划分别于 2014 年、2015 年建成投产, 届时, 傍河乡、洛若乡光伏电站才能接入送出。

5 结论及建议

综上所述, “十二五”、“十三五”期间四川省新能源发电规划装机容量在全省规划电源装机中所占比例较小, 但仍然面临一些问题。一方面, 由于省内水电集中开发, 省内市场有限, 丰水期电能消纳及外送困难, 新能源发电大规模加快开发将在丰水期与水电争抢发电空间; 另一方面, 四川省新能源发电资源分布不均, 在凉山、甘孜地区较为集中且开发时序相对靠前, 在局部电网尤其是凉山电网将造成严重的送出受限问题。应该统筹考虑省内水电发展规划、电网发展规划、市场消纳能力等相关因素, 有序

安排新能源发电的开发布局, 促进四川省新能源发电的健康快速发展。相关建议如下。

(1) “十二五”、“十三五”是四川省水电实现跨越式发展的重要时期, 将奠定四川全国水电基地的地位, 应协调好水电与新能源发电的发展关系, 确保在能够消纳质优价廉的水电清洁能源的基础上, 科学合理确定“十二五”、“十三五”期间新能源发电的开发的总体规模。另外, 新能源发电消纳配额应充分考虑四川省近期丰水期水电消纳困难的特殊情况, 尽量确保不影响丰水期省内水电发电量的消纳。

(2) 根据四川电网建设发展情况及新能源发电所在地的电力市场消纳能力, 统筹考虑新能源发电项目开发时序, 在目前已经出现送出受限的凉山南部和盐源等地区适当暂缓安排风电项目, 优先安排建设负荷集中或电网坚强的攀枝花、广元等地区的项目。

(3) 加快四川省“十二五”期间跨区、跨省特高压交流外送通道的建设, 并提前谋划“十三五”期间的特高压外送通道, 确保外送通道建设赶上并适当超前省内电源开发进度。

(4) 全力加快普格 220 kV 和会东、盐源 500 kV 等输变电工程建设实施工作。普格输变电工程的建设对于形成凉山南部 220 kV 环网, 改善当地风电送出受限, 并为普格地区风电提供接入点等方面具有重要意义。会东和盐源 500 kV 输变电工程对于加强凉山南部和盐源地区骨干电网, 提高电源送出能力具有重要意义。目前以上项目均在加快开展前期工作, 建成后将大幅提升凉山地区电网对新能源发电的接纳能力。

(5) 专题研究四川电网对新能源发电的接纳能力, 根据新能源发电的布局及送出需求有针对性的安排关键的变电站布点及优化调整局部地区网架, 实现新能源发电和四川电网的协调、统一发展。

参考文献

- [1] 四川省人民政府. 四川省“十二五”能源发展规划[R]. 2011.
- [2] 杨淑群, 詹兆渝, 范雄. 四川省太阳能资源分布特征及其开发利用建议[J]. 气候资源分析, 2007, 27(2): 15-17.

作者简介:

袁 川(1980), 工程师, 从事电网规划工作。

(收稿日期: 2013-12-01)

行业领先 技术雄厚 经验丰富 告别污闪 降低风险 提升效益

攀枝花网源电力技术服务公司成立于2013年，隶属攀枝花网源电力建设工程公司，是四川唯一一家专业从事变电站带电作业技术服务、技术研究和技术开发的现代化公司。公司技术力量雄厚、设备设施先进、作业经验丰富、项目领跑全川。不仅组建并拥有四川唯一一支专业化带电水冲洗队伍，同时在全川范围内还率先完成了变电站带电水冲洗、带电断、搭引流线等新项目。

公司服务范围主要涵盖110 kV至220 kV各类变电站，主营业务范围包括变电站带电水冲洗、带电断、搭引流线、旁路作业等重点项目。目前已具备资格并即将开展输电线路的带电水冲洗项目，同时正致力于500 kV及以上电压等级的带电水冲洗技术的探索。

上述项目在杜绝变电设备外绝缘污闪事故，提升变电设备健康运维水平，避免母线设备倒闸操作等方面具有积极的推动作用，取得了较大的经济及社会效益。网源电力技术服务公司将竭诚为广大电力客户提供优质、真诚的服务。



变电站带电断、搭引流线2



带电水冲洗2



带电水冲洗1



变电站带电断、搭引流线1