

四川电力技术

SICHUAN ELECTRIC POWER TECHNOLOGY



国网公司巴中供电公司

ISSN 1003-6954



四川省电机工程学会 四川电力科学研究院

Vol.36
2013
No.6

2013年中国电机工程学会年会在成都召开



中国电机工程学会代理理事长、国家电网公司总经理舒印彪致辞



年会开幕式由中国电机工程学会常务副理事长陈峰主持



四川省电力公司总经理王抒祥致辞



学术报告会



中国电机工程学会电力科普教育基地授牌仪式

2013年11月21~23日，2013年中国电机工程学会年会在四川省成都市召开。中国电机工程学会代理理事长、国家电网公司总经理舒印彪出席并致辞。会议开幕式由中国电机工程学会常务副理事长陈峰主持。本次年会由国网四川省电力公司、四川省电机工程学会等单位协同举办。

出席年会的有国家电网公司、南方电网公司、各发电集团公司等单位的领导、中国科学院周孝信院士、中国工程院黄其励院士和李立浯院士及各大学校长，还有来自日本、香港、澳门和台湾的嘉宾，国网四川省电力公司副总经理、四川省电机工程学会理事长王平参加了会议。

舒印彪代理理事长在讲话中指出，本届年会结合当前中国经济的发展要求，确立“电力发展与生态文明”为主题，旨在交流和探讨电力的可持续发展。希望参会代表借助年会这个平台，自由、深入地进行交流和研讨，为电力工业的发展和建成蓝天碧水的小康社会作出积极贡献。

会议协办方国网四川省电力公司王抒祥总经理在开幕式上致欢迎词并表示全力协助办好本次年会。

在为期2天的会议中，专家们就《光伏发电的发展现状和发展趋势》、《化石燃料燃烧源头控制PM2.5的基础研究》、《生态文明在台湾电力发展的现况》、《日本电气工程师学会在未来电力基础设施建设中的作用》等在论坛上做了精彩的专题学术报告，同时会议还组织了“特高压输电设备及应用高峰论坛”、“清洁高效发电技术”、“终端用户用电需求管理”、“发电和用户能源的高效管理”、“智慧城市与配电系统应用”、“海峡两岸智能电网标准与应用”、“女工程师论坛”等7场专题研讨会，25位专家作报告，会议气氛热烈。

会议期间，大会还组织召开了海峡两岸智能电网标准与应用专题研讨会，对配电自动化、自动需求响应、智慧家庭能源管理的标准和新技术进行交流。

另外年会还进行了2013年中国电机工程学会电力科普教育基地授牌仪式。国网四川省电力公司技能培训中心电力科普馆是首批授牌单位，中国电机工程学会科普工作委员们在主任委员黄其励院士的带领下考察了国网四川省电力公司技能培训中心电力科普馆，同时对如何建设科普教育基地以及如何开展科普活动等问题进行了座谈交流。

会议组织代表参观了国电成都金堂电厂和±500 kV四川德阳换流站。

四川省晶源电气设备制造有限公司

四川省晶源电气设备制造有限公司是一家集配电变压器研发、生产、销售为一体的高科技民营企业，主要生产、销售油浸式变压器、干式变压器、非晶合金变压器、特种变压器及预装式变压器，致力于打造中国西部非晶合金变压器生产基地。公司占地近70 000 m²，已建标准厂房16 000 m²，拥有完善、先进的生产设备和检测设备，能充分满足用户需要。2012年公司被科技局评为创四川省建设创新型培育企业及战略型新兴产业。公司自主研发的SCBH15型10 kV系列三相三柱非晶合金干式变压器于2012年12月成功通过四川省科技厅组织的成果鉴定。该项目产品创新性强，其主要性能指标处于国内领先水平。在国网四川省电力公司2013年第一批配(农)网设备协议库存招标采购中，公司中标非晶合金包01BYQ (K)。

公司竭诚欢迎与新老客户合作，共创美好明天！



非晶合金油浸式变压器



非晶合金干式变压器

公司地址：四川省射洪县太和大道北段银华工业城

联系人：赵军

联系电话：0825-6625001

传真：0825-6625090



国网四川甘孜

GUO WANG SI CHUAN GAN ZI



2006年1月，国家电网正式进驻甘孜州，组建成立了四川省电力公司甘孜公司。2012年3月，由四川省电力公司与甘孜州国资委共同组建的四川甘孜州电力有限责任公司正式挂牌成立。目前公司下设职能部门11个，县级供电企业17个。

经过七年多的发展，公司生产经营管理水平得到了提升，在康巴藏区竖立起国企良好形象。公司相继被评为国家电网公司先进集体、省级最佳文明单位、省公司创建劳动关系和谐企业先进集体等荣誉称号。

地址：四川省甘孜州康定县炉城南路57号
电话：0836-2877037
邮编：626000



州电力有限责任公司

ZHOU DIAN LI YOU XIAN ZE REN GONG SI

我们的责任



电力调度控制中心



220 kV幸福变电站



对县级电力配网设备进行电气试验



电力员工在抢修现场



我们的团队



国网巴中供电公司情况简介

国网巴中供电公司是国网四川省电力公司的分公司，国有大一型企业，巴中市最大的公用事业单位。于1995年8月4日成立筹备处，1998年8月26日正式挂牌成立；以电网建设和营运为核心业务，承担着为巴中经济社会发展提供安全、经济、优质、清洁、可持续电能的基本使命；供电服务区域覆盖通江、南江、平昌、巴中等三县一区，供电范围188个乡镇，供电面积（含趸售区）12 300 (km)²，供区覆盖率95.12%，供电户数103.8 562 万户，市场占有率99.81%。2009年荣获“全国五一劳动奖状”、国家电网公司“文明单位”称号，巴中市委市政府以巴委〔2009〕68号、巴委发〔2009〕12号文进行表彰并号召全市向巴中电业局学习；2010年，成功创建省级“最佳文明单位”；2011年荣获华中电网公司“安全生产先进集体”称号，四川省电力公司“红旗党委”称号；2012年荣获国家电网公司“先进集体”称号，四川省电力公司“红旗党委”、“四好班子”、“创先争优先进党委”等荣誉称号。涌现出“全国模范职工之家”1个，“全国先进工作者”1人，“全国电力行业优秀企业家”1人等多个先进典型。

全公司设11个职能部门，5个业务支撑机构，4个直属供电所，4个县级控股供电公司；共有员工4 279人，平均年龄42.6岁，人才当量密度0.798；长期以来，国网巴中供电公司坚持扎根革命老区，忠实履行社会责任，不断加强电网建设。特别是在“十一五”期间累计完成电网建设投资13.05亿元，不断提升供电优质服务水平，2007年10月，巴中成为全省第一个至今仍

然是唯一一个全面实现城乡居民生活用电同网同价的市州，全市老百姓每年减少电费支出约1.5亿元。目前，全公司干部职工正在按照巴中市委市政府“追赶跨越，加快发展”的总体要求以及建设“两地两区一中心”的战略定位，奋力推进500 kV输变电项目等一大批重点工程项目建设，努力完成“十二五”电网建设投资25.38亿元，加快坚强智能巴中电网建设，勇当老区经济社会发展的急先锋。



二次系统检修班人员对端子箱进行隐患排查



王堂站无油化改造时110kV线路CT介损损耗试验



新放电缆有序接入机构箱



高压试验成功，班组人员脸上都露出了满意的微笑

打造民族品牌，树立行业标杆

PA6000高精度功率分析仪

功率精度



完全符合标准

IEC61000-4-7

PA6000高精度功率分析仪中标南方电网电力变压器检测项目

高精度——精确呈现输入信号

- 基本功率精度：0.02%
- 测量带宽：DC、0.1Hz~1MHz
- 6相精确同步测量
- 最大1000Vrms，30Arms直接输入

卓越的可操作性——人性化设计、简便、直观

- 12.1英寸1280×800高分辨率显示
- 人性化的操作设计理念，同时支持按键、触摸、键盘和鼠标操作
- 丰富的通信接口：GPIB、USB Device(480Mbps)、Ethernet(1000Mbps)
- 支持远程操控，随时随地测量

完善功能——高效测量解决方案

- 所有通道同时支持功率测量、FFT、谐波、闪变以及波形分析功能
- 支持最高128次谐波分析测量
- 支持最高4000个周期分析功能
- 内置高达45GB存储空间，连续测量存储时间最长达1万小时
- 支持电机效率评估，多台仪器间的同步测量，提供更高效的测量解决方案

支持标准

- 支持IEC61000-3-2标准
- 支持IEC61000-3-3标准
- 支持IEC61000-4-7标准
- 支持IEC61000-4-15标准

诚招代理商和项目合作伙伴

请您用以下的联系方式联系我们，我们会为您安排现场演示并提供15个工作日的免费样机测试。感谢您对我公司产品的关注！

广州致远电子股份有限公司

欢迎拨打免费服务热线
400-888-4005

更多详情请访问
www.zlg.cn

地址：广州市天河区车陂路黄洲工业区7栋2楼
技术支持邮箱：support@zlg.cn

(上海) 021-53083451-829
上海分公司 (南京) 025-68123923
(杭州) 0571-89719493

广州销售部 020-28267968
重庆办事处 023-68797619
成都办事处 028-85437446-804

北京分公司 010-62536178-112
武汉办事处 027-87168497-613
西安办事处 029-87881296-810

《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

2013年第36卷第6期总228期(卷终)

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 谢 舫

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*

2013-12

目 次

• 基金项目 •

特高压直流对交流系统稳定性的研究 张东明 姚秀萍 王维庆 等(1)

雷击风力发电机塔筒的电磁干扰分析 程 锐 张新燕 白生忠(4)

基于BP-ANN和出力波动特性的光伏系统短期功率预测模型

..... 杨青斌 袁铁江 吐尔逊·伊不拉音 等(9)

• 电力系统 •

特高压交流电网建设进程对四川特高压直流与相关交流断面耦合关系的影响

..... 李 旻 周启航 邱丽萍 等(13)

交直流互联系统电压稳定性研究 高超峰 康积涛(17)

线路重合闸投退方式的研究 吴桂芳 胡仁祥 冯小萍 等(23)

基于Multi-agent技术的配电网络重构研究 ... 陈晓静 孔 冰 邓亚文 等(26)

一种线路高频保护防误方法分析及措施研究

..... 梁 静 赵青春 于 冰 等(29)

基于ADPSS大区电网混合仿真的直流系统辅助控制建模..... 朱 玲 王 骅(33)

概率神经网络在母线故障识别中的应用研究 纪叶生(39)

电力系统谐波频谱分析的相位差校正法 王 涛 邓亚文 李红伟(43)

用电信息采集系统信道建设研究 李赋欣 徐厚东 佟如意(46)

±500 kV换流站直流电流互感器现场校准装置与技术 周一飞(50)

四川居民阶梯电价效果分析及评价体系研究 李 红 杜新伟(55)

一种定值在线校核顺序的优化方法 张 琼 陈召阳(61)

• 高电压 •

超高压交流线路对平行架设特高压直流线路的电磁感应

..... 李宝聚 郭 雷 张 磊(66)

基于有限元法的冷缩电缆终端缺陷形态特征与局部放电特性分析

..... 邓 刚 刘 丽 方 玮 等(70)

基于支持向量机的变电设备缺陷发生率的预测及应用

..... 陈义刚 徐厚东(75)

智能识别和主动驱赶的防鸟害装置研究 曹永兴 丁登伟(78)

一起典型35 kV开关柜复合绝缘击穿事故分析及整改措施 陈海平(81)

220 kV内桥主接线开关失灵危害与对策 郭又华(84)

电容式电压互感器暂态特性校验 杨 刚 冉子凤 文 艺 等(87)

CONTENTS

Study of Impact of UHVDC on AC System Stability	Zhang Dongming Yao Xiuping Wang Weiqing et al (1)
Analysis of Electromagnetic Interference on Wind Generator Tower by Lightning Stroke	Cheng Rui Zhang Xinyan Bai Shengzhong (4)
Short – term Power Forecasting Model of Photovoltaic System Based on BP – ANN and Output Fluctuations	Yang Qingbin Yuan Tiejia Tuerxun Yibulayin et al (9)
Influence of Construction Process of UHVAC Power Grid on Coupling Relationship between Sichuan UHVDC and Related AC Section	Lin Min Zhou Qihang Qiu Liping et al (13)
Research on Voltage Stability of AC/DC Interconnected System	Gao Chaofeng Kang Jitao (17)
Research on Switching on and off Method of Line Reclosing	Wu Guifang Hu Renxiang Feng Xiaoping et al (23)
Research on Reconfiguration of Distribution Network Based on Multi – Agent Technology	Chen Xiaojing Kong Bing Deng Yawen et al (26)
Analysis and Research on Error Proofing Method and Measures for High – frequency Protection in HV Lines	Liang Jing Zhao Qingchun Yu Bing et al (29)
Modeling of Auxiliary Control for HVDC Based on Hybrid Simulation of Large – scale Power Grid in ADPSS	Zhu Ling Wang Hua (33)
Application and Research of Probabilistic Neutral Network in Bus Fault Identification	Ji Yesheng (39)
Phase Difference Calibration Method of Harmonic Spectrum Analysis in Power System	Wang Tao Deng Yawen Li Hongwei (43)
Research on Communication Channel Construction of Electricity Information Acquisition System	Li Fuxin Xu Houdong Tong Ruyi (46)
On – site Calibrating Device and Technology for DC Current Transformer in ± 500 kV Converter Station	Zhou Yifei (50)
Research on Implementation Effect Analysis and Evaluation System of Multistep Electricity Price for Sichuan Residents	Li Hong Du Xinwei (55)
Optimization Method for Online Checking Sequence of Constant Value	Zhang Qiong Chen Zhaoyang (61)
Electromagnetic Induction Influence of EHVAC Transmission Lines on Parallely Erected UHVDC Transmission Lines	Li Baoju Guo Lei Zhang Lei (66)
Characteristic Analysis on Defect Morphology and Partial Discharge of Cold – shrinkable Cable Terminal Based on Finite Element Method	Deng Gang Liu Li Fang Wei et al (70)
Prediction of Defect Occurrence Rate for Transmission and Distribution Equipment Based on Support Vector Machine and Its Application	Chen Yigang Xu Houdong (75)
Research on Device for Preventing Bird – caused Damage Based on Intelligent Recognition and Initiative Driving	Cao Yongxing Ding Dengwei (78)
Analysis of Typical Composite Insulation Breakdown in 35 kV Switchgear Cabinet and Its Rectification Measures	Chen Haiping (81)
Damages and Countermeasures of Breaker Failure in 220 kV Substation with Inner Bridge Connection	Guo Youhua (84)
Testing Calibration on Transient Characteristic of Capacitor Voltage Transformer	Yang Gang Ran Zifeng Wen Yi et al (87)

SICHUAN ELECTRIC POWER
TECHNOLOGY

2013 Vol. 36 No. 6
(Ser. No. 228)

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

特高压直流对交流系统稳定性的研究

张东明¹, 姚秀萍^{1,3}, 王维庆^{1,2}, 常喜强³, 王海云^{1,2}

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047;

2. 教育部可再生能源发电与并网控制工程技术研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830047;

3. 新疆电力调度通信中心, 新疆 乌鲁木齐 830001)

摘要: 针对大规模风电集中外送, 重点从特高压直流对风电、火电打捆联网系统的安全稳定问题展开研究。建立了直流输电系统模型以及风电机组模型; 分析了不同风电机组对交直流系统的稳定性以及直流闭锁故障对系统影响的仿真分析。在此基础上分析了风电、火电打捆联网直流外送系统带来的一系列问题, 为大规模新能源的规划和运行提供了建设性依据。

关键词: 直流输电; 风力发电; 风电打捆; 电力系统稳定性

Abstract: Aiming at the large-scale wind power transmission, the problems about the security and stability of the integrated system of thermal-generated power bundled with wind power caused by UHVDC are researched. The DC transmission system model and the wind turbine model are established. The influence of different wind turbines on the stability of AC/DC system and the impact of DC blocking fault on AC system are discussed. Based on the analysis, a series of problems brought by the integrated system of thermal-generated power bundled with wind power are considered, which provides the constructive basis for the planning and operation of the large-scale integration of new energy to power grid.

Key words: DC transmission; wind power generation; thermal-generated power bundled with wind power; power system stability

中图分类号: TM712 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)06-0001-03

0 引言

随着风电机组技术的发展以及国家对可再生能源的重视, 越来越多的大型风电场开始接入电网。风电的进一步发展, 客观上需要扩大风电消纳范围, 大风电必须融入大电网才能显著提高风电消纳能力。因此, 利用直流输电技术解决大规模风电远距离送电需求的输电方案已成为科研工作者的研究热点。

目前, 可行性的大规模风电接入方案不外乎有3种: 风电孤岛直流外送, 风、火电打捆风电直流外送以及风、火电打捆联网直流外送。风电孤岛直流外送系统, 由于缺乏系统支撑, 在风电场出力与直流输电功率之间出现的任何功率不平衡都会引起送端功率的波动, 风电机组受风速影响较大, 发电主动控制能力差, 在不采取有效的频率控制措施条件下, 一般的风速功率都会引起送端系统频率的崩溃。风、

火电打捆直流外送方案通过火电机组调速系统的调节, 送端系统能够维持频率稳定, 但是在电压稳定方面, 由于送端孤岛方案缺乏系统支撑, 送端线路发生故障易引起系统电压崩溃。

下面针对以上两种方案的优缺点, 对风、火电打捆联网直流外送方案进行了仿真计算, 详细分析了风电机组、火电机组、交直流系统之间的相互影响和系统稳定特性。研究结果分析了风、火电打捆联网直流外送方案带出的一系列问题, 为大规模风电接入电网的稳定问题提供了参考依据。

1 风、火电打捆联网直流外送系统建模

1.1 直流输电系统模型

所采用的直流输电系统模型是基于对直流换流器、控制系统和直流线路进行详细模拟的模型, 在交流系统对称和无畸变的情况下可以用来模拟直流输电系统本身的动态特性以及与交流系统之间的相互

• 1 •

基金项目: 教育部创新团队项目(IRT1285); 国家自然科学基金项目(51267017)

作用特性。采用直流输电系统详细模型的交直流电力系统机电暂态仿真原理如图1所示。对直流线路来说,两侧换流器相当于两个电压源,其数值决定于触发控制角和交流侧电压模值,直流线路本身可以采用适当的动态模型。

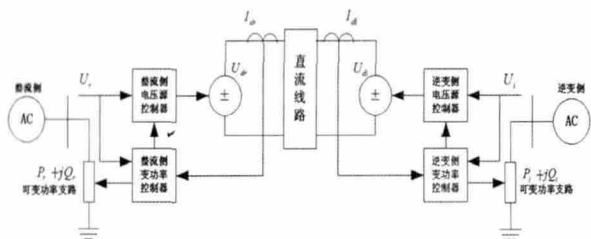


图1 直流输电系统机电暂态仿真原理图

此模型可以通过实际计算关断角 γ 比较准确地确定是否发生换相失败;直流系统在故障后的恢复过程可以得到较好的模拟,而不是事先指定恢复速度;由于模拟了定电流、定电压和定关断角等控制器的实际动态过程,因而可以比较精确地模拟直流系统中的控制模式的切换过程。

1.2 风电机组模型

基于PSASP建立了双馈风电系统模型,包括双馈感应发电机模型及其控制系统,图2为双馈感应式风电机组模型,其转子转速可以在较大范围内变化。双反馈风机并网后电机定子频率与电网一致,转子通过变频器与电网相连。

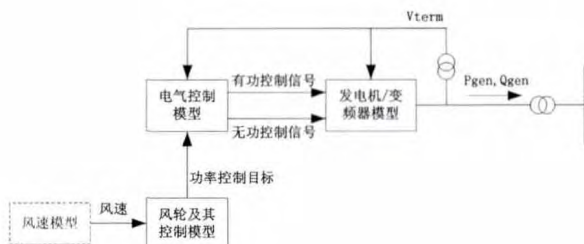


图2 双馈感应式风电机组模型

对于大规模风电场则采用等值风电机组的方法集中模拟风电场出力,从同调机群识别、同调母线聚合以及网络化简3个方面将1个同调风电机组等值为1个风电机组,然后基于加权法实现风电场模型的同调参数聚合,得出等值风电场的相关静态参数如下。

$$\begin{cases} S_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N S_i \\ P_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N P_i \\ T_{\Sigma} = \frac{1}{S_{\Sigma}} \sum_{i=1}^N T_i S_i \end{cases} \quad (1)$$

式中, S_{Σ} 、 P_{Σ} 、 T_{Σ} 分别为风电场等值机组容量、有功出力和惯性时间常数; S_i 、 P_i 、 T_i 分别为风电场第*i*台风电机组的容量、有功出力和惯性时间常数。

2 风、火电打捆联网直流外送实际系统稳定性分析

为了提高大规模风电直流外送系统的稳定性,新疆电网采用风、火电打捆联网直流外送方案,如图3所示。该方案将风电和火电构成的送端系统接入电网,可强化对直流系统的支撑能力。

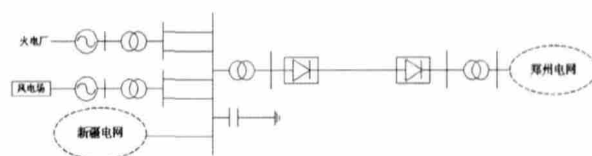


图3 风、火电打捆联网直流外送简化系统

风、火电打捆联网直流外送的送端由大规模风电场和火电厂构成。在该系统中,风电和火电配置的比例为1:2,即风电场出力为3.6 GW,火电厂实际出力为3.6 GW,备用容量为3.6 GW,通过 ± 800 kV/7.2 GW特高压直流输电系统实现电力外送。风电场、火电厂与换流站之间均通过2回长度为100 km的750 kV交流线路连接。

2.1 风电机组类型对交直流系统稳定性的影响

风电大规模集中接入方式耐受系统电压扰动能力较弱,主要有以下几个方面的问题:一是低电压及多次穿越能力;二是高电压穿越能力;三是故障过程的无功支撑能力。

大规模风电接入系统时,不同类型的风电机组对无功功率的需求不同,而且低电压穿越的能力也不同,将会直接影响接入系统的稳定性。

这里仿真了固定转速风电机组以及双馈风电机组对电网稳定性的影响。根据仿真数据可知,固定转速的风电机组不具有低电压穿越能力,在并入电网后母线电压低于0.85 p.u.,并且持续两个周期后退出运行;双馈风电机组具有低电压穿越能力,对电网稳定性影响较小。如图4给出了风电场和特高压直流送端换流站进区750 kV线路发生三相永久短路故障条件下,双馈风电机组对交直流系统影响的仿真曲线。

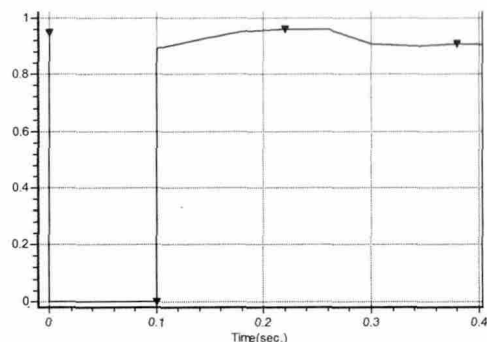


图4 风电机组对交直流系统稳定性影响

风电场附近的线路发生三相永久性短路故障期间,双馈风电机组具有低电压穿越能力,能够躲避故障期间的低电压继续并网运行,故障线路切除后,潮流将转移到其他线路,使得电网电压在一定程度上有所下降,随着交流系统电压的恢复,直流电压在恢复到 0.85 p. u. 以上时,直流功率开始恢复。

2.2 直流闭锁故障对交流系统的影响

直流闭锁故障直接影响异步联网,使得送端功率盈余,受端功率缺额;其次就是使得同步联网 100% 功率转移到并联交流通道上。

随着特高压直流外送功率的增大,直流闭锁故障造成的功率转移量也随之增大,从而导致进区通道出现电压失稳问题,对特高压直流外送功率构成约束,危及联网直流的安全稳定运行。

当直流发生闭锁故障时,导致系统出现暂态过电压,将有可能导致进区交流通道上的风机大量脱网,进一步恶化事故后稳态过电压问题。此外,在从系统故障到故障切除过程中出现的风机吸收无功这一特性,将有可能导致进一步恶化系统故障后的电压稳定问题。

2.3 直流无功控制对交流系统的影响

直流无功控制分为 3 级: 最小滤波器、电压控制、无功平衡。为保证直流可靠运行,至少投入 1 ~ 2 组滤波器,当直流电压偏差越限时,相应投切滤波器,当电压合格时,根据交直流系统无功交换控制滤波器。一般设计送端采用欠补偿,受端采用过补偿,考虑 10% 过负荷运行。

还仿真了送端送出约为 45% (电压 535 kV), 受端约为 60% (电压 510 kV) 时直流无功控制,如图 5 所示。

由图 5 可知,极 I 电流为零时间 170 ms,极 II 电流为零时间 21 ms。故障后约 300 ms 过程中,交流电压最高达到 656 kV,直流功率总体缺额较大。

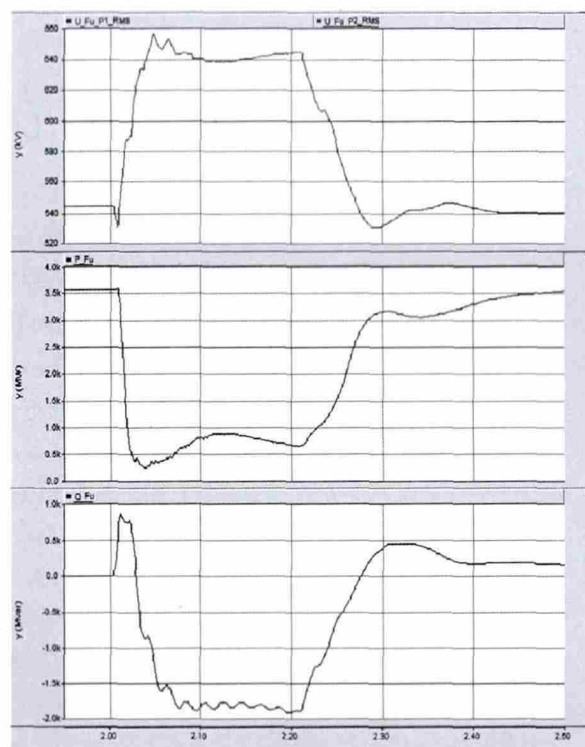


图5 直流无功控制仿真分析图

3 结 论

详细分析了风、火电打捆交直流系统的相互影响,仿真并得出: 1) 具有低电压穿越能力的风电机组能躲避故障期间的低电压继续并网运行; 故障切除后功率会转移到进区线路,使得系统电压一定程度的降低。2) 直流闭锁故障会使系统出现暂态过电压,有可能导致进区交流通道上的风机大量脱网,外加故障过程中风机吸收无功这一特性,会进一步恶化事故后稳态过电压问题。3) 故障时,直流无功控制会使得直流功率缺额总体较大。

根据以上结论还需进一步研究风电和火电的配比关系是否能解决系统的电压、频率稳定性问题,以及直流的各种控制策略,找到一种优化的外送方案,最大程度上解决直流接入面临的电压、频率等系统的安全稳定性问题,从而为特高压直流输电的投入运行提供参考依据。

参考文献

- [1] 郭小江,申洪,马士英. 风电机组大规模接入系统后对多点直流外送的影响研究 [J]. 北京: 中国电力科学研究院, 2009.

(下转第 22 页)

发生 Hopf 分岔,当励磁系统参考电压比较大时,系统只发生 SNB 分岔,此时 SNB 分岔点作为系统传输功率极限点,并且采用较高的励磁系统参考电压可以避免系统发生振荡失稳。最后通过时域仿真的方法发现,直流系统对两端交流节点电压的影响并不相同,逆变侧由于受直流系统影响比较大,会出现电压畸变现象。

参考文献

- [1] 刘明波,程劲辉,程莹. 交直流并联电力系统动态电压稳定性分析 [J]. IEEE Transactoins on Power Delivery, 1998,13(13): 923 - 931.
- [2] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析 [M]. 北京: 机械工业出版社,2004.
- [3] 庄慧敏. 基于分岔理论的交直流电力系统电压稳定性分析方法研究 [J]. 成都: 西南交通大学,2009.
- [4] 刘彩霞,周艳平. 分岔理论在电力系统电压稳定性中的应用 [J]. 云南水利发电,2007,23(3): 87 - 90.
- [5] 彭志炜,胡国根,韩祯祥. 基于分岔理论的电力系统电压稳定性分析 [M]. 北京: 中国电力出版社,2005.
- [6] 刘崇茹,张伯明. 交直流混合输电系统灵敏度分析 [J]. 电力系统自动化,2007,31(12): 45 - 49.
- [7] 邱革非,束洪春,董俊,等. 联于弱交流系统的 HVDC 输电系统输电能力和电压稳定性的研究 [J]. 昆明理工大学学报,2005,30(3): 50 - 55.
- [8] 庄慧敏,肖剑. 交直流系统电压稳定性的 Hopf 分岔分析 [J]. 高电压技术,2009,35(3): 699 - 704.
- [9] 李康. 基于分岔理论的电力系统动态电压稳定性分析

[J]. 成都: 西南交通大学,2012.

- [10] S. L. Richer, R. A. Decarlo. Continuation Methods: Theory and Application [J]. IEEE Transations on Circuits and Systems, 1983, 13(4): 459 - 463.
- [11] 顾伟. 电力系统最优分岔控制研究 [J]. 南京: 东南大学,2006.
- [12] 樊纪超. 交直流并联输电系统动态安全域及其割集表示 [J]. 天津: 天津大学,2005.
- [13] 王锡凡,方万良,杜正春. 现代电力系统分析 [M]. 北京: 科学出版社,2003.
- [14] 谭涛亮,张尧. 交直流互联系统动态电压稳定的分岔值分析 [J]. 电网技术,2011,35(3): 49 - 56.
- [15] 李宏仲. 基于 Hopf 分岔理论的电力系统动态电压稳定研究 [J]. 上海: 上海交通大学,2008.
- [16] 赵兴勇,张秀彬,苏小琳. 电力系统电压稳定性研究与分岔理论 [J]. 电工技术学报,2008,23(2): 87 - 95.
- [17] X. Yang, Y. chen, H. L. Shu. Stability Analysis of AC/DC Power Transmission System based on Bifurcation Theories [J]. Sustainable Power Generation and Supply, Nanjing, 2009: 1 - 7.

作者简介:

高超峰(1989),男,硕士研究生,研究方向为电力系统电压稳定性;

康积涛(1962),男,教授,研究方向为电力调度自动化、电力系统无功优化、电压稳定性、嵌入式测控装置和工业监控组态软件的研究。

(收稿日期:2013-06-20)

(上接第3页)

- [1] 周宏林,杨耕. 大型 DFIG 风电场的 LCC-HVDC 并网及控制 [J]. 电力自动化设备,2009,29(7): 8 - 12.
- [2] 姚伟,迟永宁,程时杰,等. 直流输电技术在海上风电场并网中的应用 [J]. 中国电力,2007,40(10): 70 - 74.
- [3] 汪宁渤. 甘肃酒泉千万千瓦风电基地面临的挑战与应对措施 [J]. 电网与清洁能源,2009,30(7): 43 - 47.
- [4] 肖创英,汪宁渤,丁坤,等. 甘肃酒泉风电功率调节方式的研究 [J]. 中国电机工程学报,2010,30(10): 1 - 7.

作者简介:

张东明(1987),男,硕士研究生,研究方向为电力系统

稳定与控制;

姚秀萍(1961),女,高级工程师,研究方向为电力系统稳定与控制及风力发电技术;

王维庆(1959),男,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统自动化和风力发电机组的智能控制;

常喜强(1976),男,高级工程师,研究方向:电力系统稳定与控制及风力发电技术;

王海云(1973),女,副教授,硕士研究生导师。研究方向为可再生能源发电与并网技术。

(收稿日期:2013-09-27)

雷击风力发电机塔筒的电磁干扰分析

程 锐¹, 张新燕¹, 白生忠²

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047;

2. 中节能风力发电(新疆)有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830002)

摘 要: 为了研究风电机组内电子设备所受到的雷电电磁干扰, 采用有限元数值分析软件(ANSYS)对风力发电机的塔筒进行建模, 通过对雷击塔筒时产生的电场和磁场进行计算, 得到整个风力发电机塔筒部分的电磁场分布规律及各处所产生的磁感应强度; 在该计算的基础上, 根据法拉第电磁感应方程计算出塔内空间任意回路中的感应电动势, 找到了影响其大小的因素, 并提出了相应的防护措施。经过分析得到的结论是: 雷击塔筒顶部时塔顶和塔底产生的磁场较大; 塔筒内空间所产生的磁场强度是由中心向塔筒壁不断增大; 塔筒内部空间的导体回路所感应出的电动势大小由距干扰源距离和回路面积决定, 其中, 面积因素起主导作用。因此, 可为塔内电子系统的防雷设计提供依据。

关键词: 雷电; 风力发电机塔筒; 电磁干扰; ANSYS; 电场; 磁场; 防雷设计

Abstract: In order to study the electromagnetic interference on electronic equipment in wind turbine caused by lightning, the modeling of the tower of wind turbine is carried out with the software ANSYS. Through the calculation of electric and magnetic fields when the tower is suffering from the lightning stroke, the distribution of electromagnetic field of the whole wind turbine tower and the strength of magnetic induction in each place are obtained. On the basis of calculation and according to the induced electromotive force in any loops of the tower space calculated by the Faraday's law of electromagnetic induction equation, the factors which affect its size are funded and some corresponding protective measures are put forward. The conclusions are as follow: the magnetic field is larger in both the top and bottom of the tower and the magnetic field intensity generated in the tower increases from the center to the tower wall; the electromotive force induced by conductor loop of the tower internal space are determined by the distance with interference source and the loop area, which can be used as a basis for the lightning protection design of electronic system in the tower.

Key words: lightning; wind generator tower; electromagnetic interference; ANSYS; electric field; magnetic field; lightning protection design

中图分类号: TM153 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)06-0004-05

由于机组的安装地理条件以及建筑结构, 增大了其遭受雷击的概率, 使得雷电成为影响机组安全运行因素中的一个重要方面。风力发电机塔筒外部的防雷区域属于 LPZ0A 区, 该区内的各物体都可能遭到直接雷击和泄放全部雷电流^[1]。当风力发电机遭受直接雷击时, 雷电流将沿塔筒流入大地, 在此暂态过程中, 由于雷电流具有很高的波头陡度, 会在其所流经的路径周边产生很强大的突变电磁场, 对发电机磁场、信号线、电力线或者控制系统内部造成严重的电磁干扰。雷电电磁脉冲可能通过空间直接辐射到电子设备, 也可能通过对信号线和电源线等金属线路的感应来形成过电流和过电压波侵入电子设备, 轻则导致设备工作失灵, 重则使设备受到永久

基金项目: 新疆自治区科技厅自然科学基金项目(2011211A016)

性破坏, 给风电机组的安全运行构成威胁^[2-4]。因此, 有必要对塔筒内雷电产生的电磁干扰进行仿真分析, 在风力发电机组安装之前根据计算出的电磁场分布情况将敏感设备安装在电磁干扰相对较弱的地方, 或是进行合适的屏蔽措施, 从最大程度上降低雷电干扰对机组内部电子设备的危害。

首先简单介绍了塔筒模型的数值算法, 然后应用有限元分析软件 ANSYS 对雷击风力发电机塔筒部分进行建模并计算其产生的电磁场。该方法所得结果较之其他数值计算方法而言, 计算量相对要小, 易于理解, 结果更为直观精确。还使用该方法计算了雷击塔筒时产生的电场和磁场, 分析不同因素对塔筒内空间任意回路所产生的感应电动势大小的影响, 并提出了相应的保护措施。

1 塔筒数值计算模型简介

雷电流在塔筒传播中是一个波过程,需用分布参数的电路模型来模拟^[5-9]。这里将整个塔筒分割为许多个线元,其中的任一段的等值电路如图1所示的 π 型结构,每一线元的长度必须小于雷电流所包含的最短波长的十分之一,这样 π 型电路中的参数就可在准静态条件下计算^[9]。因此,整个塔筒可按此原则离散成一个多节点、多支路的复杂网络。把场的问题变成由电路参数构成的路的问题。

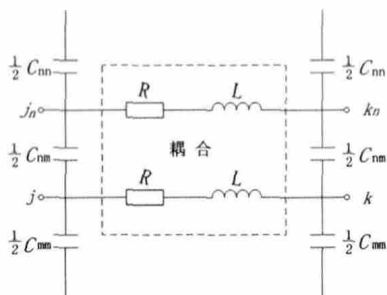


图1 塔筒 π 型电路结构

在具体计算中,有学者利用暂态等值计算电路原理^[8-9]进行计算,将塔筒上耦合的RL串联支路描述为

$$Ri_{RL} + L \frac{di_{RL}}{dt} = u_j - u_k \quad (1)$$

对式(1)进行转换,并运用梯形积分公式进行积分,得到支路电流的矩阵表达式为

$$i_{RL}(t) = N^{-1} [u_j(t) - u_k(t)] + I_{RL}(t - \Delta t) \quad (2)$$

其中,等值电流源为

$$I_{RL}(t - \Delta t) = 2(N^{-1} - N^{-1}RN^{-1}) [u_j(t - \Delta t) - u_k(t - \Delta t)] + (E - 2N^{-1}R) I_{RL}(t - 2\Delta t) \quad (3)$$

式中, E 是单位阵; u_j 和 u_k 分别表示结点 j 和 k 的电压矩阵。因此,根据式(2)和式(3)将电阻与耦合的电感电路可等效为图2所示的暂态计算电路。

对于耦合电容支路,其暂态过程可以表示为

$$i_c = C \frac{du_c}{dt} \quad (4)$$

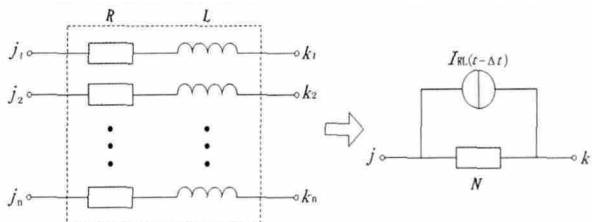


图2 耦合RL支路与等值电路

同样对其运用梯形积分公式,可得电容支路的电流表达式为

$$i_c(t) = R_c^{-1} u_q(t) + I_c(t - \Delta t) \quad (5)$$

同理,根据式(5)可得到耦合电容支路的等效如图3所示。其中, R_c 为耦合电容支路的等值电阻矩阵,电流源的递推形式为

$$I_c(t - \Delta t) = -2R_c^{-1} u_q(t) - I_c(t - 2\Delta t) \quad (6)$$

u_q 表示结点 q 的电压矩阵。

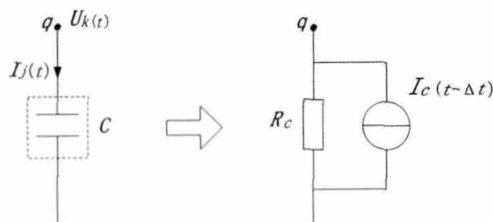


图3 耦合电容支路及等值电路

因此 π 型电路可以根据上式进行简化,得到等效电阻与等值电流源并联的暂态计算电路。

通过上述方法将所有支路进行变换,将塔筒模型构建成一个等值计算网络,然后分别对节点电压方程和支路电流方程进行计算,之后便可以得到塔筒上每一个点的电压值和每条支路的电流值。虽然这样的求解方法会提高计算机的运算效率,但是,再加之对62 m塔筒空间整体电磁场的计算分析,其计算量会变得很大很复杂。因此,应用ANSYS有限元软件分析对塔筒进行建模、赋值及计算,从而得到整个风机塔筒遭受雷击之后的空间磁场分布。

2 塔筒有限元模型建立

ANSYS软件是融结构、流体、电场、磁场、声场分析于一体的大型通用有限元分析软件。有限元分析的基本思路是将问题的求解先离散成若干个子区域。即将实物几何模型划分成为一系列相互联接的单元,各单元之间仅靠节点连接。对单元内部点的求解可以由单元节点量通过选定的函数关系插值求得,然后将各个单元的方程组合成总体的代数方程组,并且加入边界条件后便可以对方程进行求解。因此,网格单元划分越细,计算结果越精确,当然,计算量随之增大,计算时间延长,所需的存储空间越大^[10-11]。ANSYS建模属于实体建模,表1为风力发电机组塔筒相关的物理数据。

表1 塔筒主要参数

名称	参数
塔筒高度/mm	62 000
塔筒上直径/mm	2 583
塔筒下直径/mm	4 200
塔筒壁厚/mm	34
塔筒钢材型号	Q345c
钢材电阻率/($\Omega \cdot m$)	1.75×10^{-8}
钢材磁导率/($H \cdot m^{-1}$)	500

因为要进行电磁场分析,故该模型创建在 Electromagnetic 下的 Magnetic - Nodal 环境中。模型采用 PLANE13 单元,并且统一规范单位制为 MKS 制。

根据塔筒数据对其进行 3D 建模,如图 4 所示。

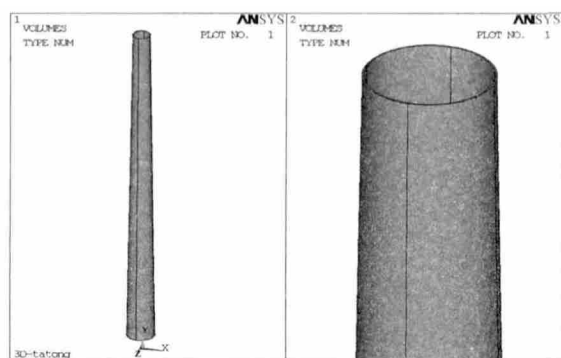


图4 3D 塔筒物理模型

由于塔筒是轴对称圆柱模型,产生的电磁场在任一竖直截面上是相同的,因此在分析时可以选择先对其一个截面及进行建模,之后可以通过旋转得到整体的塔筒模型。这样不仅能得到想要的计算结果,而且还简化了计算量。

对于雷击塔筒的二维建模,应当要考虑加入空气截面,因为需要研究雷击时塔筒内部的空间电磁场分布,故在塔筒截面模型周围,还建立了空气模型。由于模型与实物比例是 1:1,因此建立的塔筒面模型在显示时呈“线”的形状,在对某点进行分析的时候需要局部放大。在对几何模型设置单元属性、赋予材料属性之后,运用 Mesh Tool 工具对模型进行网格划分,因为分析重点在塔筒,因此对塔筒部分网格划分较为细致,空气部分略微稀疏,如图 5 所示。

图 5 中左边的图形是建立了一个塔筒加空气模型后,将面模型旋转 270° 后形成的效果。右边则是塔筒和空气面模型局部放大后的结果。从图 5 可以明显看出,塔筒模型网格划分较细,空气部分网格较大,两者间网格由小变大逐渐拟合。对于塔筒模型

边界条件确定,空气模型的边界采用施加的 $A_z = 0$ 边界条件即第一类齐次边界条件,塔筒外沿则设定为磁位沿边界线法线方向变化率为零的第二类齐次边界条件。

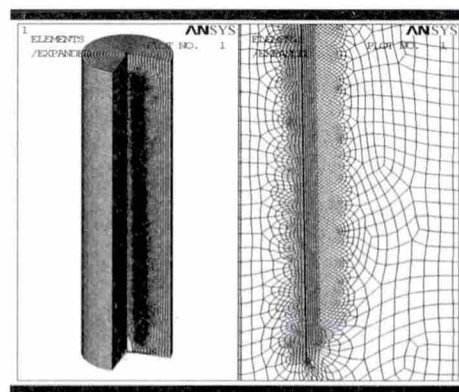


图5 塔筒网格划分

对塔筒模型完成上述条件设定之后,再对塔顶上的节点进行 VOLT 自由度耦合,然后开始从塔顶节点施加幅值为 150 kA 的 2.6/50 μs 雷电流,选择默认求解器 Frontal solver(波前求解器),并在 Transient 模式下采用全波方法(Full)开始进行求解计算。

3 雷击塔筒的电磁场计算与分析

ANSYS 软件以麦克斯韦方程组作为电磁场分析的出发点,为了使问题得到简化,通过定义矢量磁势 A 和标量电势 ∇ 两个量把电场和磁场变量分离开来,分别形成一个独立的电场和磁场的偏微分方程,这样便有利于数值求解^[1]。其中矢量磁势定义为

$$B = \nabla \times A \quad (7)$$

而标量电势定义为

$$E = -\nabla \Phi \quad (8)$$

顺利地计算之后就进入到后处理阶段。用 ANSYS 软件计算出塔筒 60 m 处的磁感应强度的结果,与文献 [6] 提出用电网络偶极子方法计算出的结果进行比较,两者结果如图 6 所示基本一致。

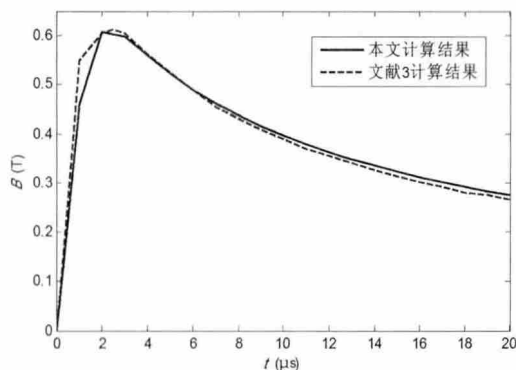


图6 塔筒 60 m 处的磁感应强度

在塔筒上取3个不同位置(塔顶、塔顶下1 m、塔底上1 m)的暂态过程进行计算得到磁感应强度 B 的变化趋势,即塔底的 B 变化较塔顶的要平缓,如图7所示,这与文献[6]得到的结论也是一致的。因此,证明了该模型的正确性。

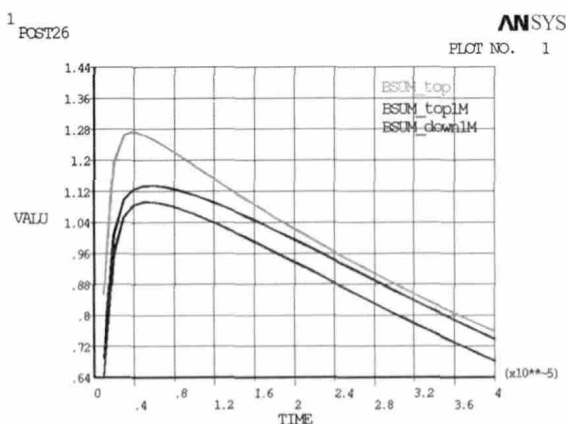


图7 塔筒上不同位置产生的磁感应强度

在证明了该模型的正确性后,取雷击 $1 \mu\text{s}$ 时刻计算塔筒电场和磁场,其分布如图8所示。

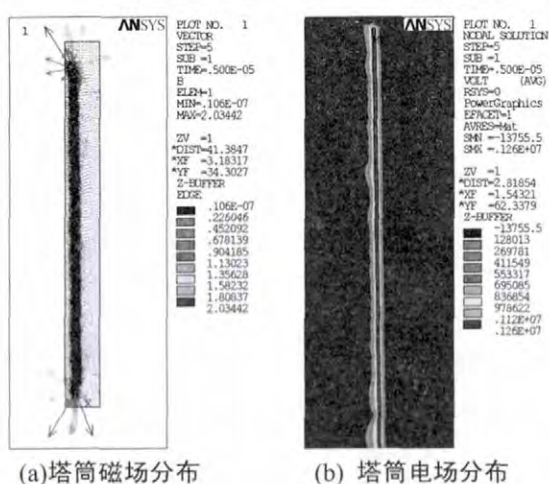


图8 雷击 $1 \mu\text{s}$ 时刻塔筒电场和磁场分布

图8(a)中反映出塔筒在遭雷击后,底部也会产生较大的磁场。这是因为在泄放雷电流进入地面时,由于强大的脉冲电流使得地电位突然升高,造成地电位反击,又再次形成一个突变电磁脉冲。因此,在塔筒底部的磁感应强度也较大。这个现象在图7中得到了反映,塔筒顶部和底部最大的磁感应强度相差仅为 0.2 T 。从图8(b)中可以很直观地看到雷击塔筒后的电场分布,塔筒顶部电场值最高,达到 $0.404 \times 10^7 \text{ V}$ 。该模型通过计算还能得到雷击过程中塔筒内部磁力线的分布,如图9所示。

该组图形可以反映出 $0 \sim 20 \mu\text{s}$ 这一暂态过程中塔筒内部空间磁场变化的趋势:塔顶周围磁场不

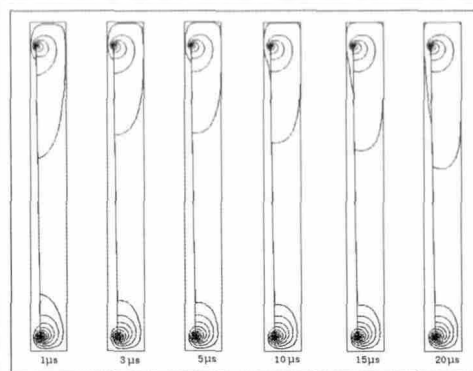


图9 雷击暂态过程中塔筒周围磁力线变化图
断向外扩散且磁力线变稀疏,表明磁场强度也在减小,而塔底周围磁场分布及大小变化较小。

对塔筒模型横向从中心轴线到塔筒外壁空气部分,纵向从塔筒 3.7 m 到 5.2 m 的截面进行路径定义并计算,结果如图10所示。

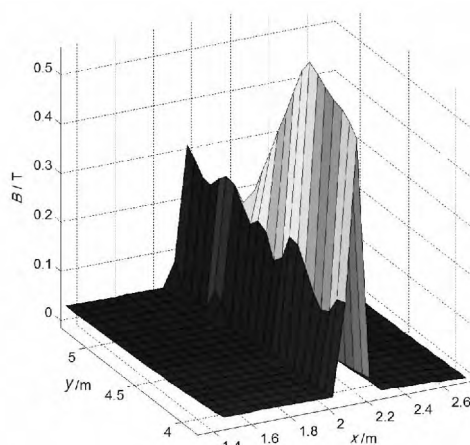


图10 $3.7 \sim 5.3 \text{ m}$ 塔筒壁截面磁感应强度

从图10中可以看出,塔筒空间中心处的磁感应强度向塔筒壁方向逐渐增大;且由于上升时间很快的雷电流含有丰富的高频分量使得整个塔身产生趋肤效应,故塔筒外壁比塔筒内壁的磁感应强度要大。

4 塔筒内部回路产生电磁干扰大小因素的分析

由于塔筒内部安装有大量的电子设备,布置着各种电源线路和信号线路,这些线路会在不同空间位置构成不同面积大小的回路。在雷击塔筒时,会对塔筒内电子器件造成巨大电磁干扰,感应出较大的感应电压,从而在回路上产生一个幅值很大的电流,并沿着信号线或电源通道进入到终端的控制设备和电源设备中,导致设备发生误动或者造成毁坏[3-14]。因此,需要对决定感应电动势产生大小的

因素进行分析。

在塔筒内选取空间点 $P_1(0,3,0)$ 和点 $P_2(1.5, 3,0)$, 在 P_1 上取 $0.3\text{ m} \times 0.3\text{ m}$ 回路1和 $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ 回路2, 在 P_2 上取 $0.3\text{ m} \times 0.3\text{ m}$ 回路3, 如图11所示。

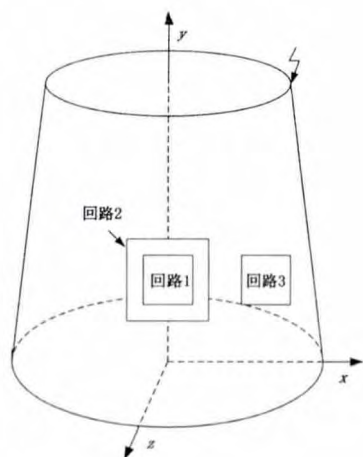


图11 塔筒内部回路

根据法拉第电磁感应原理,雷击塔筒时,突变的雷电脉冲磁场对塔筒内部金属回路上产生的感应电压为

$$u = \frac{d\Phi}{dt} = \frac{d \int_s B \cdot ds}{dt} \quad (9)$$

使用数值方法计算回路的感应电压,首先要将该回路的面积分成 N 个单元,每一个单元的面积是 $\Delta S_k (k=1,2,3 \cdots N)$, 并且认为每个单元的磁场强度都是均匀的,其值等于该单元中点处的磁场强度。因此,在对每个单元的磁场强度进行求解之后,任一时刻下的回路磁通量可以表示为

$$\Phi(i\Delta t) = \sum_{k=1}^N \Delta S_k B_k(i\Delta t) \cos\theta_k \quad (i=1,2,3 \cdots, i_{\max}) \quad (10)$$

其中, i 为计算步长。然后分别计算各回路内感应的暂态电动势,结果如图12和表2所示。

表2 不同空间回路所产生的感应电动势峰值

空间回路	回路面积 / m^2	回路中心点距塔筒内壁距离 / m	感应电压峰值 / kV
回路1	0.09	2.1	1.586
回路2	0.25	2.1	4.405
回路3	0.09	0.7	1.976

由以上计算结果可以看出,面积相同的两个回路距干扰源相差 1.4 m ,两者感应电动势相差 600 V ,同一位置的两个回路,其中回路2边长仅增加 0.2 m 则感应电动势增加近原来的3倍。因此塔筒空间内任

意回路产生感应的暂态电动势不仅由距干扰体远近决定,还由回路面积决定,并且面积因素大于距离因素。

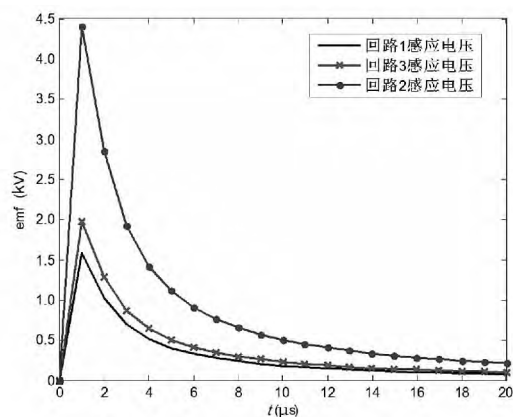


图12 各回路的感应电动势

5 结 论

对于塔筒的数值建模有学者提出过不同的方法,比如将塔筒模型简化为传输线模型,或是等效为一个耦合的电网络等,这些方法虽然较之以前的数值算法要容易一些,但是要分析雷击塔筒时整个空间电磁场的分布,还需要对空间电磁场的计算分析,其计算量就会变得很大。而用 ANSYS 软件对雷击风电机组塔筒的建模、仿真和分析,不仅简化了复杂的数值计算,而且易于理解,其结果更是直观精确。通过以上的仿真计算得到如下结论。

(1) 雷击塔筒时塔顶和塔底产生的电场和磁场较大,但是两者的最大值还是在塔顶雷击处,其中电压高达 3.644 MV ,磁感应强度达 1.192 T 。

(2) 雷击时塔筒空间中心产生的磁感应强度最小,越靠近塔筒壁磁感应强度越大,而且由于塔筒的趋肤效应使得塔筒外壁比塔筒内壁的磁感应强度要大。

(3) 由于雷击塔筒后会有地电位反击的现象出现,导致塔筒底部的磁感应强度较大,故塔底电子设备在安装时可以选择偏上的位置。

(4) 塔筒内部空间回路在突变电磁场环境下,产生的感应过电压大小,主要由距离因素和回路面积因素决定,且面积因素大于距离因素。

参考文献

- [1] IEC TR 61400224. Wind Turbine Generator System, part 24: Lightning Protection [S].

(下转第42页)

实验,结果如表4所示。

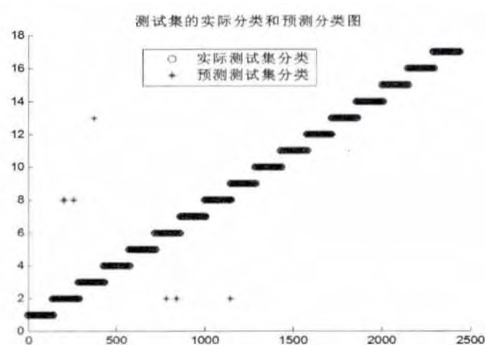


图4 最优参数设置下的测试集实际分类和预测分类图

从表4中可以看出,从平均评估正确率上看,SPREAD值为1的时候分类性能最好且稳定,SPREAD值为10的时候次之,SPREAD值为30的分类性能最差。从运行时间上看,SPREAD值为1的时候分类速度最快。因此SPREAD值为1的概率神经网络比其他的推广性要好。所以本实验表明SPREAD值为1的概率神经网络应用于母线故障识别最理想。在最优参数设置下,运行仿真程序,可以得到测试集实际分类和预测分类图,如图4所示。由图可知,外部三相短路有3个样本被分为外部BC相接地短路,2个样本分为外部AB相间短路;内部AB相短路有1个样本被分为了内部三相短路,有2个样本被分为了内部三相短路;内部CA相间短路有3个样本被分为了内部三相短路;外部AB接地短路有2个样本被分为了外部三相短路。根据每一类的识别情况表可以知道,利用概率神经网络来识别母线故障状态,具有很高的正判率。能100%区分母线区内外故障,能很好地识别母线到底处于哪一种运行状态。

4 结 论

所提出的将概率神经网络方法用于母线故障状态识别有很高的评估正确率和较好的稳定性,评估正确率高,速度快。概率神经网络的应用研究虽然在母线故障状态识别中取得较好结果,但概率神经网络也有一些问题需要进一步深入研究,如概率神经网络的性能依赖于SPREAD值的选择,如何选择合适的SPREAD值及相关参数来满足其对分类结果影响值得探讨。同时概率神经网络评估训练和测试速度有时较慢,还需进一步研究改进算法以适应母线运行状态的实时性要求。

参考文献

- [1] 詹红霞. 基于神经网络的母线保护方法的研究 [J]. 西华大学学报: 自然科学版, 2006, 25(5): 54-56.
- [2] 董秀成, 韩涵. 基于神经网络模型的母线保护故障定位研究 [J]. 西华大学学报: 自然科学版, 2009, 28(1): 1-8.
- [3] 萧彦, 赵自刚. 微机型母线保护应用中的几个问题 [J]. 华北电力技术, 2005(4): 28-31.
- [4] 银涛. 基于概率神经网络的变压器故障诊断的研究 [J]. 电气应用, 2006, 25(10): 15-17.
- [5] 王豪, 郑恩让. 概率神经网络在电机故障诊断中的应用 [J]. 化工自动化及仪表, 2010, 37(8): 59-62.
- [6] MATLAB 中文论坛. MATLAB 神经网络 30 个案例分析 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010.

(收稿日期: 2013-06-20)

(上接第8页)

- [1] Stander RB. Protection of electronic circuits from over voltages [M]. New York, USA: John Wiley & Sons Inc, 1989.
- [2] 王晓辉, 张小青. 风电机组内电子设备的雷电电磁干扰分析 [J]. 高电压技术, 2009, 35(8): 2019-2022.
- [3] 李景禄. 电力系统电磁兼容技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007. 1-3.
- [4] 赵海翔, 王晓蓉. 雷击引起风电场的地电位升高问题 [J]. 高电压技术, 2003, 29(3): 13-15.
- [5] Cho ma J. Electrical Networks—Theory and Analysis [M]. New York, USA: Wiley, 1985.
- [6] 周佩白. 电磁兼容问题的计算机模拟与仿真技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006: 213-215.
- [7] Dommel H W 著, 李永庄, 林集明, 曾昭华译. 电力系统电磁暂态计算理论 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1991.
- [8] 赵海翔, 王晓蓉. 风电机组的雷击过电压分析 [J]. 电网技术, 2004, 28(4): 27-29.
- [9] 何山, 王维庆, 张新燕, 等. 基于有限元方法的大型永

磁直驱同步风力发电机电磁场计算 [J]. 电网技术, 2010, 34(3): 157-161.

- [1] 张彦立, 王广庆, 李曼. 基于 VB 和 ANSYS 的风机塔筒参数化建模与分析 [J]. 机电工程, 2012, 29(2): 174-176.
- [2] 孙明礼, 胡仁喜, 崔海荣. ANSYS10.0 电磁学有限元分析实例指导教程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 1-3.
- [3] 张小青, 陈水明. 直接雷击时高层建筑物内暂态磁场的计算 [J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(1): 40-43.
- [4] Buccella C, Orlandi A. An Efficient Technique for the Evaluation of Lightning Induced Voltage in a Cylindrical Vessel Containing Charged Oil [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(2): 368-373.

作者简介:

程锐(1985),男,硕士研究生,研究方向为风机控制与电力系统继电保护。

(收稿日期: 2013-07-01)

基于BP-ANN和出力波动特性的光伏系统短期功率预测模型

杨青斌,袁铁江,吐尔逊·伊不拉音,陈洁,刘沛汉,刘佳铭,王再闯,葛来福
(新疆大学电气工程学院,新疆乌鲁木齐 830008)

摘要: 目前,光伏系统出力预测在精度方面还远不能满足电力系统调度的要求,已成为阻碍光伏发展的主要瓶颈问题之一。考虑到光伏系统的高度非线性特性,难以用传统的数学模型表征其输出功率与外界条件之间的映射关系。首先以传统反传播神经网络作为建模基础,建立光伏系统出力初步预测模型,再基于由光伏系统历史出力数据统计分析得到的波动量统计规律对初步预测结果进行修正,建立了具有较高精度的光伏系统出力预测模型。进一步进行算例仿真验证,结果表明所建立的光伏系统出力预测模型能够较好地反应现场实际情况。

关键词: 光伏系统; 神经网络; 波动量统计规律; 预测模型

Abstract: Currently, the output prediction of photovoltaic system could not meet the requirements of power system dispatching in the aspect of precision, which has become one of the major bottlenecks to hinder the development of photovoltaic. Taking the highly non-linear characteristics of photovoltaic system into account, it is difficult to use the conventional mathematical model to represent the mapping relationship between the output power and the external conditions. Firstly, an output preliminary prediction mode of photovoltaic system is established using the traditional back-propagation neural network as the foundation of modeling. Secondly, the initial forecast results are corrected based on the statistical regularities of fluctuation quantity in historical output data. And a higher precision model for output prediction of photovoltaic system is established. The simulation and the error analysis are verified, whose results show that the proposed output prediction model of photovoltaic system can reflect the actual situation perfectly.

Key words: photovoltaic system; BP-ANN; statistical regularities of fluctuations; forecasting model

中图分类号: TM714 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)06-0009-04

0 引言

大规模光伏系统的并网有利于缓解能源危机、保护环境,但是其输出功率具有随机性、不连续等特点会对光伏并网电力系统的安全、稳定运行以及电能质量等造成严重威胁,因此光伏系统出力预测显得极为重要。然而,目前光伏系统出力预测在精度方面还远不能满足大规模光伏并网电力系统调度的要求,并已成为阻碍光伏发展的主要瓶颈问题之一。因此,亟待针对适应大规模光伏并网电力系统调度的光伏系统出力预测模型进行研究。

光伏系统具有高度非线性特性,其输出功率主要受太阳辐照强度和温度的影响。目前大多研究都是基于光伏系统的物理特性进行建模^[1-4]。然而,

这些传统方法需要详细的物理参数。就这些参数尚且不易获得,推导出的数学模型更不一定准确,因此传统方法所建模型与实际系统特性相差甚远,且精度也极为有限。神经网络建模将建模对象当作一个黑盒子不考虑其物理意义,而是利用历史数据对神经网络进行训练,对建模对象进行识别。因此越来越多的人将神经网络技术应用于光伏系统中^[5-11]。但这些方法都只是在神经网络上进行处理,而没有再考虑光伏出力波动特性的基础上对神经网络建模后进行二次修正研究。

在上述背景下,首先以传统反传播神经网络作为建模基础,建立光伏系统出力初步预测模型,再利用由历史出力数据分析得到的波动量统计规律对其初步预测结果进行修正,建立了具有较高精度的光伏系统出力预测模型。最后,利用实际光伏系统历史数据进行了算例验证。

1 光伏系统输出功率特性

光伏系统的输出功率受外界条件影响较大,具有随机性、不连续性等特点。在影响光伏系统出力的诸多因素中,太阳辐照强度和温度影响最大。太阳辐射强度指在单位时间内垂直投射到单位面积上的太阳辐射能量,从物理意义上讲,太阳的辐照是导致光伏电池产生伏特效应的的主导因素,辐照强度的大小直接影响光伏电池出力的大小。在额定范围内,当温度一定时,光伏系统的输出功率随着太阳辐照强度的增大而增大。一般情况下,随着温度上升光伏系统的转换效率降低,当辐照强度一定时输出功率会减小。同时光伏系统的输出功率变化还具有很强的周期性,包括日变化周期和年变化周期,光伏系统主要是在每天 8:00 ~ 17:00 这段时间内输出功率,并且在大多数时间内它和电力负荷有较好的耦合性,在上午的负荷高峰时段光伏发电系统能较好地提供相当数量的功率,起到调峰的作用^[2]。

2 预测模型建模

为了提高预测的精度,所提出的预测思路是:首先基于神经网络技术对预测时段出力进行初步预测,然后利用历史出力数据的波动量统计规律对初步预测值进行修正,得到最终预测值。具体预测流程如图 1 所示。

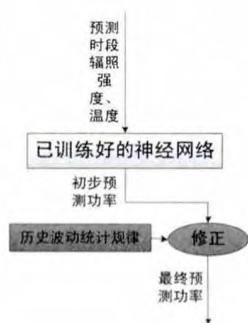


图1 总预测思路

2.1 BP神经网络结构

图2为所选取的BP神经网络模型,以温度 T 和太阳辐照强度 C 为网络的输入量(输入层输入),光伏系统的输出功率 P 为网络的输出(输出层输出), I (input)和 O (output)分别表示隐含层及其他相应输入和输出。 $f^{(1)}(\cdot)$ 、 $f^{(2)}(\cdot)$ 和 $f^{(3)}(\cdot)$ 分

别表示输入层、隐含层和输出层的激发函数(这里将 $f^{(2)}(\cdot)$ 和 $f^{(3)}(\cdot)$ 选择为sigmoid型函数)。 ω 表示神经元之间的连接权值, θ 表示神经元的阈值。输入信息沿图2所示的方向正向传递,最后输出层的输出与期望值 O_d 比较,将误差反向传递,调整各个权值和阈值的大小,这样反复操作直至输出误差达到允许的范围。

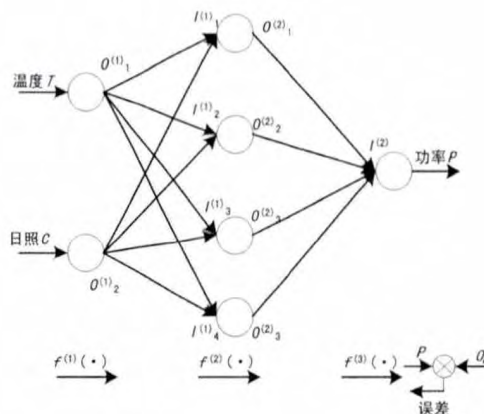


图2 BP神经网络结构图

设共有 n 个样本,对于第 n 个样本,输入输出关系为

1) 输入层

输入为 T, C

$$\text{输出为 } O_{1n}^{(1)} = f^{(1)}(T), O_{2n}^{(1)} = f^{(1)}(C) \quad (1)$$

2) 隐含层

$$\text{输入为 } I_{jn}^{(1)} = \sum_{i=1}^2 (\omega_{ji} O_{in}^{(1)} - \theta_j) \quad (2)$$

$$\text{输出为 } O_{jn}^{(2)} = f^{(2)}(I_{jn}^{(1)}) \quad j=1, 2, 3, 4 \quad (3)$$

3) 输出层

$$\text{输入为 } I_n^{(2)} = \sum_{j=1}^4 (\omega_j O_{jn}^{(2)} - \theta) \quad (4)$$

$$\text{输出层为 } P = f^{(3)}(I_n^{(2)}) \quad (5)$$

2.2 初步预测建模

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

某种现象的出现一定是由某种原因的作用引发的,光伏系统的输出功率变化过程亦是如此。光伏系统在某时刻的输出功率取决于该时刻的太阳辐照强度、温度等外界情况以及光伏系统本身利用太阳能的能力。影响光伏系统将太阳能转化成电能的能力的因素比较多,如光伏系统的总容量、电池板的类型、电池板自身的特性曲线、光伏电站的运营水平、

电池板的分布等。如果孤立地考察每个影响因素与光伏系统输出功率之间的关系,往往是非线性的,且对于光伏系统并网电力系统的研究也是没有实际意义的;但是将这些影响因素作为一个整体考虑,与光伏系统的输出功率之间一定存在着某种映射关系。因此,光伏系统输出功率的预测模型必须要能够高精度地反映这种映射关系。神经网络的主要优点是能够通过学习已有样本信息来建立反映所要处理信息之间的内在联系的模型。对于光伏系统输出功率预测初步模型的建模思路是:构建神经网络,应用历史的太阳辐照强度、温度数据和对应的光伏系统输出功率数据对模型进行训练,当用大量的历史数据将其训练到所要求精度时,该神经网络模型就能在所要求的精度范围内模拟作为研究对象的特定光伏系统,即实现初步预测模型的建立。由于训练模型需要的数据量较大,为了提高程序的运算速度和模型预测的精度,必须先对这些数据进行预处理,再用于模型的训练,进而得到较准确的初步预测模型,对光伏系统的未来某时段内的输出功率曲线进行初步预测。具体程序流程如图3所示。



图3 基于BP-ANN的光伏出力初步预测流程图

2.3 初步预测误差修正建模

光伏系统的历史出力一定存在着特定的出力波动特性,作为研究对象的目标光伏系统其预测出力也一定要满足该光伏系统历史出力数据所统计输出的波动特性,因此提出在初步预测的基础上,依据历史波动量统计规律对其进行修正。

将光伏系统历史出力的相邻两个采样时间点的出力值做差并取绝对值求得其波动量 $(|P_{n+1} - P_n|)$,形成历史出力波动量 (ΔP_n) 序列,对该序列进行统计分析,找出其在各波动量区间内的概率分布值 (p_i) 和历史最大波动量 $(\max \Delta P)$;再将各波动量区

间平均值 $(\bar{\Delta P}_i)$ 进行加权求和得到综合置信度修正量 $(C\Delta P)$,如公式(7)所示,在公式(7)中各波动量区间平均值所占权重(波动量区间置信度)为历史波动量在对应波动量区间内的概率分布值;对初步预测出力 (P_n^e) 也同样的处理,相邻两个采样时间点出力值做差得到初步预测波动量 (ΔP_n^e) 序列,将超过历史最大波动量的用综合置信度修正量 $(C\Delta P)$ 进行修正,修正后得到的最终出力及其波动量序列记为 $P_n^0, \Delta P_n^0$ 。综上所述,所提出的修正措施可以用公式(8)和公式(9)来表示为

$$C\Delta P = \sum_{i=1}^j p_i \bar{\Delta P}_i \quad j = \text{区间总个数} \quad (7)$$

$$\Delta P_n^0 = \begin{cases} \Delta P_n^e, & \Delta P_n^e \leq \max \Delta P \\ C\Delta P, & \Delta P_n^e > \max \Delta P \end{cases} \quad (8)$$

$$P_{n+1}^0 = \begin{cases} P_n^0 + \Delta P_n^0, & P_{n+1}^e \geq P_n^e \\ P_n^0 - \Delta P_n^0, & P_{n+1}^e < P_n^e \end{cases} \quad (9)$$

修正流程如图4所示。

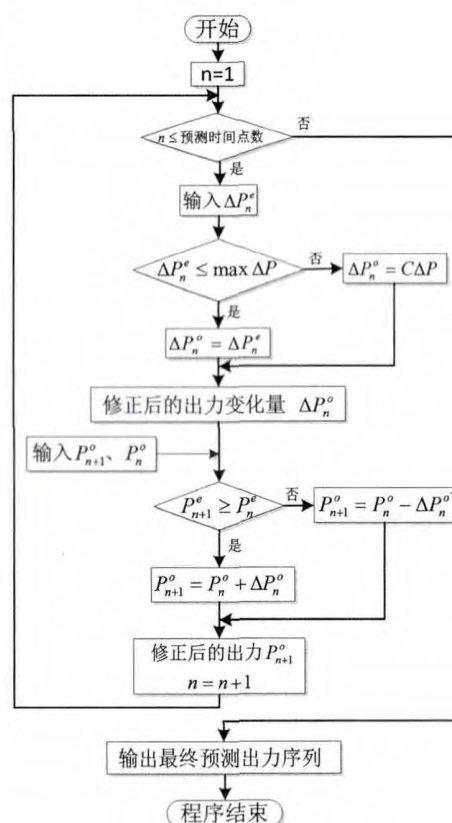


图4 初步预测误差修正流程图

3 算例分析

3.1 算例仿真

以某光伏系统作为研究对象,将该光伏系统某年9月18日的太阳辐照强度、温度和相应输出功率数据为分析样本,该样本以每隔10 min为一个时间点、共连续75个时间点。图5、图6和图7分别给出了这75个时间点的太阳辐照强度、温度和相应输出功率的数据及其变化趋势,图8为其历史出力波动量统计图。用前40个时间点的太阳辐照强度、温度和相应输出功率数据做学习样本对神经网络进行训练,最后应用训练好的神经网络对该光伏电站后35个时间点的输出功率进行预测,并与实际输出功率比较,考证其预测误差。

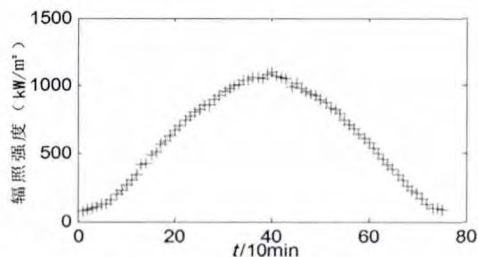


图5 太阳辐照强度历史数据

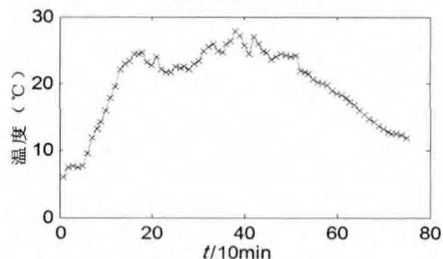


图6 温度历史数据

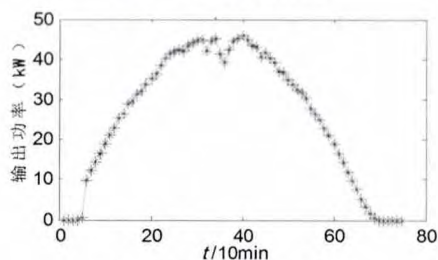


图7 输出功率历史数据

该光伏电站预测模型的最终预测结果如图9所示,初步预测值、最终预测值和实测值3条曲线对比如图10所示。从图10可以看出初步预测值基本上跟踪了实测值的变化趋势,但在局部时段出现了畸变点;经过修正后的最终预测值就更加接近于实测值,基本趋于重合。通过仔细观察可以发现即使是修正后的预测值在某些时段依然存在较大误差,此现象的出现可能是由于该时段外界条件的急剧变化增强了光伏系统的非线性特性所致。

3.2 误差分析

纵观全时段可以看出,所提出的预测模型较高

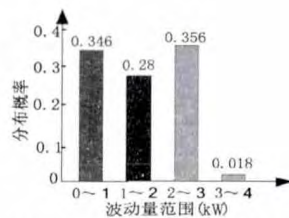


图8 历史数据波动量统计图

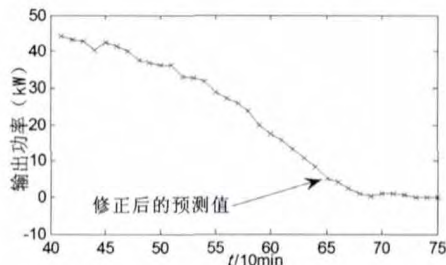


图9 40~75段内输出功率预测值

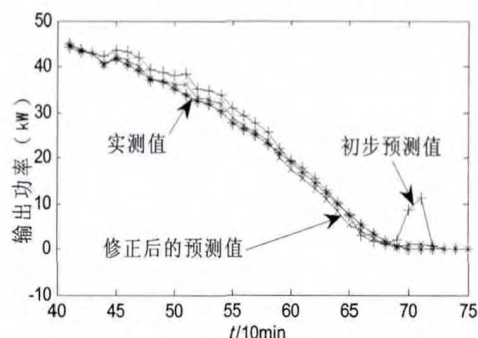


图10 40~75段内输出功率和实际值

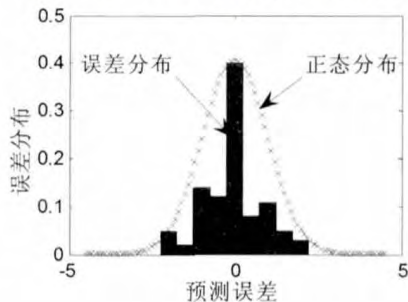


图11 预测误差概率分布

精度地反应了作为研究对象的光伏系统外界条件与输出功率之间的映射关系。预测误差近似服从正态分布,其均值为0,其方差为 $\sigma^2 = 0.9604$,如图11所示。

由图11可知,预测相对误差 e 主要集中于 $|e| \leq 4.4\%$ 之间。如果误差落在 Δe_i 内的概率为 p_i ,则 P_i 可以用公式(10)来计算。

$$p_i = \int_{P_{pk}}^{P_{pk} + \Delta e_i} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot \exp\left(-\frac{e^2}{2\sigma^2}\right) \cdot de \quad (10)$$

由式(10)计算可得误差在 $|e| \leq 4.4\%$ 内的概率为0.9587,大于4.4%的概率仅为0.0413。

(下转第65页)

2007, 19(1): 1-8.

- [6] 张保会. 加强继电保护与紧急控制系统的研究提高互联电网安全防御能力 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 1-6.
- [7] 张晓辉, 李颖, 卢志刚. 风险思想下的输电线路脆弱性综合分析 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(2): 35-40.
- [8] 黄超, 李银红, 等. 基于整定逆过程的保护定值在线校核 [J]. 电力系统及其自动化, 2011, 35(12): 59-64.
- [9] 曾耿晖, 李银红, 段献忠. 电力系统继电保护定值的在线校核 [J]. 继电器, 2002, 30(1): 22-24.
- [10] 吕颖, 张伯明. 基于集群计算机的保护定值在线校核 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(14): 12-16.
- [11] 谢俊, 石东源, 杨增力, 等. 基于多代理系统的继电保护定值在线校核预警系统 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(13): 77-82.
- [12] 朱永利, 宋少群, 朱国强, 等. 地区电网保护定值在线校验

智能系统 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(6): 87-92.

- [13] 曹国臣, 蔡伟国, 王海军. 继电保护整定计算方法存在的问题与解决对策 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 5-56.
- [14] 刘耀年, 术茜, 康科飞, 等. 基于电抗加权介数指标的电网脆弱线路识别 [J]. 电力系统保护与控制, 2001, 39(23): 89-92.
- [15] 曹一家, 陈晓刚, 孙可. 基于复杂网络理论的大型电力系统脆弱线路辨识 [J]. 电力自动化设备, 2006, 26(12): 1-5.
- [16] 华科, 谢开, 郭志忠. 采用直流和交流功率传输分布因子的输电权交易 [J]. 电网技术, 2007, 31(13): 71-74.

作者简介:

张琼(1981), 女, 助理工程师, 研究方向为电力系统继电保护;

陈召阳(1987), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护.

(收稿日期: 2013-06-19)

(上接第12页)

4 结 论

提出了以传统反传播神经网络作为建模基础, 建立光伏系统出力初步预测模型, 再利用历史出力波动量统计规律对其初步预测结果进行修正建立预测模型, 对未来短期内相应时刻的光伏系统出力进行预测。算例结果说明, 该预测模型显著提高了预测精度, 较好地模拟了现场光伏系统的实际情况, 为从预测太阳辐照强度、温度到预测功率提供了一种良好的方法。对于研究大规模光伏系统出力预测具有一定的应用价值。

参考文献

- [1] 李乃永, 梁军, 赵义术. 并网光伏电站的动态建模与稳定性研究 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(10): 12-18.
- [2] 李晶, 许洪华, 赵海翔, 等. 并网光伏电站动态建模及仿真分析 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(24): 83-87.
- [3] 郭立, 晁勤, 袁铁江, 等. 基于工程模型的光伏建模与输出特性仿真 [J]. 四川电力技术, 2011, 34(5): 89-91.
- [4] 张艳霞, 赵杰, 邓中原. 太阳能光伏发电并网系统的建模和仿真 [J]. 高电压技术, 2010, 36(12): 3097-3012.
- [5] 戴武昌, 孔令国, 崔柱. 大规模光伏并网发电系统建模与运行分析 [J]. 中国电力, 2012, 45(2): 58-63.
- [6] 茆美琴, 苏建微, 张国荣, 等. 大型光伏并网系统的建

模与仿真 [J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2005, 28(9): 1069-1072.

- [7] Tamotsu Ninomiya, Akira Takeuchi. Analysis of Beat Phenomenon and Chaotic Oscillation in Resonant Switching Converters [J]. Industrial Electronics, Control and Instrumentation, 1991(1): 417-422.
- [8] Nagy I., Denes I., Hamar J., et al. Small-signal Analysis of a Dual Channel Resonant Buck and Boost Converter [J]. Industrial Electronics, 2002, ISIE 2002, Proceedings of the 2002 IEEE International Symposium on, 2002, (4): 1279-1284.
- [9] 李伟, 朱新坚, 曹广益. 基于一种改进的BP神经网络光伏电池建模 [J]. 计算机仿真, 2006, 23(7): 228-290.
- [10] 郭亮, 陈维荣, 贾俊波, 等. 基于粒子群算法的BP神经网络光伏电池建模 [J]. 电工电能新技术, 2011, 30(2): 84-87.
- [11] 张艳霞, 赵杰. 基于反馈型神经网络的光伏系统发电功率预测 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(15): 96-101.
- [12] 栗然, 李广敏. 基于支持向量机回归的光伏发电出力预测 [J]. 中国电力, 2008, 41(2): 74-77.

作者简介:

杨青斌(1988), 男, 硕士研究生, 研究方向为洁净能源及其并网技术;

袁铁江(1975), 男, 博士, 副教授, 从事洁净能源发电及其并网技术等方面的研究工作。

(收稿日期: 2013-07-23)

特高压交流电网建设进程对四川特高压直流与相关交流断面耦合关系的影响

李 旻¹, 周后航¹, 邱丽萍², 程振龙³

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192; 3. 华北电力大学电气与工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 随着特高压交流电网建设进程的不断深入及锦苏、复奉、溪浙三大特高压直流的建成, 四川电网将形成交直流混联外送的格局。针对特高压直流闭锁后功率转移情况, 并结合特高压交流电网的建设进程, 分析与特高压直流具有较强耦合关系的交流断面, 为四川电网的安全稳定运行提供指导。

关键词: 特高压; 直流闭锁; 交流断面; 耦合关系

Abstract: With the construction process of ultra-high voltage (UHV) AC power grid and the completion of Jinsu, Fufeng and Xizhe HVDC transmission lines, Sichuan power grid will form a pattern of AC/DC hybrid power delivery. Aiming at the situation of power transfer after UHV DC blocking and combined with the construction process of UHV AC power grid, the AC sections which have a strong coupling relationship with UHV DC is analyzed, which provides guidance for the safe and stable operation of Sichuan power grid.

Key words: ultra-high voltage (UHV); DC blocking; AC transmission section; coupling relationship

中图分类号: TM711 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)06-0013-04

0 引言

根据国家电网特高压交直流混联工程建设^[1-2]进度, 2012年华北电网与华中电网通过特高压试验示范串补加强工程交流互联, 华中电网与华东电网通过复奉、锦苏 ± 800 kV特高压直流线路以及宜华、龙政、江城、林枫等 ± 500 kV直流线路互联。四川电网通过德阳—宝鸡背靠背 ± 500 kV与西北电网互联, 预计2013年“三华”联网格局将全面形成。作为大型水电外送基地, 四川水电资源丰富, 小水电多集中于川西、川南, 大型水电基地如二滩、锦屏、溪洛渡、官地、向家坝等多集中于四川中部和北部。四川电网将在近年内建成锦苏、复奉、溪浙三大特高压直流, 届时四川电网将形成交直流混联格局, 因此, 大集群水电外送及特高压交直流联网外送能力是四川电网需要重点分析解决的关键问题之一^[3-4]。

基于国家电网及各区域网省公司最新的电网发展规划方案, 建立“三华”电网2~3年基础数据和典型方式数据, 并进行校核分析, 研究四川电网安全稳定特性及各重要断面输电能力, 针对特高压直流闭锁后功率转移情况, 并结合特高压交流电网的建设进程, 分析与特高压直流具有较强耦合关系的交

流断面, 为四川电网的安全稳定运行提供指导。

1 特高压建设进程

特高压直流线路电压等级高、送电距离长、送电功率大, 一旦发生闭锁故障, 将造成功率的大范围转移, 与特高压直流输电线路并联运行的交流线路潮流加重, 引发整流侧有功过剩、换流母线电压升高甚至出现过电压等情况; 而对于受端电网来说, 直流闭锁故障会导致受端电网有功不足、换流母线电压短时升高等情况, 严重时可能会导致系统出现功角、电压稳定问题^[5-8]。

在特高压交直流并联系统中交流和直流系统相互的影响是特高压电网安全稳定影响研究的核心, 而直流系统和交流的耦合程度是影响特高压电网安全稳定水平的重要因素^[9-12]。对于复杂的“三华”电网, 与直流并联的交流通道非常复杂, 为了更好地研究交直流之间的交互影响, 确定交直流电网之间的耦合关系非常重要。特高压交流电网建设的不同阶段, 功率转移的情况有所不同, 与特高压直流耦合关系密切的交流断面也有所不同, 从特高压交流电网规划情况来看, 未来特高压建设进程大致可能为以下5个阶段。

- (1) 特高压示范工程单线加强阶段;
- (2) 特高压西纵加强阶段;
- (3) 特高压示范工程加强 + 东纵阶段;
- (4) 特高压两纵阶段;
- (5) 特高压两纵两横阶段;

从对四川电网影响的角度出发,选取(1)、(4)、(5)三个阶段分析四川特高压直流与相关交流断面之间的耦合关系。特高压交流电网建设各阶段重要断面送电功率安排如表1所示。

表1 特高压交流电网建设各阶段重要断面送电功率(MW)

断面及重要线路	特高压 两纵	特高压 两纵两横	特高压 扩建工程
川渝断面	4 000	8 650	4 000
渝鄂断面	1 200	5 900	1 200
鄂湘断面	6 400	6 400	3 000
鄂豫断面	2 000	2 000	200
鄂赣断面	4 500	4 500	3 000
特高压长南线	7 000	7 000	5 000
特高压南荆线	4 300	4 300	1 000
特高压雅安—重庆	—	4 000	—
特高压济南—徐州线	5 000	5 400	—
特高压荆门—长沙	3 200	3 200	—
特高压荆门—武汉	3 000	6 800	—
特高压武汉—南昌	2 300	2 000	—
特高压蒙锡特—晋中	2 800	1 600	—
特高压蒙锡盟特—京北	7 500	7 500	—
特高压重庆—万县	—	4 000	—
特高压京北—济南	6 800	6 200	—
特高压武汉—芜湖	—	5 600	—
锦苏直流	7 200	7 200	7 200
溪浙直流	8 000	8 000	8 000
复奉直流	6 400	6 400	6 400

2 特高压示范工程单线加强阶段

特高压示范工程单线加强阶段,长治—南阳—荆门特高压输电工程仅考虑一回加串补线路,特高压电网为“两华”同步电网。该网架下由于特高压单线加强工程安排功率送电方向为南送,故四川特高压直流功率与特高压单线加强工程送电功率之间的耦合关系不明显,与四川特高压直流送电功率耦合关系较为明显的是川渝、渝鄂500 kV交流断面。

四川特高压直流一旦发生闭锁故障,冗余功率将沿着川渝、渝鄂交流断面向华中主网转移,有可能导致断面功率过载甚至冲破断面静稳极限导致系统失去稳定。图1为特高压示范工程单线加强阶段系统接线图。

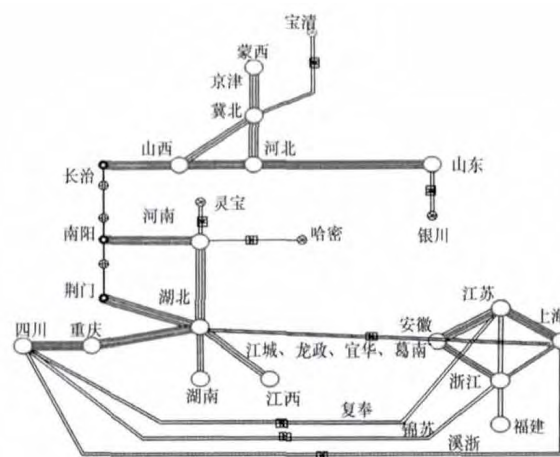


图1 特高压示范工程单线加强阶段系统接线图

(1) 复奉、溪浙、锦苏直流发生单极闭锁故障,系统均保持稳定。复奉及锦苏直流发生单极闭锁故障后川渝断面500 kV线路洪板线功率接近热稳限额(2 300 MW),溪浙直流单极闭锁后洪板线过载5.2%。

(2) 复奉直流发生双极闭锁故障,系统失稳,提升锦苏直流单极额定功率的10%(360 MW)或切向家坝电厂1台机(800 MW)即可使系统恢复稳定。

(3) 溪浙直流发生双极闭锁故障,系统失稳,提升锦苏及复奉直流双极额定功率的10%(1 360 MW)并切溪洛渡电厂1台机(760 MW),或直接切溪洛渡电厂3台机(2 280 MW),系统可恢复功角稳定。

(4) 锦苏直流发生双极闭锁故障,系统失稳,提升溪浙及复奉直流双极额定功率的10%(1 440 MW)并配合切锦屏电厂2台机(1 520 MW),或直接切除锦屏电厂3台机(2 280 MW)可使系统恢复功角稳定。

3 特高压两纵阶段

特高压两纵阶段,西纵长治—南阳—荆门特高压线加强为三回,东纵锡盟—京北—济南—徐州—南京为双回特高压双回线结构,华东电网形成南京—泰州—苏州—上海—浙江—皖南—淮南—南京双环特高压网,实现了“三华”联网格局。相比于特

②提升华中—华东电网其余直流线路额定功率的10%(2 460 MW),切除配套电源锦屏电厂9台机(5 400 MW)、二滩电厂4台机(2 200 MW)。

(1) 四川特高压直流发生单极闭锁故障,系统可保持稳定,无需采取安控措施。

(2) 复奉直流发生双极闭锁故障,系统失步,提升锦屏、溪浙直流双极功率的10%(1 520 MW)系统即可恢复稳定,或者直接在向家坝电厂切除3台机(2 400 MW)。

(3) 溪浙直流发生双极闭锁故障,系统失步,仅提升复奉、锦屏直流双极功率的10%系统无法恢复稳定,还需切溪洛渡电厂4台机(3 040 MW);或者直接采取切机措施切除溪洛渡电厂7台机(5 320 MW)。系统可恢复稳定。

(4) 锦苏直流发生双极闭锁,系统失步,提升复奉、锦苏双极直流功率的10%,并配合切锦屏电厂3台机(1 800 MW),或者直接切除锦屏电厂6台机(3 600 MW),系统可恢复稳定。

5 结 语

特高压交流工程建设不同阶段,四川特高压直流与特高压交流网络的耦合关系也有所不同。

(1) 特高压示范工程单线加强阶段,四川特高压直流送电功率主要与500 kV川渝、渝鄂断面存在强耦合关系,与特高压交流网络耦合关系不明显。特高压直流发生单极闭锁故障,系统可保持稳定,发生双极闭锁故障,采取直流调制或切机措施均可使系统恢复稳定。

(2) 特高压两纵阶段,四川特高压直流送电功率与华北—华东特高压交流断面耦合关系最为明显,其次也与500 kV川渝、渝鄂断面间存在一定的耦合关系。特高压直流发生单极闭锁故障,需要采取切机或直流调制措施使系统恢复稳定,发生双极闭锁故障需要配合采用切机、直流调制、切负荷等措施,安控量较大。

(3) 特高压两纵两横阶段,川渝交流送电断面增加了雅安—重庆特高压双回线,华东电网特高压交流受电断面也加强为4回,川渝、渝鄂、华北—华东断面承受特高压直流闭锁功率冲击的能力大大增

强,断面与特高压直流功率间的耦合关系也有所弱化。特高压直流发生单极闭锁故障系统可保持稳定,发生双极闭锁故障,采取直流调制或切机措施均可使系统恢复稳定。

参考文献

- [1] 国家电网公司. 国家电网公司“十二五”电网发展规划[R]. 北京: 国家电网公司, 2012.
- [2] 郭强, 申洪, 周勤勇, 等. 2015年国家电网主网架结构稳定性研究与评估[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2010.
- [3] 程路. 大水电与特高压建设[J]. 国家电网, 2013(2): 40-42.
- [4] 陈汉雄, 吴安平. 优化川电东送曲线 减少四川丰期弃水[J]. 中国电力, 2010, 43(4): 9-13.
- [5] 谢惠藩, 王海军, 陈潜, 等. 云广特高压直流对南方电网稳定性影响[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(6): 130-137.
- [6] 赵强, 许婧, 王琦, 等. 宁东直流山东侧电网稳定控制措施研究[J]. 中国电力, 2012, 45(4): 5-9.
- [7] 常海军, 刘福锁. 一种表征特高压交直流耦合程度的方法[J]. 中国电机工程学会电力系统自动化专业委员会三届一次会议暨2011年学术交流会论文集, 2011: 1-7.
- [8] 王鹏飞, 张英敏, 李兴源, 等. 基于无功有效短路比的交直流交互影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(6): 74-78, 85.
- [9] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [10] 杨卫东, 徐政, 韩祯详. 多馈入交直流电力系统研究中的相关问题[J]. 电网技术, 2000, 24(8): 13-17.
- [11] 周保荣, 金小明, 吴小辰. 特高压直流对交直流并联电网安全稳定影响[J]. 南方电网技术, 2010, 4(2): 31-34.
- [12] 霍鹏飞, 王国功, 刘敏, 等. 向上±800 kV特高压直流输电工程的直流保护闭锁策略[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 137-139, 144.

(收稿日期: 2013-07-30)

欢迎订阅 欢迎投稿

交直流互联系统电压稳定性研究

高超峰, 康积涛

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 利用分岔理论对交直流互联电力系统电压稳定性进行分析。首先对交直流系统进行数学建模, 给出系统、发电机、励磁系统和直流系统数学模型表达式, 利用连续潮流方法对系统平衡解流形进行追踪并求取分岔点。通过考虑直流电流参考值、励磁系统参考电压等系统参数对电压稳定性的影响, 并利用实际 WSCC9 节点系统进行验证分析。最后通过时域仿真的方法还初步探讨了直流输电线路对整流侧和逆变侧电压的影响。

关键词: 交直流系统; 分岔理论; 电压稳定性; 系统参数; 连续潮流法

Abstract: The voltage stability of AC/DC interconnected power system is analyzed with bifurcation theory. Firstly, the mathematical modeling of AC/DC system is done, and the mathematical expressions of system, generator, excitation system and DC system are given. The continuation power flow method is used to track the equilibrium solution manifold of the system and get the bifurcation point. Considering the influences of system parameters on the voltage stability such as DC reference current, the reference voltage of excitation system, it is verified with the actual WSCC9 system. Finally, the influence of DC transmission line on the voltage of rectifier side and inverter side is discussed with time domain simulation method.

Key words: AC/DC system; bifurcation theory; voltage stability; system parameter; continuation power flow method

中图分类号: TM712 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2013)06-0017-06

0 引言

直流系统由于不存在功角稳定问题, 并且具有快速调节特性^[1], 近来以高压和特高压直流输电为代表的交直流输电系统在中国电网中应用越来越多。相比交流系统, 直流系统具有更多的参数和变量, 并且其中应用大量的电力电子器件, 使得交直流系统具有很强的非线性特性^[2], 在运行中换流器会消耗大量无功功率, 逆变器吸收的无功功率约占直流输送功率的 40% ~ 60%, 这对交流系统的容量提出非常高的要求^[3], 使得系统电压稳定性面临严峻的挑战, 需要深入研究影响系统电压稳定性的因素。

分岔理论是起源于力学失稳现象的一种理论^[4], 1961 年 Andronov 和 Neimark 第一次把分岔理论应用到电力系统的研究中, Harry G. Kwantny 等人首次在对电压稳定性的研究中应用分岔理论。目前的分岔分析方法中大多以静态分析方法^[5-7]为主。分岔理论能够更加精确地分析临界点附近系统的稳定性情况^[8]。目前, 利用分岔理论对交直流互联系统电压稳定性的研究还不是很深入, 与交流系统相

比, 直流系统具有更多的动态元件和非线性环节^[9], 为揭示电压失稳的机理, 需要采用微分代数模型, 进入深入研究。

选取更接近实际的交直流系统电压稳定性进行研究, 使得出结论更具有可信度, 通过连续潮流方法^[10]得到系统 PV 曲线并求取系统霍普夫和鞍结分岔点, 通过研究发现系统参数对电压稳定的影响作用, 最后, 通过时域仿真^[11]的方法, 观察整流侧和逆变侧电压在 Hopf 分岔点电压随时间的变化情况, 得出影响交直流系统电压稳定的一些结论。

1 电力系统的系统模型

一般电力系统电压稳定性分析中, 电力系统的模型可以表示为一组微分-代数方程组^[8]。

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, y, \mu) \\ 0 = g(x, y, \mu) \end{cases} \quad (1)$$

式中, 令 $x = (\sigma, \omega, E'_q, E'_d, E_{fd}, u_R, R_F)$ 为系统中的微分变量; $y = (u, \theta)$ 为系统中的代数变量; $\mu = (P_i, Q_i)$ 为系统的控制参数(也可以选其他变量)。为了考察式(1)系统的动态稳定性, 在平衡点对式(1)进

行微分变换。

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = D_x f(x_0, y_0) \cdot dx + D_y f(x_0, y_0) \cdot dy \\ 0 = D_x g(x_0, y_0) \cdot dx + D_y g(x_0, y_0) \cdot dy \end{cases} \quad (2)$$

对上式进行变换得到系统的雅可比矩阵 $J = A - BD^{-1}C$, $A = D_x f(x_0, y_0)$, $B = D_y f(x_0, y_0)$, $C = D_x g(x_0, y_0)$, $D = D_y g(x_0, y_0)$, 由分岔理论可知系统的稳定性完全由这个矩阵的特征值决定。

1.1 同步发电机的数学模型

同步发电机的运行特性在电力系统中起着举足轻重的作用,在对电力系统电压稳定性问题进行分析 and 研究的整个过程中,发电机是必须要考虑的因素之一。作为一种复杂的旋转设备,在发电机的建模中一般都应用随电机同步旋转的 $d-q$ 坐标系,于是首先要对基于同步坐标 $x-y$ 分量进行机网变换。针对不同的具体问题,发电机根据转子绕组数的不同采用不同的模型。这里采用 IEEE 双轴 4 阶模型,主要考虑转子绕组的暂态过程而忽略次暂态过程和定子绕组暂态过程,同时考虑 g 绕组、 f 绕组暂态和转子运动的动态。发电机实用 4 阶模型^[1]如下。

$$\begin{cases} \dot{\sigma} = (\omega - 1)\omega \\ M\dot{\omega} = T_M + u_1 \left[\frac{E'_d \cos(\theta' - \delta)}{x'_q} + \frac{E'_q \sin(\theta - \delta)}{x'_d} \right] \\ + \frac{u_1^2 \sin 2(\theta_1 - \delta)}{2} \left(\frac{1}{x'_q} - \frac{1}{x'_d} \right) - D(\omega - \omega_0) \\ T'_{d0} \dot{E}'_q = -\frac{x_d E'_q}{x'_d} + \frac{1}{x'_d} [x_d - x'_d] u_1 \cos(\theta_1 - \delta) \\ + E_f d \\ T'_{f0} \dot{E}'_d = -\frac{x_q E'_q}{x'_q} - \frac{1}{x'_q} [x_q - x'_q] u_1 \sin(\theta_1 - \delta) \end{cases} \quad (3)$$

式中, i 取值由 1 至发电机总数; j 为与节点 i 相连的节点号; δ_i 为第 i 台发电机功角; θ_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间的电压相角差; g_{ij} 和 b_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间的电导和电纳。

1.2 励磁系统数学模型

励磁系统的动态特性对系统稳定有着重要的影响,通过励磁电流的调节从而调节无功输出,达到稳定发电机机端电压的目的,这里采用励磁器——IEEE DC I 型励磁器,数学模型采用文献^[2]提出的一阶模型。

$$T_A \dot{E}_{fd} = -E_{fd} + K_A (u_{ref} - u_t) \quad (4)$$

式中, T_A 和 K_A 分别为励磁调节器的时间常数和放大倍数; u_{ref} 为励磁参考电压。

1.3 直流系统数学模型

直流系统数学模型一般分为稳态模型、准稳态模型和暂态模型^[3],这里研究小扰动情况下交直流系统的电压稳定性,考虑到直流换流器控制方式的动态行为,直流系统采用准稳态模型。

由于直流线路的两端一般都与交流系统相连接,一端通过整流器把交流变为直流,另外一端通过逆变器把直流变为交流,如图 1 所示。

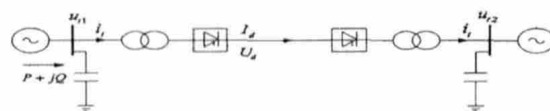


图1 直流系统结构图

整流器和逆变器原理基本相同,所以统称为换流器,其数学模型如下^[2,14]。

$$\begin{cases} U_d = k_T u_t \cos \theta_d - X_c I_d \\ U_d = k_r k_T u_t \cos \varphi \\ \dot{x}_{rec} = K_I (I_{ref} - I_d) \\ \cos \alpha_{rec} = x_{rec} + K_p [I_{dref} - I_d] \end{cases} \quad (5)$$

式中, k_T 和 θ_d 分别为换流变压器变比和换流器的控制角,最后两个公式说明换流器的控制方式,这里主要研究的是整流器定电流逆变器定熄弧角这种控制方式; K_I 和 K_p 分别为积分放大倍数和比例放大倍数。

考虑到直流线路和控制器的动态过程,直流线路采用 $L-R$ 等值电路,忽略对地充电电容,微分方程^[3]为

$$\dot{I}_d = \frac{1}{L} (U_{drec} - U_{dinv} - I_d R_d) \quad (6)$$

式中, U_{drec} 和 U_{dinv} 分别代表整流侧和逆变侧直流电压; R_d 为直流线路电阻。

1.4 系统网络模型

发电机节点的潮流方程^[14]为

$$\begin{cases} \frac{u_i}{x'_{di}} E'_{qi} \sin(\delta_i - \theta_i) - \frac{u_i}{x'_{qi}} E'_{di} \cos(\delta_i - \theta_i) \\ - u_i \sum_{j=1}^n u_j [g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}] = 0 \\ \frac{u_i}{x'_{di}} E'_{qi} \cos(\delta_i - \theta_i) + \frac{u_i}{x'_{qi}} E'_{di} \sin(\delta_i - \theta_i) - \frac{u_i^2}{x'_{di}} \\ - u_i \sum_{j=1}^n u_j [g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}] = 0 \end{cases} \quad (7)$$

非发电机节点潮流方程为

$$\begin{cases} u_l \sum_{k=1}^n u_k [g_{lk} \cos \theta_{lk} + b_{lk} \sin \theta_{lk}] + P_l = 0 \\ u_l \sum_{k=1}^n u_k [g_{lk} \sin \theta_{lk} - b_{lk} \cos \theta_{lk}] + Q_l = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中, l 为非发电机节点号; k 为与 l 相关联节点号; P_l 和 Q_l 为节点 l 的负荷给定的有功和无功功率。

直流节点的潮流方程为

$$\begin{cases} u_s \sum_{s=1}^n u_s [g_{rs} \cos \theta_{rs} + b_{rs} \sin \theta_{rs}] + P_l \pm U_d I_d = 0 \\ u_r \sum_{s=1}^n u_s [g_{rs} \sin \theta_{rs} - b_{rs} \cos \theta_{rs}] + Q_l + U_d I_d \tan \varphi = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中, r 为直流节点; s 为与直流节点相关联的交流节点; 第一个方程中正号表示整流器端, 负号表示逆变器端。

2 分析理论

2.1 分析理论

在电力系统电压稳定性分析中根据所考虑的动态特性变化范围的不同, 分岔可以分为局部分岔和全局分岔^[2]。局部分岔是单独研究平衡点的某一邻域内向量场的分岔, 常见的有: 鞍结分岔、奇异诱导分岔、霍普夫分岔、极限诱导分岔。这里主要针对交直流系统在霍普夫分岔和鞍结分岔时系统电压稳定特性进行研究。

(1) 霍普夫(Hopf)分岔^[7]

通过选择可控的系统参数在不断变化的过程中, 系统雅可比矩阵的一对共轭特征值从左向右或是从右向左穿越虚轴, 系统发生霍普夫分岔。其中又分为超临界和亚临界霍普夫分岔。

(2) 鞍结分岔(SNB)^[7]

系统初始运行时一般至少有 2 个平衡点, 随着控制参数的不断变化, 相应平衡点也会沿着系统 PV 曲线相互靠近, 当系统参数到达一定临界值时, 两个平衡点会合并为一个, 此时发生 SNB 分岔, 对应系统特征方程有一个零特征值。

2.2 连续潮流法(延拓法)

连续潮流法是对电力系统电压稳定性分析的有力工具, 在对交直流系统电压稳定性分析研究中应用连续潮流方法^[1]追踪系统的平衡解流形并求取分岔点, 这种方法可以避免在临界点常规潮流方程

难以收敛的问题。连续潮流法包含 4 个步骤: 预估、校正、步长控制和参数化^[8]。此方法的基本思想就是从初始运行点开始, 随着控制参数的不断变化, 通过对下一运行点进行预估、校正, 直至绘制出完整的系统 PV 曲线。

在分析中, 一般将系统变量 x, y 统一用 z 表示。 x, y 的维数分别为 $p, q, n = p + q$, 系统的平衡解流形 Φ 可以表示为

$$\Phi = \{z \in R^{n+1} / F(z) = 0\} \quad (11)$$

① 预估^[8]

$$DFz = \frac{\partial F}{\partial z} = \begin{bmatrix} \partial F_1 / \partial z_1 \partial F_1 / \partial z_2 \cdots \partial F_1 / \partial z_{n+1} \\ \partial F_2 / \partial z_1 \partial F_2 / \partial z_2 \cdots \partial F_2 / \partial z_{n+1} \\ \cdots \\ \partial F_{n+1} / \partial z_1 \partial F_{n+1} / \partial z_2 \cdots \partial F_{n+1} / \partial z_{n+1} \end{bmatrix}$$

初始的 3 个点用切向量法进行追踪, 启动算法, 其切向量通过下式求解为

$$\begin{bmatrix} DFz \cdot \tau_1 \\ \tau^2 - 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (12)$$

从第 4 个点开始, 采用切线加割线的方法^[8]进行追踪, 切向量采用下面方法进行求解^[8]。

$$J_p =$$

$$(-1)^{p+1} \det \begin{bmatrix} \partial F_1 / \partial z_1 \partial F_2 / \partial z_2 \cdots \partial F_1 / \partial z_{p-1} \partial F_1 / \partial z_{p+1} \cdots \partial F_1 / \partial z_{n+1} \\ \partial F_2 / \partial z_1 \partial F_2 / \partial z_2 \cdots \partial F_2 / \partial z_{p-1} \partial F_2 / \partial z_{p+1} \cdots \partial F_2 / \partial z_{n+1} \\ \cdots \\ \partial F_n / \partial z_1 \partial F_n / \partial z_2 \cdots \partial F_n / \partial z_{p-1} \partial F_n / \partial z_{p+1} \cdots \partial F_n / \partial z_{n+1} \end{bmatrix}$$

其中, $p = 1, 2, \cdots, n+1$ 。

$V = [V_1, V_2, \cdots, V_{n+1}]^T, \tau = V / \|V\|$, 即为平衡解流形 Φ 的单位切向量。

设 τ_i 是 z_i 点处的单位切向量, $d_i = z_i - z_{i-1}$ 是 z_i 点和前一个 z_{i-1} 点的割线方向, $v_i = \tau_i + d_i$ 代表切线加割线方法得到的预估方向。这样可以得到最初的预估值, $z'_{i+1} = z_i + hv_i, h$ 为步长。

② 校正及参数化^[8]

对初值进行校正采用的是垂直法校正, 然后对预估值进行修正得到准确值, 修正表达式为

$$z_{i+1} = z'_{i+1} - \left[\frac{DFz(z'_{i+1})}{\tau^T(z'_{i+1})} \right]^{-1} \begin{bmatrix} F(z'_{i+1}) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (13)$$

通过牛顿迭代法求解上述方程组, 直到得到准确解。

③ 步长控制

在算法的实现过程中, 步长选择是一个重要因素: 如果步长太大, 会导致曲线不精确; 步长太小, 虽

然计算结果精确,但是计算量过大。实时根据曲线形状调整步长大小成为不错的选择,这里采用如下步长控制方法^[9]为

$$h = h_0 / \| \tau \| \quad (14)$$

式中, $\| \tau \|$ 为切向量的 2-范数或 ∞ -范数; h_0 为初始设定的一个标量。

2.3 单参数分岔点的求解方法

单参数分岔点的求解方法主要有延拓法和直接法。延拓法^[9]利用连续潮流法追踪系统的平衡解流形得到 PV 曲线,过程中利用雅可比矩阵特征值的变化情况检查是否满足各种分岔发生的条件、判断 PV 曲线上是否存在相应的分岔点。直接法就是用牛顿拉夫逊法直接求解各种分岔点所满足的分岔条件和平衡解条件的非线性代数方程组^[11]。

直接法求霍普夫分岔点的迭代方程组为

$$\begin{cases} f(x, y, \mu) = 0 \\ g(x, y, \mu) = 0 \\ Jv = i\omega v \\ \langle v, v^0 \rangle = 1 \end{cases} \quad (15)$$

式中, v 为未知变量; v^0 为已知列向量; $J = A - BD^{-1}C$, (x, y, v, ω) 为上述方程的未知数。

直接法求鞍结分岔点的迭代方程

$$\begin{cases} f(x, y, \mu) = 0 \\ g(x, y, \mu) = 0 \\ A_{\text{sys}} p = 1 \\ \langle p, p^0 \rangle = 1 \end{cases} \quad (16)$$

式中, p 为未知向量; p_0 为已知量; $A_{\text{sys}} = \begin{bmatrix} AB \\ CD \end{bmatrix}$; (x, y, p) 为上面方程组的未知数,且 $(x, y, p) \in R^n \times R^m \times R^{n+m}$, 于是方程的个数为 $n + m + n + m + 1 = 2n + 2m + 1$ 。

2.4 时域仿真法

电力系统电压失稳实质上是一个动态发展过程,时域仿真法就是考虑系统的非线性和元件的动态特性的影响,利用数值积分的方法得到电压等状态量随时间变化的曲线。这里采用联立求解法^[4],利用隐式梯形法对微分方程进行求解,基本思想为:用隐式梯形法将微分方程转化为差分型代数方程,然后与代数方程组联立,最后用牛顿拉夫逊法解此非线性方程组。

隐式梯形法的计算方法为

$$\begin{cases} x_{n+1} = x_n + [f(t_n, x_n, y_n) + f(t_{n+1}, x_{n+1}, y_{n+1})] h/2 \\ g(t_{n+1}, x_{n+1}, y_{n+1}) = 0 \end{cases} \quad (17)$$

3 电压稳定性研究

研究选取交直流系统是在 WSCC9 节点系统的基础上稍加改造,将节点 7 和 8 之间的交流线路换成直流线路,如图 2。与发电机 1 相连节点定为参考节点,参数见文献^[2] 直流线路,电抗为 0.025 p. u., 额定功率为 67.2 MW,额定电压为 56 kV,额定电流为 1.2 kA,初始触发角和熄弧角分别为 18° 和 20° ,系统基准额定功率为 100 MW,直流电流和电压都去额定值下的参考值。

对交直流系统电压稳定性的研究是在基于 Matlab 仿真基础上进行的,通过 M 文件编程实现系统模型建立,并应用前文所提到的算法求取系统的 PV 曲线,系统参数都用标么值表示,对于不同参数表现出的不同系统特性进行仿真实验,从而发现问题。选择与 1 节点相连的发电机 1 的有功功率 P 作为系统的控制参数。

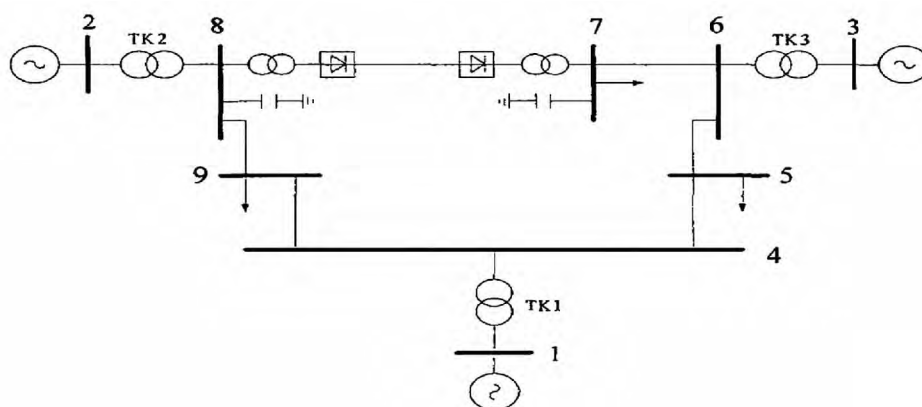


图2 WSCC9 节点交直流系统

3.1 系统参数对电压稳定性的影响

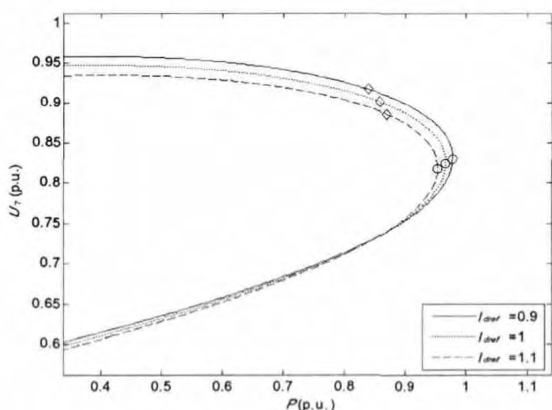


图3 I_{dref} 取不同值时系统 $P-U_7$ 曲线

图3中, $\diamond$ 代表Hopf分岔, $\circ$ 代表SNB分岔,通过大量的仿真实验发现,系统在发生SNB分岔之前一般会先发生Hopf分岔^[5],通过对分岔点的时域仿真曲线可以看出,系统在Hopf分岔点处会发生振荡失稳,所以Hopf分岔点处的功率即为系统的传输功率极限^[5]。图3中 I_{dref} 为系统直流电流的参考值,可以看出随 I_{dref} 的增大Hopf分岔点依次发生延迟,传输功率逐渐增大,但是,系统的电压水平降低,这是由于 I_{dref} 较小时,直流系统对交流系统的无功需求比较小,而且能够降低换相失败的可能性^[5]。

从图4可以看出,当 V_{ref} 为0.89时,此时即使系统负荷比较轻的情况下,系统还是会比较早的就发生Hopf分岔,说明此时系统非常不稳定;当 V_{ref} 为1.5时,这时系统在发生SNB分岔之前不再发生Hopf分岔现象,可以看出随着 V_{ref} 的不断增大,系统分岔点不断右移,说明选取比较高的 V_{ref} 不仅可以提高系统的传输功率极限,而且还可以消除Hopf分岔点,从而避免系统发生振荡失稳^[2]。

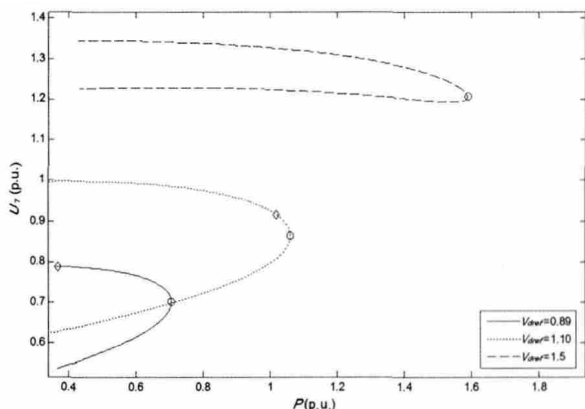


图4 V_{ref} 取不同值时系统 $P-U_7$ 曲线

3.2 直流输电线路对电压稳定性的影响研究

针对所选WSCC9交直流系统,换流器控制方

式选择定电流定熄弧角(CC/CEA),在感应电动机负荷下,应用时域仿真法观察整流侧和逆变侧电压在Hopf分岔点处受到扰动后,电压随时间的变化情况。

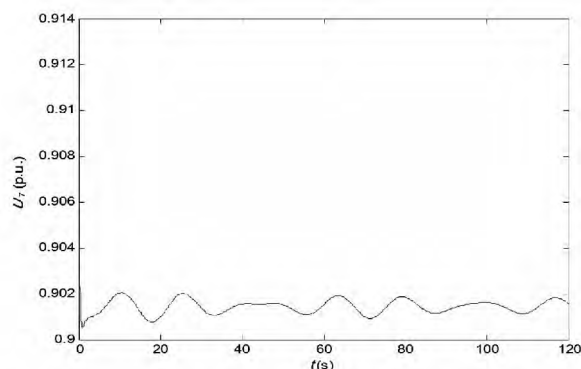


图5 节点7直流电压的时域仿真曲线

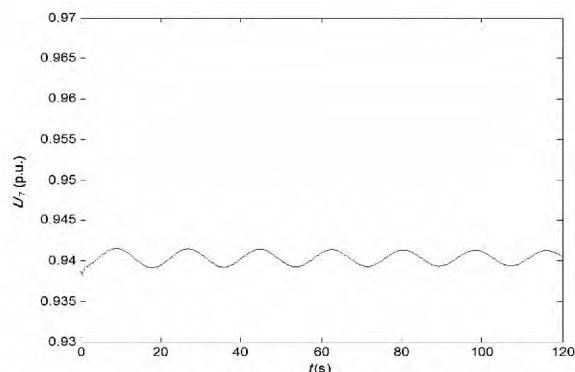


图6 节点8直流电压的时域仿真曲线

对比图5和图6可以看出,在Hopf分岔点处受到相同大小的扰动,逆变侧节点电压 U_7 做非等幅振荡,并且有明显的畸变,而整流侧节点电压 U_8 做等幅振荡,这说明了直流系统对两端的影响程度不相同,这是因为换流设备在扰动发生后快速作用,通过调节阀的触发角,改变潮流和电压的大小,逆变侧由于功率的传输要经过直流线路和换流设备,所以受直流系统的影响比较大,逆变侧电压会出现。

4 结 论

通过对发电机、励磁系统和交直流系统网络进行建模,并考虑交直流系统中换流器及其控制方式等动态变化规律,运用分岔分析方法,通过连续潮流方法追踪系统平衡解流形,并求取霍普夫分岔和鞍结分岔。增大系统直流的参考值可以延迟系统Hopf分岔但是以降低系统电压水平为代价的,所以在应用中应注意权衡;并不是所有情况下系统都会

发生 Hopf 分岔,当励磁系统参考电压比较大时,系统只发生 SNB 分岔,此时 SNB 分岔点作为系统传输功率极限点,并且采用较高的励磁系统参考电压可以避免系统发生振荡失稳。最后通过时域仿真的方法发现,直流系统对两端交流节点电压的影响并不相同,逆变侧由于受直流系统影响比较大,会出现电压畸变现象。

参考文献

- [1] 刘明波,程劲辉,程莹. 交直流并联电力系统动态电压稳定性分析 [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998,13(13):923-931.
- [2] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析 [M]. 北京:机械工业出版社,2004.
- [3] 庄慧敏. 基于分岔理论的交直流电力系统电压稳定性分析方法研究 [J]. 成都:西南交通大学,2009.
- [4] 刘彩霞,周艳平. 分岔理论在电力系统电压稳定性中的应用 [J]. 云南水利发电,2007,23(3):87-90.
- [5] 彭志炜,胡国根,韩祯祥. 基于分岔理论的电力系统电压稳定性分析 [M]. 北京:中国电力出版社,2005.
- [6] 刘崇茹,张伯明. 交直流混合输电系统灵敏度分析 [J]. 电力系统自动化,2007,31(12):45-49.
- [7] 邱革非,束洪春,董俊,等. 联于弱交流系统的 HVDC 输电系统输电能力和电压稳定性的研究 [J]. 昆明理工大学学报,2005,30(3):50-55.
- [8] 庄慧敏,肖剑. 交直流系统电压稳定性的 Hopf 分岔分析 [J]. 高电压技术,2009,35(3):699-704.
- [9] 李康. 基于分岔理论的电力系统动态电压稳定性分析

[J]. 成都:西南交通大学,2012.

- [10] S. L. Richer, R. A. Decarlo. Continuation Methods: Theory and Application [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems, 1983, 30(4):459-463.
- [11] 顾伟. 电力系统最优分岔控制研究 [J]. 南京:东南大学,2006.
- [12] 樊纪超. 交直流并联输电系统动态安全域及其割集表示 [J]. 天津:天津大学,2005.
- [13] 王锡凡,方万良,杜正春. 现代电力系统分析 [M]. 北京:科学出版社,2003.
- [14] 谭涛亮,张尧. 交直流互联系统动态电压稳定的分岔值分析 [J]. 电网技术,2011,35(3):49-56.
- [15] 李宏仲. 基于 Hopf 分岔理论的电力系统动态电压稳定研究 [J]. 上海:上海交通大学,2008.
- [16] 赵兴勇,张秀彬,苏小琳. 电力系统电压稳定性研究与分岔理论 [J]. 电工技术学报,2008,23(2):87-95.
- [17] X. Yang, Y. Chen, H. L. Shu. Stability Analysis of AC/DC Power Transmission System based on Bifurcation Theories [J]. Sustainable Power Generation and Supply, Nanjing, 2009:1-7.

作者简介:

高超峰(1989),男,硕士研究生,研究方向为电力系统电压稳定性;

康积涛(1962),男,教授,研究方向为电力调度自动化、电力系统无功优化、电压稳定性、嵌入式测控装置和工业监控组态软件的研究。

(收稿日期:2013-06-20)

(上接第3页)

- [1] 周宏林,杨耕. 大型 DFIG 风电场的 LCC-HVDC 并网及控制 [J]. 电力自动化设备,2009,29(7):8-12.
- [2] 姚伟,迟永宁,程时杰,等. 直流输电技术在海上风电场并网中的应用 [J]. 中国电力,2007,40(10):70-74.
- [3] 汪宁渤. 甘肃酒泉千万千瓦风电基地面临的挑战与应对措施 [J]. 电网与清洁能源,2009,30(7):43-47.
- [4] 肖创英,汪宁渤,丁坤,等. 甘肃酒泉风电功率调节方式的研究 [J]. 中国电机工程学报,2010,30(10):1-7.

作者简介:

张东明(1987),男,硕士研究生,研究方向为电力系统

稳定与控制;

姚秀萍(1961),女,高级工程师,研究方向为电力系统稳定与控制及风力发电技术;

王维庆(1959),男,教授,博士研究生导师,主要研究方向为电力系统自动化和风力发电机组的智能控制;

常喜强(1976),男,高级工程师,研究方向:电力系统稳定与控制及风力发电技术;

王海云(1973),女,副教授,硕士研究生导师。研究方向为可再生能源发电与并网技术。

(收稿日期:2013-09-27)

线路重合闸投退方式的研究

吴桂芳¹, 胡仁祥¹, 冯小萍², 常喜强²

(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: 从架空线、电缆线在单电源和双电源情况下进行重合闸装置的投退分析, 重点考虑架空线与电缆线的混合线路重合闸, 得出的结论可为电力相关部门在决策和实施上提供一点借鉴。

关键词: 混合线路; 重合闸; 分布式电源; 投退

Abstract: The switching on and off of reclosing device are analyzed under single and double power source for overhead transmission lines and cable conductors, which focuses on the reclosing of hybrid lines of overhead line and cable conductor. The obtained conclusion can provide a reference to the decision and implementation for the related departments.

Key words: hybrid line; reclosing; distributed generation; switching on and off

中图分类号: TM732 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)06-0023-03

随着社会的发展, 城市化快速建设的同时, 要求城市中原有的架空线改为电缆线路下地已经成为一种趋势, 但对于早期大量已经建设完成的架空线路, 要一次全部改造成电缆线路也不可能马上实现, 势必会出现另一种局面, 电力电缆和架空线混合线路出现在供电网络中。这种电力电缆和架空线混合线路因其灵活性在城市电网中得到越来越广泛的应用, 但对继电保护和重合闸配置提出了更高的要求。由于架空线故障一般(90%)是瞬时故障, 需要启动重合闸, 恢复供电; 而电力电缆故障, 一般是永久故障, 再次重合会对电缆产生较大的损伤, 因此给线路重合闸的投退带来了新的挑战。

近几年电力公司对输电线路的可靠性管理指标和各公司之间的同业对标要求越来越高, 也越来越严格。为了提高供电可靠性, 输电线路都投入了重合闸装置, 这对于混合线路中的架空线上的故障(多为瞬时故障), 能起到快速的恢复供电。若是故障发生在电力电缆线路上(多为永久性故障), 重合闸动作又将重合于故障线路上, 对系统造成再一次的冲击。此时若未投入重合闸装置, 势必造成整个混合线路停电, 给输电线路运行可靠性指标带来不利影响。故具体是否投入该线路重合闸, 就需要权衡供电可靠性和设备安全等多方面因素最后决定。

其次, 分布式电源的接入使原来单一辐射性网络变成双电源或多电源供电系统, 此时需要对其线

路的重合闸方式进行进一步的深入研究。

正是针对上述情况, 通过对常规架空线和电力电缆线路投入和不投入重合闸带来的利弊进行分析, 以最大限度地提高线路的供电可靠性。

1 全架空线路对重合闸投退的影响

1.1 单电源辐射型架空线路

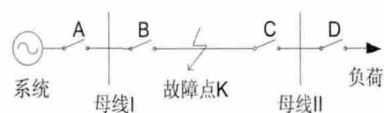


图1 单电源辐射型架空线路示意图

如图1所示, K点发生瞬时故障, 保护B动作跳开, 重合闸动作, 线路恢复供电。电力系统运行经验表明, 架空线路绝大多数的故障都是“瞬时性”的, 永久性的故障一般不到10%。因此, 在由继电保护动作切除短路故障后, 电弧将自动熄灭, 绝大多数情况下短路处的绝缘可以自动恢复。因此, 自动将断路器重合, 不仅提高了供电的安全性和可靠性, 减少了停电损失, 而且还提高了电力系统的暂态水平, 同时可增大了高压线路的送电容量, 也可纠正由于断路器或继电保护装置造成的误跳闸。所以, 单电源辐射型全架空线路要投入重合闸。

1.2 含分布式的双电源架空线路

含分布式电源的输电线路为双电源架空供电线路,此时架空线路故障,重合闸的动作需要考虑两侧保护的时间配合问题和两侧电源的同步问题。重合闸动作时间需要考虑两侧电源的动作时间、故障点电弧熄灭时间和断路器绝缘恢复时间。由于输电线路两侧的保护跳闸时间可能不同,此时线路的重合闸需要保证两侧保护都跳闸以后才能重合。否则,重合故障上会对输电线路形成二次电流冲击,对系统运行带来不利。会出现两种情况,一是重合闸动作过快,另一侧电源未与故障点断开,导致重合于故障线路。二是重合闸动作时间过慢,使对用户供电中断时间增长,同时也会使两侧电源失去同步而不利于重合闸。

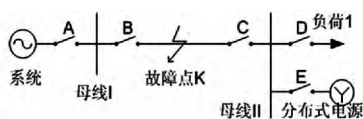


图2 含分布式电源的重合闸示意图

如图2所示,对于含分布式电源的双侧电源供电线路,如果线路负荷1相对于分布式电源出力来说较大,先合分布式电源侧E,导致功率不平衡,使频率下降,低频低压动作,同时分布式电源也不具备调频的功能;若线路负荷1相对分布式电源出力来说较小,先合分布式电源侧E,会出现高频现象,频率过高超过设定值,分布式电源将自动切出,负荷再次失压而不能正常运行,因此一般可以先合系统侧B电源,给负荷供电。再合分布式电源侧E,此时对系统侧重合闸可采用检无压方式重合,分布式电源侧的线路重合闸则可以分为检同期和非同期合闸。

由于实际中分布式电源与电网一般通过单回架空线路相连,在K点发生故障且保护B、E动作后,此时分布式电源不再与系统电源有电气联系,两个电源之间有可能会失去同步。如上所述先合系统侧B,再合分布式电源侧E。如果分布式电源侧重合闸采用非同期重合,若重合时产生的冲击电流没有超过允许值,不对系统和设备产生影响,则可以对电源进行非同期重合闸。当不满足要求时,就需要进行检同期,才能进行重合闸,此时根据分布式电源侧是否带负荷可以分为直接重合闸和解列重合闸两种情况。如果发生故障后,分布式电源直接被切除而没有向负荷供电,即分布式电源不再向负荷输出功率,此时重合闸需要采用检同期重合,将分布式电源并入电网。

1.2.1 分布式电源不带负荷检同期直接重合

如图2所示,在发生线路故障后,先切除分布式

电源再进行重合闸。图2中保护B、E为有重合闸装置的线路保护,分布式电源通过保护E与母线II并网。如图2所示在线路K点发生短路故障后,系统侧保护B先动作切除故障线路,保护E再动作切除分布式电源上网,此时分布式电源不带负荷。在确定保护B、E跳闸和故障K点电弧熄灭及绝缘强度恢复之后,保护B重合闸检无压重合,如果重合成功,则保护E检同期重合,分布式电源并网运行。如果重合不成功,则保护B后加速跳闸,保护E不再进行重合闸动作。

1.2.2 分布式电源带负荷解列

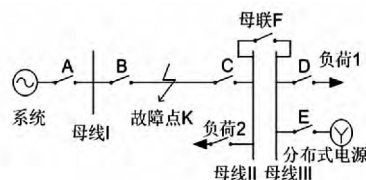


图3 含分布式电源的解列重合闸示意图

图3中分布式电源通过母线III并网,母线II和III通过母联F相连。同时母联F处为解列点。如图3所示在线路K点发生短路故障后,保护B动作切除故障线路,同时母联F动作与系统解列。若分布式电源出力与负荷1平衡,则分布式电源将通过母线III接带负荷1。在确保两侧保护都动作切除故障,同时故障点电弧熄灭,绝缘强度恢复后。保护B处重合闸首先检无压动作,如果重合闸成功,则保护F在解列点检同期完成并列操作。若重合不成功,则系统侧保护再次动作跳闸。所以,含分布式电源的双电源架空线路投入重合闸时,系统侧需检无压重合,分布式电源侧需检同期重合。

2 混合线路对重合闸投退的影响

2.1 单电源辐射型混合线路

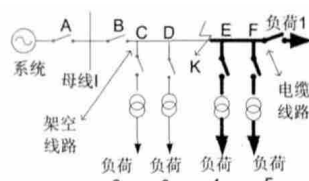


图4 单电源辐射型混合线路示意图

如图4所示,线路B到E点为架空线路,E点以后为电缆线路。保护B带重合闸装置。这里将从以下几个方面论述这种单电源架空-电缆混合线路对重合闸投退的影响。

2.1.1 电缆线路占总线路的比例

为保证供电可靠性,吐鲁番电业局运行单位对于混合线路重合闸装置都是投入运行。但这带来了新的问题,就是没有考虑故障发生类型和在什么线路上。架空线多为瞬时故障,电缆线路多为永久故障,且电缆和架空线连接的接头(EBA)也有爆炸的危险,这就得综合考虑电缆线路所占整个线路的比例以及电缆线路所带负荷性质。近几年运行数据电缆线路比重增加按重合闸成功率降低,如表1所示。

表1 混合线路投重合闸成功率

电缆占整条线路比例/%	投重合闸成功率/%
10	76
20	65
30	56
40	47
50	38

从表1可以看出,随着电缆线路所占整条线路的比例增加,重合闸的成功率也在不断地下降,当电缆线路比例占到40%时,重合闸的成功率不足50%。所以为避免重合到永久性故障上对电网再次冲击,建议电缆线路比例占40%及以上,就应该退出重合闸。同时电缆线路所带负荷性质也应该是考虑是否投入重合闸的另一个因素。

2.1.2 电缆类型

随着电缆行业的发展,现在常用电力电缆多为橡胶电缆(如聚氯乙烯),该电缆在制造、运行过程以及废弃后基本不污染环境,而且具有电能输送容量大、安装方便、运行安全可靠、使用寿命长等优点。根据用途和适应环境的不同可分为阻水电缆、阻燃电缆、耐火电缆、低卤低烟电缆、无卤低烟电缆等。

根据电缆类型的不同和使用环境的不同,对于是否投入重合闸装置要分别对待。如不具有阻水功能的电缆,用于潮湿环境中,建议不投重合闸装置。具有阻燃、耐火特性的电缆安全性比较高,正常情况下建议投入重合闸装置。

2.1.3 电缆敷设方式

常用电缆敷设方式可分为直埋敷设、浅槽敷设、穿管敷设、沟道敷设和隧道敷设等以及由上述几种方式相互结合的敷设方式。不同的敷设方式对于电缆受到外力的破坏概率是不一样的。据全国主要城市的统计数据表明,直埋敷设、沟道敷设和隧道敷设受到外力破坏的概率分别为61%、34%、5%。这也直接影响重合闸装置的投退^[4]。

故建议直埋敷设和水中敷设可直接投入重合闸装置。其他敷设应根据电缆敷设路线是否有多回路且无电缆接头,可考虑投入重合闸装置。

2.1.4 电缆运行年限

运行中的电缆将受到电、机械、化学以及热光等因素的作用而发生老化,影响其寿命。所以运行的年限也是一个考虑的重要因素。

据统计,电缆运行的1~5年是故障易发时期,5~25年进入稳定运行期,25年后故障风险概率大幅增加。

表2 根据运行年限考虑重合闸投退

运行年限	是否投入重合闸
1年内	否
1~5年	根据统计运行情况考虑
5~25年	是
25年以上	否

2.2 双电源混合线路

双电源混合线路重合闸的投退应参考双电源架空线、电缆线路比例、类型、敷设方式、运行年限等多方面因素,还应考虑线路所带负荷的重要性以及供电可靠性和设备安全等因素,最后权衡利弊决定是否投入该线路重合闸。

3 结 论

前面从不同的线路类型和电源出发进行重合闸装置的投退分析,单电源架空线应投入重合闸,双电源架空线投入重合闸时应考虑检同期情况。混合线路是否投运重合闸可从电缆线路比例、类型、敷设方式、运行年限等方面考虑。所得出的结论可为电力相关部门在决策和实施上提供一点借鉴。

参考文献

- [1] 李骏,范春菊. 基于小波分析的电缆-架空线混合输电线路行波故障测距方法[J]. 电网技术,2006,30(9):92-97.
- [2] 丛柏生,吴兴林,王志坚. 浅谈几种电缆敷设形式的经济技术比较[J]. 高电压技术,2001,27(S1):17-18.
- [3] 李斌,李永丽,黄强,等. 单相自适应重合闸相位判据的研究[J]. 电力系统自动化,2003,27(22):41-44.
- [4] 杨国生,李欣,周泽昕. 风电场接入对配电网继电保护的影响与对策[J]. 电网技术,2009,33(11):87-91.
- [5] 陈沛云. 高压、超高压交联电缆的发展及应用[J]. 高电压技术,2001,27(S1):324.
- [6] 马永翔,王世荣. 电力系统继电保护[M]. 北京:北京大学出版社,2006.

作者简介:

胡仁祥(1987),男,硕士,从事电网方式运行。

(收稿日期:2013-08-05)

基于 Multi-agent 技术的配电网网络重构研究

陈晓静¹, 孔冰², 邓亚文², 龚雪²

(1. 国网四川省电力公司供电服务中心, 四川 成都 610000;

2. 西南石油大学电气信息学院, 四川 成都 610500)

摘要: 当配电网发生故障时, 需要调整网络中开关的状态, 从而实现为失电负载恢复供电的目标。基于多代理技术, 利用 JADE 开发平台, 设计了一个多代理复电系统。简要叙述了多代理系统的特征, 阐述了所设计的多代理复电系统中各代理的特点和作用, 分析了多代理复电系统的主要工作流程, 以及各代理在复电重构过程中的交互情况。模拟配电网发生线路故障, 用该多代理复电系统对故障网络进行重构, 检验了该多代理复电系统的运行情况。

关键词: 配电网; 复电重构; 多代理系统; 电力系统

Abstract: When there are failures in distribution network, it needs to change the state of the switches in the network in order to realize the power restoration. Based on multi-agent technology, a multi-agent service restoration system is designed using JADE development platform. A brief introduction of the characteristics of multi-agent system is given and the characteristics and functions of each agent in multi-agent service restoration system are described. The main working process of the system is analyzed as well as the interactions of each agent in the process of power restoration. The multi-agent service restoration system is used to reconfigure the system structure while the distribution network has a line fault, and its operation is verified.

Key words: distribution network; power service restoration; multi-agent system; power system

中图分类号: TM732 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)06-0026-03

0 引言

配电网络的快速发展, 以及用户对连续性供电的要求越来越高, 对配电网快速、可靠的复电重构不断提出了新的要求。配电网络的复电重构, 即调整网络中的联络开关和分段开关的状态, 找到一个最优的开关操作方案, 从而为停电区域恢复供电^[1]。在配电网络的复电重构过程中, 需要考虑如扩大复电区域、减少开关操作、最大限度减少复电时间、保持系统的辐射状架构等诸多因素^[2]。目前解决配电网重构的方法大致有数学优化方法、启发式搜索方法、人工智能方法以及多代理技术等^[3-5]。

文献[6]按照馈线自动化系统的功能将其划分为终端层、子站层和主站层, 并将功能下放至子站层, 各子站通过彼此之间的合作与协调共同完成故障检测、隔离和恢复的任务。文献[7]将故障恢复过程分为4个阶段, 各代理按照预定步骤, 逐步生成各阶段的故障恢复方案, 减小了故障影响范围。文献[8]应用多代理技术, 提出了以恢复负荷最多、开

关操作数最少为目标的供电恢复模型, 建立了多代理系统, 对含分布式电源的配电网的供电恢复问题进行了研究。基于多代理技术, 利用 JADE 开发平台, 为一个配电网设计了多代理复电系统, 并检验了该系统的运行情况。

1 多代理系统概述

多代理系统(multi-agent system, MAS)是指能主动感知所处环境的变化并能作用于环境的软硬件集合。多代理系统中的各代理具有反应性、社会性、自治性等特点, 对于某些特殊的应用系统, 也可能主要利用代理的移动性等特征。

多代理系统中的各代理可通过自主性动作解决所遇到的问题; 当单个代理遇到无法解决的问题时, 它会通过与其他代理的协调与合作共同解决这个问题。因此, 在多代理系统的设计中, 不仅涉及到单个代理的体系结构、开发手段、功能配置等问题, 还涉及到代理间的协调机制、交互方式、组织策略等问题。

多代理系统是可以协同工作的一种松散型系

统,其知识、数据及控制在逻辑上和物理上都可能是分散的,系统中各 Agent 分布于网络的各节点上,可方便地求解分布式问题和动态问题。电力系统配电网络复电重构技术存在多目标、分区域、非线性以及多阶段等特点,属于多代理技术的研究范围^[2]。

2 复电重构代理

利用 JADE 开发平台,为图 1 所示的配电网络设计了一个多代理复电系统。如图所示,该配电网络由 2 个变电站组成,每个变电站中都有 1 台变压器为 3 条支线供电,且每条支线分别为 4 条母线供电。在该配电网络中分布着大量的联络开关(如 S1、S2、T1、T2),当配电网发生故障时,即是通过改变这些开关的状态,为失电的负载寻找到 1 条最优的复电路径,从而恢复停电区域的供电。

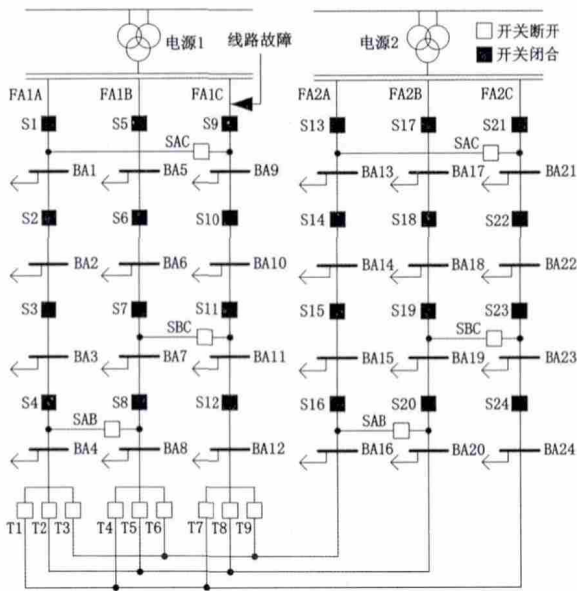


图 1 配电系统结构图

在配电网络的每条支线上都设置 1 个支线代理(如 FA1A、FA2A),这些代理主导故障后的复电过程。支线代理接收各母线代理的故障信息并进行综合分析 and 判断,从而确定故障区域和故障程度;然后根据故障情况与网络中其他支线代理协调协商,最终找到 1 个最优的开关操作方案,实现失电负载的转供。

在配电网络的每条母线上都设置 1 个母线代理(如 BA1、BA5),其主要任务是实时监测母线的工作状况,在母线故障时将故障情况报告给相应支线代理,并根据支线代理的命令操作相应开关。

3 复电策略及流程

3.1 复电策略

当实际配电网络发生故障后,以何种目标指导复电过程取决于实际需要。为了直观地呈现多代理系统的工作情况,将复电目标简化为以下两点。

(1) 最大限度地恢复供电

当配电网络中发生故障时,相应支线代理的任务之一即是尽最大可能为全部失电负载恢复供电。图 1 所示的配电系统正常运行时,各支线及母线上的功率消耗值如表 1 所示(单位 MW),并设定系统中各支线可以提供的最大功率均为 1 000 MW。

表 1 正常运行时的功率消耗值

支线	1A				1B			
母线	1	2	3	4	5	6	7	8
功率	120	180	130	130	150	140	110	120
合计	560				520			
支线	1C				2A			
母线	9	10	11	12	13	14	15	16
功率	130	140	140	170	130	100	100	110
合计	580				440			
支线	2B				2C			
母线	17	18	17	18	17	18	17	18
功率	100	140	120	100	120	120	160	120
合计	460				520			

(2) 根据就近原则确定复电路径

配电系统发生故障时,故障支线代理会逐一评价准备为其提供电力供应的支线,依次选择离它距离最小的支线提供的电力,直到所有停电区域都恢复供电。在图 1 所示的系统中,定义各支线间的距离如表 2 所示。

表 2 各支线之间的距离值

	1A	1B	1C	2A	2B	2C
1A	×	1	2	3	4	5
1B	1	×	1	4	3	4
1C	2	1	×	5	4	3
2A	3	4	5	×	1	2
2B	4	3	4	1	×	1
2C	5	4	3	2	1	×

3.2 复电流程

假设配电网络在运行时发生了如图 1 所示的线

路故障,则支线代理 FA1C 会执行复电重构工作,其过程简述如下:①注册黄页服务:系统故障时,各支线正常工作且可以向外提供电力,各支线代理会在黄页上注册功率服务,表示其可以向其他支线输出功率。②接收故障信息:若支线 1C 上发生了线路故障,处于该支线上故障区域中母线代理会向支线代理 FA1C 发送故障信息。FA1C 接收、记录并分析这些故障信息。③注销黄页服务:若 FA1C 分析得出整条支线都已经停电,则它会注销其黄页服务。④搜索黄页服务并发出请求:为了恢复失电负载的供电,支线代理 FA1C 会搜索黄页上能够提供功率服务的支线,并向它们发出请求电力供应的 CFP 信息。⑤接收回复信息:接收到了 CFP 信息的支线代理会根据本支线的实际情况,决定是否同意故障支线代理 FA1C 的请求,并回复“同意”、“拒绝”或者不回复任何信息,FA1C 接收并记录这些信息。⑥评估建议信息:如果有支线代理准备为故障支线 1C 提供电力,则支线代理 FA1C 会逐一评估这些支线代理提供的建议信息,根据就近原则和最大限度恢复供电原则确定最优的复电方案。⑦方案执行:评估完成后,支线代理 FA1C 会发出命令操作相应的开关并连接上负载。

4 仿真分析

所模拟的是支线 1C 发生线路故障时,多代理系统完成配电网故障重构的过程。由表 1 可得,当支线 1C 上发生线路故障时,该支线需要恢复的总功率是 580 MW。设定支线 1C 发生故障时,其它支线均正常工作,并都准备向 1C 提供富余功率。由于支线 1B 和 1C 之间的距离为 1,且支线 1B 目前可向外输出 480 MW 功率,所以 FA1C 会首先接收该 480 MW 功率。由于支线 1A 和 1C 之间的距离为 2,且支线 1A 目前可向外提供 440 MW 的功率,因此它会提供给支线 1C 另外的 100 MW 功率。网络重构后的系统结构如图 2 所示。

图 3(a)、(b) 由 JADE 平台上的 Sinffer Agent 监测到的该故障环境下各代理的交互顺序图。图中的每一列表示一个代理;每一行表示一次信息的交互过程,由信息发送者指向信息接收者。为了便于观察,图中只列出了支线代理 FA1A、FA1B、FA1C、BA9、BA10、BA11、BA12 等几个与该故障环境密切

相关的代理的交互情况。在图 3(a)、(b) 中,第 3~5 列分别代表支线代理 FA1A、FA1B、FA1C,第 6~9 列分别表示母线代理 BA9~BA12。图中各行信息所表示的具体含义如表 3 所示。

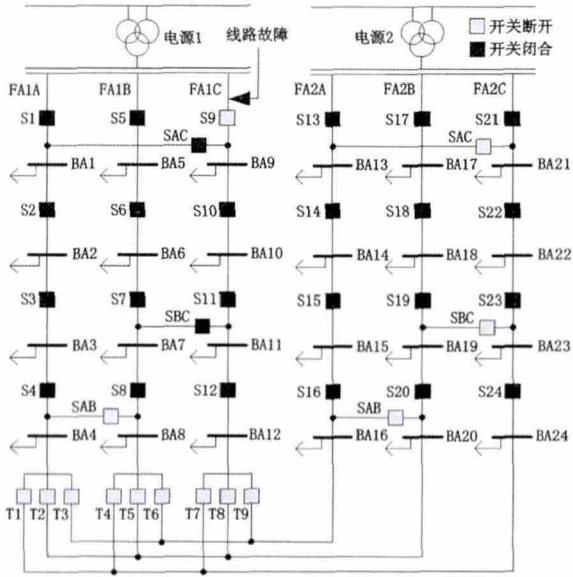


图 2 重构后的网络结构图

表 3 各代理交互信息描述

行数	信息含义
1 ~ 12	各支线代理在黄页上注册功率服务。
13 ~ 16	BA9 ~ BA12 向 FA1C 发送故障信息。
17 ~ 20	FA1C 在黄页上注销其功率服务。
21 ~ 22	FA1C 在黄页上搜索注册了功率服务的代理。
23 ~ 27	FA1C 向注册了功率服务的代理发出 CFP 信息。
28 ~ 32	各支线代理向 FA1C 回复“建议”信息,表示可以提供富余电力。
33 ~ 39	FA1C 接受 FA1B、FA1A 的“建议”,拒绝剩下的“建议”,并获取支线 1B 和 1A 上的富余电力。
40 ~ 43	FA1C 命令 BA9、BA12 闭合开关 SAC、SBC; 动作完成后,BA9、BA12 回复确认信息。
44 ~ 45	FA1C 请求订阅 FA1B 和 FA1A; FA1A 和
50 ~ 51	FA1B 回复信息,表示同意订阅。
46 ~ 49	FA1C 命令各母线代理 BA9 ~ BA12 连接负
52 ~ 55	载; 动作完成后,BA9 ~ BA12 回复确认信息。

5 结 论

以多代理技术为基础,利用 JADE 开发平台,设计了一个多代理复电系统,并检验了该系统的运行情况。多代理系统的分布式控制功能,为问题的求解提供了一个更快捷的途径。尽管多代理技术的研
(下转第 54 页)

- [9] 王红梅. 特高压直流输电技术现状及在我国的应用前景 [J]. 北京: 华北电力大学, 2006.
- [10] 王凤至, 张素霞. 自制大电流直流可调电源 [J]. 河南师范大学学报, 1994, 18(2): 120.
- [11] 揭秉信. 磁调制器的理论分析与计算 [J]. 仪器仪表学报, 1982, 3(1): 57-63.
- [12] 李维波, 李启炎, 任士炎, 等. 新型直流大电流比较仪

的建模与仿真研究 [J]. 四川工业学院学报, 2001, 20(2): 8-12.

- [13] 李恺, 罗志坤, 欧朝龙, 等. 基于电流比较仪测试直流互感器误差的方法 [J]. 湖南电力, 2010, 30(5): 41-44.

(收稿日期: 2013-07-21)

(上接第28页)

究已经取得了很大的进展,但总的来说,多代理技术还不成熟,还需要深入的研究。此外,由于多代理技术的成本较高,加之配电系统对安全性的要求较高,所以多代理技术在配电系统中的应用还较少。但由于多代理技术的诸多优点,随着其成本的降低和技

术的成熟,多代理技术在电力系统中的应用定会越来越广泛。

参考文献

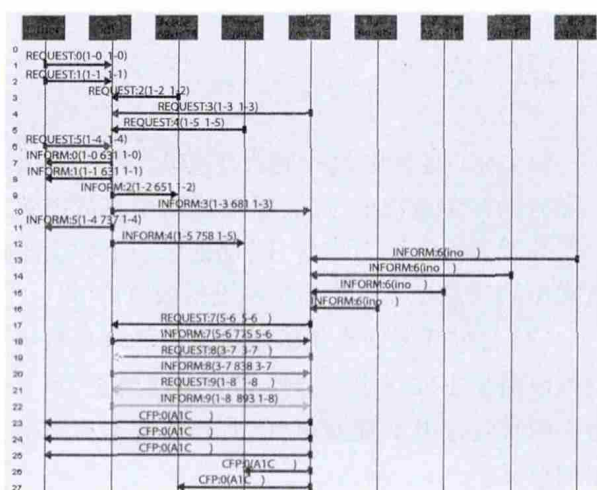
- [1] 徐青山. 电力系统故障诊断及故障恢复 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [2] 孔冰, 赵泽茂, 李红伟. 基于多代理技术的配电网网络复电技术 [J]. 电气应用, 2013, 32(7): 28-31.
- [3] 刘莉, 陈学锋, 翟登辉. 智能配电网故障恢复的现状与展望 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(13): 148-152.
- [4] 李鹏飞. 基于人工智能的配电网故障恢复重构研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- [5] 冯树海. 配电系统网络重构方法研究 [J]. 电力自动化设备, 2002, 22(5): 13-15.
- [6] 王照, 马文晓, 高飞. 基于多代理技术的分布式馈线自动化实现方法 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34(6): 54-56.
- [7] 丁施尹, 刘明波, 谢敏, 等. 应用多代理技术求解高压配电网故障恢复问题 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(9): 54-60.
- [8] 王守相, 李晓静, 肖朝霞, 等. 含分布式电源的配电网供电恢复的多代理方法 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(10): 61-65.
- [9] 于卫红. 基于 JADE 平台的多 Agent 系统开发技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.

作者简介:

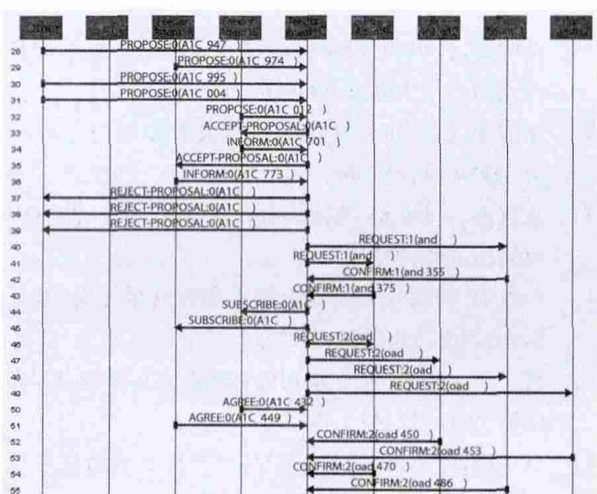
陈晓静(1979), 女, 工程师, 主要从事电网运行监控及智能电网研究工作;

孔冰(1989), 男, 硕士研究生, 主要从事智能体及多代理系统研究。

(收稿日期: 2013-08-05)



(a)



(b)

图3 各代理的交互顺序图

一种线路高频保护防误方法分析及措施研究

梁 静¹, 赵青春², 于 冰³, 胡立锦⁴, 赵 伟², 常喜强³

(1. 国网新疆电力公司电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830002; 2. 南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 210000;
3. 国网新疆电力公司电力调度控制中心, 新疆 乌鲁木齐 830002; 4. 国网重庆电力公司建设分公司, 重庆 410021)

摘 要: 提出了由于电网结构差异较大, 负荷结构和电源布局不均匀导致线路区外对称故障时可能出现较大的零序电流, 进而导致线路高频保护误动作的思考。理论推导了对称故障下出现零序电流的原因, 在此基础上搭建了仿真模型进行仿真。理论分析和仿真结果表明线路系统区外对称故障下零序电流的最大确实会导致被保护线路高频保护误动。以新疆某地区实际电网为模型, 沿用系统参数设置, 采用在线和离线的方法调节系统负荷及电源投入情况, 模拟并分析出现的高频保护误动情况, 进而针对模拟情况提出合理的预防建议和措施。

关键词: 对称故障; 负荷; 高频保护; 仿真分析; 离线模拟

Abstract: A stronger zero - sequence current may occur when the symmetrical fault appears outside the line zone due to the different structure of power grid, uneven load structure and power distribution, which results in the misoperation of high - frequency protection. The reasons why zero - sequence current occurs under symmetrical fault are analyzed by theoretical derivation, and the simulation model is established. The theoretical analysis and simulation results show that the maximum zero - sequence current under symmetrical fault outside the line zone will exactly cause the misoperation of high - frequency protection in the protected line. Taking the actual power grid as the model in one place of Xinjiang, the misoperation of high - frequency protection is simulated and analyzed by following the setting of system parameters and adopting the on - line and off - line methods to control the system load and the power source connection, thus the reasonable preventive suggestions and measures are put forward.

Key words: symmetrical fault; load; high - frequency protection; simulation analysis; off - line simulation

中图分类号: TM773 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003 - 6954(2013)06 - 0029 - 04

0 引 言

分布式电源、特高压输变电工程以及大规模新能源的飞速发展并投入运行, 改变了电网原有的较为单一的能源结构和负荷模式。基于传统能源结构而设置的线路高频保护^[1], 旨在弥补联动和差动保护在被保护线路区内对称故障时不能及时有效从故障点两端同时切除线路的不足^[2], 由于此时电路一般为理想状态, 线路参数基本对称, 线路对称故障^[3]时并无明显的零序电流产生和流通。

但是, 随着电网结构的不断变化, 导致线路参数不完全换位或不换位的情况存在并增多。零序电流大小与相间互导纳的不平衡程度, 与两回线之间互感的不平衡程度有着较为直接的关系, 不平衡程度越大, 零序电流越大; 负荷越大零序电流越大^[4-6]。当线路参数满足一定条件时, 有可能使得零序电流

与短路电流的方向相反, 进而表现为零序电流在双回线内呈环流的现象, 从而导致相关线路高频保护装置误动作^[7-10]。

基于此思考, 从理论上分析并推导了对称故障下线路参数的变化情况, 明确了零序电流可能出现的原因。结合理论分析, 搭建了符合实际的仿真模型进行仿真分析。结果表明, 对称故障下线路参数不平衡确实会导致零序电流增加, 证明了推测的合理性和准确性。

1 系统对称故障出现零序电流的原因分析

对于双回线路, 根据其两端电压和六相电流, 有以下方程。

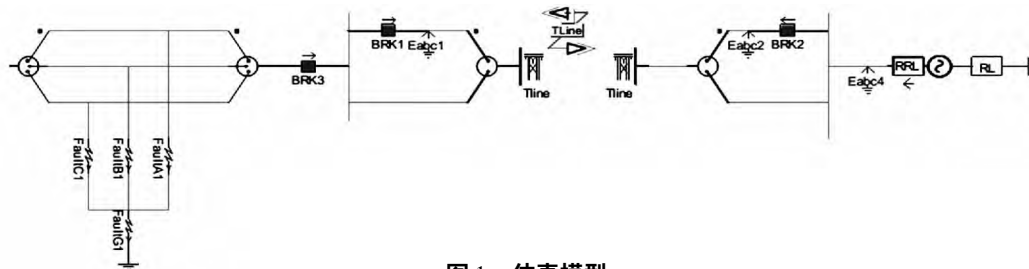


图1 仿真模型

$$\begin{bmatrix} \Delta U_A \\ \Delta U_B \\ \Delta U_C \\ \Delta U_{A'} \\ \Delta U_{B'} \\ \Delta U_{C'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} ZL & ZM_{AB} & ZM_{CA} & ZM_{AA'} & ZM_{AB'} & ZM_{AC'} \\ ZM_{AB} & ZL & ZM_{BC} & ZM_{BA'} & ZM_{BB'} & ZM_{BC'} \\ ZM_{CA} & ZM_{BC} & ZL & ZM_{CA'} & ZM_{CB'} & ZM_{CC'} \\ ZM_{AA'} & ZM_{BA'} & ZM_{CA'} & ZL & ZM_{A'B'} & ZM_{A'C'} \\ ZM_{AB'} & ZM_{BB'} & ZM_{CB'} & ZM_{A'B'} & ZL & ZM_{B'C'} \\ ZM_{AC'} & ZM_{BC'} & ZM_{CC'} & ZM_{A'C'} & ZM_{B'C'} & ZL \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \\ I_{A'} \\ I_{B'} \\ I_{C'} \end{bmatrix} \quad (1)$$

参照转换为导纳方程后如下。

$$\begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \\ I_{A'} \\ I_{B'} \\ I_{C'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} YL & YM_{AB} & YM_{CA} & YM_{AA'} & YM_{AB'} & YM_{AC'} \\ YM_{AB} & YL & YM_{BC} & YM_{BA'} & YM_{BB'} & YM_{BC'} \\ YM_{CA} & YM_{BC} & YL & YM_{CA'} & YM_{CB'} & YM_{CC'} \\ YM_{AA'} & YM_{BA'} & YM_{CA'} & YL & YM_{C'B'} & YM_{A'C'} \\ YM_{AB'} & YM_{BB'} & YM_{CB'} & YM_{A'B'} & YL & YM_{B'C'} \\ YM_{AC'} & YM_{BC'} & YM_{CC'} & YM_{B'C'} & YM_{B'C'} & YL \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_A \\ \Delta U_B \\ \Delta U_C \\ \Delta U_{A'} \\ \Delta U_{B'} \\ \Delta U_{C'} \end{bmatrix} \quad (2)$$

再转为正负零序参数如下。

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \\ I_{0'} \\ I_{1'} \\ I_{2'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{00} & Y_{01} & Y_{02} & Y_{00'} & Y_{01'} & Y_{02'} \\ Y_{10} & Y_{11} & Y_{12} & Y_{10'} & Y_{11'} & Y_{12'} \\ Y_{20} & Y_{21} & Y_{22} & Y_{20'} & Y_{21'} & Y_{22'} \\ Y_{00'} & Y_{01'} & Y_{02'} & Y_{00'} & Y_{01'} & Y_{02'} \\ Y_{10'} & Y_{11'} & Y_{12'} & Y_{10'} & Y_{11'} & Y_{12'} \\ Y_{20'} & Y_{21'} & Y_{22'} & Y_{20'} & Y_{21'} & Y_{22'} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_0 \\ \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \\ \Delta U_{0'} \\ \Delta U_{1'} \\ \Delta U_{2'} \end{bmatrix} \quad (3)$$

忽略零序和负序电压量,可求得 I 回线零序分量如下。

$$I_0 = (Y_{01} + Y_{01'}) \Delta U_1 \quad (4)$$

$$Y_{01} = \frac{YM_{AB} + a^2 YM_{BC} + a^* YM_{CA}}{3} (1 + a^2) \quad (5)$$

$$Y_{01'} = \frac{(YM_{AA'} + YM_{AB'} + YM_{AC'})}{3} + \frac{(YM_{BB'} + YM_{AB'} + YM_{BC'})^* a^2}{3} + \frac{(YM_{CC'} + YM_{BC'} + YM_{CA'})^* a}{3} \quad (6)$$

同理可得到 II 回线零序分量如下。

$$I_{0'} = (Y_{01'} + Y_{01}) \Delta U_1 \quad (7)$$

$$Y_{01} = \frac{YM_{AB'} + a^2 YM_{BC'} + a^* YM_{CA'}}{3} (1 + a^2) \quad (8)$$

$$Y_{01} = \frac{(YM_{AA'} + YM_{AB'} + YM_{AC'})}{3} + \frac{(YM_{BB'} + YM_{AB'} + YM_{BC'})^* a^2}{3} + \frac{(YM_{CC'} + YM_{BC'} + YM_{CA'})^* a}{3} \quad (9)$$

(1) 线路完全换位

各互感导纳和自感导纳均相等,此时 $Y_{01} = Y_{01'}$
 $= Y_{01} = Y_{01'} = 0$,不会有零序电流。

(2) 线路不完全换位或不换位

零序电流大小与相间互感导纳的不平衡程度,与两回线之间互感的不平衡程度亦有关,不平衡程度越大,零序电流越大;负荷 (ΔU_1) 越大零序电流越大。当线路参数满足一定条件时,有可能使得 I_0 与 $I_{0'}$ 的方向相反,进而表现为零序电流在双回线内呈环流的现象。

从以上分析可以看到,当线路物理确定时,可根据两端电压情况计算出线路上由于线路参数不对称而产生零序电流。

2 仿真分析

结合理论分析,搭建仿真模型如图1。

TV 变比 220 kV/100 V, TA 变比 2 000 A/1A, 线路相序安排如图2。

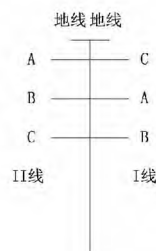


图2 模拟区外三相对称故障

2.1 近故障侧仿真结果分析

故障电流电压仿真波形如图3所示。

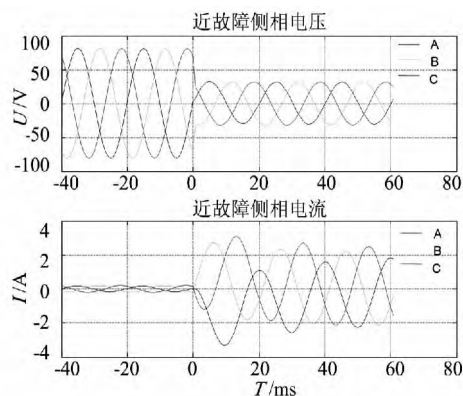


图3 近故障侧电流电压

零序电压电流仿真波形如图4所示。

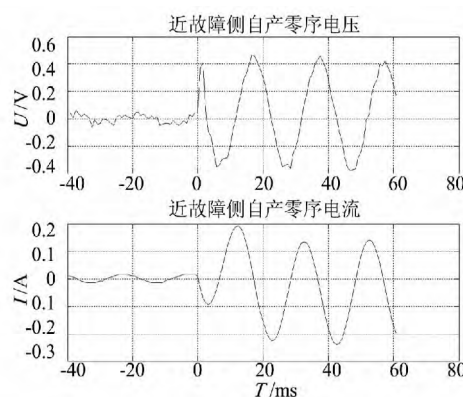


图4 近故障侧零序电流

零序电压大小、零序电流大小、零序电压电流相对相位及零序功率如图5所示。

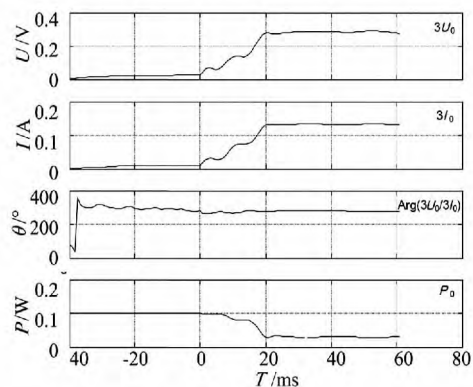


图5 近故障侧零序电气量相位比较

由于零序电压较小,零序功率不足 -0.1 VA ,但零序功率特征呈现正方向特征。

2.2 远故障侧仿真结果分析

远故障侧仿真结果见图6~图8。

由于零序电压较小,零序功率不足 -0.1 VA ,但零序功率特征呈现正方向特征。

从理论和仿真分析来看,由于线路不换位或者不完全换位,在特定相序安排下确有可能出现区外发生不接地故障导致双回线出现零序电流。

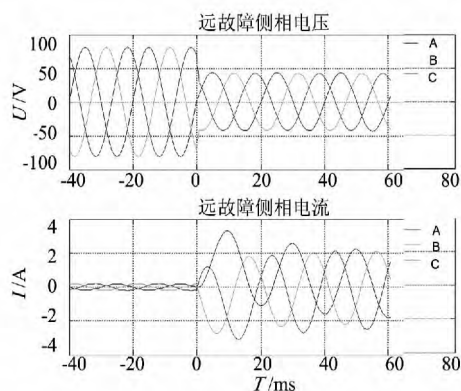


图6 远故障侧电流电压

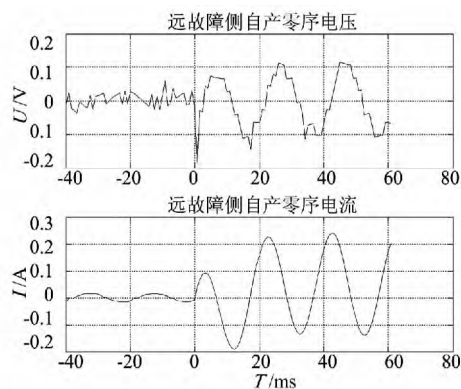


图7 远故障侧零序电压电流

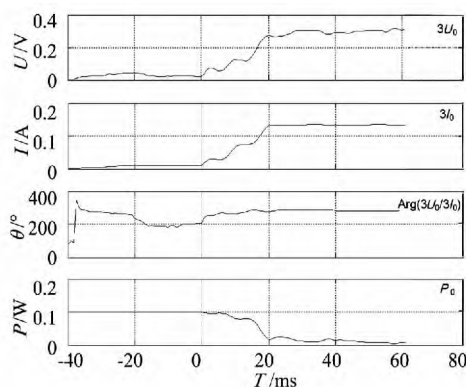


图8 远故障侧零序电气量相位比较

3 实际电网离线模拟验证

新疆电网某地区新建750 kV变电站改变了附近地区电网的结构特性,由于新建线路同杆架设,线路长短不同,导致参数存在不平衡现象。以此局部电网为例,进行离线模拟分析。选取保护线路如图9所示。

乌岗I、II线两端采用高频距离保护装置,龙岗侧区外三相短路故障,图中0+表示零序功率判为正方向,0-表示零序功率判为反方向;Z+表示纵联距离判为正方向,Z-表示纵联距离未判为正方

向。以电网实际运行参数为基础,调整电源及复合结构,模拟分析故障情况下高频保护动作情况。

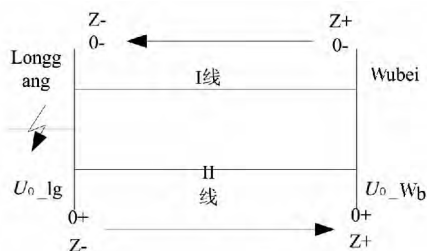


图9 保护对象模型

(1) 乌岗II线龙岗变电站侧保护装置离线计算结果分析

取乌岗II线龙岗变电站侧保护装置录波数据如图10。

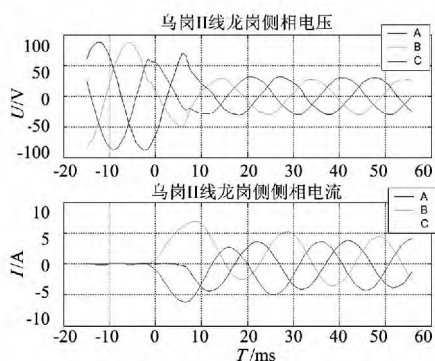


图10 乌岗II线龙岗侧电压电流波形

根据保护录波数据,离线计算故障时乌岗II线乌北变电站侧保护装置的AB、BC、CA相间测量阻抗如图11。

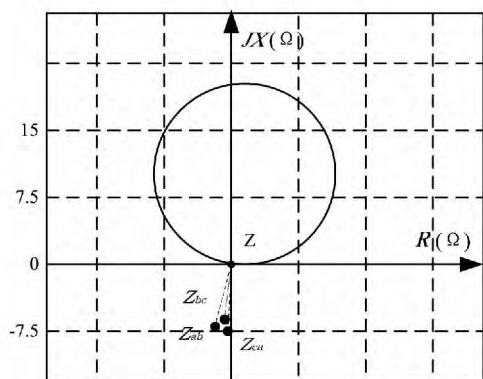


图11 乌岗II线龙岗侧测量阻抗

从测量阻抗与动作范围来看,乌岗II线乌北变电站侧 Z_{ab} 、 Z_{bc} 、 Z_{ca} 均未进入动作区。

根据离线数据计算零序电压、零序电流、零序电压和电流相对相位以及零序功率如图12。

图12中,第1幅为零序电压有效值,第2幅为零序电流有效值,第3幅为零序电压相对零序电流相

位,第4幅为零序功率,零序功率 < -0.1 为正方向。

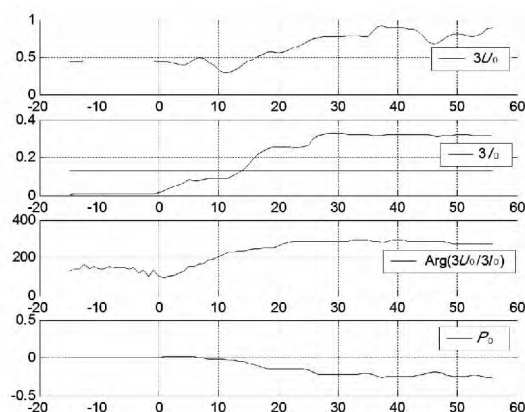


图12 乌岗II线龙岗侧零序功率情况

(2) 乌岗II线乌北侧保护装置动作行为分析取乌北侧保护装置录波数据如图13。

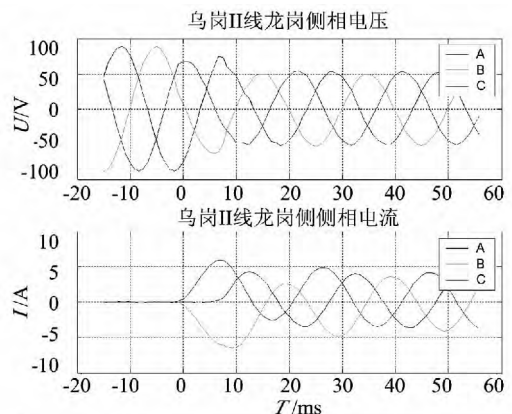


图13 乌岗II线乌北侧电压电流波形
计算乌北侧3个相间测量阻抗如图14。

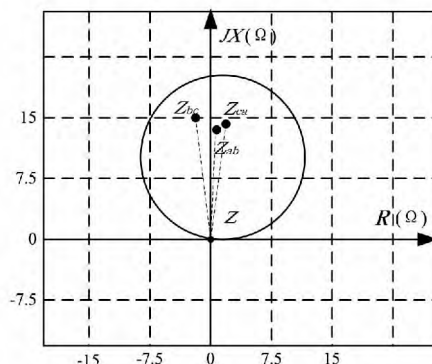


图14 乌岗II线乌北侧测量阻抗
测量阻抗位于动作区内。

根据离线数据计算零序电压、零序电流、零序电压和电流相对相位以及零序功率如图15。

第1幅为零序电压,第2幅为零序电流,第3幅为零序电压相对零序电流相位,第4幅为零序功率,零序功率位于正方向的边界。

(下转第38页)

的无功控制策略 [J]. 电网技术, 2012, 36(1): 118 - 122.

[6] 张望, 郝俊芳, 曹森, 等. 直流输电换流站无功功率控制功能设计 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(14): 72 - 76.

[7] 刘崇茹, 张伯明. 考虑换流变压器和无功补偿协调控制计算 AC/DC 系统有功 - 电压曲线 [J]. 电力自动

化设备, 2009, 29(1): 50 - 53.

作者简介:

朱 玲(1990), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统安全稳定与控制;

王 骅(1973), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统仿真。

(收稿日期: 2013 - 06 - 14)

(上接第 32 页)

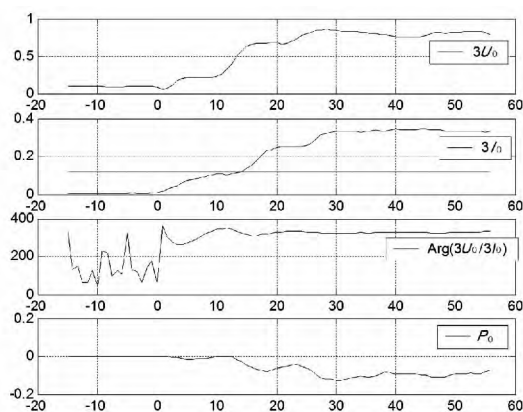


图 15 乌岗 II 线乌北侧零序功率情况

4 结 论

通过分析可知: 乌岗 II 线乌北侧纵联距离元件动作; 龙岗侧纵联零序功率判为正方向。从高频保护逻辑来看, 两侧保护有可能出现不正确动作

在区外不接地对称故障中, 系统中出现零序分量, 导致乌岗 II 回线保护感受到零序电压和零序电流, 从而造成保护装置出现上述的动作特性。

结合理论分析、仿真计算和离线模拟分析, 在实际电网运行的经验基础上, 给出以下建议。

(1) 对系统不平衡程度进行判别, 当不平衡程度较弱时, 闭锁纵联零序正方向或者延时投入纵联零序正方向。

方案优点: 常规区内故障能可靠快速动作; 能有效防止线路不换位时区外故障出现零序分量导致保护误动;

方案缺点: 重负荷高阻接地故障时, 纵联零序动作速度受到影响(此时系统电压下降不多, 对系统稳定影响不大)。

(2) 考虑利用高阻投入抑制零序电流。但此方案需在以下几方面进行进一步研究, 以保障高阻投入的正确性。

1) 零序功率方向元件投入需要确定是高阻情况才投入;

2) 研究如何区别高阻接地与不平衡零序电流;

3) 对方向元件进行研究, 确保各种条件下, 反方向故障时不启动发信。

参考文献

- [1] 孙国凯. 电力系统继电保护原理 [M]. 北京: 中国水利电力出版社, 2002: 137 - 142.
- [2] 贺家李. 电力系统继电保护原理 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1994: 87 - 91.
- [3] 王瑞敏. 电力系统继电保护原理 [M]. 北京: 北京农业出版社, 1994: 25 - 32.
- [4] 刘杨, 李晓明, 曹凯丽. 220 kV 系统高频保护异常运行分析及预防措施 [J]. 电力自动化设备, 2005, 25(5): 98 - 101.
- [5] 苏斌, 董新洲, 阿德南, 等. 方向高频保护的动作为第二部分: 复故障情况下方向高频保护的动作为分析 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2003(2): 9 - 13.
- [6] 康小宁, 梁振锋. 同杆平行双回线路保护及自动重合闸综述 [J]. 继电器, 2004, 31(23): 72 - 76.
- [7] 王红光. 影响高频保护正常投入的原因分析及对策 [J]. 继电器, 2000, 28(11):
- [8] 汤大海, 周立刚. 区外母线故障高频保护动作为分析 [J]. 江办电机工程, 1995(4): 13 - 16.
- [9] 景胜. 河南电网高频保护不正确动作原因分析与建议 [J]. 继电器, 2003, 31(3): 76 - 78.
- [10] 高智勇. 高频保护误动原因分析及改进措施 [J]. 四川电力技术, 2002(S1): 33, 37.

作者简介:

梁 静(1963), 女, 高级工程师, 主要从事电力系统继电保护分析方面的研究;

赵青春(1980), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统继电保护分析方面的研究;

胡立锦(1983), 男, 硕士研究生, 主要从事电网运行控制方面的工作。

(收稿日期: 2013 - 07 - 08)

基于 ADPSS 大区电网混合仿真的直流系统 辅助控制建模

朱玲¹, 王骅²

(1. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031; 2. 河南电力试验研究院, 河南 郑州 450052)

摘要: 在基于 ADPSS 的大区交直流电网混合仿真中, 直流输电控制模型不够完善, 影响直流系统的运行特性。对直流控制器原理进行研究, 探讨了直流系统无功消耗、关断角、换相角、直流电流等变量之间相互关系, 利用程序自定义功能, 建立了考虑分接头调整和无功补偿装置投切联合控制的直流辅助控制模型。仿真分析了大区电网直流功率提升时辅助控制模型的动作特性, 验证了模型的正确性和有效性。仿真结果表明, 辅助控制模型能够维持换流站的无功平衡, 将直流运行参数控制在合理范围内, 减少“换相失败”发生的风险, 适用于大规模电网的运行特性和协调控制研究。

关键词: 混合仿真; 直流输电; 用户自定义模型; 分接头控制; 无功补偿

Abstract: The inadequate model of control system for HVDC affects the operation condition of DC system negatively in hybrid simulation of large-scale AC/DC power systems on the basis of advanced digital power system simulator (ADPSS). After the research of the principle of DC controller and the relations among such variables as reactive power consumption, extinction angle, commutation angle and DC current, the auxiliary control model of DC system considering the combined control of tap changer adjustment and reactive power compensation device switching is established using the user-defined model (UDM) function provided by the software. The auxiliary control behavior during DC power increasing is analyzed in the simulation to verify the correctness and effectiveness of the proposed model. The simulation results show that the auxiliary control model can sustain the balance of reactive power in converter station and restrict DC operating parameters to a reasonable range so as to reduce the risk of "commutation failure", which is suitable for the research of operating characteristics and coordinated control strategy of large-scale power grid.

Key words: hybrid simulation; HVDC; user-defined model; tap changer control; reactive power compensation

中图分类号: TM743 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2013)06-0033-06

0 引言

随着中国西电东送和跨大区联网战略的逐步实施, 直流系统的运行控制特性对电网安全稳定运行所造成的影响程度和影响层面越来越突出^[1-4]。

当前使用较为广泛的仿真软件均考虑直流输电环节。机电暂态仿真软件(常见的有 BPA、PSASP 和 PSS/E 等)采用的直流准稳态模型无法实现对直流系统动态特性的精确仿真^[5-8]。PSCAD/EMTDC 是目前公认较权威的包含直流输电系统的电磁暂态仿真软件, 但其所能模拟的系统规模较小, 需要对电力系统进行等值简化, 降低了计算分析的准确性^[9-10]。

近年来, 中国电力科学研究院研究并开发的电

力系统实时仿真装置(advanced digital power system simulator, ADPSS)在含 HVDC 的大电网仿真研究中的应用得到广泛关注。ADPSS 可应用于机电-电磁混合仿真的模式, 既详细模拟 HVDC 内部快速暂态变化过程, 又不需要对外部网络简化等值, 大大提高仿真分析的准确性^[11-13]。但是 ADPSS 电磁暂态程序 ETSDAC 提供的直流控制系统模型缺乏相应的直流辅助功能控制模块, 控制特性较工程实际尚有较大差距。

为了解决上述问题, 利用 ADPSS 电磁暂态程序 ETSDAC 的用户自定义功能, 以 Simens 的直流辅助控制为参考, 建立了换流变压器分接头控制和换流站无功控制的辅助控制模型; 探讨了直流系统无功消耗、关断角、换相角、直流电流等变量之间相互关系, 提出分接头调整和无功补偿装置投切的联合控

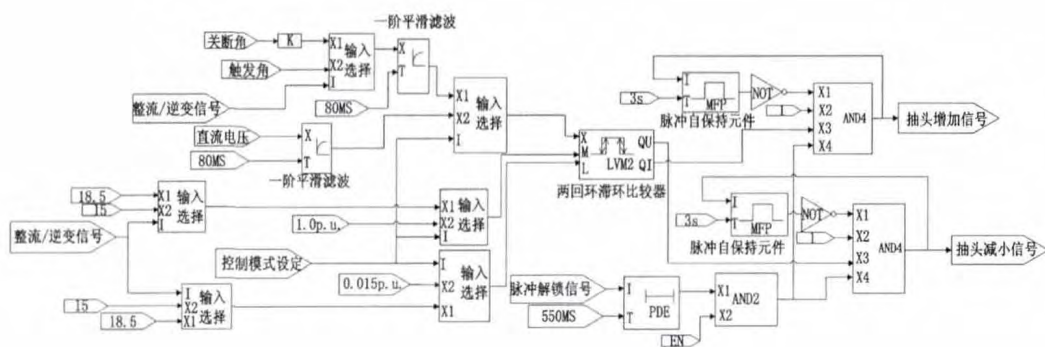


图1 分接头控制框图

制策略;在此基础上,将辅助控制应用到含 HVDC 的实际大电网进行混合仿真分析,验证了模型的有效性,分析了辅助控制模型对直流系统稳定性的影响,为交直流大电网运行特性的仿真研究提供参考。

1 辅助控制模型及控制策略

1.1 换流变压器分接头控制(TCC)建模

换流变压器分接头控制的基本控制原则是保持整流侧触发角、逆变侧熄弧角和直流电压运行在指定范围内^[4]。模型的主要结构见图1,可分为输入信号选择与处理、滞环比较控制、输出脉冲控制三个层级。

模型基本控制模式有两种,可手动切换。

1) 角度控制

整流侧分接头采用角度控制时,触发角 α 维持在指定范围内($15^\circ \pm 2.5^\circ$),以保证触发角留有可调范围的同时尽量提高换流器的功率因数;逆变侧分接头角度控制则保持一周期12个关断角中的最小值 $\gamma_{\min}$ 不超出指定范围($18^\circ \pm 2^\circ$)。

2) 电压控制

对于直流电压 U_d 的控制,当其偏离指定范围($0.98 \sim 1.02$)且超过时滞时间时,分接头动作调节电压。

模型根据控制模式的设定选择输入信号,并通过一阶平滑器PT1滤除干扰信号。与经典分接头控制相比,模型控制参数的指定范围由自定义双回滞环比较器LVM2确定,采用这种方法对控制量的上限和下限分别设定两个门槛值,从而避免了当测量值接近临界值时,测量值的误差信号使分接头控制误动作。模型考虑了分接头动作的时滞时间(3s),在时滞时间内控制量短时超出指定范围分接头不切换,主要目的是为了防止调节机构来回频繁

动作。

1.2 无功控制(RPC)建模

无功控制为滤波器投切控制模式之一,主要功能是通过投切交流滤波器组或电容器组实现交直流无功功率交换的平衡^[5-14]。换流站与交流系统的无功交换 Q_{sys} 可以表示为

$$Q_{sys} = Q_{dc} - Q_{filteract} \quad (1)$$

式中, Q_{dc} 为换流站吸收的无功; $Q_{filteract}$ 为投入运行的滤波器实际提供的无功。

直流系统运行状态发生变化时,无功控制就将换流站与交流系统间的无功交换限制在允许范围内。

实际上,交流电网随着全网负荷水平的不同而不断变化,投入运行的无功滤波器的出力也不是一成不变的,实际无功出力可由式(2)得到。

$$Q_{filteract} = (U_{ac}/U_{acN})^2 Q_{total} \quad (2)$$

式中, U_{ac} 为实际交流母线电压; U_{acN} 为无功设备设计时考虑的交流母线额定电压; Q_{total} 为当前状态下已投入总的无功补偿设备的额定容量。

通过运行人员工作站(QWS)可以确定当前运行点的理想不平衡无功 Q_{ac} 和允许不平衡无功 ΔQ ,换流器消耗功率由式(3)求出。

$$Q_{dc} = 2U_d I_d \frac{(\pi/180)\mu - \sin \mu \cos(2\alpha + \mu)}{\sin \mu \sin(2\alpha + \mu)} \quad (3)$$

式中, U_d 和 I_d 分别为直流电压和电流; α 为整流侧触发角; μ 为换相重叠角。当换流器位于逆变站时,用熄弧角替换式中的 α 。

当满足 $Q_{dc} - (U_{ac}/U_{acN})^2 Q_{total} + Q_{ac} \geq \Delta Q$ 时,发出无功补偿设备投入命令。

当满足 $(U_{ac}/U_{acN})^2 Q_{total} - Q_{ac} - Q_{dc} \geq \Delta Q$ 时,发出无功补偿设备切除命令。

为防止滤波器无功出力在投切控制临界点造成滤波器频繁投切,双回滞环比较器对无功交换设

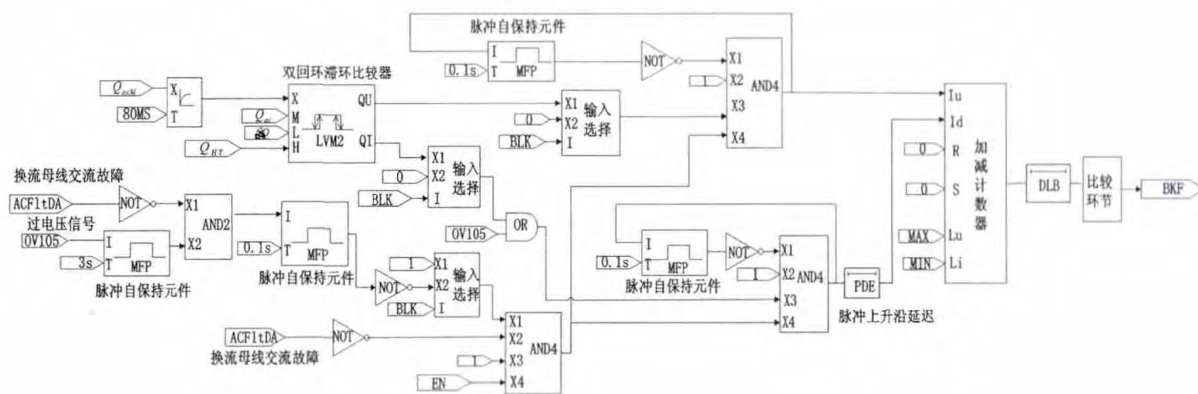


图2 无功控制框图

定上限和下限分别设置两个门槛值。模型主结构如图2所示。

考虑到交流母线电压在无功控制过程中的变化,模型设置电压限制投切功能,当电压达到“隔离”或者“跳闸”级别时,无论不平衡无功是否在指定范围内,都将自动分闸,直到只剩下最小滤波器,保证系统安全。此外,在换流母线发生交流短路故障时,无功控制功能将自动闭锁,以避免开关频繁误动。

1.3 TCC 与 RPC 联合控制

基于 ADPSS 的特高压直流输电控制系统模型的基本控制方式是,整流侧由定电流控制和 $\alpha_{\min}$ 限制两部分组成,逆变侧配有定电流控制、定电压控制和定关断角 γ 控制,此外,整流侧和逆变侧都配有低压限流控制(VDCOL)。其稳态方程如下。

$$\begin{cases} U_{d1} = N_1 \left(1.35 U_1 \cos \alpha - \frac{3}{\pi} X_{r1} I_d \right) \\ U_{d2} = N_2 \left(1.35 U_2 \cos \gamma - \frac{3}{\pi} X_{r2} I_d \right) \\ I_d = \frac{1.35 (U_1 \cos \alpha - U_2 \cos \gamma)}{R + 3/\pi (X_{r1} - X_{r2})} \end{cases} \quad (4)$$

式中, U_{d1} 和 U_{d2} 为整流站和逆变站的直流电压; U_1 和 U_2 为整流站和逆变站换流变压器阀侧空载线电压有效值; I_d 为直流电流; X_{r1} 和 X_{r2} 为整流站和逆变站每相的换相电抗; α 为整流器触发角; γ 为逆变侧关断角。

正常运行时,整流侧为定电流控制模式,逆变侧为定 γ 控制,一般直流换流器控制靠改变换流器的触发角来间接调节 I_d 和 γ 达到整定值(1~10 ms)。

当直流电流整定值 I_{dref} 发生大幅改变时,由式(4)可知,若要在电流达到指令值的同时使得直流系统维持正常的换流器控制模式,需人为调整换流

变压器阀侧空载线电压值(U_1 、 U_2),通过改变换流变压器的变比 k 或换流母线的电压 U_{ac} 来调节直流的稳态运行特性,此类调整一般由改变换流变压器分接头档位和投切无功滤波器实现,且两种辅助控制之间相互影响^[1]。

换流器对于交流系统而言是一种无功负荷,其功率因数由式(5)确定。

$$\tan \Phi = \frac{(\pi/180)\mu - \sin \mu \cos(2\alpha + \mu)}{\sin \mu \sin(2\alpha + \mu)} \quad (5)$$

其中,换相重叠角

$$\mu = \cos^{-1} [U_d/U_{d0} - (X_c/\sqrt{2})(I_d/U_1)] - \alpha \quad (6)$$

由式(5)和式(6)可知,若调节换流变压器档位,阀侧电压 U_1 改变, μ 和 $\tan \Phi$ 的数值均会发生变化,从而影响换流器消耗的无功量,导致换流母线的电压 U_{ac} 和直流运行参数发生波动。反之,运行参数的改变又将影响分接头控制的输出,可能引起分接头位置的再次变化。因此分接头档位的调整和无功补偿装置的控制需要相互配合来确定最终的稳定运行状态。

TCC 与 RPC 的联合控制策略如图3所示,将换流站的控制分为3个层次,第1层为直流系统换流器控制层,第2层为无功控制层,第3层为换流变压器分接头控制层。第2层与第3层的辅助控制之间的控制级别为:第2层优先,第3层次之。即直流系统运行参数发生改变时,首先控制无功补偿装置的投入使无功不平衡量和换流母线电压回到规定范围;然后调整换流变压器分接头,将 α 、 U_{d2} 等直流参数调节到正常值;由于直流参数的变化对于系统无功消耗存在影响,必要时,需重新改变无功补偿的投入,再次调整分接头。

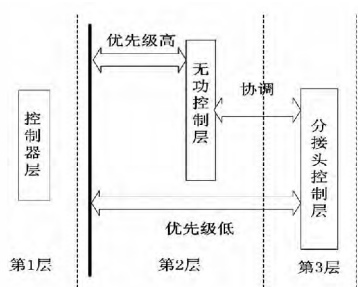


图3 联合控制策略

2 仿真分析

2.1 算例情况与仿真方案

仿真数据基于华中电网2014规划冬大方式,该数据中含有16 698个节点、8 686条交流线路、1 725台发电机和14条直流输电线路。其中哈密—郑州直流输电工程额定功率8 000 MW,额定电压 ± 800 kV,将成为中国输送容量最大、输送距离最远的特高压直流,其稳态运行特性成为影响华中电网安全稳定性的重要因素。

为精确模拟换流器、直流控制系统物理过程,同时保留大电网运行特性,对系统采取混合仿真。机电暂态接口位置选在与HVDC直接相连的交流母线,直流部分划分到电磁子网,交流系统划分到机电子网。辅助控制模型通过自定义模块(UDM)的“接口变量”与仿真主系统连接,实现模型在主系统中的“安装”及调用。辅助控制的配置如下:整流侧换流变压器分接头采用角度控制,逆变侧采用电压控制;送端换流站位于电厂附近,可利用交流系统的部分无功源,因此只考虑逆变侧的无功控制以维系该侧换流母线电压。

2.2 辅助控制的动作特性及机理分析

考虑运行状态I:直流系统自5 s开始进入持续时间为2 h的短期过负荷状态。辅助控制的动作过程及对直流运行参数的影响如图4和图5所示。

由图4和图5可知,直流功率提升后,所建的无功控制自定义模块能够正确响应,投入13组无功补偿装置,为直流系统提供无功支撑。此时换流站其他运行参数(直流电压、触发角等)存在越界的现象,两侧换流变压器分接头控制自定义模块同时发出动作指令,分接头档位分别降低至-3和-2,从而提高两端换流变压器阀侧绕组电压,使得触发角

回升至 14° ,直流电压稳定在0.99 p. u.。分接头调整过程中,逆变侧空载直流电压的增大导致换流站无功需求增加,因此在逆变侧换流变压器分接头第二次动作时,无功控制模块根据新的档位对无功补偿进行调整,增加投入1组无功补偿装置,使不平衡无功重新达到规定范围。调整后,逆变侧直流电压仍控制在理想范围内,换流变压器分接头不需要再次动作。

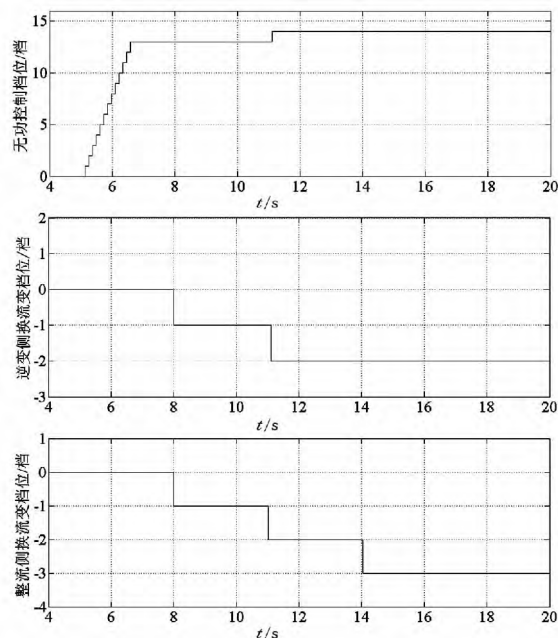


图4 直流过负荷期间辅助控制的动作

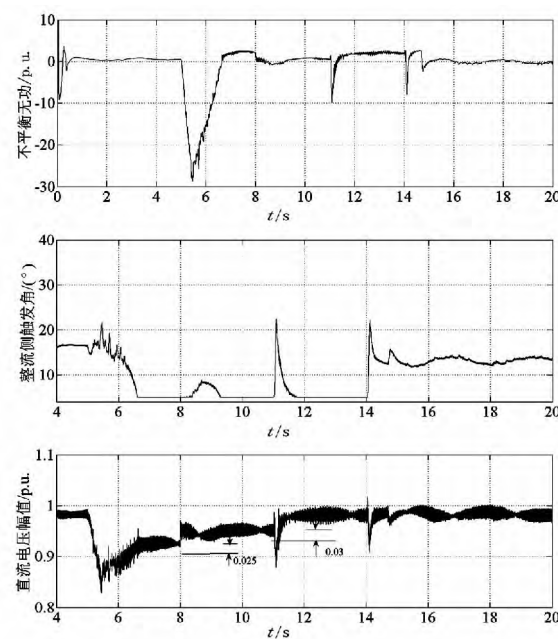


图5 辅助控制对直流运行参数的影响

2.3 辅助控制的影响分析

表1对比了无辅助控制与投入辅助控制两种情

况下的直流稳态运行参数。

表1 不同控制策略下直流稳态参数

控制	U_d /p. u.	I_d /p. u.	α /°	Q_{ac} /p. u.	p_{ac} /p. u.
1	0.83	48	22	33	0.90
2	0.98	48	14	0.50	0.99

注: 控制1为无辅助控制; 控制2为投入辅助控制。

可以看到,在直流过负荷的运行方式下,投入TCC与RPC的联合控制,在维持直流系统逆变侧无功平衡和换流母线电压稳定方面效果显著,同时换流站运行参数被控制到指定范围内,直流系统的稳态运行性能得到大大改善。

在运行状态I的基础上假设故障: 逆变站交流母线“豫郑州换”母线三相短路接地,接地电阻为60Ω,开始时间为20s,结束时间为20.1s。比较表1两种情况下的逆变侧阀电流波形,如图6所示。

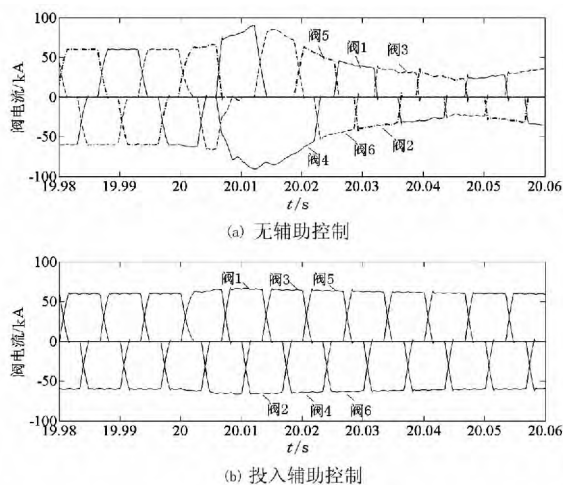


图6 两种控制模型下逆变侧阀电流波形

由图6的阀电流波形可以看到,辅助控制的投入避免了故障期间“换相失败”现象的发生。这是因为:在直流过负荷的运行方式下,TCC与RPC的联合控制提高了逆变器的换相电压,增大稳态时的关断余裕角,从而减少“换相失败”发生的风险,使得直流系统对交流系统故障导致的“换相失败”承受能力更强。

3 结 论

(1) 利用ADPSS用户自定义功能建立的包括换流变压器分接头控制和换流站无功控制的直流辅助控制模型能够正确响应直流系统运行状态的变化,适用于实际大区电网的混合仿真分析。

(2) 考虑直流换流器参数与换流站无功调整之间的交互影响,模型对分接头调整和无功补偿装置

投切之间采用联合控制,从而达到维持换流站无功平衡和保证直流理想运行参数的双重控制目标。

3) 与ADPSS原有直流输电模型相比,辅助控制模型的投入对改善直流稳态运行性能效果显著,有效减少“换相失败”的风险,有利于维持直流输电系统的安全稳定运行。

参考文献

- [1] 吴宝英,陈允鹏,陈旭,等. ± 800 kV云广直流输电工程对南方电网安全稳定的影响[J]. 电网技术,2006,30(22): 5-12.
- [2] 毛晓明,管霖,张尧,等. 含有多馈入直流的交直流混合电网高压直流建模研究[J]. 中国电机工程学报,2004,24(9): 72-77.
- [3] 汪隆君,王钢,李海峰,等. 交流系统故障诱发多直流馈入系统换相失败风险评估[J]. 电力系统自动化,2011,35(3): 9-14.
- [4] 周俊,郭剑波,胡涛,等. 高压直流输电系统数字物理动态仿真[J]. 电工技术学报,2012,27(5): 221-228.
- [5] 徐政,蔡晔,刘国平. 大规模交直流电力系统仿真计算的相关问题[J]. 电力系统自动化,2002,26(15): 4-8.
- [6] 李秋硕,张剑,肖湘宁,等. 基于RTDS的机电电磁暂态混合实时仿真及其在FACTS中的应用[J]. 电工技术学报,2012,27(3): 219-226.
- [7] 刘文焯,汤涌,万磊,等. 大电网特高压直流系统建模与仿真技术[J]. 电网技术,2008,32(22): 1-3.
- [8] 于占勋,朱倩茹,赵成勇,等. 高压直流输电换相失败对交流线路保护的影响(一)含直流馈入的山东电网EMTDC建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(24): 58-64.
- [9] 龙霏,蔡泽祥,李晓华,等. 含多馈入直流的广东电网EMTDC仿真建模[J]. 电力系统自动化,2010,34(3): 53-57.
- [10] 慈文斌,刘晓明,刘玉田. ± 660 kV银东直流换相失败仿真分析[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(12): 134-139.
- [11] 岳程燕,田芳,周孝信,等. 电力系统电磁暂态-机电暂态混合仿真的应用[J]. 电网技术,2006,30(11): 1-5.
- [12] 田芳,李亚楼,周孝信,等. 电力系统全数字实时仿真装置[J]. 电网技术,2008,32(22): 17-22.
- [13] 朱旭凯,周孝信,田芳,等. 基于电力系统全数字实时仿真装置的大电网机电暂态-电磁暂态混合仿真[J]. 电网技术,2011,35(3): 26-31.
- [14] 王峰,徐政,黄莹,等. 高压直流输电主回路稳态参数计算[J]. 电工技术学报,2009,24(5): 135-140.
- [15] 张啸虎,曹国云,陈陈. 高压直流系统低功率运行时

的无功控制策略 [J]. 电网技术, 2012, 36(1): 118 - 122.

[6] 张望, 郝俊芳, 曹森, 等. 直流输电换流站无功功率控制功能设计 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(14): 72 - 76.

[7] 刘崇茹, 张伯明. 考虑换流变压器和无功补偿协调控制计算 AC/DC 系统有功 - 电压曲线 [J]. 电力自动

化设备, 2009, 29(1): 50 - 53.

作者简介:

朱 玲(1990), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统安全稳定与控制;

王 骅(1973), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统仿真。

(收稿日期: 2013 - 06 - 14)

(上接第 32 页)

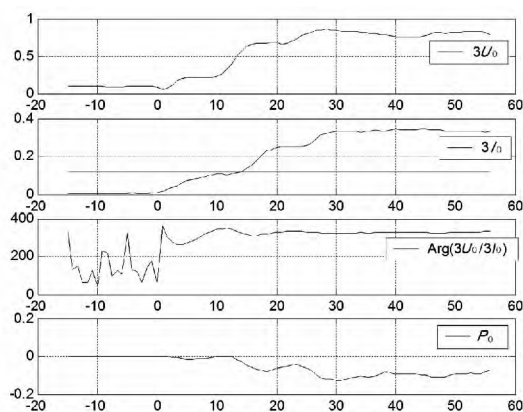


图 15 乌岗 II 线乌北侧零序功率情况

4 结 论

通过分析可知: 乌岗 II 线乌北侧纵联距离元件动作; 龙岗侧纵联零序功率判为正方向。从高频保护逻辑来看, 两侧保护有可能出现不正确动作

在区外不接地对称故障中, 系统中出现零序分量, 导致乌岗 II 回线保护感受到零序电压和零序电流, 从而造成保护装置出现上述的动作特性。

结合理论分析、仿真计算和离线模拟分析, 在实际电网运行的经验基础上, 给出以下建议。

(1) 对系统不平衡程度进行判别, 当不平衡程度较弱时, 闭锁纵联零序正方向或者延时投入纵联零序正方向。

方案优点: 常规区内故障能可靠快速动作; 能有效防止线路不换位时区外故障出现零序分量导致保护误动;

方案缺点: 重负荷高阻接地故障时, 纵联零序动作速度受到影响(此时系统电压下降不多, 对系统稳定影响不大)。

(2) 考虑利用高阻投入抑制零序电流。但此方案需在以下几方面进行进一步研究, 以保障高阻投入的正确性。

1) 零序功率方向元件投入需要确定是高阻情况才投入;

2) 研究如何区别高阻接地与不平衡零序电流;

3) 对方向元件进行研究, 确保各种条件下, 反方向故障时不启动发信。

参考文献

- [1] 孙国凯. 电力系统继电保护原理 [M]. 北京: 中国水利电力出版社, 2002: 137 - 142.
- [2] 贺家李. 电力系统继电保护原理 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1994: 87 - 91.
- [3] 王瑞敏. 电力系统继电保护原理 [M]. 北京: 北京农业出版社, 1994: 25 - 32.
- [4] 刘杨, 李晓明, 曹凯丽. 220 kV 系统高频保护异常运行分析及预防措施 [J]. 电力自动化设备, 2005, 25(5): 98 - 101.
- [5] 苏斌, 董新洲, 阿德南, 等. 方向高频保护的动作为第二部分: 复故障情况下方向高频保护的动作为分析 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2003(2): 9 - 13.
- [6] 康小宁, 梁振锋. 同杆平行双回线路保护及自动重合闸综述 [J]. 继电器, 2004, 31(23): 72 - 76.
- [7] 王红光. 影响高频保护正常投入的原因分析及对策 [J]. 继电器, 2000, 28(11):
- [8] 汤大海, 周立刚. 区外母线故障高频保护动作为分析 [J]. 江办电机工程, 1995(4): 13 - 16.
- [9] 景胜. 河南电网高频保护不正确动作原因分析与建议 [J]. 继电器, 2003, 31(3): 76 - 78.
- [10] 高智勇. 高频保护误动原因分析及改进措施 [J]. 四川电力技术, 2002(S1): 33, 37.

作者简介:

梁 静(1963), 女, 高级工程师, 主要从事电力系统继电保护分析方面的研究;

赵青春(1980), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统继电保护分析方面的研究;

胡立锦(1983), 男, 硕士研究生, 主要从事电网运行控制方面的工作。

(收稿日期: 2013 - 07 - 08)

概率神经网络在母线故障识别中的应用研究

纪叶生

(国网四川省电力公司建设管理中心, 四川 成都 610021)

摘要: 提出一种利用概率神经网络来进行母线故障识别的新方法。首先用 PSCAD/EMTDC 软件对母线故障状态进行仿真, 提取仿真数据, 进行数据预处理, 然后建立概率神经网络模型, 训练网络后判断母线的区内、区外故障及正确识别各种故障类型, 从而验证基于概率神经网络的母线故障识别的准确性。

关键词: 概率神经网络; 母线故障; 故障识别

Abstract: A new method based on probabilistic neural network (PNN) is proposed to identify the fault of bus. Firstly, the software of PSCAD/EMTDC is used to simulate the state of the fault bus, and the data is abstracted and preprocessed. Then a model of PNN is established. Sequentially, the accuracy of bus fault identification based on PNN can be verified by discriminating all kinds of bus faults correctly after training.

Key words: probabilistic neural network; bus fault; fault identification

中图分类号: TM855 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2013)06-0039-04

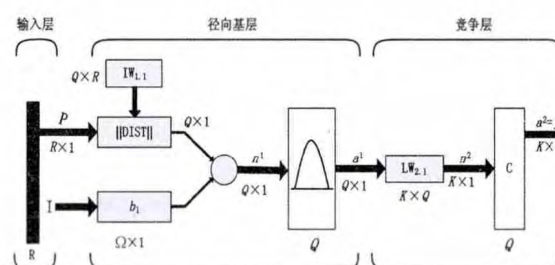
母线是电力系统中最重要元件之一, 母线安全、稳定、可靠的运行关系到电力系统的稳定性及供电的可靠性。同时母线故障的影响面很大, 是最严重的电气故障之一。因此快速、准确地识别母线故障, 同时判断故障类型, 对切除故障母线, 消除或减小故障产生的影响是十分重要的^[1,2]。

母线的故障识别在本质上是模式识别问题, 这里对该问题展开了讨论, 并提出了利用概率神经网络来进行母线故障识别的新方法。应用概率神经网络, 建立仿真模型, 通过对采集的故障样本进行试验, 结果表明该模型能有效提高故障识别准确率^[3]。

1 概率神经网络

概率神经网络是一种基于贝叶斯最小风险准则发展而来的可用于模式分类的并行算法。概率神经网络的结构如图1所示, 共由3层组成^[4,5]。

根据概率密度函数和贝叶斯分类准则提出了概率神经网络的层次模型。在进行网络训练时, 训练样本向量直接存储为概率神经网络的模式样本向量。在进行网络测试时, 由输入层将网络待测样本送到模式层各个类别单元中, 与相应权向量进行点积运算, 然后将计算的结果直接送入径向基层。



在径向基层中, 将各单元与对应分类的模式单元相连, 进而估计各类别的概率输出。在决策竞争层中依据上一层得到对输入向量的概率估计, 按贝叶斯最小风险准则将输入向量分到具有最大后验概率值的类别中去, 最终实现模式识别^[5,6]。

概率神经网络分类过程为: 输入向量传递到输入层; 径向基层计算该输入向量和样本输入向量之间的距离, 并输出一个距离向量; 竞争层接受距离向量并计算每个模式出现的概率, 概率密度函数最大的那个神经元输出为1, 即所对应的那一类即为待识别的样本模式类别, 其他神经元的输出全为0^[5,6]。

2 母线故障识别的概率神经网络模型

2.1 母线故障识别算法流程

基于概率神经网络的母线故障识别算法流程如图2所示。母线故障识别过程分为两步: ①基于一定数量的训练样本集对概率神经网络进行训练, 得

到期望的概率神经网络模型; ②根据当前输入对故障状态进行识别, 识别的过程即为利用概率神经网络进行计算的过程。在学习和识别之前, 通常需要对学习训练样本和待识别样本数据进行适当的处理, 包括预处理和特征选取/提取等, 目的是为概率神经网络提供合适的识别输入和训练样本^[9]。

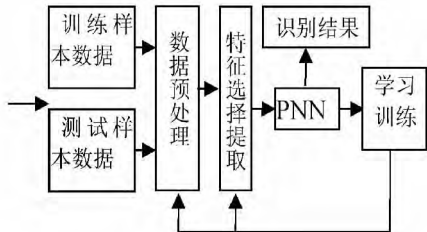


图 2 基于概率神经网络的目标识别结构图

要实现对母线故障的识别, 需考虑母线各种运行状态, 包括正常、内部三相短路、外部三相短路等总共 17 种状态。表 1 给出了母线各种运行状态及其在概率神经网络中的对应输出类别。

要识别母线 17 种运行状态, 需要确定输入样本特征值。为了使样本尽可能地反映母线运行状态,

提取了母线的三相线电压、相电压、三相相电流、三相负序电流相位以及零序电流幅值共 10 组特征值作为概率神经网络的输入样本。

2.2 数据的采集与样本集的确

为使训练样本集包括所要分类的必要信息, 所采用的训练样本尽可能地包括母线各种情况的内部故障和外部故障。利用 EMTDC 程序仿真生成概率神经网络所需的训练样本和测试样本, 同时在获取样本过程中考虑到电流互感器的饱和情况。数字仿真系统模型如图 3 所示。

图 3 中 220 kV 母线上接有 6 回线路, 2 回线路是电源侧线路, 2 回线路是负荷侧线路, 还有 2 回变压器回路, 110 kV 母线接有 4 回负荷出线。针对该模型, 选取 220 kV 母线来进行仿真, 分别对 6 个回路中的 A、B、C 三相电路进行正常运行时的数据采集和故障运行时的数据采集, 采样频率 3 kHz, 即每周采 60 个点, 将这些数据作为样本的原始数据。所采集的正常数据样本和故障数据样本分别为 6 回线路的 A、B、C 三相, 模型的样本分别取图 3 所示的母线的 6 个连接元件的 A 相、B 相和 C 相的一次侧电流之和经电流互感器传变后的二次侧电流。

表 1 母线各种运行状态及对应网络输出编号

母线运行状态	正常	内部三相短路	外部三相短路	内部 A 相单相接地	外部 A 相单相接地	内部 AB 相短路
状态输出编号	1	2	3	4	5	6
母线运行状态	外部 AB 相间短路	内部 BC 相间短路	外部 BC 相间短路	内部 CA 相间短路	外部 CA 相间短路	内部 AB 接地短路
状态输出编号	7	8	9	10	11	12
母线运行状态	外部 AB 接地短路	内部 BC 接地短路	外部 BC 接地短路	内部 CA 接地短路	外部 CA 接地短路	
状态输出编号	13	14	15	16	17	

表 2 母线各种运行状态的部分原始数据(经互感器传变的二次值)

母线故障类型	I_A/kA	I_B/kA	I_C/kA	U_{AB}/V	U_{BC}/V	U_{CA}/V	U_{AN}/V	U_{BN}/V	U_{CN}/V
内部 BC 接地短路	-0.000 59	4.805 9	-22.682	28.863	0.072 234	28.791	68.427	13.894	28.854
	-0.000 64	7.029 2	-20.782	30.507	0.0732 02	30.433	68.43	13.895	30.489
	-0.000 68	9.177	-18.613	31.782	0.0731 33	31.709	68.433	13.895	31.757
外部 BC 接地短路	0.000 586	0.002 847	0.004 108	32.98	4.254 6	28.726	-149.52	0.000 389	30.157
	0.000 578	0.002 818	0.004 116	29.072	2.235 7	31.308	-149.52	0.000 389	30.536
	0.0005 81	0.002 794	0.004 115	31.351	1.1167	30.234	-149.77	0.000 389	30.599
外部三相短路	0.000 845	-0.000 14	-0.000 92	0.013 388	0.003 086	0.016 486	166.27	3.26E-05	0.009 997
	0.000 842	-0.000 14	-0.000 92	0.014 172	0.002 997	0.017 181	156.09	3.24E-05	0.010 382
	0.000 841	-0.000 14	-0.000 92	0.014 912	0.003 003	0.017 927	146.69	3.24E-05	0.010 931
内部 A 相单相接地	-1.280 5	0.000 85	-0.000 65	63.289	94.329	31.04	-150.41	0.000 381	1.394
	-4.9919	0.000 773	-0.000 61	55.956	87.891	31.935	-150.41	0.000 381	0.680 86
	-8.235 7	0.000 692	-0.000 56	51.834	80.387	28.553	-88.236	0.005 87	0.404 93

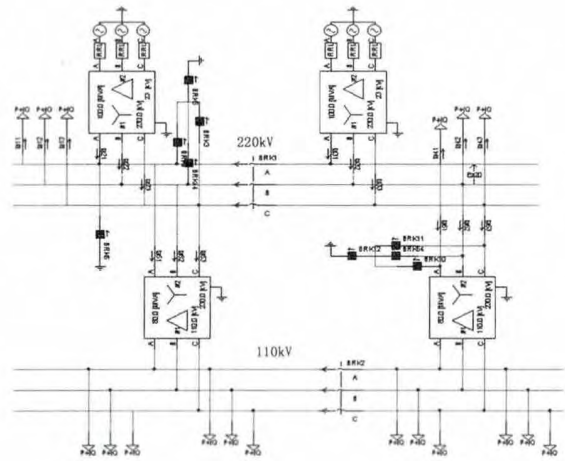


图 3 母线故障仿真电路

根据基尔霍夫电流定律,当系统处于正常运行方式或母线外部故障时,理论上 6 个元件的 A、B、C 的电流之和应该分别为零,但由于现实的一些原因,如传变误差等,6 个元件的 A、B、C 各相电流之和并不等于零,而是存在一个不平衡电流。当母线内部故障时,电流之和为短路点的总短路电流,值很大。

仿真过程中,网络的每个样本取 10 组数据,分别取母线的三相线电压、相电压、相电流、零序电流幅值。采集了正常运行数据和不同故障类型数据共 17 组。表 2 分别给出了母线部分运行状态下的原始数据片断。

3 实验结果与分析

确定选择概率神经网络后,要使用概率神经网络中默认的 SPREAD 值(0.1)对训练数据学习,并使用测试数据检验训练模型所能达到的识别正确率。

3.1 采用不同归一化方式的对比

为了研究数据预处理对识别结果的影响,采用

概率神经网络对训练库中采用不同数据预处理方法得到的样本进行学习,然后对测试库中的数据进行测试,得到的识别结果如表 3 所示。

表 3 样本数据采用不同归一化方式的对比

归一化方式	平均识别率 / %	SPREAD 值	运行时间 / s
不进行归一化处理	57.251 1	1	7.337 215
$[-1,1]$ 归一化	99.172 7	1	0.812 269
$[0,1]$ 归一化	97.386 2	1	0.875 102

由表 3 可知,如果样本数据不进行归一化处理,则分类准确率很低且运行时间长,超过 7 s 才能运行得到结果,且识别结果准确率很低,远远不能满足对母线运行状态的识别需要。如果将数据归一化到 $[-1,1]$ 和 $[0,1]$ 区间,识别准确率较高,运行时间较短。综合几种数据处理方式可以看出,在母线故障识别研究中,将数据归一化到 $[-1,1]$ 区间效果最好,程序运行时间最短,识别准确率很高。

3.2 不同的 SPREAD 值分析比较

表 4 不同 SPREAD 值概率神经网络性能比较

SPREAD 值	识别准确率 / %	运行时间 / s
0.01	92.143 2	0.846 672
1	98.487	0.552 952
10	98.231 2	1.027 203
30	22.418 8	0.359 978 5

针对状态特征数据,使用不同的 SPREAD 值对概率神经网络进行了分类测试,以判别概率神经网络是否具有不同的分类性能,并且确定哪种 SPREAD 值的概率神经网络最适合于该模型的状态评估识别。选取训练样本数为 2 414,测试样本数为 2 431。对不同 SPREAD 值的概率神经网络性能进行了比较

表 5 母线每一种状态的分类准确率

母线运行状态	正常	内部三相短路	外部三相短路	内部 A 相单相接地	外部 A 相单相接地	内部 AB 相短路
状态编号	1	2	3	4	5	6
识别准确率 / %	100	100	96.8	100	100	97.1
母线运行状态	外部 AB 相间短路	内部 BC 相间短路	外部 BC 相间短路	内部 CA 相间短路	外间 CA 相间短路	内部 AB 接地短路
状态编号	7	8	9	10	11	12
识别准确率 / %	100	96.2	100	99.5	100	100
母线运行状态	外部 AB 接地短路	内部 BC 接地短路	外部 BC 接地短路	内部 CA 接地短路	外间 CA 接地短路	内部 AB 接地短路
识别准确率 / %	98.9	100	100	100	100	

实验,结果如表4所示。

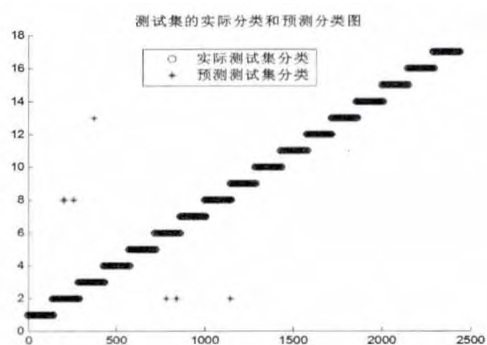


图4 最优参数设置下的测试集实际分类和预测分类图

从表4中可以看出,从平均评估正确率上看,SPREAD值为1的时候分类性能最好且稳定,SPREAD值为10的时候次之,SPREAD值为30的分类性能最差。从运行时间上看,SPREAD值为1的时候分类速度最快。因此SPREAD值为1的概率神经网络比其他的推广性要好。所以本实验表明SPREAD值为1的概率神经网络应用于母线故障识别最理想。在最优参数设置下,运行仿真程序,可以得到测试集实际分类和预测分类图,如图4所示。由图可知,外部三相短路有3个样本被分为外部BC相接地短路,2个样本分为外部AB相间短路;内部AB相短路有1个样本被分为了内部三相短路,有2个样本被分为了内部三相短路;内部CA相间短路有3个样本被分为了内部三相短路;外部AB接地短路有2个样本被分为了外部三相短路。根据每一类的识别情况表可以知道,利用概率神经网络来识别母线故障状态,具有很高的正判率。能100%区分母线区内外故障,能很好地识别母线到底处于哪一种运行状态。

4 结 论

所提出的将概率神经网络方法用于母线故障状态识别有很高的评估正确率和较好的稳定性,评估正确率高,速度快。概率神经网络的应用研究虽然在母线故障状态识别中取得较好结果,但概率神经网络也有一些问题需要进一步深入研究,如概率神经网络的性能依赖于SPREAD值的选择,如何选择合适的SPREAD值及相关参数来满足其对分类结果影响值得探讨。同时概率神经网络评估训练和测试速度有时较慢,还需进一步研究改进算法以适应母线运行状态的实时性要求。

参考文献

- [1] 詹红霞. 基于神经网络的母线保护方法的研究 [J]. 西华大学学报: 自然科学版, 2006, 25(5): 54-56.
- [2] 董秀成, 韩涵. 基于神经网络模型的母线保护故障定位研究 [J]. 西华大学学报: 自然科学版, 2009, 28(1): 1-8.
- [3] 萧彦, 赵自刚. 微机型母线保护应用中的几个问题 [J]. 华北电力技术, 2005(4): 28-31.
- [4] 银涛. 基于概率神经网络的变压器故障诊断的研究 [J]. 电气应用, 2006, 25(10): 15-17.
- [5] 王豪, 郑恩让. 概率神经网络在电机故障诊断中的应用 [J]. 化工自动化及仪表, 2010, 37(8): 59-62.
- [6] MATLAB 中文论坛. MATLAB 神经网络 30 个案例分析 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2010.

(收稿日期: 2013-06-20)

(上接第8页)

- [1] Stander RB. Protection of electronic circuits from over voltages [M]. New York, USA: John Wiley & Sons Inc, 1989.
- [2] 王晓辉, 张小青. 风电机组内电子设备的雷电电磁干扰分析 [J]. 高电压技术, 2009, 35(8): 2019-2022.
- [3] 李景禄. 电力系统电磁兼容技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007. 1-3.
- [4] 赵海翔, 王晓蓉. 雷击引起风电场的地电位升高问题 [J]. 高电压技术, 2003, 29(3): 13-15.
- [5] Cho ma J. Electrical Networks—Theory and Analysis [M]. New York, USA: Wiley, 1985.
- [6] 周佩白. 电磁兼容问题的计算机模拟与仿真技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006: 213-215.
- [7] Dommel H W 著, 李永庄, 林集明, 曾昭华译. 电力系统电磁暂态计算理论 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1991.
- [8] 赵海翔, 王晓蓉. 风电机组的雷击过电压分析 [J]. 电网技术, 2004, 28(4): 27-29.
- [9] 何山, 王维庆, 张新燕, 等. 基于有限元方法的大型永

磁直驱同步风力发电机电磁场计算 [J]. 电网技术, 2010, 34(3): 157-161.

- [1] 张彦立, 王广庆, 李曼. 基于 VB 和 ANSYS 的风机塔筒参数化建模与分析 [J]. 机电工程, 2012, 29(2): 174-176.
- [2] 孙明礼, 胡仁喜, 崔海荣. ANSYS10.0 电磁学有限元分析实例指导教程 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 1-3.
- [3] 张小青, 陈水明. 直接雷击时高层建筑物内暂态磁场的计算 [J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(1): 40-43.
- [4] Buccella C, Orlandi A. An Efficient Technique for the Evaluation of Lightning Induced Voltage in a Cylindrical Vessel Containing Charged Oil [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(2): 368-373.

作者简介:

程锐(1985),男,硕士研究生,研究方向为风机控制与电力系统继电保护。

(收稿日期: 2013-07-01)

电力系统谐波频谱分析的相位差校正法

王涛¹, 邓亚文², 李红伟²

(1. 成都市三新电力服务有限公司, 四川 成都 610000;

2. 西南石油大学电气信息学院, 四川 成都 610500)

摘要: 采用快速傅里叶变换(FFT)进行电力系统谐波分析时很难做到同步采样,故造成频谱泄漏,而要得到准确的频谱分析结果就必须对经FFT变换得到的频谱进行校正。详细分析了常用的相位差校正法的几种实现方法,并通过仿真比较了它们的优劣性。

关键词: 谐波分析; 相位差校正法; 汉宁窗

Abstract: There have difficulties in synchronized sampling during the harmonic analysis of power system using fast Fourier transform (FFT) algorithm, which results in frequency spectrum leakage. So it needs the accurate spectrum value by correcting the frequency spectrum obtained by FFT. Three conventional phase difference calibration methods are analyzed in detail, and their advantages and disadvantages are compared by the simulation.

Key words: harmonic analysis; phase difference calibration; Hanning window

中图分类号: TM861 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)06-0043-03

电力系统的谐波问题在世界范围内得到了十分广泛的关注,谐波的管理、检测和治理等被摆到了十分重要的位置。谐波问题涉及面广,它包括谐波分析、谐波测量、谐波抑制等。谐波测量是谐波问题管理的主要依据,实测电网谐波的干扰和分布状况,已成为保证电网安全经济运行、高质量供电必不可少的措施之一^[1,2]。

而电力系统谐波分析的主要方法是频域分析,由于栅栏效应、频率混叠和频谱泄漏,故要得到准确的频谱分析结果就必须对经FFT变换得到的频谱进行校正。相位差校正法由于其相对简单,通用性好,计算方便,故在不很密集的频谱分析中得到了广泛应用。下面讨论了几种实现相位差校正法的方法,并通过仿真对几种方法做了对比分析。

1 余弦窗函数及其拼谱

电网信号主要含有整数次谐波,因而常采用基于余弦窗的组合窗,这类窗只要选取观测时间是信号周期的整数倍,其频谱在各次整数倍谐波频率处幅值为零,因而谐波之间不发生相互泄漏^[3]。

余弦窗一般可以表达为(H 为窗的项数减1)

$$w(n) = \frac{1}{N} \sum_{h=0}^H a_h \cos \frac{2\pi n h}{N} \dots n=0 \sim N-1 \quad (1)$$

归一化后的频谱可表示为(满足 $\sum_{h=0}^H a_h = 0$)

$$W(\lambda) = \sin \pi \lambda \cdot e^{-j\pi \lambda} \left[\sum_{h=0}^H \frac{a_h}{2N} \cdot \frac{\sin \frac{2\pi \lambda}{N}}{\sin \frac{\pi(\lambda-h)}{N} \sin \frac{\pi(\lambda+h)}{N}} \right] \quad (2)$$

可见,在窗的主瓣内具有线性相位 $-\lambda\pi$ 。

2 相位差校正法^[4]

2.1 相位差校正方法1

采集两段连续的信号样本,然后对这两段信号做FFT变换,利用其对应离散谱线的相位差校正出谱峰处的准确频率和相位。对两段信号加相同的窗函数后进行FFT变换后的相频函数,在窗函数主瓣内都具有同样的相位偏差 θ_w ,而且斜率相同,则第 k 次谐波有(θ_k 为信号实际相位)

$$\theta_{k0} = \theta_k + \theta_w$$

$$\theta_{k1} = \theta_k + \theta_w + 2\pi \times \Delta x / T_k \quad (3)$$

相位差为(令 $\Delta x_k = \text{mod}(\Delta x, T_k)$)

$$\Delta k = \Delta x_k / T_k = (\theta_{k1} - \theta_{k0}) / 2\pi \quad (4)$$

$$(\Delta x_k + nT_k) = T \Rightarrow (m + \Delta k) T_k = T \quad (5)$$

校正频率为

$$f_k = (m + \Delta k) \frac{f_s}{N} \quad (6)$$

可得式(5)、(6)中, T_k 为 k 次谐波的周期; T 为采样序列的周期; m 为峰值谱线号; N 为采样点数; f_s 为采样频率, $f_s = N/T$ 。

设窗函数的频谱模函数为 $w(\lambda)$, y_k 为谱线为 n 时的 FFT 幅值, 则幅值校正为^[3]

$$A = \frac{y_k}{w(\Delta k)} \quad (7)$$

而汉宁窗的幅值校正公式为

$$A = \frac{2\pi\Delta k}{\sin(\pi\Delta k)} \cdot (1 - \Delta k^2) y_k \quad (8)$$

当实部为 R_k , 虚部为 I_k 时, 真实相位角 θ_k 为

$$\theta_k = \tan^{-1} \left[\frac{I_k}{R_k} \right] - \Delta k\pi \quad (9)$$

其特点是通用性好, 对不同窗函数时可用相同的公式进行频率和相位校正, 频率分辨率为窗函数的分辨率, 如上面的汉宁窗为两倍的采样基波频率 ($2/T$), 校正精度高。且计算方法简单, 运算速度快, 加汉宁窗时, 考虑旁瓣干扰, 适用于频率间隔为 2 个以上的频率分辨率的离散频率成分的校正。当频率成分很靠近时, 存在旁瓣干扰, 甚至会发生主瓣干扰, 因而会影响校正精度, 甚至无法校正。

2.2 相位差校正方法 2

这种方法只对原始信号采用一段样本, 然后分别作 N 点和前 $N/2$ 点 FFT, 利用其对应离散谱线的相位差校正出谱峰处的精确频率和相位。同样加窗后两段信号的相位分别为

$$\begin{aligned} \theta_{k0} &= \theta_k + \theta_w \\ \theta_{k1} &= \theta_k + \theta_w/2 \end{aligned} \quad (10)$$

$$\text{故可得 } \theta_w = -2\Delta\theta = \Delta k\pi \quad (11)$$

即 $\Delta k = -2\Delta\theta/\pi$

同样, 加汉宁窗后的第 k 次谐波校正频率、校正幅值和校正相位基于式(6)、(8)、(9)求得。

这种方法的特点是只需要一段时间信号, 对于频率成分靠得很近, 因为作 $N/2$ 点 FFT 时, 频率分辨率扩大一倍而导致校正误差大, 故加汉宁窗时, 适用于频率间隔为 5 个以上频率分辨率的离散频率成分的校正。

2.3 相位差校正方法 3

这种方法只采用一段时域信号, 然后构造另一时间序列, 再对这两段时间序列做 FFT 变换, 利用其相位差进行频谱校正。构造序列的方法是: 根据原始序列 $x(n)$ ($n=0, 1, \dots, N-1$), 将原序列的前 $N/2$ 点向右平移 $N/4$, 然后将序列的前后 $N/4$ 点置

零, 利用窗函数的能量集中在中间近似求解。

加窗做 FFT 变换后, 两段信号的相位分别为

$$\theta_{k0} = \theta_k + \theta_w$$

$$\theta_{k1} = \theta_k + \theta_w + \frac{\pi k}{2} + \frac{\Delta x}{4T_k} \cdot 2\pi \quad (12)$$

相位差为(令 $\Delta x k = \text{mod}(\Delta x, T_k)$, $i = \text{mod}(k, 4)$)

$$\Delta\theta = (\theta_{k1} - \theta_{k0}) = \frac{\pi i}{2} + \frac{\Delta x_k}{2T_k} \cdot \pi \quad (13)$$

$$\Delta k = \Delta x_k/T_k = 2(\Delta\theta - \pi i/2)/\pi \quad (14)$$

同样, 加汉宁窗后的第 k 次谐波校正频率、校正幅值和校正相位基于式(6)、(8)、(9)求得。

这种方法的特点是速度快。只需采一段时间信号, 加任何对称窗函数均可, 通用性好。但精度比第一种方法略低, 但其有比较好的抗干扰能力。但此方法仍然无法消除频谱干扰带来的误差, 不适用于密集频率分析。

3 仿真实例

3.1 较远的频率成分的校正比较

信号如式(15)所示, 采样频率为 1 024 Hz, 频谱分析点数为 1 024, 频率分辨率为 1 Hz。选用汉宁窗, 分别进行无噪声和加最大幅值为 0.5 的随机小噪声(消除直流成分后, 相当于各频率成分幅值的 25%)以及加最大幅值为 2 的随机大噪声(消除直流成分后, 相当于各频率成分幅值的 100%)。实验分析结果如表 1、2 所示。

$$\begin{aligned} y(t) &= \cos(2\pi 4.2t + 20\pi/180) \\ &\cdots + \cos(2\pi 150.5t + 30\pi/180) \\ &\cdots + \cos(2\pi 300.7t + 50\pi/180) \end{aligned} \quad (15)$$

结果表明如下。

(1) 在小噪声(无噪声)的情况下, 对于间隔较远的频率成分, 各种相位差的校正方法在频率、幅值和相位方面的校正精度很高。比较而言, 相位差法 1 的精度高于其他两种校正法。

(2) 在加大噪声的情况下, 各种校正方法的校正精度都明显降低, 但结果精度仍然很高。相比而言, 第 3 种校正法受噪声影响最小。

3.2 间隔较近的频率成分的校正比较

信号如式(16)所示, 采取方法 1 中同样的采样频率、点数。

$$\begin{aligned} y(t) &= \cos(2\pi 123.4t + 20\pi/180) \\ &\cdots + \cos(2\pi 127.4t + 30\pi/180) \\ &\cdots + \cos(2\pi 131.4t + 50\pi/180) \end{aligned} \quad (16)$$

对式(16)信号加最大幅值为 0.5 的小噪声, 再

加汉宁窗进行分析。对比的结果如表3所示。

表1 叠加随机小噪声信号校正结果分析

校正方法	名称	结	果	
未校正	频率	4.000	150.000	300.000
	幅值	0.966	0.850	0.943
	相位/(°)	55.581	119.878	-3.719
相位差法1	频率	4.200	150.504	300.701
	幅值	1.006	1.007	0.998
	相位/(°)	19.475	28.685	49.604
相位差法2	频率	4.201	150.497	300.706
	幅值	1.004	1.020	1.003
	相位/(°)	19.74	30.594	48.565
相位差法3	频率	4.200	150.507	300.710
	幅值	0.995	1.017	1.012
	相位/(°)	18.991	29.877	48.582

表2 叠加随机大噪声信号校正结果分析

校正方法	名称	结	果	
未校正	频率	4.000	150.000	300.000
	幅值	0.978	0.865	0.960
	相位/(°)	55.927	120.455	-3.632
相位差法1	频率	4.196	150.505	300.706
	幅值	1.028	1.0235	1.048
	相位/(°)	20.630	28.38	49.446
相位差法2	频率	4.223	150.463	300.617
	幅值	1.011	0.907	0.953
	相位/(°)	15.158	38.597	54.307
相位差法3	频率	4.191	150.502	300.693
	幅值	0.979	0.985	1.001
	相位/(°)	20.546	31.422	47.745

表3 校正结果分析($\Delta f = 4$ Hz)

校正方法	名称	结	果	
未校正	频率	123.000	127.000	131.000
	幅值	0.903	0.905	0.914
	相位/(°)	91.986	101.484	121.376
相位差法1	频率	123.399	127.401	131.402
	幅值	0.993	0.997	1.000
	相位/(°)	20.348	29.666	49.324
相位差法2	频率	123.397	127.626	130.832
	幅值	0.987	1.169	0.916
	相位/(°)	20.320	-10.854	152.759
相位差法3	频率	123.394	127.380	131.377
	幅值	1.001	0.987	0.990
	相位/(°)	20.693	32.660	54.691

在频率间隔4个频率分辨率时,利用相位差法1进行校正,频率最大误差为0.001749个频率分辨率,幅值最大误差为0.7099,相位最大误差为0.675663°。利用相位差法3进行校正,频率最大误差为0.022803个频率分辨率,幅值最大误差为1.20049%,相位最大误差为4.690788°。

而用相位差法2进行校正,频率最大误差为0.43197个频率分辨率,幅值最大误差为16.9311%,相位最大误差为100.758972°。

4 结 论

通过几个仿真中可总结出,在无噪声和小噪声的情况下第1种相位差校正法校正精度高于其他两种。从电力系统谐波分析的实际考虑,假定谐波是平稳分布的,通过进一步仿真表明,采样周期选为5倍的基波周期时,相位差校正法1的精度完全可以满足要求。而达到同样精度,其他两种算法要抽样时间大于10倍的基波额定周期。实际中,相位差法1需要采样两个序列,故3种方法的采样时间相差不大,但如果分析的谐波次数相同的情况下,后两种方法的采样速率必须是前者的两倍,处理的数据量也增加了一倍。另外,如果考虑更好的窗函数,可以求得更好的结果,但计算复杂,且3次以上窗很难得到准确的校正公式^[9]。故基于第1种相位差校正法的优点,推荐使用加汉宁窗的第1种相位差校正法进行校正。

参考文献

- [1] 吴竟昌. 供电系统谐波 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [2] 宋文南, 刘宝仁. 电力系统谐波分析 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.
- [3] 丁康, 钟舜聪. 通用的离散频谱相位差校正方法 [J]. 电子学报, 2003(1): 142-145.
- [4] 潘文, 钱俞寿. 基于加窗插值FFT的电力谐波测量理论: (I) 窗函数研究 [J]. 电工技术学报, 1994(1): 50-54.
- [5] 潘文, 钱俞寿. 基于加窗插值FFT的电力谐波测量理论: (II) 双插值FFT理论 [J]. 电工技术学报, 1994(2): 53-56.
- [6] 沈国峰, 王祁. 进一步提高准同步采样谐波分析法准确度的方案 [J]. 仪器仪表学报, 2001(5): 455-457.
- [7] 谭山, 熊元新, 刘珠明. 电力系统分数谐波的测量方法 [J]. 继电器, 2002(2): 19-21.
- [8] 陈隆道, 王小海. 周期域分析中的信号周期算法 [J]. 仪器仪表学报, 2001(4): 410-412.

作者简介:

王 涛(1970), 男, 工程师, 研究方向为电力系统及其自动化;

邓亚文(1990), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统及其自动化、智能控制;

李红伟(1977), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统及其自动化、智能控制。 (收稿日期: 2013-09-04)

用电信息采集系统信道建设研究

李赋欣, 徐厚东, 佟如意

(国网四川省电力公司, 四川 成都 610041)

摘要: 通过对主流用电信息采集系统通信技术方案的分析, 提出了适合各类电力用户的用电信息采集通信组网方案, 确保科学组网、可靠通信。

关键词: 用电信息; 采集; 通信; 组网

Abstract: Through the comparison and analysis among the communication technology schemes of main electricity information acquisition system, the communication networking schemes of electricity information acquisition for power consumers of all kinds are put forward so as to ensure the scientific networking and reliable communication.

Key words: electricity information; acquisition; communication; networking

中图分类号: TM769 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)06-0046-04

0 引言

近年, 国家电网公司加快用电信息采集系统(以下简称采集系统)建设, 在为电费结算、线损分析、市场分析与节能服务、计量管理、客户服务、用电检查等营销业务提供强大技术支撑基础上, 还将为规划、调度、配电网等专业提供有效数据资源, 实现“用电信息采集成果在电网规划、安全生产、经营管理、优质服务工作中得到全面应用”建设目标。

采集系统主要由主站、终端和通信信道(包含远程和本地通信两部分)3部分构成, 但在建设过程中, 如何随着通信技术进步不断优化采集通信手段, 提高通信成功率, 解决大数据量的双向交互, 一直是采集系统推广建设中面临的问题。为此, 国家电网公司在智能电网的框架下对用电采集系统的各个环节的技术事项作了原则性的规定, 这就需要各个省(市)电力公司在国家电网公司统一技术标准的前提下, 选择适合的通信技术建设自己的用电采集系统。

1 采集系统建设现状

1.1 国外用电信息采集系统建设情况

在欧洲, 用电采集系统项目建设进展迅速, 意大利、瑞典几乎所有家庭都安装了智能电表, 英国、法

国等西欧国家正积极推进智能电表建设, 已基本实现了工商用户和部分居民用户的用电信息自动采集。在美国, 全美20个州超过一半用户正在使用智能电表。在日本, 智能电表建设主要集中在关西地区, 大地震引发核电危机后, 为有效控制用电需求, 智能电表建设步伐加快趋势明显。

采集系统通信方面, 国外远程信道主要是光纤(以太网)组网技术为主与无线公网并存局面, 其中美国是以光纤为主。本地信道方面, 美国推广建设的智能电表基本是以 Zigbee 智能表, 其本地通信大量采用微功率无线方式, 英国、澳大利亚、印度主流应用也是 Zigbee 微功率无线技术。西欧国家中, 由于其低压电力网上存在的电磁污染治理得较好, 且其电器电磁兼容性的控制较为严格, 所以电力线载波技术在西欧得到了相对广泛的、成功的应用, 随着电力线通信关键技术上取得的重要突破, 本地通信方式多以载波技术为主。

1.2 国内用电采集系统建设情况

国内用电采集系统经历了第一、二代的发展, 目前正进入第三代建设起步阶段, 电力线载波技术、光纤通信等相关通信技术均取得了创新和突破。国内各省(市)采集系统的远程信道主要采用光纤、无线公网、无线专网的方式, 本地信道主要采用 485 接线和载波(大部分是窄带载波, 少量宽带载波), 微功率无线等方式也有应用。

2 几种主流信道技术

2.1 光纤通信

光纤通信是利用光波在光导纤维中传输信息的通信方式,主要分为有源光网络通信和无源光网络通信。光纤专网通信的接口方式有以太网(Ethernet)通信方式、RS232专线方式和E1方式。但是由于自建光纤成本较高,光纤通信尚未得到普及。

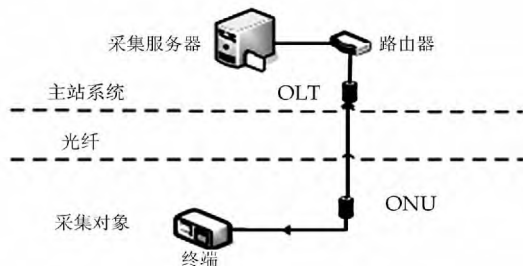


图1 光纤通信

通过租用广电网络也可达到光纤通信的目的,基于广电光纤网络的集抄技术具备光纤通信速度快、传输数据量大的优势,避免了自建电力光纤入户的高昂费用,是节约资源的有效方式,具备发展前景。

2.2 无线公网

无线公网通讯是指电力计量装置或终端通过无线通讯模块接入到无线公网,再经由专用光纤网络接入到主站采集系统的应用,目前无线公网主要有GPRS、CDMA、3G3种。

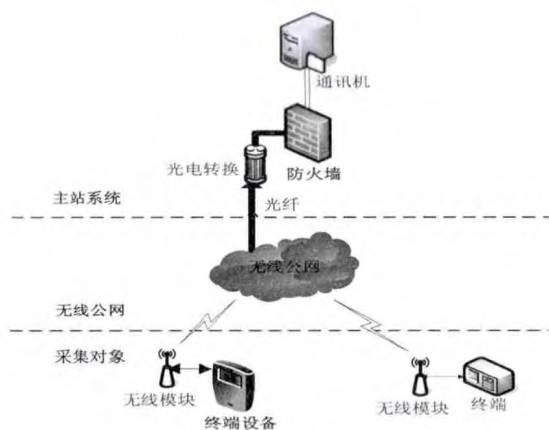


图2 无线公网

2.3 微功率无线通信方式

微功率无线是在较短距离内利用无线通信的低功耗通信技术。在低功耗、低成本的前提下,微功率无线利用高速微处理器技术解决通信难题,适合于测量点多、范围分散场合的低压抄表应用。

2.4 低压窄带载波通信技术

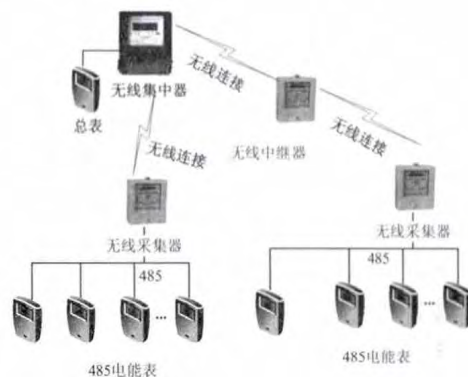


图3 无线集中器(无线中继器)+无线采集器+485电能表方案

电力线载波通信,是将信息调制为高频信号并耦合至电力线路,利用电力线路作为介质进行通信的技术。低压窄带载波通信是指载波信号频率范围 ≤ 500 kHz的低压电力线载波通信。DL/T 698规定载波信号频率范围为3~500 kHz,优先选择IEC 61000-3-8规定的电力部门专用频段9~95 kHz。

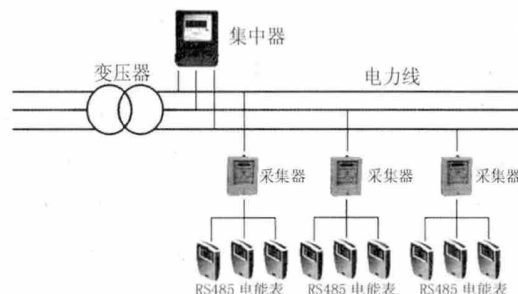


图4 集中器+载波采集器+RS485电能表通信方案

2.5 低压宽带载波通信技术

电力线载波通信,是将信息调制为高频信号并耦合至电力线路,利用电力线路作为介质进行通信的技术。和窄带电力线载波技术不同,宽带电力线载波系统工作在1~40 MHz频率范围内,较好地避开了千赫兹(kHz)频段的常规低频干扰,采用正交或扩频调制方式实现兆级以上的数据传输,数据物理层传输速率最高可达200 Mbps。宽带电力线载波技术还处于发展阶段,目前没有统一标准,技术变化和进步较快,相互之间不能兼容。

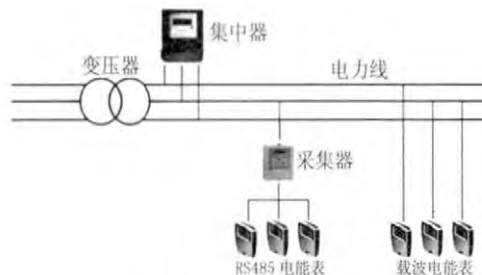


图5 集中器(集成宽、窄带)+采集器+RS485电能表+载波电能表方案

2.6 总线通信

RS-485 总线是基于 RS-485 总线与表计通信的有线通信方式。通信效率相对无线和载波可靠性高,但安装难度大,需专门敷设线路组网,维护不方便,成本高。另外,在多雷的地区,雷击损坏严重。

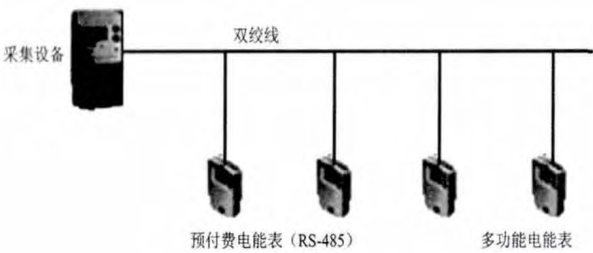


图 6 RS485 通信方案

3 几种主流采集组网方式比较

3.1 技术性能比较

如表 1 所示,根据各类信道组网方式的比较,从数据传输可靠性、通信实时性等主要信道传输指标来考虑,光纤通道以其高速高可靠的传输性能,成为采集远程信道的首选。同时无线公网也以较高的速率、强大的并发处理能力、可靠的通信性能成为远程

信道的次优方案。在本地通信中,RS485 总线方式以高可靠性、高度安全性成为本地通信的首选方案,窄带载波(或窄带载波+RS485 线)、微功率无线等本地通信方案则因技术简单,便于维护,可在农村或人口低密度地区采用。

3.2 投资成本比较

根据技术比较,RS485 总线方式可作为本地通信方式的首选方案,按照四川省内现有已经完成的工程项目,对“自建光纤+485”、“广电网络+485”、“无线公网+485”3 种主流组网方式投资成本进行测算,如表 2 所示。

从投资成本看出,同样采用 RS485 本地通信方式,远程通道采用无线公网户均价格最低,其次是采用广电网络,最后是自建光纤。但在实际建设过程中,因远程信道中光纤网络的建设成本较高,可考虑基于多网融合的广电网络(即 CATV 网络)的建设方式。基于广电 CATV 网络传输的智能管理终端将采集功能和集中功能集合在一起,通过 RS 485 接口采集电表读数,终端内置调制解调器,通过广电的同轴电缆传输到广电中心机房,在通过广电机房的中心交换服务器交换,利用专用光纤到供电局的主站

表 1 用电信息采集系统信道建设方式比较

远程信道	本地信道	说 明	传输速率	理论采集成功率 /%	数据传输可靠率 /%
光纤	宽带载波(或宽带载波+RS485 线)	信道安全可靠,传输速度快,适于海量、高频数据采集和准确实时控制,但宽带电力线载波技术还处于发展阶段,目前没有统一标准,无法全面推广。	200 M/s	99.00	99.00
	RS-485	信道安全可靠,适于准确实时控制,同时 RS485 信道需施工维护。	1 200 bit/s	99.99	99.99
	窄带载波(或窄带载波+RS485 线)	由于窄带载波传输速率较低,这种方式无异于“大马拉小车”无法充分发挥光纤信道的优势。	300 bit/s	98.00	98.00
	微功率无线	微功率无线不仅速率低,而且易受环境干扰,无法充分利用光纤信道的优越性。	20 k/s	97.00	97.00
无线公网	宽带载波(或宽带载波+RS485 线)	信道施工简单、便利,无需信道维护,但宽带电力线载波技术还处于发展阶段,目前没有统一标准,无法全面推广。	14 k/s	99.00	99.00
	RS-485	GPRS/CDMA 应用简单、便利,无需信道维护,同时 RS485 信道需施工维护。	1 200 bit/s	99.00	99.00
	窄带载波(或窄带载波+RS485 线)	整个信道无需布线,维护简单,但延时较大,无法满足四川公司“e 购电”的业务需求。	300 bit/s	96.00	96.00
	微功率无线	整个信道虽然施工简单,便于维护,但容易受到天气、建筑以及其他外界因素的影响,仅用于数据传输,无法满足四川公司“e 购电”的业务需求。	10 k/s	96.00	96.00

表 2 用电信息采集系统信道建设成本比较

通信信道	建设内容(每万户)	户均投资 /元	备 注
无线公网 +485 线	按每 12 户安装 1 只采集终端测算,需安装直接采集表计信息的集中器 834 只	220. 16	/
广电网络 +485 线	按每 12 户安装 1 只采集终端测算,需安装同轴输出 CATV 采集终端 834 只	371. 95	/
自建光纤 +485 线	按户均敷设光缆 30 米,每 12 户安装 ONU(光网络单元设备) 1 只,每 400 户安装 OLT(光缆终端设备) 1 只测算,需敷设 OPLC(光纤复合低压电缆) 30 万米,安装 ONU834 只,安装 OLT25 只	950. 52	自建光纤网络为四川公司配网自动化建设部分内容(即光纤建设到台区)

机房,整个传输线路不受任何的其它信道干扰。同时,部分小区内广电网络的同轴线缆接口已经位于电表箱的附近,施工方便,操作简单。采用广电 CATV 网络作为远程通信手段,在网络稳定性、流畅性与带宽方面较传统 GPRS 集抄有了质的突破,在实现远程抄表的基础上,更能利用 CATV 专线网络,实现稳定、高效的电价下发工作,成功率远超过传统 GPRS 集抄。

3.3 组网方式选择

由于变电站关口、配变台区、低压用户等采集终端类型不同,用电信息采集系统信道的选择应按照合理性和经济性的原则来选定,各类终端用电信息采集系统信道选择合理性为

$$P_n(T) = \sum K_i X_i$$

其中, $P_n(T)$ 表示终端 T 选用第 n 种信道建设方案的合理性; K_i 表示因素 X_i 的影响权重; X_i 表示第 i 个影响因素。

	A	B	C	D	合计
A					2
B	→A				1
C	→A	→B			1
D	D	D	D		2
合计	2	1	0	3	
重要程度指数	4	2	1	5	
权重	0.33	0.17	0.08	0.42	

图 7 CTQ 优选法

这里考虑传输速率、采集成功率、数据传输可靠率和户均投资额 4 个方面影响因素,则按照归一化方法为

$$X_i = (X - \text{MinValue}) / (\text{MaxValue} - \text{MinValue})$$

其中, X 和 X_i 分别为转换前、后的值;MaxValue、MinValue 分别为样本的最大值和最小值。

综合各方面因素考虑,主要采用精益 CTQ (Critical - to - Quality,重要品质特性) 优选法实现

权重 K_i 设定。如图 7 所示,A、B、C、D 分别代表在某一终端类型下,传输速率、采集成功率、数据传输可靠率和户均投资额 4 个因素。

针对多因素情况,采用 CTQ 优选法对因素进行两两比较,充分显示出因素与因素之间重要性的相互关系,并且判断两因素哪个更重要,最终得到影响权重。

4 用电信息采集系统组网建议

在选择采集系统信道建设方案时,必须坚持科学性、合理性、经济性并重的原则。综合以上的技术、经济分析,按照组网方式选择方法,提出用电信息采集系统信道建设建议方案如表 3。

表 3 各类终端用电信息采集系统信道建议方案

终端类型	通信信道		备 注
	远 程	本 地	
变电站 关口	综合数据网(即公司光纤内网)	RS485 线	
配变 台区	综合数据网(即公司光纤内网)	RS485 线	
专变、非统 调电厂	无线公网(GPRS 或者 CDMA)	RS485 线	
	无线公网(GPRS 或者 CDMA)	RS485 线	不具备 CATV 安装条件时
低压 用户	广电光纤网络 (即 CATV 网络)	RS485 线	
	自建光纤网络	RS485 线	有政策支持 的地区
农村低 密度地区	无线公网(GPRS 或者 CDMA)	窄带载波(或窄带载波 + RS485 线) 微功率无线	

参考文献

钱萍,胡林,黄晶,等. 负荷管理系统中的通信及通信安全研究[J]. 电气应用,2007(2): 24 - 27.

(下转第 60 页)

促使用电量多的居民用户多负担电费外,还需不区分农村、城市划分电量需求分档,对困难群体给予一定免费用电量等方式,实现“富人补贴穷人,城市补贴农村”,抑制过度消费,特别是保障困难群众基本生活的目的,体现公平正义的原则。

4.3 促进发展

促进发展是指促进电力企业的良性循环能力,加快供电侧的技术革新,保障电力行业健康发展。

由于近年来实行煤电联动政策调整销售电价时,居民电价未作调整,实施居民阶梯电价需要考虑弥补购电成本的增支;此外阶梯电价实行后,居民生活用电量增长有可能放缓;电力企业将面临数量众多的用户计量装置改造、电费核算软件升级等一系列工作,相关政策规定开展此类工作不得向用户收费。因而,阶梯电价的评价需兼顾到电力企业的成本,避免电力企业因成本上升而陷入发展困境。

表2 阶梯电价的主要评价原则及指标

评价原则	评价指标
机制合理	第1档用户覆盖率
	3档用户平均月电量比
	3档用户单位电价比
公平负担	城乡用户3档单位电价比
	典型(高中低收入)用户3档用电量比
	典型(高中低收入)用户3档单位电价量比
促进发展	免费用电补贴支出
	用户用电满意度
	电费收益增长率
降低能耗	软硬件改造升级费用
	电力发展隐形影响程度
	居民用电量增长率
降低能耗	电力能耗弹性系数
	居民生活用电习惯变化
	其他能源替代率

4.4 降低能耗

降低能耗是指充分发挥价格杠杆的作用,促进合理、节约用电,建设能源浪费,提高能源利用效率。随着经济的快速发展,能源紧缺以及由能源大量消耗引发的环境问题,对中国经济社会可持续发展的

制约日益增强。抑制不合理需求、促进节能减排和环境保护,发挥价格杠杆调节作用势在必行。在社会主义市场经济条件下,促进发展方式转变和节能减排主要还是要靠经济手段,而价格机制是最重要的经济杠杆。实施阶梯电价,应对抑制不合理的电力需求、促进经济结构调整发挥积极作用。

对应于以上4个方面的评价原则,定量或定性设置一些评价指标体系,如表2所示。

5 结 语

基于目前四川现行销售电价政策分析,将2012年7月新阶梯电价政策与原电价政策进行对比分析,利用数学方法分析新阶梯电价的计算方法及其与原阶梯电价的对比函数,并对相关因子进行敏感性分析,得到了阶梯电价的调整变化曲线。分析阶梯电价的实质和实施动因,根据其目的制定了阶梯电价评价原则,建立了阶梯电价评价指标体系,对阶梯电价实施效果的研究具有一定的参考意义。

参考文献

- [1] 张健,柳伟,庞猛.四川电价水平报告[R].研究与参考,2011.
- [2] 国家发改委.印发关于居民生活用电实行阶梯电价的指导意见的通知[R].2011.
- [3] 国家发改委.关于加快推行电价改革的若干意见(征求意见稿)[R].2009.
- [4] 四川发改委.关于调整四川电网居民生活用电阶梯电价的通知[R].2012.
- [5] 朱成章.关于我国实行阶梯电价的建议和设想[J].中外能源,2012,15(5):13-17.
- [6] 陶庆先.阶梯电价的效果评价与实施策略研究[J].市场经济与价格,2012,(5):9-11.
- [7] 郑厚清,金毅,尤培培.居民阶梯电价的评价与展望[J].能源技术经济,2012,24(1):6-9.

(收稿日期:2013-09-28)

(上接第49页)

- [1] 郭万祝,赵远.负荷管理系统功能拓展经验浅谈[J].电力需求侧管理,2008,10(2):26-29.
- [2] 龚敏.电力信息综合管理终端技术讨论[J].电力需求侧管理,2009,11(4):69-71.
- [3] 张捷.淮北电网基于EPON的用电信息采集系统设计

[J].北京:华北电力大学,2012.

作者简介:

李赋欣(1982),男,硕士,工程师,长期从事电力营销管理、用电信息采集研究等工作。

(收稿日期:2013-09-10)

± 500 kV 换流站直流电流互感器现场校准装置与技术

周一飞

(国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072)

摘要: 随着中国超高压直流输电工程大量建成并投入商运, 作为关系到直流输电系统稳定、安全、可靠运行的关键测量设备之一的直流电流互感器, 目前主要依赖进口, 并且还比较缺乏自主的产品性能检测手段和设备, 因此, 目前无论在换流站的投运前, 还是在运行检修时, 对其进行性能考察都比较困难, 或成本很高, 从而导致了难以准确掌控和把握该类型直流测量设备真实的运行状况。所提的直流互感器现场校准用设备与技术, 通过在实际直流工程现场进行实际应用, 证明了其有效性和实用性, 并在实际应用中取得了良好的效果。

关键词: 直流输电; 直流电流互感器; 高精度直流电流比较仪; 高稳定度直流电流源; 无线同步采集装置

Abstract: With the development of HVDC transmission projects which have been completed and put into commercial operation, the application of direct current transformer which is one of key measuring equipment for the stable, safe and reliable operation of DC transmission system will be increasingly widespread. But it mainly depends on the import, and there lacks independent test method and equipment for product performance. Therefore, at present, whether before commissioning of converter station or during operation maintenance, it is difficult to do the performance investigation or the cost is high, which results in the fact that it is hard to accurately control and grasp the real operation conditions of this type of DC measurement equipment. The proposed field test equipment and technology for DC transformer have proved to be effective and practical by actual applications in DC projects, and the good effect has been achieved in practical application.

Key words: DC transmission; DC current transformer; high-precision DC current comparator; high-stability DC current source; wireless synchronous acquisition device

中图分类号: TM835 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2013)06-0050-05

0 引言

超特高压直流输电技术的发展起源于20世纪60年代。瑞典查尔穆斯理工(Chalmers)大学于20世纪60年代中期开始着手研究超、特高压(± 750 kV)输电线路等工作。此后, 欧洲的前苏联、南美洲的巴西等国也投入到超特高压输电工程的研究和工程实践工作中来^[1]。IEEE(美国电气与电子工程师协会)和CIGRE(国际大电网会议)均在20世纪80年代中后期指出^[2]: 根据已有技术和运行经验, ± 500 kV、 ± 800 kV均是合适的直流输电电压等级^[3]。中国历时数年对高压直流输电的电压等级多方研究论证并进行不断技术攻关, 同时考虑到对直流输电技术的研发水平和直流设备的研究及生产能力, 坚定了必须明确一个特高压直流输电等级作为方向, 并最终锁定 ± 800 kV为中国特高压直

流输电的标称电压^[4]。

直流互感器是直流输电系统的重要一次设备^[5], 为系统的控制和保护提供准确可靠的测量信息, 其运行可靠性和测量准确性直接关系到直流输电系统的安全稳定运行^[6]。为了开展直流换流站电流传感器的现场校准, 需研究现场校准用电流源的技术要求、适用于现场校准用的标准装置类型和结构、测量线路和误差处理方法及大电流计量标准装置的校准技术^[7]。目前已投运的换流站采用的直流互感器大部分均为进口, 国产化水平偏低^[8], 在实际运行中, 部分换流站的直流互感器多次出现故障, 有些故障直接导致了直流系统的单极闭锁。然而目前换流站用直流互感器一般只进行过出厂校准试验, 由于缺乏相应的试验手段和试验设备, 且无相关直流互感器标准和技术监督规程可依, 直流互感器在国内进行现场校准试验和例行校准的条件十分匮乏。

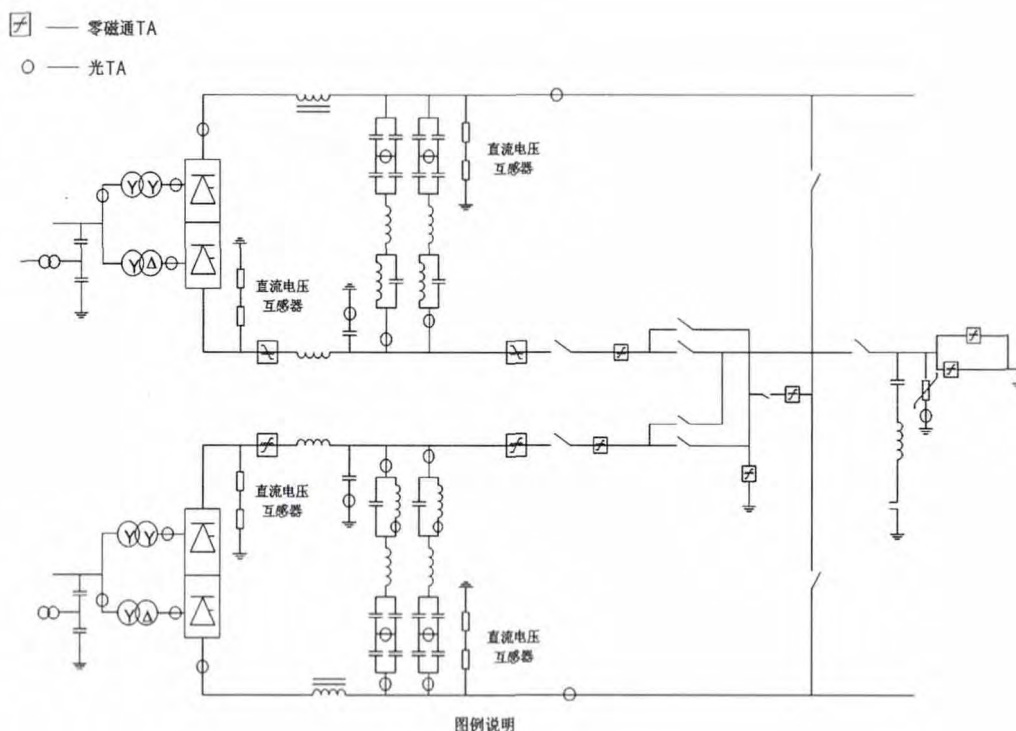


图1 换流站直流部分接线图

1 直流换流站中直流电流互感器概况

目前已投运换流站使用的直流电流互感器按原理分为光电流互感器(OTA)与零磁通直流电流互感器(零磁通TA),它们的特点不同,TA易于解决绝缘的问题,零磁通TA的准确度比较高,因而将它们应用于换流站不同位置。OTA主要用于直流阀厅内极线、直流场极线以及直流滤波器高压侧回路的电流测量。零磁通式直流电流互感器用于阀厅内直流中性线、直流场中性线以及直流场NBGS开关的电流测量^[1]。图1是某换流站直流部分的接线图,可以看到,直流电流互感器在换流站中应用十分广泛。

2 现场校准设备

用于超高压直流换流站直流电流互感器现场校准的装置分为两类:一类是现场用标准设备,主要是直流电流比例标准装置——直流电流比较仪;另一类就是校准用辅助设备,包括现场用高稳定度直流电流源^[2]和无线同步数据采集装置。

2.1 直流电流比例标准

校准0.2级的直流电流互感器要求标准器的准

确度至少应达到0.05级。磁调制式直流比较仪^[1]是20世纪60年代加拿大科斯托尔斯(Kusters)首先研制成功的,其准确度高达 1×10^{-6} 以上,现在世界各国已经采用这种直流电流比较仪作为直流电流比较标准^[2]。为开展国内超高压直流电流互感器现场校准试验,特试制了5 kA直流电流比较仪作为校准试验中的标准器^[3],该电流比较仪的电流比例准确度等级达到 2×10^{-6} 。在实际校准试验中,该直流电流比较仪要外接负荷电阻,使得比较仪可以输出电压。校准试验中采用的负荷电阻为0.01级高精度电阻,因此直流电流比例标准装置的整体准确度优于0.02%。

2.2 高稳定度直流电流源

随着国内超高压直流输电工程的陆续投运,适用于现场电流互感器校准的直流电流源要求越来越高。不仅需要该类电源的输出电流能够在零到额定范围内连续并且可调,而且还要保证其输出电流的高稳定性和高准确度,同时为了满足现场测试的实际需求,还尽量要求此类电源体积小、重量轻、可靠性高。

为提高电流源的输出电流的精度,现场校准试验用所设计制造的5 kA高稳定度直流电流源使用直流电流比较仪作为采样环节,并增加PI控制环节,减小给定电流与输出电流的误差。三相交流电经过三相不控整流、DC/AC高频逆变器、高频变压



图2 高稳定直流电流源电路框图

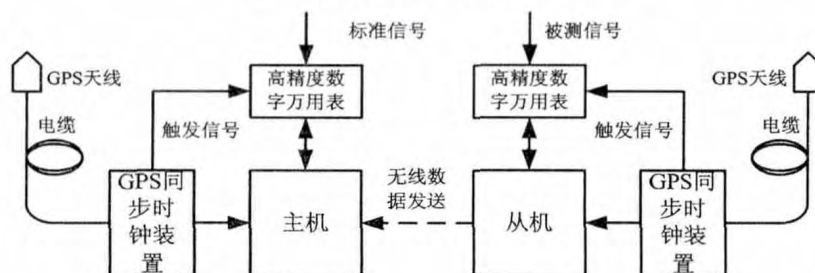


图3 GPS无线同步数据采集装置原理图

器输出再经过全波不控整流、滤波最终得到所需直流电流,原理如图2所示。

2.3 同步数据采集装置

在直流互感器现场校准试验中,标准的输出与被校准互感器的输出分别位于直流场与控制室,当被校准互感器的二次输出为模拟信号时,为了能够同步测量标准输出和被校准互感器的输出,需要使用GPS无线同步触发测量技术。

该装置由主(从)机测试系统、GPS同步时钟装置、高精度数字万用表等几个部分组成,其中主机通过Labview平台(虚拟仪器技术)与GPS装置、高精度数字万用表进行接口。利用该装置进行直流互感器现场校准时,主机置于直流场,从机位于控制室,两者通过无线通讯技术连接。

3 直流电流互感器校准方法(异地同步测量法)

3.1 测量原理

当被校准直流电流互感器的输出与标准器的输出由于场地的限制相距较远时,建议采用本方法。如图4所示,1为标准直流电流比较仪;2为被校准直流电流互感器;3为标准电阻(直流电流比较仪负荷); U_p 为直流电流比例标准输出的电压,信号取自于直流场标准器侧; U_s 为被校准直流电流互感器的二次输出电压,信号取自于控制室。同步测量两地的信号并转换为对应的一次电流,经比较即可得到被校准直流电流互感器的误差。这种方法称之为异地同步测量法。

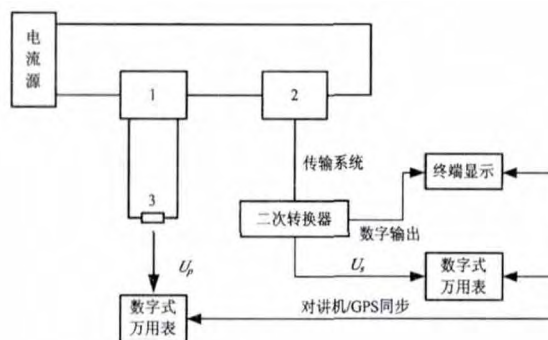


图4 异地同步测量法校准直流电流互感器原理图
电流比值误差表达式按式(1)计算为

$$\varepsilon = \frac{U_s - U_p}{U_p} \times 100\% \quad (1)$$

3.2 试验方法

1) 当被校准直流电流互感器二次没有模拟输出接口时,只能通过人工方式同步直流场数字式万用表和控制室终端显示的读数,此时对直流电流源输出电流的稳定度要求很高。为降低读数延迟造成的误差,需采取多次重复测量取平均值的方法;

2) 当被校准直流电流互感器二次具有模拟输出接口时,采用GPS无线同步数据采集装置(见图3)同步测量两地信号,此时由于同步精度很高,对电流源输出电流的稳定度要求可以降低。

4 直流电流互感器现场校准

使用异地同步测量法和上述试验设备对 ± 500 kV德阳换流站内极线上的OTA进行了现场校准试验,注入电流主回路长度约为50 m,主回路连接导线采用3根额定1 000 A大电流导线并联。测量点为额

表2 ±500 kV 德阳换流站极线 OTA 测试数据

测量点	标准示值 /A	试品通道1 示值 /A	通道1 误差 /%	试品通道2 示值 /A	通道2 误差 /%
0 A	0.00	-0.92	/	4.69	/
上升 300 A	296.30	294.88	-0.48	207.74	-29.89
上升 600 A	597.43	595.34	-0.35	600.93	0.59
上升 1 500 A	1 496.35	1 492.35	-0.27	1 497.76	0.09
上升 2 400 A	2 391.89	2 386.46	-0.23	2 392.24	0.01
上升 3 000 A	2 993.12	2 984.83	-0.28	2 990.67	-0.08
下降 2 400 A	2 395.72	2 389.51	-0.26	2 395.43	-0.01
下降 1 500 A	1 498.07	1 493.87	-0.28	1 499.43	0.09
下降 600 A	597.93	595.94	-0.33	601.63	0.62
下降 300 A	295.12	293.41	-0.58	299.18	1.37

定电流的 0、10%、20%、50%、80%、100%。测试结果见表 2。



图5 ±500 kV 德阳换流站极线 OTA 试验场景

分析此次校准试验,可以得到如下几点结论。

- (1) 德阳极 I 光电流互感器(OTA)在 10% 额定电流点出现超差,且两通道输出数据差距较大,考虑到分流器本身的线性度优良,应当是信号处理与传输环节引入的误差,需要通过现场校准进行调整;
- (2) 不同光电流互感器(OTA)的误差-电流曲线则有一定的分散性,这体现了光电流互感器误差影响环节较多的特点,如分流器环节、多级放大环节、各级零点偏置、AD 转换环节等等;

(3) OTA 的工作环境温度范围为 -40℃ ~ +50℃,如果要在全温度范围内误差均满足 0.5 级要求,则 OTA 的误差温度系数应在 40×10^{-6} 以下。

5 结 论

- (1) 测定直流电流互感器误差时,电流上升和下降的误差变差较小,这表明换流站中直流电流互感器的误差性质较为稳定,同时也在一个方面证明所采用的误差校准方法和校准设备的可信度。
- (2) 通过开展直流互感器投运前的现场校准试验可以提早发现直流互感器的故障或隐患,对于保障中国直流输电工程安全、优质和经济运行具有重要的意义。

参考文献

[1] 刘国云,代因筠. 伊泰普高压直流输电系统总论及其特点 [J]. 华中电力,1995(6):13-18.

[2] 李晓黎. 特高压直流输电技术发展综述 [J]. 广西电力,2009(1):23-26.

[3] 袁懋振. ±800 kV 直流输电技术研究 [M]. 北京:中国电力出版社,2006.

[4] 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.

[5] 蒋大悲. 高压直流输电用的直流电流互感器 [J]. 高压电器,1982(2):44-46.

[6] 赵中原,方志,邱毓昌,等. 高压直流换流站技术现状与发展 [J]. 中国电力,2002,35(3):48-51.

[7] 王乐仁,雷民,章述汉. 特高压直流换流站电流电压传感器的测量误差 [J]. 高电压技术,2006,32(12):164-167.

[8] 赵杰,蔡宗远. 高压直流输电技术自主化迈出重要一步 [J]. 电力系统装备,2005(10):17-20.

- [9] 王红梅. 特高压直流输电技术现状及在我国的应用前景 [J]. 北京: 华北电力大学, 2006.
- [10] 王凤至, 张素霞. 自制大电流直流可调电源 [J]. 河南师范大学学报, 1994, 18(2): 120.
- [11] 揭秉信. 磁调制器的理论分析与计算 [J]. 仪器仪表学报, 1982, 3(1): 57-63.
- [12] 李维波, 李启炎, 任士炎, 等. 新型直流大电流比较仪

的建模与仿真研究 [J]. 四川工业学院学报, 2001, 20(2): 8-12.

- [13] 李恺, 罗志坤, 欧朝龙, 等. 基于电流比较仪测试直流互感器误差的方法 [J]. 湖南电力, 2010, 30(5): 41-44.

(收稿日期: 2013-07-21)

(上接第28页)

究已经取得了很大的进展,但总的来说,多代理技术还不成熟,还需要深入的研究。此外,由于多代理技术的成本较高,加之配电系统对安全性的要求较高,所以多代理技术在配电系统中的应用还较少。但由于多代理技术的诸多优点,随着其成本的降低和技

术的成熟,多代理技术在电力系统中的应用定会越来越广泛。

参考文献

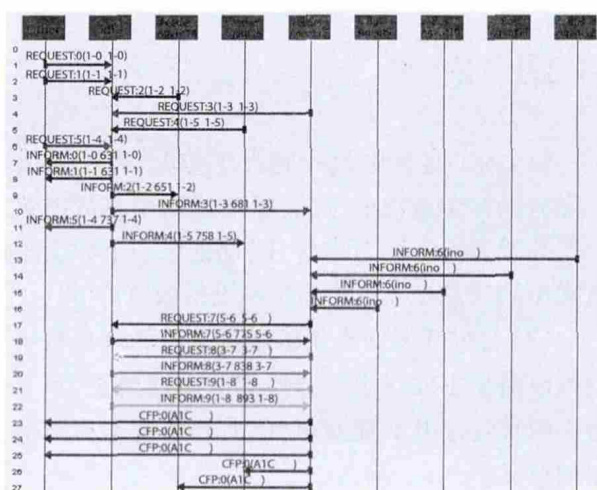
- [1] 徐青山. 电力系统故障诊断及故障恢复 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [2] 孔冰, 赵泽茂, 李红伟. 基于多代理技术的配电网网络复电技术 [J]. 电气应用, 2013, 32(7): 28-31.
- [3] 刘莉, 陈学锋, 翟登辉. 智能配电网故障恢复的现状与展望 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(13): 148-152.
- [4] 李鹏飞. 基于人工智能的配电网故障恢复重构研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2008.
- [5] 冯树海. 配电系统网络重构方法研究 [J]. 电力自动化设备, 2002, 22(5): 13-15.
- [6] 王照, 马文晓, 高飞. 基于多代理技术的分布式馈线自动化实现方法 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34(6): 54-56.
- [7] 丁施尹, 刘明波, 谢敏, 等. 应用多代理技术求解高压配电网故障恢复问题 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(9): 54-60.
- [8] 王守相, 李晓静, 肖朝霞, 等. 含分布式电源的配电网供电恢复的多代理方法 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(10): 61-65.
- [9] 于卫红. 基于 JADE 平台的多 Agent 系统开发技术 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.

作者简介:

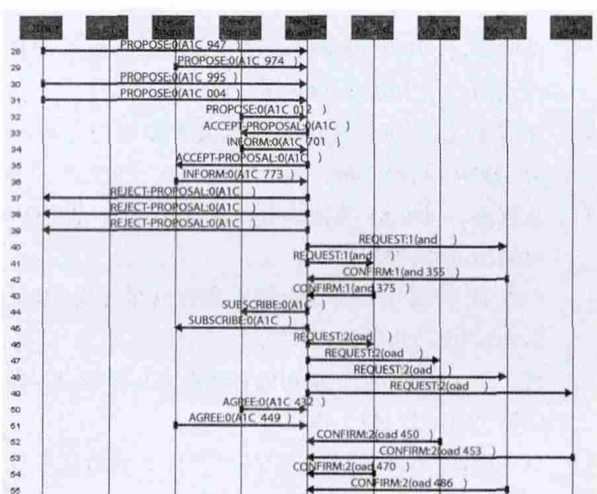
陈晓静(1979), 女, 工程师, 主要从事电网运行监控及智能电网研究工作;

孔冰(1989), 男, 硕士研究生, 主要从事智能体及多代理系统研究。

(收稿日期: 2013-08-05)



(a)



(b)

图3 各代理的交互顺序图

四川居民阶梯电价效果分析及评价体系研究

李红, 杜新伟

(国网四川省电力公司经济技术研究院, 四川 成都 610041)

摘要: 居民生活用电阶梯电价是电价体系改革的重要举措, 2012年7月起四川对居民生活用电阶梯电价进行了调整, 对四川目前销售电价制度进行总结的基础上, 利用数学方法分析新阶梯电价的计算方法及其与原阶梯电价的对比函数, 对相关影响因素进行敏感性分析, 并基于阶梯电价实施目标对阶梯电价的评价原则和体系进行了研究。

关键词: 阶梯电价; 四川电力; 效果分析; 评价体系

Abstract: The multistep electricity price is an important measure for the reform of electricity price system, which has been adjusted since July 2012 in Sichuan. On the basis of summarization of the current electricity sell price regulations, the calculation method of new multistep electricity price and its comparison function with the original one are analyzed using the mathematical methods, and the sensitivity of the related influencing factors is also analyzed. Based on the analysis of implementation target, the evaluation principles and system for multistep electricity price are studied.

Key words: multistep electricity price; Sichuan electric power; implementation effect analysis; evaluation system

中图分类号: F407.6 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)06-0055-06

0 引言

电价作为电力市场的核心内容, 对促进市场发展、优化资源配置、提高能源效率等起着关键作用。一直以来, 中国销售电价存在着总体水平偏低、各类用户交叉补贴不合理等问题^[1], 为深化资源性产品价格改革, 发挥价格机制对用电需求调节作用, 理顺电价关系, 引导居民合理消费电能, 近年来中国电价体系进行了多项改革, 居民生活用电阶梯电价就是其中的重要一项^[2]。

阶梯电价一般指阶梯式递增电价, 是单位用电价格随用电量增加阶梯状逐级递增的电价机制。2006年7月起, 四川就已开始实施阶梯电价(称为“原阶梯电价”), 对提高用户节约用电意识、引导电能消费起到了一定作用。2009年11月国家发改委发布《关于加快推行电价改革的若干意见(征求意见稿)》^[3], 经广泛征求意见, 2012年6月四川省发改委颁布《关于调整四川电网居民生活用电阶梯电价的通知》^[4], 于2012年7月正式实施居民生活用电阶梯电价新方案(称为“新阶梯电价”)。

对四川目前销售电价制度进行总结的基础上, 利用数学方法分析新阶梯电价的计算方法及其与原

阶梯电价的对比函数, 对相关影响因素进行敏感性分析, 并基于阶梯电价实施目标对阶梯电价的评价原则和体系进行研究^[5-7]。

1 四川现行销售电价分析

1.1 目录电价

四川目录销售电价分为重灾区和非重灾区两个价区。按照用电性质, 将用电分为居民生活用电、商业与非居民照明用电、非工业与普通工业用电、大工业电价、农业生产电价、趸售用电等6个类别; 根据《国家发改委关于调整华中电网电价的通知》(发改价格[2011]中2623号), 将非居民照明、商业与非普通工业用电合并为一般工商业及其他用电类别。按用电电压等级, 分为不满1 kV、1~10 kV、35~110 kV以下、110 kV、220 kV及以上5个等次。四川目前只对大工业用户实行两部制电价, 其他用户均执行单一制电价, 大工业用户基本电价最高按最大需量39元/kW·月或受电变压器容量26元/kVA·月来计算。2006—2012年, 四川电网销售电价多次进行调整, 其中近期主要有3次。

(1) 2009年11月调整。按照《国家发展改革委关于调整华中电网电价的通知》^[8](发改价

格〔2009〕2925号),销售电价主要调整内容为:1)销售电价每 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 提高0.2分,暂用于解决电网企业“一户一表”改造投资还本付息等问题;2)适当提高电网销售电价,四川省销售电价平均提价标准每 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 为2.24分;3)进一步优化销售电价结构,四川省实行商业与非居民照明用电同价。

(2)2011年6月调整。按照《国家发展改革委关于适当调整电价有关问题的通知》^{〔1〕}(发改价格〔2011〕1101号),销售电价主要调整内容为:在火力发电企业上网电价提高后,销售电价相应调整,四川销售电价(含趸售用电)每 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 提高0.4分,其中居民用电价格暂不调整,调价金额由其他用户承担,四川电网除居民生活用电外的其他用电价格每 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 提高0.52分。

(3)2011年12月调整。按照《国家发展改革委关于调整华中电网电价的通知》^{〔1〕}(发改价格〔2011〕2623号),销售电价主要调整内容为:1)提高电网销售电价,四川销售电价平均提价标准每千瓦时为2.71分钱;2)进一步完善销售电价结构,四川省将非居民照明、商业与非普通工业用电合并为一般工商业及其他用电类别;3)根据可再生能源发展需要,将向除居民生活和农业生产以外其他用电征收的可再生能源电价附加标准提高至每千瓦时0.8分钱。

1.2 丰枯峰谷电价

1998年9月,国家计委颁布《四川省电网丰枯、峰谷电价暂行规定》(计价格〔1998〕1802号),进一步扩大四川电网试行丰枯、峰谷电价的范围。

(1)丰枯季节、峰谷时段划分。将一年按发电来水和用电需求划分为丰水期、平水期和枯水期3个季节,其中丰水期6至10月份;枯水期1至4月份,12月份;平水期5月份和11月份,实行不同电价水平。将一天24小时分成3个时段(高峰、平段、低谷),其中高峰时段:7:00~11:00,19:00~23:00;低谷时段:23:00~7:00;平段:11:00~19:00,每个时段实行不同的电价水平。

计算丰枯、峰谷电价的基准销售电价为国家规定目录电价中的电度电价,基本电价以及随电费加收的基金、附加费等不实行丰枯、峰谷电价。

(2)实施范围。销售电量丰枯、峰谷电价的执行范围为受电变压器容量在315 kVA及以上的大工业用户;受电变压器容量在50 kVA及以上非工

业、普通工业用户;除党政机关、事业社团、学校、医院、民政福利单位和城市公用路灯以外的非居民照明用户;趸售用电。大工业或非工业、普通工业用户中的自来水生产和城市热力燃气用电不实行丰枯、峰谷电价办法。

(3)实施方式。丰枯销售电价为,丰水期电价在基准电价基础上下浮10%,枯水期电价在基准电价基础上上浮20%,平水期电价按基准电价执行。峰谷销售电价为,在丰枯电价基础上,高峰用电电价上浮60%,低谷用电电价下浮60%。

(4)其他。两部制电价用户以实行丰枯、峰谷浮动后的电度电价加上国家规定的基本电费为基础,单一电价制电价的用户以浮动后的电度电价为基础,按国家规定功率因数调整电费办法,计算功率因数调整电费。

2010年2月,国家发展改革委办公厅发布《关于调整四川省丰枯、峰谷电价办法有关问题的复函》(发改办价格〔2010〕300号),对丰枯、峰谷电价标准进行了部分调整。对于销售电价,主要调整为将销售环节峰谷电价上、下浮动比例调整为50%。

1.3 居民阶梯电价

2006年7月,四川省就在全率先开始实施阶梯电价,分为4档实行,电价标准为:月电量在60 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 及以下部分,电价不提高;61~100 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 部分,电价上调0.08元/ $\text{kW}\cdot\text{h}$;101~150 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 部分,电价上调0.11元/ $\text{kW}\cdot\text{h}$;151 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 以上的部分,电价上调0.16元/ $\text{kW}\cdot\text{h}$ 。按照国家发改委《印发关于居民生活用电试行阶梯电价的指导意见的通知》(发改价格〔2011〕2617号)精神,结合四川实际,四川在召开四川电网居民阶梯电价调整听证会,充分听取听证会参加人意见的基础上,2012年6月四川省发改委颁布《关于调整四川电网居民生活用电阶梯电价的通知》(川发改价格〔2012〕560号),公布了四川电网居民阶梯电价调整方案,于2012年7月1日起开始实施。

2 原阶梯电价与新阶梯电价对比分析

四川原居民阶梯电价与新阶梯电价表如表1所示,主要对比分析如下。

2.1 阶梯电量档次

从国内外阶梯电价的实践情况看,阶梯电价有

表1 原、新阶梯电价对比表

(单位: 元/kWh)

原阶梯电价		新阶梯电价	
(一) 合表居民用电	0.522 4	(一) 合表居民用电	0.546 4
(二) 城乡“一户一表”居民用电		(二) 城乡“一户一表”居民用电	
高峰时段、平段	0.472 4	高峰时段、平段	0.522 4
月用电 60 kW·h 以内 丰水期低谷时段	0.151 0	月用电 180 kW·h 以内 丰水期低谷时段	0.175 0
枯平水期低谷时段	0.229 5	枯平水期低谷时段	0.253 5
月用电 61 ~ 100 kW·h	0.552 4	月用电 180 ~ 280 kW·h	0.622 4
月用电 101 ~ 150 kW·h	0.582 4	月用电 280 kW·h 以上	0.822 4
月用电 151 kW·h 以上	0.632 4		

2 档、3 档、4 档、5 档和 6 档,甚至更多。总体而言,划分的档次越多,操作越复杂。四川原阶梯电价将阶梯电量档次分为 4 档,新阶梯电价将其减少为 3 档。从概念和具体操作上来看,分 3 档概念明确,便于具体操作。另外,四川原 60 kW·h 的第 1 档标准在执行 6 年后,显得有些过时,新阶梯电价较原阶梯电价电量标准有了较大程度提高,第 1 档由原来的 60 kW·h 提高至 180 kW·h,档次间电量差也由原来的 40 ~ 50 kW·h 提高至 100 kW·h。

2.2 各档电价标准

实行居民阶梯电价需要保障大多数居民用电价格基本稳定。对于“一户一表”用户,新阶梯电价第 1 档电价水平维持在原阶梯电价合表用电户的电价水平,从分档上来看,新阶梯电价第 1 档涵盖了原阶梯电价的第 1 档和第 2 档,基本保持了电价水平不变。第 2、3 档由于电量标准较大程度提高,电价水平也有一定增加,但单位电量提价标准仍维持在 0.001 ~ 0.003 元/kW·h 左右,保持不变。对于合表用户,电价标准在现行电价基础上按国家规定顺加 2.4 分,按 0.546 4 元/kW·h 执行。

2.3 相关优惠政策

一是低谷电价政策,四川对居民生活用电实行了低谷用电的优惠政策,在 6 至 10 月丰水期的低谷电价为 0.151 元/kW·h,11 月至次年 5 月的枯、平水期低谷电价为 0.229 5 元/kW·h。在新阶梯电价中,继续保留低谷时段优惠电价,按照国家规定每度电在现行合表用户电价基础上顺加 2.4 分执行。

二是对于城乡“低保户”和农村“五保户”家庭设置了每月 15 kW·h 免费用电基数,这在原阶梯电价政策中是没有的。为便于实际操作和电费结算,四川电网直供区城乡“低保户”和农村“五保户”家庭实施“先征后返”方式,每半年清退一次,免费金

额统一为每月每户 7.84 元。

3 阶梯电价效果分析

从阶梯电价计算方法来看,可以列出四川原阶梯电价计算公式和新阶梯电价计算公式分别如式(1)和式(2)所示。

$$\begin{cases} Q_{GP} \times 0.4724 + Q_D \times p_{d1} & Q \leq 60 \\ Q_{GP} \times 0.4724 + Q_D \times p_{d1} + \\ (Q - 60) \times 0.08 & 60 < Q \leq 100 \\ Q_{GP} \times 0.4724 + Q_D \times p_{d1} + 40 \times 0.08 + \\ (Q - 100) \times 0.11 & 100 < Q \leq 150 \\ Q_{GP} = 0.4724 + Q_D \times p_{d1} + 40 \times 0.08 + \\ 50 \times 0.11 + (Q - 150) \times 0.16 & Q > 150 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} Q_{GP} \times 0.5224 + Q_D \times p_{d2} & \leq 180 \\ Q_{GP} \times 0.5224 + Q_D \times p_{d2} + \\ (Q - 180) \times 0.1 & 180 < Q \leq 280 \\ Q_{GP} \times 0.5224 + Q_D \times p_{d2} + 100 \times 0.1 + \\ (Q - 280) \times 0.3 & Q > 280 \end{cases} \quad (2)$$

其中, Q 、 Q_{GP} 、 Q_D 分别为居民当月用电量、高峰平段用电量和低谷用电量,满足式(3)。

$$Q = Q_{GP} + Q_D \quad (3)$$

其中, p_{d1} 、 p_{d2} 分别为原、新居民阶梯电价中低谷电价标准,满足式(4)、(5)。

$$\begin{cases} p_{d1} = 0.151 & 6 \text{ 月至 } 10 \text{ 月丰期} \\ p_{d1} = 0.2295 & 11 \text{ 月至次年 } 5 \text{ 月枯平期} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} p_{d2} = 0.175 & 6 \text{ 月至 } 10 \text{ 月丰期} \\ p_{d2} = 0.2535 & 11 \text{ 月至次年 } 5 \text{ 月枯平期} \end{cases} \quad (5)$$

设某月中用户低谷用电量 Q_D 占当月总用电量比例为 k ,则有

$$\begin{cases} Q_D = Q \times k \\ Q_D = Q \times (1 - k) \end{cases} \quad (6)$$

分别将式(4)、(5)、(6)代入式(1)、(2),可得
到原、新阶梯电价计算公式如下式所示。

原阶梯电价丰期为

$$\begin{cases} Q \times 0.4724 - Q \times k \times 0.3214 & Q \leq 60 \\ Q \times 0.5524 - Q \times k \times 0.3214 - 4.8 & 60 < Q \leq 100 \\ Q \times 0.5824 - Q \times k \times 0.3214 - 7.8 & 100 < Q \leq 150 \\ Q \times 0.6324 - Q \times k \times 0.3214 - 15.3 & Q > 150 \end{cases} \quad (7)$$

原阶梯电价枯平期为

$$\begin{cases} Q \times 0.4724 - Q \times k \times 0.2429 & Q \leq 60 \\ Q \times 0.5524 - Q \times k \times 0.2429 - 4.8 & 60 < Q \leq 100 \\ Q \times 0.5824 - Q \times k \times 0.2429 - 7.8 & 100 < Q \leq 150 \\ Q \times 0.6324 - Q \times k \times 0.2429 - 15.3 & Q > 150 \end{cases} \quad (8)$$

新阶梯电价丰期为

$$\begin{cases} Q \times 0.5224 - Q \times k \times 0.3437 & Q \leq 180 \\ Q \times 0.6224 - Q \times k \times 0.3437 - 18 & 180 < Q \leq 280 \\ Q \times 0.8224 - Q \times k \times 0.3437 - 44 & Q > 280 \end{cases} \quad (9)$$

新阶梯电价枯平期为

$$\begin{cases} Q \times 0.5224 - Q \times k \times 0.2689 & Q \leq 180 \\ Q \times 0.6224 - Q \times k \times 0.2689 - 18 & 180 < Q \leq 280 \\ Q \times 0.8224 - Q \times k \times 0.2689 - 44 & Q > 280 \end{cases} \quad (10)$$

由式(7)、(8)、(9)、(10)可以看出: 1) 居民生活月电费支出一般由3项组成,第1项为按照所在档次电价标准计算的最高电费,第2项为由于低谷电价优惠所节省的电费,第3项为所在档次前1档或2档按其电价标准计算所应减少电费的补偿值。2) 居民生活月电费支出与2个参数有关,月用电量 Q 和低谷时段电量所占比重 k ,电费支出分别随着 Q 和 k 的增加而分别增加和减少。

设 k 分别等于10%、20%、30%,则用户月电费支出成为变量为 Q 的一个分段函数,以丰期为例,原、新阶梯电价对比示意图分别如图1所示。

由图中可以看出:

(1) 较四川原阶梯电价相比,在月用电量280 kW·h以下时,两种阶梯电价制度计算得到的电费支出基本持平,若月用电量高于280 kW·h,则新阶梯电价下电费支出会有一个较为明显的增长。

定量分析,可以看出两条计算曲线有2个交点,

将其定义为 Q_1 和 Q_2 ,其中 $Q_2 = 280 \text{ kW} \cdot \text{h}$,丰期 Q_1

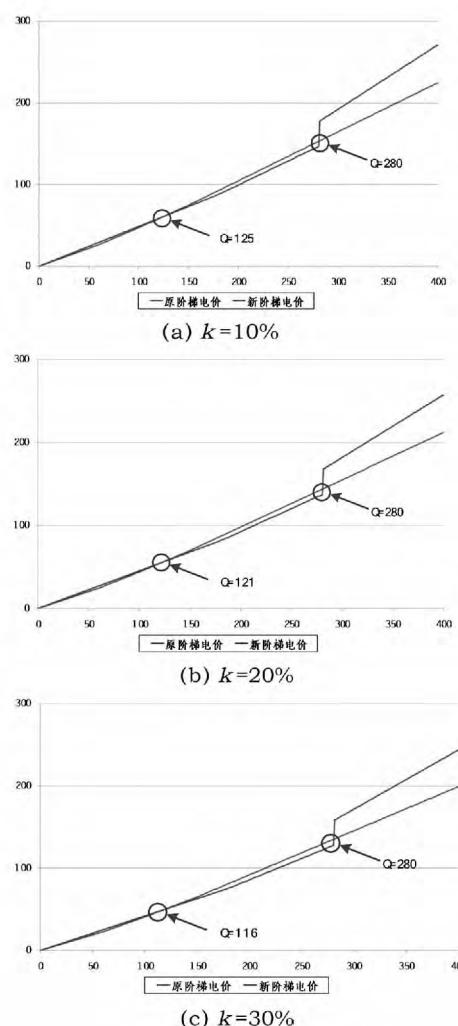


图1 原、新阶梯电价对比分析
的计算公式近似为

$$Q_1 = \frac{78}{0.6 + 0.223k} \quad (11)$$

在 k 等于10%、20%、30%时, Q_1 分别约为125、121和116 kW·h。

由图中可以看出,在两个交点将阶梯电价曲线分为了3段(与分档并不完全重合),在 $0 \sim Q_1$ 之间,用户月电费支出有所增长;在 $Q_1 \sim Q_2$ 之间,用户月电费支出有所减少;在 Q_3 以上(即为新阶梯电价第3档),用户月电费支出明显增长。

为定量掌握增量的情况,在丰期情况下,将式(7)和式(9)相减,得到新阶梯电价月电费支出虽用电量变化的函数,分为6段,如式(12)所示。

在6个分段中,在 $Q < 60 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 和 $Q > 280 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 两区间电费支出较原来电价的增量随着 Q 的增加

而增

$$\begin{cases} Q \times 0.05 - Q \times k \times 0.02 & Q \leq 60 \\ Q \times (-0.03) - Q \times k \times 0.02 - 4.8 & 60 < Q \leq 100 \\ Q \times (-0.06) - Q \times k \times 0.02 - 7.8 & 100 < Q \leq 150 \\ Q \times (-0.11) - Q \times k \times 0.02 + 15.3 & 150 < Q \leq 180 \\ Q \times (-0.01) - Q \times k \times 0.02 + 15.3 & 180 < Q \leq 280 \\ Q \times 0.19 - Q \times k \times 0.02 + 15.3 & Q > 280 \end{cases} \quad (12)$$

长,在 60 ~ 280 kW·h 区间内,增加量随着用电量的增加呈递减的趋势。

在 $k=20\%$ 、丰期时,新阶梯电价月电费支出较原阶梯电价的增量函数曲线如图 2 所示。

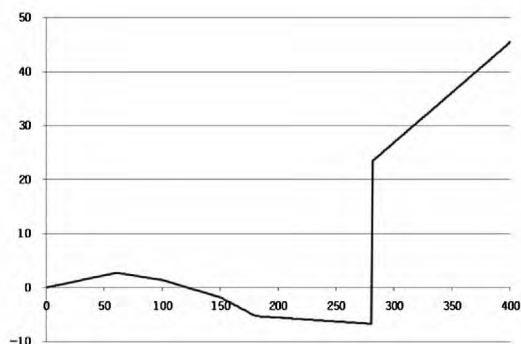


图 2 $k=20\%$ 时新阶梯电价月电费支出较原阶梯电价的增量

总体而言,新的阶梯电价实施后,对绝大多数用户家庭而言,电费支出影响不大,特别对在月用电量在 120 ~ 280 kW·h 区间的用户,电费支出与原来相比还有一定减少;而若月用电量超过新阶梯电价的第 3 档标准,则电费支出出现明显上涨,且随着用电量的增加,电费支出还呈现放大增加趋势。此外,由于对城乡低保户、农村五保户设置每月 15 kW·h 免费电量,每年每户还可减少电费支出 94.1 元。

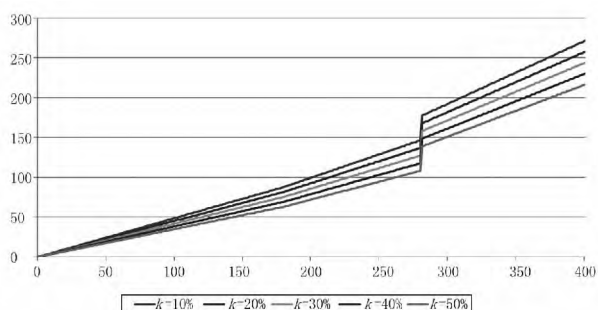


图 3 k 变化时新阶梯电价月电费支出曲线

(2) 可充分利用低谷电价政策节省电费。对于“一户一表”居民用户,每天 23 时至次日 7 时为低谷时段,6 月到 10 月丰水期为 0.175 元/kW·h,11 月到次年 5 月为 0.253 5 元/kW·h。四川的低谷电价,在全国都是最低的,如果想节约电费,可以利用优惠政

策,多在夜间用电。如图 3 所示,为 $k=10\% \sim 50\%$ 变化时新阶梯电价月电费支出曲线,图可以看出随着 k 的不断增大,月电费支出呈不断减少的趋势。

定量分析,如式(13)为月用电量固定时, k 变化时所对应的电费减少量。若月用电量为 200 kW·h,在丰期 k 增加 10% 可减少电费支出约 6.87 元。

$$\begin{cases} Q \times \Delta k \times 0.3437 & 6 \text{ 月至 } 10 \text{ 月丰期} \\ Q \times \Delta k \times 0.2689 & 11 \text{ 月至次年 } 5 \text{ 月枯平期} \end{cases} \quad (13)$$

4 阶梯电价的主要评价原则

阶梯电价的实行既需要适应促进节能减排、环境保护的形势要求,又兼顾群众日常生活的基本需求,其目的主要可归结为“效率”和“公平”两个方面,如何在促进节能减排、环境保护的同时,兼顾群众日常生活的基本需求,在理顺价格关系、提高经济效率的同时,促进社会公平正义,真正让广大城乡居民分享改革发展成果,是价格改革评价的主要原则。结合实施对象,可将其具体分为“机制合理、公平负担、促进发展、降低能耗”4 个方面。

4.1 机制合理

机制合理就是建立一种可以长期坚持、不断适应经济社会发展情况的价格制度。在目前中国的电价水平和电价机制下,机制合理既要“保基本”,又要“显差别”,就是区分居民用电需求中的基本和非基本部分,对居民基本用电需求优先保障,实行稳定的电价政策,并在一定时期内保持价格相对稳定;对非基本用电需求发挥市场调节作用,应实行较高价格,体现“多用电者多付费”的核心理念,以充分反映市场供求情况和资源稀缺程度。

4.2 公平负担

公平负担就是要尽力减少各类用户间的交叉补贴,改善电价结构,促进其逐步趋于合理。一般而言,电压等级越高的用户,供电成本越低;电压等级越低的用户,供电成本越高。居民用电位于电网供电最终端,电压等级最低,因而其供电成本是最高的。国外居民电价一般是工业电价的 1.5 ~ 2 倍,而中国居民用电价格低于工业电价、居民电价低于供电成本,造成用电越多的居民用户,享受的补贴越多,用电量越少的居民用户,享受的补贴越少。公平负担除了通过对非基本用电需求实行较高电价,以

促使用电量多的居民用户多负担电费外,还需不区分农村、城市划分电量需求分档,对困难群体给予一定免费用电量等方式,实现“富人补贴穷人,城市补贴农村”,抑制过度消费,特别是保障困难群众基本生活的目的,体现公平正义的原则。

4.3 促进发展

促进发展是指促进电力企业的良性循环能力,加快供电侧的技术革新,保障电力行业健康发展。

由于近年来实行煤电联动政策调整销售电价时,居民电价未作调整,实施居民阶梯电价需要考虑弥补购电成本的增支;此外阶梯电价实行后,居民生活用电量增长有可能放缓;电力企业将面临数量众多的用户计量装置改造、电费核算软件升级等一系列工作,相关政策规定开展此类工作不得向用户收费。因而,阶梯电价的评价需兼顾到电力企业的成本,避免电力企业因成本上升而陷入发展困境。

表2 阶梯电价的主要评价原则及指标

评价原则	评价指标
机制合理	第1档用户覆盖率
	3档用户平均月电量比
	3档用户单位电价比
公平负担	城乡用户3档单位电价比
	典型(高中低收入)用户3档用电量比
	典型(高中低收入)用户3档单位电价量比
促进发展	免费用电补贴支出
	用户用电满意度
	电费收益增长率
降低能耗	软硬件改造升级费用
	电力发展隐形影响程度
	居民用电量增长率
降低能耗	电力能耗弹性系数
	居民生活用电习惯变化
	其他能源替代率

4.4 降低能耗

降低能耗是指充分发挥价格杠杆的作用,促进合理、节约用电,建设能源浪费,提高能源利用效率。随着经济的快速发展,能源紧缺以及由能源大量消耗引发的环境问题,对中国经济社会可持续发展的

制约日益增强。抑制不合理需求、促进节能减排和环境保护,发挥价格杠杆调节作用势在必行。在社会主义市场经济条件下,促进发展方式转变和节能减排主要还是要靠经济手段,而价格机制是最重要的经济杠杆。实施阶梯电价,应对抑制不合理的电力需求、促进经济结构调整发挥积极作用。

对应于以上4个方面的评价原则,定量或定性地设置一些评价指标体系,如表2所示。

5 结 语

基于目前四川现行销售电价政策分析,将2012年7月新阶梯电价政策与原电价政策进行对比分析,利用数学方法分析新阶梯电价的计算方法及其与原阶梯电价的对比函数,并对相关因子进行敏感性分析,得到了阶梯电价的调整变化曲线。分析阶梯电价的实质和实施动因,根据其目的制定了阶梯电价评价原则,建立了阶梯电价评价指标体系,对阶梯电价实施效果的研究具有一定的参考意义。

参考文献

- [1] 张健,柳伟,庞猛.四川电价水平报告[R].研究与参考,2011.
- [2] 国家发改委.印发关于居民生活用电实行阶梯电价的指导意见的通知[R].2011.
- [3] 国家发改委.关于加快推行电价改革的若干意见(征求意见稿)[R].2009.
- [4] 四川发改委.关于调整四川电网居民生活用电阶梯电价的通知[R].2012.
- [5] 朱成章.关于我国实行阶梯电价的建议和设想[J].中外能源,2012,15(5):13-17.
- [6] 陶庆先.阶梯电价的效果评价与实施策略研究[J].市场经济与价格,2012,(5):9-11.
- [7] 郑厚清,金毅,尤培培.居民阶梯电价的评价与展望[J].能源技术经济,2012,24(1):6-9.

(收稿日期:2013-09-28)

(上接第49页)

- [1] 郭万祝,赵远.负荷管理系统功能拓展经验浅谈[J].电力需求侧管理,2008,10(2):26-29.
- [2] 龚敏.电力信息综合管理终端技术讨论[J].电力需求侧管理,2009,11(4):69-71.
- [3] 张捷.淮北电网基于EPON的用电信息采集系统设计

[J].北京:华北电力大学,2012.

作者简介:

李赋欣(1982),男,硕士,工程师,长期从事电力营销管理、用电信息采集研究等工作。

(收稿日期:2013-09-10)

一种定值在线校核顺序的优化方法

张 琼¹, 陈召阳²

(1. 国网凉山供电公司, 四川 西昌 615000; 2. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要: 电力系统运行方式变化时, 保护定值可能不适应当前的运行方式, 需要校核部分保护的定值。然而大规模复杂电网中, 需要校核的保护非常多, 校核工作很难在短时间内完成, 导致电网存在校核风险。如果能够辨识出那些误动后对系统影响较大的保护予以优先校核和修改定值, 显然能够显著降低电网的校核风险。基于此, 在充分考虑保护误动对系统结构和状态造成的影响, 提出保护的重要度指标, 以保护重要度排序结果决定校核顺序。通过 IEEE 14 节点系统的仿真分析, 验证了该方法的可行性和有效性。

关键词: 在线校核; 改进加权介数; 状态脆弱度; 综合脆弱度; 保护重要度

Abstract: When the operating modes of power grid has changed, the protection setting may not be suitable for the present operating mode, therefore, it needs checking some of the protection setting. However, there are many protections needing to be checked in the large and complex power grid, the checking is difficult to be completed in a short time, which results in checking risk for power grid. Therefore, if those protections which have great influence on power system can be identified after the malfunction so as to be checked and adjusted preferentially, it will reduce the checking risk of power system obviously. On this basis, the influence of protection malfunction on the structure and state is taken into account, and the formula of protection importance is put forward in order to decide the checking sequence according to the ranking results of protection importance. At last, the simulation analysis of IEEE 14 bus system proves the feasibility and availability of the proposed method.

Key words: online checking; improved weighted betweenness; state vulnerability; comprehensive vulnerability; protection importance

中图分类号: TM771 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)06-0061-05

0 引 言

科学技术的不断进步, 带动了电力工业的快速发展, 电网的电压等级和网络结构的复杂程度逐渐提高, 对电网的安全稳定运行提出了严峻的考验^[1-4]。继电保护的定值大都是离线整定的, 而高压复杂电网的运行方式复杂多变, 使继电保护的定值难以适应当前的运行方式。保护可能出现扰动情况下的误动或者故障情况下的拒动, 而这往往是引起大规模停电的罪魁祸首, 给国民经济带来巨大的损失。因此, 在运行方式变化时需对部分保护定值进行校核, 并对不满足校核要求的保护定值进行及时的调整。文献[5-6]从保护定值校核的原理出发, 给出了保护定值校核的具体公式; 文献[7-9]从结构角度出发, 设计了具体的定值校核系统。

然而, 大规模复杂电网保护数量巨大, 需要校核

的保护较多, 用户不可能在短时间内校核完所有的保护, 导致电网存在校核风险。由于各保护误动对系统造成的影响程度是不一样的, 如果能够找到那些误动后对系统影响较大的保护优先予以校核, 并对不满足校核要求的保护优先修改定值, 显然能够显著降低电网的校核风险, 因而需要一种合理有效的校核顺序优化方法。基于此, 充分考虑保护误动对系统结构和状态造成的影响, 定义保护的重要度指标, 以保护重要度排序结果决定校核顺序, 达到优化校核顺序的目的。

1 校核范围的评估

校核范围的评估是校核顺序优化的基础, 可避免非校核保护对保护校核顺序的影响, 所谓非校核保护指运行方式变化后无需校核的保护, 这类保护的定值仍然适应当前的运行方式。电网运行方式发

生变化时,不是所有保护的定值都不适合当前的运行方式。文献[10]表明,电力系统运行方式变化对系统的影响范围局限于一定的区域,保护定值校核范围也理所当然的局限于这一区域。

在线校核过程中最重要的环节就是计算短路电流。若短路电流变化较小,则运行方式变化对定值性能影响较小,该保护定值可予以不校核;若短路电流变化较大,则保护定值受系统运行方式变化影响大,该保护应该纳入校核范围。由于不同保护的定值大小不同,为了方便衡量运行方式变化对不同保护定值影响程度,这里用短路电流变化比来表征定值受影响的大小。将短路电流变化比大于一定阈值的保护纳入校核范围。即

$$R = \{R_i | |(I_1(R_i) - I_0(R_i)) / I_0(R_i)| > \varepsilon\} \quad (1)$$

式中, R 为一集合,是保护的校核范围,即需要校核的保护; $i=1,2,3,\dots,n$, $I_1(R_i)$ 为运行方式变化后保护 R_i 的故障点短路电流; $I_0(R_i)$ 为运行方式变化前保护 R_i 的故障点短路电流; ε 为短路电流变化比的阈值,一般取0.01~0.05,视具体情况而定。

2 校核顺序的优化

2.1 结构脆弱度指标

文献[11-12]从介数角度分析元件的结构脆弱性,并得出电力系统在针对高介数元件攻击下会变得很脆弱的结论。所谓介数,又称为节点或支路的负荷,是指某一节点或支路被电源负荷节点对间最短电气路径经过的次数。然而线路或节点在被不同的电源负荷节点对间的最短电气路径经过时,其体现出的功率传输效率是有差异的,同时,潮流并非只是沿着最短电气路径传播,而是沿着所有可能的路径传播。考虑到这些缺陷,基于直流潮流模型中的功率传输分布因子(PTDF)对已有介数进行改进,使其更加符合电力系统的实际情况。

2.1.1 PTDF 定义

在电网络中,电源负荷节点对间存在功率交换,若功率交换量发生变化,则将引起系统中功率的重新分配。PTDF定义了电源负荷节点对间的功率交换量变化时引起支路功率的变化情况[13]。

直流潮流模型中,电源负荷节点对 (s,t) 进行功率交换时,设在电源节点 s 注入功率 ΔP_{st} ,在负荷节点 t 汲取功率 ΔP_{st} ,则在支路 ij 上引起的功率变化

量为

$$\Delta P_{st}(ij) = (F_s(ij) - F_t(ij)) \Delta P_{st} \quad (2)$$

式中, $F_s(ij)$ 为在电源节点 s 注入单位功率并在参考节点汲取单位功率时支路 ij 上分布的功率; $F_t(ij)$ 为在负荷节点 t 注入单位功率并在参考节点汲取单位功率时支路 ij 上分布的功率; $\Delta P_{st}(ij)$ 为电源负荷节点对 (s,t) 之间的功率交易量在支路 ij 上引起的功率。进而可以推出如下公式。

$$\Delta P_{st}(ij) = \frac{X_{is} - X_{it} - X_{js} + X_{jt}}{x_{ij}} \Delta P_{st} = G_{st}(ij) \Delta P_{st} \quad (3)$$

式中, X_{is} 为节点电抗矩阵中第 i 行 s 列元素; X_{it} 、 X_{js} 、 X_{jt} 类同; x_{ij} 为支路 ij 的电抗值; $G_{st}(ij)$ 为电源负荷节点对 (s,t) 之间单位功率交换在支路 ij 上引起的功率传输量,即PTDF。

2.1.2 改进加权介数

根据PTDF,定义线路的改进加权介数为

$$B(ij) = \sum_{s \in G, t \in L} |G_{st}(ij)| \quad (4)$$

式中, G 为电源节点的集合; L 为负荷节点的集合; $B(ij)$ 为线路 ij 的改进加权介数,其意义为线路对电源负荷节点对功率交换的总效率。 $B(ij)$ 越大,线路功率传输的效率就越高,在电源负荷节点对之间的功率交换过程中就越重要。由于 $B(ij)$ 只与网络参数有关,因而在一定程度上可反应线路的结构脆弱性。

同理,定义节点的改进加权介数为

$$B(i) = \sum_{s \in G, t \in L} G_{st}(i) \quad (5)$$

其中, $B(i)$ 为节点的改进加权介数,其意义为节点 i 对电源负荷节点对功率交换的总效率; $G_{st}(i)$ 为单一电源负荷节点对 (s,t) 单位功率交换时节点 i 上流过的功率, $G_{st}(i)$ 的表达式如式(6)。

$$G_{st}(i) = \begin{cases} \frac{1}{2} \sum_j |G_{st}(ij)| & , i \neq s, t \\ 1 & , i = s, t \end{cases} \quad (6)$$

式中, j 为节点 i 的相邻节点。

2.2 状态脆弱度指标

元件状态(指节点或者线路的运行状态)脆弱性是指系统在遭受故障或扰动后,元件状态变量发生变化(如电压下降或呈现下降趋势),并可能向临界值(电压崩溃点)逼近的特性。该特性反映的是从稳定状态向临界失稳状态的过渡过程,是对系统当前状态安全水平及变化趋势的反映。常用如下的数学表达式。

$$\lambda = \frac{|\beta(t) - \beta_{\text{临界}}|}{|\beta_0 - \beta_{\text{临界}}|} \quad (7)$$

式中, $\beta(t)$ 为状态变量的当前值; β_0 为状态变量的初始值; $\beta_{\text{临界}}$ 为状态变量的临界值; λ 为相对脆弱度, 能反映不同电压等级状态变量的脆弱程度。

由式(7)可知, 节点的状态脆弱度表达式为

$$\lambda(i) = \frac{|u_i(t) - u_{i\text{临界}}|}{|u_{i0} - u_{i\text{临界}}|} \quad (8)$$

式中, $u_i(t)$ 为节点电压的瞬时值; $u_{i\text{临界}}$ 为节点电压的临界值; u_{i0} 为节点电压的初始值; $\lambda(i)$ 反映了节点电压的安全水平, $\lambda(i)$ 越小, 则节点发生电压崩溃的可能性就越大。

线路的状态脆弱度表达式可用式(9)表示。

$$\lambda(i, j) = \frac{P_{ij}(t)}{P_{ij\text{max}}} \quad (9)$$

式中, $P_{ij}(t)$ 为线路有功功率的瞬时值; $P_{ij\text{max}}$ 为线路有功功率的最大允许值; $\lambda(i, j)$ 为线路的负载率, $\lambda(i, j)$ 越大, 线路被切除的可能性越大。

2.3 保护重要度

衡量元件的脆弱度不能单一地只考虑元件的结构或者状态脆弱度, 应该综合考虑两方面的因素, 为了克服权重选择的困难性, 定义节点的综合脆弱度为

$$C(i) = \frac{B(i)}{\lambda(i)} \quad (10)$$

式中, $C(i)$ 为节点的综合脆弱度, 其意义为: 对于节点状态脆弱度相同的两个节点, 介数较大的节点由于在网络中更加活跃, 可以承担的功率传输任务较重, 因而该节点电压崩溃对系统的影响程度越深, 影响范围越广。

同理, 定义线路的综合脆弱度为

$$C(i, j) = B(i, j) \lambda(i, j) \quad (11)$$

式中, $C(i, j)$ 为线路的综合脆弱度, 其意义为: 对于负载率相同的线路, 介数较大的线路由于在网络中更加活跃, 可以承担的功率传输任务较重, 因而该线路被切除对系统的影响程度越深, 影响范围越广。

由于 $C(i)$ 、 $C(i, j)$ 均考虑了元件退出运行的可能性和失效后果, 因而一定程度上可将 $C(i)$ 、 $C(i, j)$ 理解为元件的运行风险, 因而其意义比较明确。同时, 为了满足在线校核的要求, 节点和线路的改进加权介数采用运行方式变化前的介数值, 而状态值取决于当前运行方式。

显然, 保护所属线路的综合脆弱度可以用来表

示保护的重要度, 考虑同一线路两端保护所属节点的差异性, 定义保护重要度为

$$I(n) = \omega_v C(i) + \omega_l C(i, j) \quad (12)$$

式中, $I(n)$ 为保护 n 的重要度; ω_v 、 ω_l 分别为节点和线路综合脆弱度的权重系数, 考虑保护的主要任务是保护线路, 因而在评估过程中 ω_l 应该大于 ω_v , 取值视具体情况而定, 但两者之和应该为 1。

保护重要度 $I(n)$ 综合考虑了保护所属节点和线路的结构与状态脆弱度, 考察对象比较全面, $I(n)$ 越大, 保护越重要, 误动以后对系统的综合影响就越大。对校核范围内的保护进行重要度评估并按从高到低排序, 以排序结果决定校核顺序, 在一定程度上可以优化校核顺序, 降低校核过程中电网的运行风险, 避免计算机随机顺序校核的盲目性。

3 算例分析

以 IEEE 14(如图1所示)节点系统为例, 对所提出的方法进行仿真分析, 该系统共有 20 条线路, 线路均装设方向电流保护, 共 40 个保护。

(1) 首先进行校核范围的评估, 为了便于验证, 以电流 I 段校核为例, 电流变化比阈值取 0.05, 选择开断线路(B_4 , B_9) 模拟运行方式的变化, 评估结果见表 1。

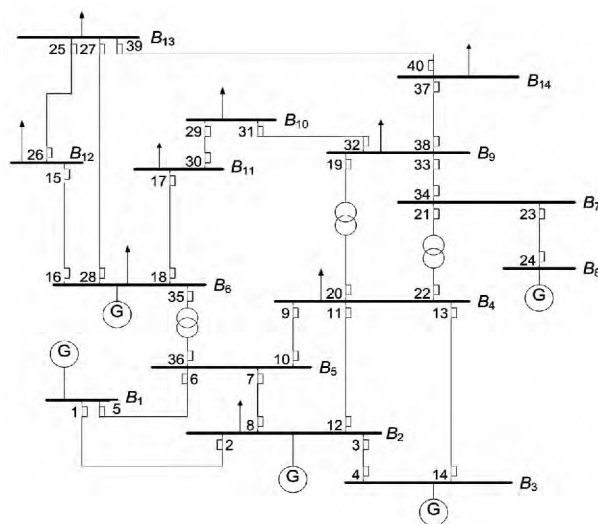


图1 IEEE 14节点系统

(2) 由式(5)、(6)、(8)求出表1中保护所属节点的结构与状态脆弱度, 并按式(10)计算出综合脆弱度指标, 评估结果如表2所示。节点的电压临界值为鞍结分岔值。

表 1 校核范围的评估结果

保护 编号	短路电流 变化比	保护 编号	短路电流 变化比
15	0.086 2	29	0.082 3
17	0.085 9	33	0.213 7
21	0.143 9	34	0.062 9
22	0.061 8	38	0.070 8
27	0.085 8	40	0.056 6

表 2 节点脆弱度评估结果

节点 编号	所属保 护编号	结构脆 弱度	状态脆 弱度	综合脆 弱度
B_{12}	15	11.511 6	0.887 9	12.964 9
B_{11}	17	14.958 8	0.890 6	16.796 3
B_7	21、34	15.062 6	0.883 5	17.048 8
B_4	22	34.705 2	0.826 4	41.995 6
B_{13}	27	19.114 4	0.906 6	21.083 6
B_{10}	29	16.028 9	0.866 7	18.494 2
B_9	33、38	27.591 7	0.883 2	31.240 6
B_{14}	40	14.041 6	0.828 9	16.940 1

由表 2 可以看出,节点 B_4 、 B_{14} 的状态脆弱度几乎相同,但节点 B_4 的结构脆弱度较大,在网络中更加活跃,其断开将直接导致两台变压器停止工作,因而节点 B_4 的脆弱度更大,可见考虑结构与状态的综合脆弱度评估指标更加符合实际情况。

(3) 由式(4)、(9) 求出表 1 保护所属线路的结构与状态脆弱度,并按式(11) 计算出综合脆弱度指标,评估结果如表 3 所示,线路有功功率阈值统一取 100 MW。

表 3 线路脆弱度评估结果

线路 编号	所属保 护编号	结构脆 弱度	状态脆 弱度	综合脆 弱度
(B_6, B_{12})	15	5.640 4	0.084 6	0.477 2
(B_6, B_{11})	17	10.115 7	0.124 6	1.260 4
(B_4, B_7)	21、22	16.785 8	0.359 4	6.032 8
(B_{12}, B_{13})	27	4.275 6	0.022 8	0.097 5
(B_{10}, B_{11})	29	9.353 8	0.088 2	0.825 1
(B_7, B_9)	33、34	17.550 7	0.359 4	6.307 7
(B_9, B_{14})	38	7.812 9	0.061 9	0.483 6
(B_{13}, B_{14})	40	7.116 1	0.088 9	0.632 6

由表 3 可以看出: 线路 (B_{10}, B_{11}) 与线路 (B_{13}, B_{14}) 的状态脆弱度几乎相同,但由于线路 (B_{10}, B_{11})

在网络中更加活跃,因而该线路更加脆弱; 同理,线路 (B_9, B_{14}) 的结构脆弱度比线路 (B_{13}, B_{14}) 大,但状态脆弱度比线路 (B_{13}, B_{14}) 小,为了比较两者的脆弱度,显然综合脆弱度更加合适。

(4) 由表 2、表 3 保护所属线路与节点的综合脆弱度评估结果按式(12) 计算各保护的重要度,并由高到低顺序排列,评估结果如表 4 所示, ω_v 取 0.1, ω_l 取 0.9。

表 4 保护重要度

保护	保护重要度	保护	保护重要度
22	9.629 1	17	2.813 9
33	8.557 9	29	2.592 0
34	7.138 8	40	2.263 6
21	7.134 4	27	2.196 1
38	3.559 3	15	1.725 9

由表 4 可以看出,排名靠前的保护在网络中均处于重要的功率传输通道上,如 21、22 为变压器支路保护,33、34 为线路 (B_7, B_9) 的保护,而 (B_7, B_9) 为发电机 8 与变压器支路的重要出线,与实际情况基本相符。保护重要度不仅与所属线路脆弱度有关,还与所属节点的脆弱度密切联系,由于考虑了系统元件的运行状态,因而可用于实时评估。依据保护重要度对校核顺序进行优化,可降低校核过程中的运行风险,避免计算机随机顺序校核的盲目性。同时,也可以依据保护重要度排序结果对不满足校核要求的保护进行定制修改,为调度部门工作人员制定合理的定值维护策略提供依据。

4 结 论

为了使继电保护校核顺序更加合理科学,减小校核过程中的运行风险。所以对校核范围内的保护进行重要度评估并排序,以排序结果决定校核顺序,在一定程度上可降低电力系统的运行风险。因而所提的校核方案对在线校核具有一定的指导意义。

参考文献

- [1] 孟绍良,吴军基,王虎. 电网脆弱性评价的灵敏度分析法 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(5): 89 - 93.
- [2] 曹一家,刘美君,丁理杰,等. 大电网安全性评估的系统复杂性理论研究 [J]. 电力系统及其自动化学报,

2007, 19(1): 1-8.

- [6] 张保会. 加强继电保护与紧急控制系统的研究提高互联电网安全防御能力 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 1-6.
- [7] 张晓辉, 李颖, 卢志刚. 风险思想下的输电线路脆弱性综合分析 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(2): 35-40.
- [8] 黄超, 李银红, 等. 基于整定逆过程的保护定值在线校核 [J]. 电力系统及其自动化, 2011, 35(12): 59-64.
- [9] 曾耿晖, 李银红, 段献忠. 电力系统继电保护定值的在线校核 [J]. 继电器, 2002, 30(1): 22-24.
- [10] 吕颖, 张伯明. 基于集群计算机的保护定值在线校核 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(14): 12-16.
- [11] 谢俊, 石东源, 杨增力, 等. 基于多代理系统的继电保护定值在线校核预警系统 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(13): 77-82.
- [12] 朱永利, 宋少群, 朱国强, 等. 地区电网保护定值在线校验

智能系统 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(6): 87-92.

- [13] 曹国臣, 蔡伟国, 王海军. 继电保护整定计算方法存在的问题与解决对策 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 5-56.
- [14] 刘耀年, 术茜, 康科飞, 等. 基于电抗加权介数指标的电网脆弱线路识别 [J]. 电力系统保护与控制, 2001, 39(23): 89-92.
- [15] 曹一家, 陈晓刚, 孙可. 基于复杂网络理论的大型电力系统脆弱线路辨识 [J]. 电力自动化设备, 2006, 26(12): 1-5.
- [16] 华科, 谢开, 郭志忠. 采用直流和交流功率传输分布因子的输电权交易 [J]. 电网技术, 2007, 31(13): 71-74.

作者简介:

张琼(1981), 女, 助理工程师, 研究方向为电力系统继电保护;

陈召阳(1987), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护。

(收稿日期: 2013-06-19)

(上接第12页)

4 结 论

提出了以传统反传播神经网络作为建模基础, 建立光伏系统出力初步预测模型, 再利用历史出力波动量统计规律对其初步预测结果进行修正建立预测模型, 对未来短期内相应时刻的光伏系统出力进行预测。算例结果说明, 该预测模型显著提高了预测精度, 较好地模拟了现场光伏系统的实际情况, 为从预测太阳辐照强度、温度到预测功率提供了一种良好的方法。对于研究大规模光伏系统出力预测具有一定的应用价值。

参考文献

- [1] 李乃永, 梁军, 赵义术. 并网光伏电站的动态建模与稳定性研究 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(10): 12-18.
- [2] 李晶, 许洪华, 赵海翔, 等. 并网光伏电站动态建模及仿真分析 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(24): 83-87.
- [3] 郭立, 晁勤, 袁铁江, 等. 基于工程模型的光伏建模与输出特性仿真 [J]. 四川电力技术, 2011, 34(5): 89-91.
- [4] 张艳霞, 赵杰, 邓中原. 太阳能光伏发电并网系统的建模和仿真 [J]. 高电压技术, 2010, 36(12): 3097-3012.
- [5] 戴武昌, 孔令国, 崔柱. 大规模光伏并网发电系统建模与运行分析 [J]. 中国电力, 2012, 45(2): 58-63.
- [6] 茆美琴, 苏建微, 张国荣, 等. 大型光伏并网系统的建

模与仿真 [J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2005, 28(9): 1069-1072.

- [7] Tamotsu Ninomiya, Akira Takeuchi. Analysis of Beat Phenomenon and Chaotic Oscillation in Resonant Switching Converters [J]. Industrial Electronics, Control and Instrumentation, 1991(1): 417-422.
- [8] Nagy I., Denes I., Hamar J., et al. Small-signal Analysis of a Dual Channel Resonant Buck and Boost Converter [J]. Industrial Electronics, 2002, ISIE 2002, Proceedings of the 2002 IEEE International Symposium on, 2002, (4): 1279-1284.
- [9] 李伟, 朱新坚, 曹广益. 基于一种改进的BP神经网络光伏电池建模 [J]. 计算机仿真, 2006, 23(7): 228-290.
- [10] 郭亮, 陈维荣, 贾俊波, 等. 基于粒子群算法的BP神经网络光伏电池建模 [J]. 电工电能新技术, 2011, 30(2): 84-87.
- [11] 张艳霞, 赵杰. 基于反馈型神经网络的光伏系统发电功率预测 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(15): 96-101.
- [12] 栗然, 李广敏. 基于支持向量机回归的光伏发电出力预测 [J]. 中国电力, 2008, 41(2): 74-77.

作者简介:

杨青斌(1988), 男, 硕士研究生, 研究方向为洁净能源及其并网技术;

袁铁江(1975), 男, 博士, 副教授, 从事洁净能源发电及其并网技术等方面的研究工作。

(收稿日期: 2013-07-23)

超高压交流线路对平行架设特高压直流线路的电磁感应

李宝聚, 郭雷, 张磊

(国网吉林省电力有限公司, 吉林 长春 130021)

摘要: 交流输电线路与特高压直流输电线路平行架设时, 通过电磁耦合交流线路会在特高压直流线路上感应出工频交流分量。感应产生的工频电流, 经过换流器后会产生直流分量。此直流分量流经换流变压器, 会导致换流变压器偏磁。采用 EMTDC 程序建立了交/直流输电系统仿真模型, 对交流输电线路对平行架设的特高压直流输电线路产生的电磁感应影响进行仿真研究, 分析了交/直流线路平行架设长度、接近距离、土壤电阻率、杆塔接地电阻等因素对特高压直流线路的工频电磁感应影响。另外, 对比分析了超高压紧凑型线路、常规型线路分别与特高压直流线路平行架设时特高压直流线路上的工频感应电压、电流和直流偏磁电流。

关键词: 直流偏磁电流; 感应电压; 感应电流; 电磁感应; 仿真计算; 特高压直流

Abstract: When AC transmission line is in parallel with UHVDC line, it may cause electromagnetic influence upon UHVDC transmission line and the power-frequency AC component will occur along the UHVDC transmission line. The power-frequency AC current will be transformed into DC current by current converter. When flowing into converter transformer, DC current can cause magnetic bias. Based on EMTDC software, the simulation model of AC/DC transmission lines is established. The electromagnetic induction influence of AC transmission line on parallelly erected UHVDC transmission line is studied. The factors that affect the influence of electromagnetic induction on UHVDC transmission line are analyzed such as parallel erection length, adjacent distance, soil resistivity and tower grounding resistance. The power-frequency induced voltage, induced current and DC bias current in UHVDC lines which are in parallel with EHVAC compact line or EHVAC conventional line are compared and analyzed.

Key words: DC bias current; induced voltage; induced current; electromagnetic induction; simulation calculation; UHVDC

中图分类号: TM761 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)06-0066-04

随着输电线路的不断建设, 输电线路走廊资源越来越紧缺。交流输电线路与直流输电线路平行架设共用走廊有时不可避免^[1-3]。交流线路与特高压直流线路平行架设时, 由于两者之间存在的电磁耦合, 交流输电线路会在平行架设的特高压直流输电线路中产生工频感应电压和电流。而工频电流通过直流输电线路进入两端换流站后, 在换流器的作用下会在换流变压器阀侧产生直流偏磁电流^[4-9]。若变压器处在直流偏磁工作状态, 将导致变压器的损耗、温升及噪音增大, 甚至影响使用寿命。

根据云广 ± 800 kV 特高压直流线路参数, 建立交/直流输电系统的仿真模型。在不同平行架设长度、不同接近距离(文中接近距离为线路杆塔中心之间的距离)、不同土壤电阻率、不同杆塔接地电阻的条件下, 对特高压直流线路上的感应电压、电流以

及换流变压器阀侧的直流偏磁电流进行了仿真计算。对比分析了平行架设时超高压紧凑型线路和常规型线路对特高压直流线路的电磁影响。

1 超高压交流线路对平行架设特高压直流线路的工频电磁感应

1.1 系统概况及线路参数

以图 1 所示的超高压交流输电线路和云广 ± 800 kV 特高压直流输电线路并行为例, 分析超高压交流线路对平行架设特高压直流线路的工频电磁感应影响^[10-11]。超高压交流输电线路输送功率为 1 000 MW, 云广特高压直流线路全长 1 446 km, 双极输送功率为 5 000 MW。交/直流线路参数和杆塔布置见表 1、2 和图 1。

表1 ±800 kV 直流线路导线和地线参数

名称	线路	地线
导线型号	6 × LGJ - 630/45	LBGJ - 180 - 20AC
导线外径/cm	3.36	1.75
直流电阻/(Ω · km ⁻¹)	0.046 33	0.709 8
分裂间距/cm	45.0	

表2 600 kV 超高压交流线路导线和地线参数

名称	线路	地线
导线型号	4 × LGJ - 400/35	LBGJ - 180 - 20AC
导线外径/cm	2.682	1.575
直流电阻/(Ω · km ⁻¹)	0.073 89	0.295 2
分裂间距/cm	45.0	

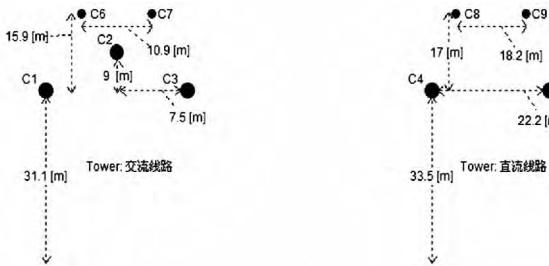


图1 交/直流线路平行架设的杆塔布置

1.2 超高压交流线路与特高压直流线路平行架设的仿真计算

特高压直流线路单独架设时整流侧的直流电压、电流波形如图2所示。交/直流线路平行架设时(平行长度为100 km、接近距离为50 m),特高压直流线路整流侧的直流电压、电流波形如图3所示。

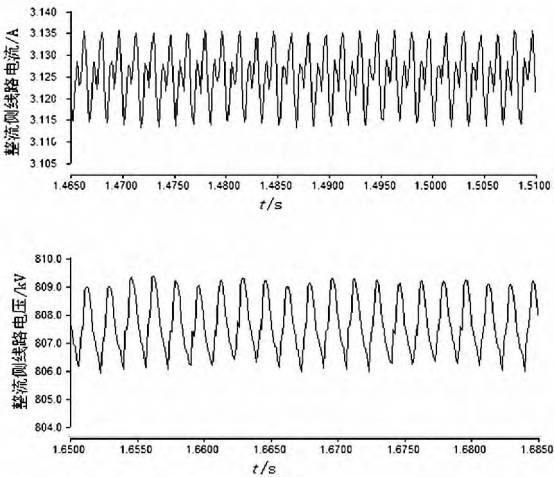


图2 特高压直流单独架设运行时线路电流、电压

对比图2、3可以看出,交/直流平行架设后,特高压直流线路电压、电流中的工频分量明显增加。超高压交流线路在平行架设特高压直流线路上感应出稳定的工频电压、电流。

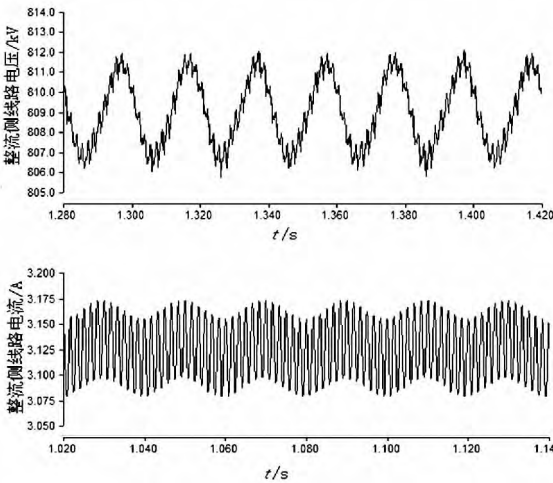


图3 交/直流平行架设时特高压直流线路电流、电压

2 交流线路对平行架设特高压直流线路电磁感应的影响因素

2.1 交/直流线路平行长度和接近距离

2.1.1 工频感应电压、电流

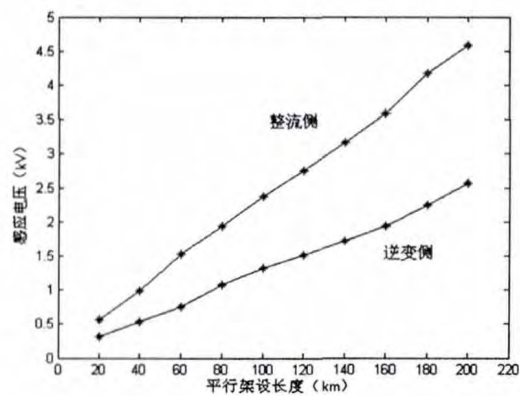
在接近距离为50 m时,不同平行架设长度下特高压直流线路上感应工频电压、电流如图4所示。平行长度100 km,不同接近距离下特高压直流线路上感应工频电压、电流如图5。

由图4、5可见,工频感应电压、电流随着交/直流线路平行架设长度的增加而增大,两者基本呈线性关系。工频感应电压、电流随着交/直流线路接近距离的增加而减小,当交/直流线路接近距离较近时,工频感应分量随着距离的增大衰减得很快,但当接近距离大于100 m时,工频感应分量的衰减幅度越来越小。

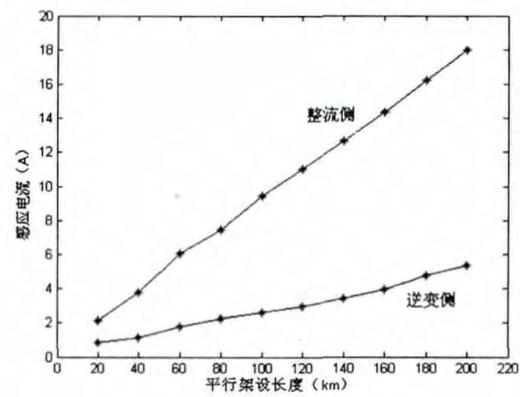
2.1.2 直流偏磁电流

工频感应电流通过直流输电线路进入两端换流站后,在换流器的作用下会在换流变压器阀侧产生直流偏磁电流。直流偏磁电流进入换流变压器后,可能导致换流变压器偏磁。特高压直流线路整流侧和逆变侧换流变压器阀侧直流偏磁电流如表3、4所示。

从表3、4可知,整流站与逆变站的换流变压器阀侧直流偏磁电流随着平行长度的增大而增加;随着接近距离的增大而逐渐衰减。交直流线路的平行长度和接近距离会受到换流变压器所承受的最大直流偏磁电流的制约。

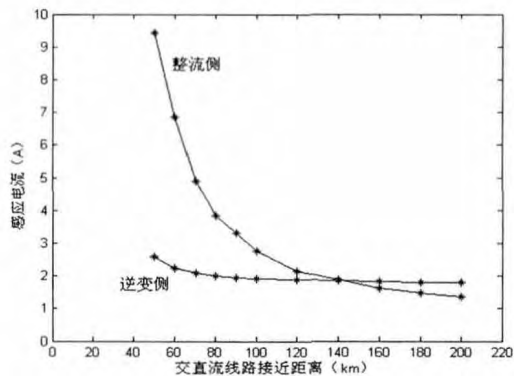


a 工频感应电压

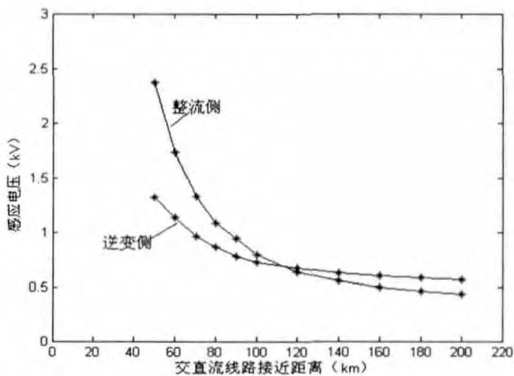


b 工频感应电流

图4 不同平行架设长度下的电磁耦合影响



a 工频感应电压



b 工频感应电流

图5 不同接近距离下的电磁耦合影响

表3 整流站换流变压器阀侧直流偏磁电流 /A

间距 /m	平行长度/km						
	20	40	60	80	100	120	140
50	1.57	3.31	5.22	6.45	7.91	8.92	10.3
60	1.28	2.23	3.46	4.61	5.83	6.27	7.33
70	1.08	1.71	2.37	4.01	4.34	4.81	5.47
80	0.73	1.52	1.89	2.53	3.54	3.75	4.36
90	0.64	1.27	1.51	2.11	3.16	3.32	3.61
100	0.57	1.05	1.34	1.82	2.49	2.72	3.07
120	0.49	0.79	0.99	1.42	1.98	2.11	2.37
140	0.42	0.71	0.88	1.13	1.62	1.75	1.93
160	0.38	0.64	0.76	0.97	1.34	1.48	1.62
180	0.36	0.59	0.67	0.83	1.12	1.21	1.38
200	0.32	0.55	0.62	0.75	1.02	1.11	1.19

表4 逆变站换流变阀侧直流偏磁电流 /A

间距 /m	平行长度/km						
	20	40	60	80	100	120	140
50	1.93	2.71	3.51	4.38	5.34	6.34	7.49
60	1.67	2.45	3.34	3.97	4.74	5.58	6.17
70	1.61	2.32	2.77	3.69	4.38	5.21	5.99
80	1.54	2.21	2.63	3.47	4.03	5.11	5.74
90	1.51	2.12	2.55	3.31	3.87	5.01	5.43
100	1.49	2.01	2.44	3.23	3.56	4.89	5.11
120	1.46	1.92	2.15	2.92	3.33	4.24	4.49
140	1.42	1.79	1.95	2.44	3.11	3.76	3.99
160	1.36	1.68	1.83	2.21	2.84	3.39	3.55
180	1.32	1.61	1.75	2.09	2.63	3.11	3.19
200	1.27	1.52	1.68	1.82	2.42	2.69	2.92

2.2 土壤电阻率和杆塔接地电阻

图6、7为不同土壤电阻率、杆塔接地电阻下,直流系统中电磁感应参量的变化情况。

由图6可知,平行段土壤电阻率对直流线路工频感应电压、电流以及直流偏磁电流的影响很小。由图7可知,随着平行段杆塔接地电阻的增大,直流线路工频感应电压、电流以及直流偏磁电流也有所增加,但增加幅度较小。

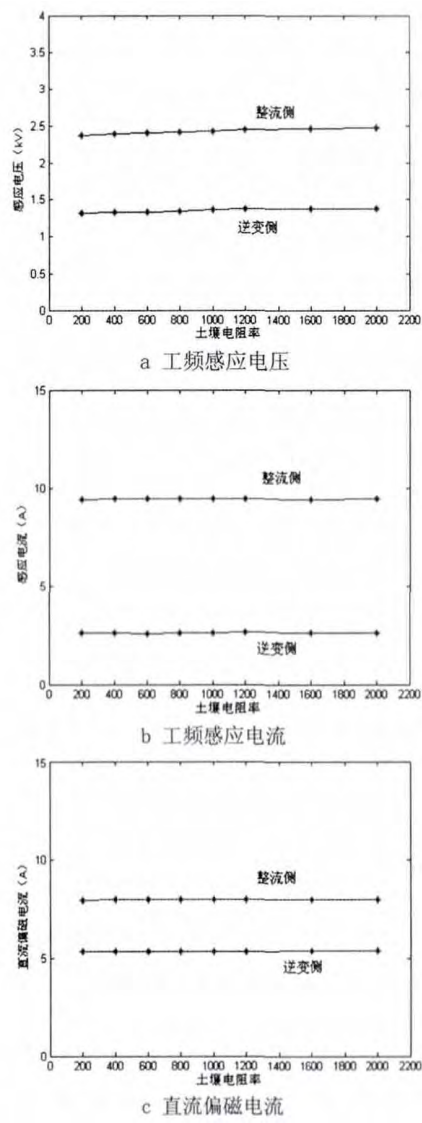


图 6 电磁感应参量随土壤电阻率的变化趋势

3 超高压紧凑型、常规线路对平行架设特高压直流线路的电磁影响

超高压紧凑型线路和常规线路的导线布置以及导线参数如图 8、表 2、5 所示。

表 5 超高压紧凑型线路的导线和地线参数

名称	线路	地线
导线型号	6 × LGJ - 300 / 40	GJ - 80
导线外径 / cm	2.394	1.105
直流电阻 / (Ω · km ⁻¹)	0.073 89	2.864 5
分裂间距 / cm	37.5	

超高压常规线路的输送功率控制在 1 000 MW，由于紧凑型线路自然功率大，将其输送功率控制在 1 500 MW。那么，直流线路上的感应参量见表 6。

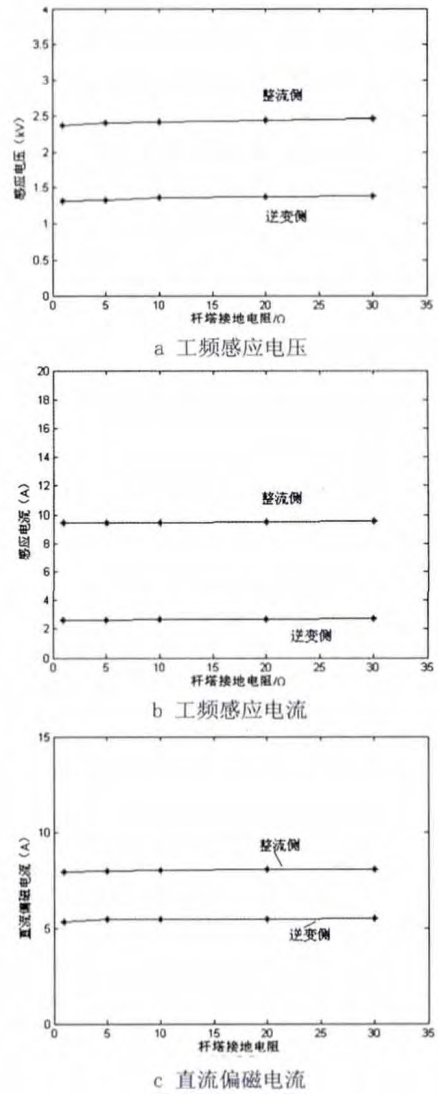


图 7 电磁感应参量随杆塔接地电阻的变化趋势

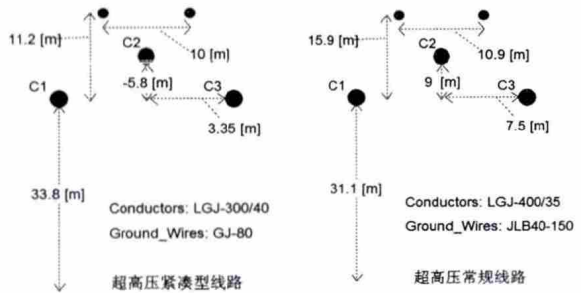


图 8 超高压紧凑型线路及常规线路导线布置

表 6 超高压线路对平行架设特高压直流线路的电磁影响

线路	整流侧			逆变侧		
	感应电压 / kV	感应电流 / A	直流偏磁电流 / A	感应电压 / kV	感应电流 / A	直流偏磁电流 / A
超高压紧凑型线路	1.28	5.31	5.36	1.06	2.35	4.39
超高压常规线路	3.5	13.3	11.89	3.18	7.3	12.89

(下转第 91 页)

应、电磁感应和自由振荡3个过程组成,所以冲击电压通过 CVT 的隔离变换后,低压侧波形出现了失真,暂态过电压在 CVT 中并不是按其额定变比来传递的。

2) 低压侧输出地电压信号与高压侧冲击电压信号几乎同时出现,极性相同。实测结果表明,高压侧电压幅值与低压侧输出的稳态电压值是按照 CVT 的额定变比传递的。

3) 当冲击电压参数和副边电阻一定时,原边电阻越大,高压侧电压幅值就越大,波前时间亦越长,低压侧响应电压波形振荡越剧烈;当冲击电压参数和原边电阻一定时,副边电阻越大,低压侧响应电压幅值就越大,波前时间反而越短,但对高压侧电压的幅值和波前时间几乎不影响。

虽然, CVT 不能完整地传变高频暂态信号,但低压侧响应波形波头部分的特性与一次侧是一致的。在合理配置 CVT 电路参数的情况下,依然能够使低压侧响应波形满足相关标准的要求,并运用于暂态过电压的在线监测中。

参考文献

[1] 郭克勤,刘翔,陈鹏,等. 电容式电压互感器传递过电

(上接第69页)

由计算结果可知,由于紧凑型线路减小了交流三相线路对直流线路电磁耦合影响的不平衡,交流紧凑型线路要比常规线路对特高压直流线路的电磁影响明显减小。

5 结 论

(1) 交/直流平行架设后,特高压直流线路电压、电流中的工频分量明显增加。超高压交流线路会在平行架设特高压直流线路产生工频感应电压、电流。特高压直流线路换流变压器阀侧产生直流偏磁电流。

(2) 特高压直流线路工频感应电压、电流和换流变压器阀侧直流偏磁电流随着交/直流线路平行架设长度的增加而增大,两者基本呈线性关系;随着交/直流线路接近距离的增加而减小,呈非线性关系。

(3) 并行段土壤电阻率和杆塔接地电阻对特高压直流线路工频感应电压、电流以及直流偏磁电流的影响很小。

(4) 对平行段特高压直流线路的电磁影响,超高压交流紧凑型线路比常规线路明显减小。

参考文献

[1] 陆国庆,何宏明,张军. 交直流输电线路相邻架设或共

压试验研究 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2009, 30(4): 25-28.

[2] 赵智大. 高电压技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.

[3] Martinez, J. A; Walling, R; Mork, B. A, et al. Parameter Determination for Modeling System Transients - Part III: Transformers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(3): 2051-2062.

[4] 姚晓健,蔡祖安,陈红. 电容式电压互感器的高频暂态特性仿真分析 [J]. 湖南电力, 2011, 31(2): 13-16.

[5] 曾祥君,刘正谊,屈明志,等. 互感器暂态行波传输特性仿真分析与实验测试 [J]. 长沙理工大学学报: 自然科学版, 2004, 1(1): 71-75.

[6] 王黎明,方斌. 500 kV 电容式电压互感器暂态特性仿真 [J]. 高电压技术, 2012, 38(9): 2389-2396.

[7] Hassan Khorashadi Zadeh, Zuyi Li. A Compensation Scheme for CVT Transient Effects Using Artificial Neural Network [J]. Electric Power Systems Research, 2008(78): 30-38.

[8] D. Fernandes Jr, W. L. A. Neves, J. C. A. Vasconcelos. Coupling Capacitor Voltage Transformer: A Model for Electromagnetic Transient Studies [J]. Electric Power Systems Research, 2007(77): 125-134.

(收稿日期: 2013-09-27)

用走廊的探讨 [J]. 高电压技术, 1997, 23(4): 68-70.

[9] 黎小林,黄琦,唐剑,等. 交流线路对邻近并行直流线路影响 [J]. 中国电机工程学会 2006 无线电干扰和变电站电磁兼容研讨会, 2006.

[10] 周沛洪,修木洪,聂定珍. 同廊道架设交直流线路的相互影响 [J]. 高电压技术, 2003, 29(9): 5-9.

[11] 马为民. 换流变压器中直流偏磁电流的计算 [J]. 高电压技术, 2004, 30(11): 48-49.

[12] 赵松涛. 交流输电线路对并行直流输电线路电磁感应的仿真研究 [J]. 北京: 华北电力大学, 2006: 1-2.

[13] ± 800 kV 直流输电技术研究 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.

[14] Tiebing Lu, Songtao Zhaoxiang Cui. Simulation of Electromagnetic Induction on DC Transmission Lines from Parallel AC Transmission Lines [J]. Electromagnetic Compatibility, 2007: 114-117.

[15] E. V. Larsen, R. A. Walling, C. J. Bridenbaugh. Parallel AC/DC Transmission Lines Steady-state Induction Issues. [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(1): 667-673.

[16] 曾嵘,唐剑,张波,等. 交直流输电线路并行对换流变直流偏磁影响及对策 [J]. 陕西电力, 2008, 36(9): 1-5.

[17] 王琦,曾嵘,唐剑. 罗百交流线路对云广 ± 800 kV 直流电磁干扰研究 [J]. 南方电网技术, 2007, 3(1): 27-31.

[18] 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.

(收稿日期: 2013-07-01)

基于有限元法的冷缩电缆终端缺陷形态特征与局部放电特性分析

邓刚¹, 刘丽², 方玮¹, 刘灏颖¹, 韩燕¹, 张安安¹

(1. 西南石油大学电气信息学院, 四川 成都 610500; 2. 国网成都供电公司, 四川 成都 610000)

摘要:采用有限元法建立35 kV硅橡胶预制式电缆终端缺陷模型并进行静电场仿真。针对电缆终端可能出现局部放电的位置,分别用三角形和等腰梯形模型模拟割伤和凹陷气隙缺陷,并建立等比例不同大小的缺陷模型分析其最大场强。利用最小二乘法对试验数据进行插值拟合,得到各位置不同尺寸模型的最大场强分布曲线。该曲线表明铜屏蔽层断口处是容易引起电场畸变并产生局部放电的薄弱环节;同位置割伤缺陷较凹陷缺陷场强大;半导体层断口处由于应力锥的疏散作用场强较小,减小了局部放电的可能;铜屏蔽层断口到半导体层断口之间的区域,存在微间隙缺陷时长期运行可产生局部放电。所得结论对高压电力电缆终端的设计、制作及安装等有一定的指导意义。

关键词: 电缆附件; 局部放电; 有限元法; 微间隙

Abstract: The defect models of 35 kV prefabricated silicone rubber cable terminal are established and simulated in the static electric field by finite element method. Triangle and isosceles trapezoid models are established to imitate incise lesion and sag defects where partial discharge may occur. Defects with different size and same length-width ratio are built to calculate the maximum field strength. The figure of maximum field strength is curved with the least square interpolation data. The results indicate that it is easy to cause the electric field distortion and partial discharge at the fracture of the copper shield. The electric field strength of incise lesion defect is higher than that of the sag one at the same place. Due to the effect of evacuation of the stress cone, it is less likely to cause partial discharge at fracture of semi-conducting layer. The areas between the fracture of copper shield and semi-conducting layer with micro air gap may cause partial discharge in the long-time run. The conclusions provide the guidance on the design, manufacture and installation of HV cable terminal.

Key words: cable accessory; partial discharge; finite element method; micro gap

中图分类号: TM864 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)06-0070-05

0 前言

在电缆终端,由于剥除半导体屏蔽层和铜屏蔽层,导致屏蔽层断口处局部电场畸变,场强过大,容易引起局部放电。为了改善局部场强局部集中,常使用应力锥或应力管来疏散应力,改变局部电场分布,降低局部场强。电缆终端在安装时,由于操作人员操作不规范,很容易产生半导体层或绝缘层割伤、应力锥移位、杂质气泡及应力锥凹陷等缺陷,在终端长期运行后,常使其产生局部放电并引发击穿闪络的事故^[1]。大量数据表明,局部放电是造成电缆绝缘破坏的主要原因之一,而电缆附件则是其中最薄弱的环节。因此,对电缆附件缺陷模型局部放电的研究具有重要意义。国内外对电缆终端的研究包括

传感器及检测方法的研究^[2]、数学或软件建模仿真^[3-4]、对放电数据的挖掘故障诊断及特征识别^[5]和模拟放电缺陷进行局部放电实验^[6-9]。当前主要的信号处理方法有小波分析及其衍生算法、K-means 聚类算法、模式识别方法、支持向量机理论、分形、Weibull 变换等。

目前,对电缆终端缺陷间隙大小与局放程度关系研究的论文还比较少。T. Asokan^[10]通过自制的叶片电极微间隙,研究了不同叶片电极组合情况下的击穿强度和局放特性。从其研究中可知,微间隙在小于1 000 μm 时已经不再满足帕邢定律,且随间隙的减小,场强呈现增大趋势。他们模拟了电极间的气隙,并未在实际电缆附件或电力设备中进行气隙缺陷的仿真及实验验证。H. Illias 通过建立一个球形介质腔^[11],利用有限元仿真和试验的方式研究

了不同直径和位置的球形腔在电极之间的电场分布及放电特征。由于实际电缆附件的外形及内部特征的复杂性以及应力锥和铜屏蔽层的使用,有必要对电缆附件的内部缺陷的形态特征与局部放电特性间的关系进行研究。文献[6]模拟了10 kV电缆终端主绝缘不同宽度的轴向空气隙缺陷的电场分布并进行了试验验证,文献[7]对220 kV电缆中间接头可能出现的半导电尖端放电进行了气隙缺陷仿真和试验研究。他们都针对可能出现的一种空气隙缺陷进行仿真及实验,并未结合实际考虑可能出现的各种缺陷,这正是这里研究的重点。

针对高压电缆终端各种常见缺陷,将应力锥和铜屏蔽层的作用考虑在内,利用有限元仿真软件依据35 kV电缆终端实物建立各种不同形状的微间隙缺陷模型^[12-14],并研究其气隙小于1 000 μm时的最大场强。利用最小二乘法将实验数据进行拟合,得到各位置最大场强随缺陷尺寸大小变化的分布曲线。

1 基于有限元分析的静电场仿真

有限元法是以变分原理和剖分插值为基础的一种数值计算方法^[15]。它首先利用变分原理把求解的边值问题转化为相应的变分问题,即泛函的极值问题,然后利用剖分插值将变分问题离散化为普通多元函数的极值问题,最终归结为一组多元的代数方程组,解之即得待求边值问题的数值解。

在静电场二维情况下^[16],在边界为 c 的平面域 D 中,电荷密度为 ρ ,介电常数为 ε ,电位 φ 在边界 c 上满足其次第一类边值条件,

$$\text{即 } \varphi|_c = f(c)$$

和泊松方程

$$\nabla^2 \varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon}$$

电场能量泛函为

$$W(\varphi) = \iint_D \frac{1}{2} \varepsilon E^2 dD = \iint_D \left[\frac{\varepsilon}{2} (\nabla \varphi)^2 - \rho \varphi \right] dD \quad (1)$$

泛函变分为

$$\delta W(\varphi) = \iint_D [\varepsilon \nabla \varphi \cdot \nabla (\delta \varphi) - \rho \delta \varphi] dD \quad (2)$$

联立以上方程可得电场能量最小的条件为

$$\delta W(\varphi) = 0 \quad (3)$$

其中, δ 为变分符号; E 为单位场强; ∇ 为哈密顿算

符; D 为积分面积。

因边界电位已知,不考虑式(3)。将定义域 D 剖分成有限个离散多边形子域(三角形或者四边形),待解函数 φ 在每一个单元内可以用一个合适的插值函数 $U(x,y)$ 来近似^[17],设 U 用坐标的形函数矩阵 $[N]$ 和节点势函数矩阵 $[\varphi]$ 的线性组合来表示。

$$\text{即 } U = [N]^T \cdot [\varphi] \quad (4)$$

其中

$$[N]^T = [N_1, N_2, N_3, \dots, N_k, \dots, N_s] \quad (5)$$

$$[\varphi] = [\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \dots, \varphi_k, \dots, \varphi_s]$$

$$\text{插值函数 } U(x_k, y_k) = \varphi_k \quad (6)$$

由于部分子域电位已知,故可联立方程(4)、(5)、(6)解出插值问题的数值解。由所得电位分布,即可由方程(1)计算各子域场强大小及电场能量。

2 模型分析与建立

按照1:1比例根据图1的35 kV电缆终端设计图建立了ANSYS有限元2维模型,相应的终端实物如图2。将模型建立后,在可能出现局部放电的半导电层断口、铜屏蔽层断口以及两者之间的半导电层区域分别模拟了割伤和凹陷两种缺陷的不同尺寸的模型,缺陷模型如图3所示。图中从上到下(I, II, III, IV, V, VI)依次为硅橡胶外套、应力锥、半导电层、电缆主绝缘层、电缆内半导电层和电缆线芯。半导电层上及铜屏蔽层断口处用三角形区域模拟割伤缺陷、等腰梯形模拟凹陷缺陷。半导电层断口处割伤、凹陷缺陷均设为三角形。

采用有限元方法对模型进行静电场仿真,可得到其电位分布,电场强度矢量和分布。不同位置的缺陷模型如表1所示。

在以上容易出现局部放电的位置分别建立等比例不同大小的缺陷模型进行仿真验证。电缆终端可能出现沿面滑闪放电缺陷、导电颗粒放电缺陷、内部气隙放电缺陷、线芯毛刺放电缺陷等故障缺陷。这些缺陷最终都是由于存在空气或者其他填充物形成微间隙,而微间隙与周围绝缘材料的介电常数不一致,从而导致电场分布不均。因此,可以通过模拟不同介电常数的填充介质的割伤缺陷和凹陷缺陷来模拟电缆终端可能出现的各种缺陷。电缆终端缺陷模型的各种材料介电常数及电导率见表2。

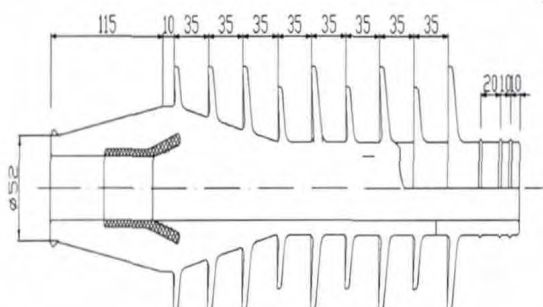


图1 电缆模型剖面图

表1 两种缺陷位于不同位置

缺陷类型	割伤缺陷			凹陷缺陷		
缺陷位置	①	②	③	④	⑤	⑥

说明: ①、④在半导体层上,位于铜屏蔽层断口处; ②、⑤在半导体层上,位于半导体层断口与铜屏蔽层断口之间; ③在电缆主绝缘上,位于半导体层断口处; ⑥在电缆主绝缘与应力锥之间,位于半导体层断口处。

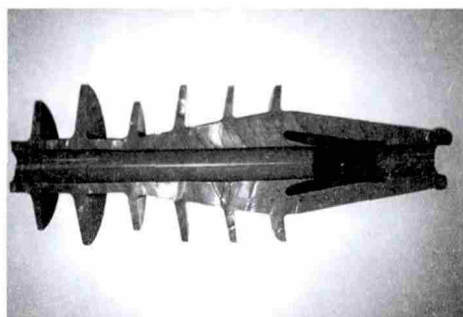


图2 35 kV 电缆终端剖面图

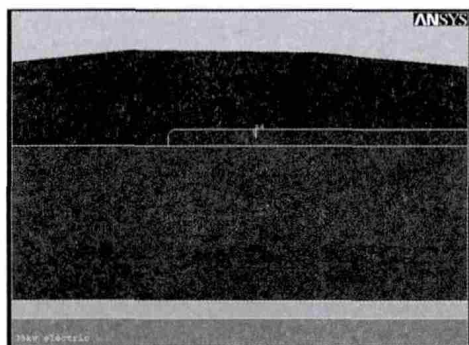


图3 模拟 35 kV 电缆终端割伤缺陷

表2 不同材料的相对介电常数和电导率

材料	硅橡胶 外套	电缆 绝缘层	内外半 导电层	电缆 线芯	应力 锥	空气
相对介 电常数	2.8	2.25	30	理想 导体	30	1
电导率	$1e-15$	0	0.002	∞	0.002	0

在仿真试验时,对电缆线芯施加 35 kV 电压终端外表面及铜屏蔽层施加 0 电位。对模型进行网格划分时,采用统一的划分并将缺陷位置处进行最大化。

3 最小二乘法数据拟合及实验结果分析

3.1 最小二乘法拟合

最小二乘法,可将离散数据按某种标准在误差最小化的前提下拟合为光滑的曲线,并通过数学表达式直观表达出来,可用于实验数据结果分析处理。对给定的一组数据 $(x_i, y_i) (i = 0, 1, \dots, m)$,要求在函数类 $\varphi = \{\varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_n\}$ 中找一函数 $y = S^*(x)$,

使误差平方和 $\|\delta\|_2^2 = \sum_{i=0}^m \delta_i^2 = \sum_{i=0}^m [S^*(x_i) - y_i]^2 = \min_{S(x) \in \varphi} \sum_{i=1}^m [S(x_i) - y_i]^2$ 。这里 $S(x) = \alpha_0 \varphi_0(x) + \alpha_1 \varphi_1(x) + \dots + \alpha_n \varphi_n(x) (n < m)$ 。

用最小二乘法求拟合曲线时,首先要确定 $S(x)$ 的形式。这与所研究问题的运动规律及所得数据 (x_i, y_i) 有关;通常从问题的运动规律及给定数据描图,确定 $S(x)$ 的形式,并通过实际计算选出比较好的结果。研究缺陷模型的最大场强随缺陷模型尺寸大小变化的规律,用最小二乘法可以自动筛选掉变化太大不符合规律的奇异点,构造出光滑的运动曲线,故采用此法对数据进行曲线拟合能较好反应所研究问题的变化规律。将不同缺陷模型不同大小的仿真所得场强最大值进行统计汇总,利用最小二乘法对各种缺陷所得数据进行插值和拟合。拟合步骤为: ①根据数据特性,选择插值拟合函数及插值拟合次数,②根据最小二乘法曲线拟合准则编程计算拟合函数系数,③进行拟合绘图。

得到以下拟合函数。

半导体层割伤拟合函数为

$$y = -235.8038x^4 + 512.6923x^3 - 333.6068x^2 + 75.7178x + 7.6696$$

半导体层凹陷拟合函数为

$$y = -14.1875x^2 + 18.4575x - 0.7060$$

半导体层割伤拟合函数为

$$y = -235.8038x^4 + 512.6923x^3 - 333.6068x^2 + 75.7178x + 7.6696$$

半导体层凹陷拟合函数为

$$y = -14.1875x^2 + 18.4575x - 0.7060$$

铜屏蔽层断口处割伤缺陷拟合函数为

$$y = 646.8x^4 - 1542.3x^3 + 1361x^2 - 525.5x + 100.7$$

铜屏蔽层断口凹陷缺陷拟合函数为

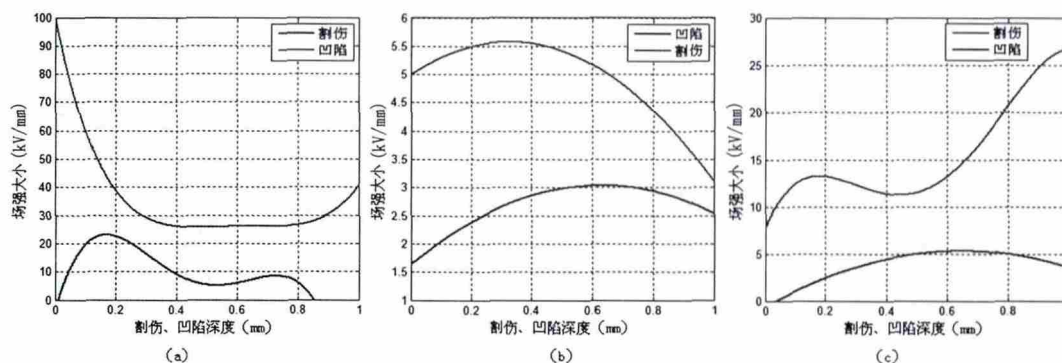


图4 各个位置割伤、凹陷缺陷最大场强拟合曲线

$$y = -1480.1x^4 + 2822.3x^3 - 1779.7x^2 + 388.4x - 4.2$$

半导体层断口处主绝缘割伤缺陷拟合函数为

$$y = -3.5678x^2 + 4.4857x + 1.6291$$

半导体层断口处凹陷缺陷拟合函数为

$$y = -5.45x^2 + 3.575x + 4.99$$

各拟合函数经最小二乘法多次拟合后绘制如图

4。

3.2 实验结果分析

以往的研究,常常在建模仿真试验时忽略铜屏蔽层的存在。通过研究发现,铜屏蔽层是一个至关重要的部分,是极易发生局放的薄弱环节。铜屏蔽层的作用是,正常情况下流过电容电流,短路时作为短路电流的通道,同时也起到屏蔽电场的作用^[3]。其断口处由于气隙缺陷的存在,会使接触电阻增加,限制了短路容量的大小,并且电流不是沿轴向流动,而是绕轴心成螺旋流动,引起电感,导致感应电动势增加。如图4(a)所示:铜屏蔽层断口处存在缺陷时,场强将急剧增大,平均场强远大于空气击穿场强30 kV/cm。其中割伤缺陷随割伤深度增大呈递减趋势,当间隙小于0.1 mm时,最大场强接近100 kV/mm,极易造成绝缘材料老化加剧,并产生局部放电。对于此处的凹陷缺陷,场强平均约为10 kV/mm,同样容易产生局部放电。因此,电缆终端铜屏蔽层断口处极易成为局部放电的源头,应当认真做好铜屏蔽层的直流电阻或感应电压和电流测试,及时更换老化终端,避免事故的发生。

在未考虑铜屏蔽层的终端仿真中,半导体层断口处主绝缘割伤等缺陷会有很大场强,易发生局部放电。将铜屏蔽层考虑在内时,由于铜屏蔽层对电场的屏蔽作用和应力锥的应力疏散作用,使得半导体层断口处微气隙缺陷的场强过大问题得到改善。

如图4(b)所示:缺陷平均场强被控制在4.5 kV/mm以下。由于半导体层和应力锥接触良好,且有相似的介电常数,故在用有限元法进行计算时可看作一体,而电缆主绝缘较应力锥和半导体层有稍小的介电常数,使得周围介质的介电常数相对缺陷气隙差距减小。因此此类缺陷局部场强比其他缺陷小,不至于发生局部放电。

位于铜屏蔽层断口与半导体层断口之间的半导体层,由于铜屏蔽层的剥除,电场应力在铜屏蔽层断口附近集中,半导体层上的电场分布也随之改变。如图4(c)所示:实验模拟之割伤缺陷较凹陷缺陷有较大场强,且与割伤深度成正比例关系,其平均场强大于10 kV/mm,超过空气击穿最大场强,长期运行会使缺陷边缘的介质介电常数减小,由于场强与介电常数成反比例关系,故缺陷处会产生更大的场强,形成恶性循环,从而加快电缆终端的老化并最终产生局部放电。根据各类电缆终端缺陷仿真数据各类缺陷所得最大场强,对各类缺陷局部放电可能性进行预估。归纳如表3。

由以上实验数据可知,在可能产生局部放电的各位置,割伤缺陷较凹陷缺陷有更大的场强,更容易发生局部放电。电缆终端缺陷模型越尖锐,电场畸变越严重,介质材料发生变化部位的场强越大。这与人研究结果一致。不同的是铜屏蔽层断口处应力集中,场强过大,是电缆终端的薄弱环节,也是最容易产生局部放电的位置。半导体层断口处由于应力锥的作用,使应力得到明显疏散,从而大大降低场强,减小了局部放电的可能。因此安装电缆终端时,要注意不能割伤半导体层并将半导体层表面及各断口打磨光滑成反应力锥形状,需用硅脂以及绝缘胶等绝缘材料填充电缆半导体层表面及断口处可能存在的微间隙,防止形成微间隙缺陷,减小局部放

电发生的可能性。

表3 不同缺陷局部放电可能性对比

局部放电可能性排序	局部放电与否	各种缺陷模型试验最大场强 / (kV · mm ⁻¹)	局部放电缺陷及位置
1	是	59.169	铜屏蔽层断口处割伤缺陷
2	是	26.388	半导体层割伤缺陷
3	是	25.719	铜屏蔽层断口处凹陷缺陷
4	否	5.884	半导体层断口处凹陷缺陷
5	否	5.088	半导体层凹陷缺陷
6	否	2.980	半导体层断口处主绝缘割伤缺陷

4 实验验证

由现场实验所得发生局部放电的35 kV电缆终端实物剖析所见,与仿真所得结论相符。检查故障电缆终端,可见铜屏蔽层断口处未进行打磨和绝缘应力控制形成微气隙缺陷,且半导体层断口不齐,有台阶气隙缺陷导致局部放电。如图5所示。放电位置为铜屏蔽层断口处(白圈范围内)。

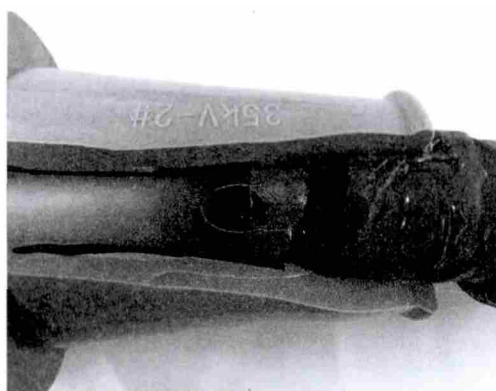


图5 铜屏蔽层断口气隙缺陷

5 结论

用有限元法对35 kV电缆终端进行仿真试验,分析不同尺寸的割伤和凹陷缺陷的最大场强分布,结合最小二乘法将数据进行曲线拟合后对比得出以下结论。

(1) 越靠近铜屏蔽层的地方,应力控制越薄弱,局部场强越大。

(2) 同样的位置割伤缺陷比凹陷缺陷局部场强大,更容易产生局部放电。

(3) 铜屏蔽层断口处应力集中,场强较大,易产生局部放电,是生产和安装时应注意的薄弱环节。

从现场实验所得故障终端证实了仿真所得铜屏蔽层为局部放电薄弱环节。拟合所得数据对电缆终端内部可能出现的局部放电缺陷位置定位和大小测量提供了数据支持。对电缆故障终端的绝缘树枝老化及使用寿命有一定指导意义。通过最小二乘法曲线拟合,结合现场局部放电试验检测可以大致估计产生局部放电的位置和缺陷大小。结合所得局部放电电量、放电次数以及放电时间间隔等数据,进行局部放电故障诊断分析、预估电缆终端老化曲线等问题有待下一步研究。

参考文献

- [1] 唐炬,龚宁涛,李伟,等. 高压交联聚乙烯电缆附件局部放电特性分析[J]. 重庆大学学报,2009,32(5):528-529.
- [2] 陶诗洋,冯义,曹佳楣,等. 高频传感器在10 kV电缆带电检测中的应用[J]. 中国电力,2011,44(3):27-29.
- [3] 王超,刘毅刚,刘刚,等. 有限元法应用于电缆终端应力锥缺陷分析[J]. 高电压技术,2007,33(5):152-153.
- [4] 周凤争,孟庆霖,朱晓辉,等. 10 kV电缆附件典型缺陷仿真与绝缘故障分析[J]. 绝缘材料,2011,44(4):67-68.
- [5] 唐炬,李伟,欧阳有朋. 采用小波变换奇异值分解方法的局部放电模式识别[J]. 高电压技术,2010,36(7):1686-1687.
- [6] 刘刚,陈志娟. 10 kV交联聚乙烯电缆终端主绝缘含空气气隙缺陷试验[J]. 高电压技术,2012,38(3):678-682.
- [7] 姜芸,闵红,罗俊华. 220 kV电缆接头半导体尖端缺陷的局部放电试验[J]. 高电压技术,2010,36(11):2657-2660.
- [8] M. Pompili, R. Bartnikas. On Partial Discharge Measurement in Dielectric Liquids[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(5): 1476-1481.
- [9] Sedat Adili, Christian M. Franck. Application of Pulsed X-ray Induced Partial Discharge Measurements[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(5): 1833-1839.
- [10] T. Asokan, T. C. Balachandra. Electrical Discharge Behavior of Micro-gaps[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(6): 1864-1868.

(下转第83页)

小于 770 mm^②。

3.2 综合原因分析

通过以上分析认为,该公司生产的 XGN17 - 40.5 产品仅 A 处的绝缘隔板不满足规程规定,尽管存在设计隐患,但仍通过了出厂试验和现场验收试验,为什么 A 处绝缘板在运行 3 年后形成沿绝缘板表面击穿的现象,可从以下方面分析。

1) A 处绝缘板的布置与三相母线相垂直,虽然不增加相间绝缘的绝缘介质,但在特定条件下,如高海拔、表面积尘、空气湿度过大、凝露等影响下,可能会导致绝缘板表面绝缘性能的下降,相当于降低了相间或相对地的空气绝缘距离。

2) 当出现上述特定的情况时,绝缘板可等效为一个接近于地电位或高阻接地的状态,此时,相间电压会全部施加于导体与绝缘板间很小的空气间隙,导致场强相对集中,可能引发局部放电,长期对周围的设备元件电离腐蚀,尤其是长期对有机绝缘件表面产生电晕,使绝缘件老化、绝缘性能迅速下降,积累到一定程度使绝缘件击穿,发生闪络。

综上所述,由于 XGN17 型产品绝缘隔板结构设计不完善,特定条件下的长期运行中因表面凝露、积污和局部放电,使开关柜局部绝缘性能下降,最终绝缘击穿导致本次事故的发生。

4 整改措施

1) 排查开关柜内部导体穿过绝缘隔板的情况,参照 DL/T 404 - 2007《3.6 kV ~ 40.5 kV 交流金属封闭开关设备和控制设备》关于相间组合绝缘的要

求(10 kV 设备应不小于 30 mm,40.5 kV 设备应不小于 60 mm),对绝缘隔板开孔尺寸进行整改。

2) 加强开关柜的运行维护,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。

3) 目前执行的《基建工程项目验收作业标准》对开关柜内穿孔部分的复合绝缘空气间隙无具体的验收要求,仅以通过绝缘试验为验收依据,在验收中未能发现厂家的设计隐患,建议在《基建工程项目验收作业标准》增加对开关柜内复合绝缘空气间隙的验收要求。

5 结束语

通过对这起典型的 35 kV 开关柜复合绝缘事故原因的分析,可认识到: XGN17 型开关柜的设计仍需厂家继续完善并提高产品质量;运行单位在验收环节有必要增加对开关柜内复合绝缘空气间隙的要求;运行单位加强管理与维护工作,做好整改措施,避免再次发生同样的事故。

参考文献

- ① DL/T 404 - 2007,3.6 kV ~ 40.5 kV 交流金属封闭开关设备和控制设备 ②。
- ② DL/T 593 - 1996,高压开关设备的共用订货技术导则 ③。

(收稿日期:2013 - 09 - 27)

(上接第 74 页)

- ① H. Illias, G. Chen, P. L. Lewin. Modeling of Partial Discharge Activity in Spherical Cavities Within a Dielectric Material ②. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2011, 27(1): 38 - 45.
- ② Hazlee Illias, George Chen. Partial Discharge Behavior within a Spherical Cavity in a Solid Dielectric Material as a Function of Frequency and Amplitude of the Applied Voltage ③. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(2): 432 - 443.
- ③ H. A. Illias, G. Chen. Partial Discharge within a Spherical Cavity in a Dielectric Material as a Function of Cavity Size and Material Temperature ④. IET Science,

Measurement and Technology, 2012, 6(2): 52 - 62.

- ④ L. H. Germer. Electrical Breakdown between Close Electrodes in Air ⑤. Journal of Applied Physics, 1959, 30(1): 46 - 51.
- ⑤ 李华春,章鹿华,周作春. 应用有限元方法优化应力锥设计 ⑥. 高电压技术, 2005, 31(11): 55 - 58.
- ⑥ 阎照文. 工程电磁分析技术与实例详解 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- ⑦ 张榴晨. 有限元法在电磁计算中的应用 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1996.
- ⑧ 刘子玉、王惠明, 电力电缆结构设计原理 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1995.

(收稿日期:2013 - 08 - 12)

基于支持向量机的变电设备缺陷发生率的预测及应用

陈义刚, 徐厚东

(国网四川省电力公司, 四川 成都 610041)

摘 要: 缺陷预测是设备管理中的重要内容。变电设备由于运行环境复杂, 设备缺陷发生的随机性较大。基于支持向量机理论, 采用数据挖掘技术, 通过对设备运行环境和缺陷发生率的统计分析, 利用支持向量机建立设备缺陷平均发生率与设备运行环境的回归函数, 回归结果与实际情况较为吻合。对给定运行环境下设备缺陷平均发生率进行预测, 预测误差小于 10%, 对设备的运行维护管理具有较高的参考价值。

关键词: 支持向量机; 设备缺陷管理; 发生率; 预测

Abstract: Defect prediction is the important content of the equipment management. Due to the complex operating condition of transmission and distribution equipment, the randomness of the occurrence of defects is high. Based on the theory of support vector machine, the operating condition and defect occurrence rate of the equipment are analysis using data mining technology, and the regression functions for the average defect occurrence rate and the operating condition are established using support vector machine, whose regression results coincide with the actual situation. The prediction for the average occurrence rate of equipment defects under the given operating condition is carried out and the prediction error is less than 10%, which is of valuable reference for the management of the operation and maintenance of the equipment.

Key words: support vector machine; management of equipment defect; occurrence rate; prediction

中图分类号: TM866 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)06-0075-03

0 引 言

变电站是电力系统的重要枢纽, 变电设备的安全稳定运行是确保电力系统可靠供电的重要基础。设备的缺陷管理是运行管理的重要组成部分, 是提高设备完好率的重要手段, 是编制设备修、试、校计划的主要依据。设备缺陷管理也是安全生产管理的重要内容之一。随着变电设备的大量增加, 每年发生的设备缺陷也急剧增加。大量增加的设备缺陷需要消耗大量的运维力量。科学预测设备缺陷的发生率, 及时制定有针对性的措施, 对于保障设备的安全稳定运行具有重要的意义。

由于设备的运行环境较为复杂, 统计样本量较少, 对设备缺陷发生率的预测一般较为困难。近年来, 随着支持向量机技术的发展, 支持向量机在少量样本的回归分析和预测中得到了快速发展和应用, 为科学预测设备缺陷发生率提供了一种新的方法和手段。采用支持向量机, 利用设备的历史运行环境

数据和缺陷发生率进行回归分析, 建立设备缺陷发生率与设备运行环境的回归函数, 对设备缺陷发生率进行预测和分析, 为设备的运行维护管理提供参考。

1 支持向量机原理^[1,2]

支持向量机是数学挖掘中的新方法, 它是建立在统计学基础之上的通用学习方法, 专门针对小样本情况下研究机器学习规律的理论, 目前已较多地应用于工程预测和综合评价等诸多领域。

回归问题可以表述为, 通过给定的观测样本集 $T = \{ (x_1, y_1), \dots, (x_i, y_i) \}$ 寻找一个回归函数 $f \in F$, 使得关系 $y = f(x)$ 损失风险最小。

其中, $x_i \in R^n$, 是输入指标向量; $y_i \in R$, 是输出。

回归问题的目的是, 给定一个新的输入 x , 根据已知观测集所蕴含的关系, 推断它所对应的输出 y 值。

支持向量机方法最初是以解决分类问题为出发点的, 通常选择 ε 为不敏感损失函数。即

$$\begin{aligned} c[y, f(x)] &= |y - f(x)| - \varepsilon \\ &= \max\{0, |y - f(x)| - \varepsilon\} \end{aligned} \quad (1)$$

当 x 点的观测值 y 与预测值 $f(x)$ 之差不超过事先给定的 ε 时,认为在该点的预测值 $f(x)$ 是无损失的。

支持向量机进行回归分析时,限定回归函数在线性函数集合中进行选取。当观测样本不能用线性函数进行回归时,支持向量机先将观测样本 (x_i, y_i) 映射到一个高维的 Hilbert 空间中 $(\Phi(x_i), y_i)$, 然后再对映射后的样本集进行线性回归。即,令

$$z = \Phi(x) \quad (2)$$

支持向量机的线性回归函数一般为

$$f(x) = w \cdot z + b, w \in R^n, b \in R \quad (3)$$

基于结构风险最小化原则,回归问题转化为下列最优化问题。

$$\begin{aligned} \min_{w \in R^n, \zeta, \zeta^*, b \in R} & \frac{1}{2} \|w\|^2 + C \sum_{i=1}^k (\zeta_i + \zeta_i^*) \\ \text{s. t. } & [w \cdot z_i] + b - y_i \leq \varepsilon + \zeta_i \\ & y_i - [w \cdot z_i] + b \leq \varepsilon + \zeta_i^* \\ & \zeta_i, \zeta_i^* \geq 0 \end{aligned} \quad (4)$$

其中, $\|w\|^2$ 表示置信范围,体现了函数集的表达能; $\sum_{i=1}^k (\zeta_i + \zeta_i^*)$ 体现了经验风险; C 为惩罚因子,最小化这两项之和体现了结构风险最小化思想; ζ_i, ζ_i^* 为松弛变量的上下限,体现了不敏感损失函数的应用。

根据对偶原理,引入式(3)的对偶问题如下。

$$\begin{aligned} \min_{\alpha, \alpha^* \in R^k} & \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^k (\alpha_i^* - \alpha_i) (\alpha_j^* - \alpha_j) (z_i \cdot z_j) + \\ & \varepsilon \sum_{i=1}^k (\alpha_i^* + \alpha_i) - \sum_{i=1}^k y_i (\alpha_i^* - \alpha_i) \\ \text{s. t. } & \sum_{i=1}^k (\alpha_i^* - \alpha_i) = 0 \\ & 0 \leq \alpha_i^*, \alpha_i \leq C \end{aligned} \quad (5)$$

利用序列最小最优化算法可得到最优解 α_i^* 和 α_i , 并根据 KKT 条件计算得到 $\bar{b}$, 从而回归函数的表达式如下。

$$f(x) = \sum_{i=1}^k (\alpha_i^* - \alpha_i) (\Phi(x_i) \cdot \Phi(x)) + \bar{b} \quad (6)$$

即

$$\begin{aligned} f(x) &= \sum_{i=1}^k (\alpha_i^* - \alpha_i) (\Phi(x_i) \cdot \Phi(x)) + \bar{b} \\ &+ \sum_{i=1}^k (\alpha_i^* - \alpha_i) K(x_i, x) + \bar{b} \end{aligned} \quad (7)$$

式中, $K(x_i, x)$ 为支持向量机的核函数。常用的核函数有多项式核函数、高斯径向基函数核函数、B 样条

核函数、傅里叶核函数、Sigmoid 核函数等。

2 变电设备缺陷发生率的支持向量机模型

变电设备缺陷的产生除设备本身质量原因外,与设备的运行环境具有很大的关系。设备本身的质量原因而引起的设备缺陷的概率接近于一个常数,因此,变电设备的缺陷发生率受设备的运行环境影响较大,是设备运营环境的函数。

根据变电设备的运行特点,影响设备的运行环境通常主要包括设备的运行负荷、运行年限、温度、湿度、污秽情况、海拔等。将不同地区变电设备的运行环境作为输入向量,将各地区变电设备的缺陷发生率作为输出量,根据观测到的历史数据,通过支持向量机理论进行机器学习,建立回归模型,并利用该模型,对给定的运营环境下的设备缺陷发生率进行预测,从而进一步指导变电设备的运行和维护。

近年来,随着中国电力设备制造企业的不断发展,技术不断进步,电力设备运行中发生缺陷的情况越来越少。对于单台变电设备而言,发生缺陷具有较大的偶然性。根据统计学原理,为了得到更为准确的概率,需要更多的运行样本。但是,根据电力系统设备的运行特点,相同运行环境下,型号、容量等参数完全相同的设备几乎没有。因此,需要对设备和设备的运行环境做一些近似处理。

设备缺陷发生率,通常按照设备类型,如变压器、断路器等,来统计设备的平均缺陷发生率。在电力系统的生产运行中,也常常采用平均缺陷发生率。

设备的平均缺陷发生率定义如下。

$$P_i = N_i / T_i \quad (8)$$

式中, P_i 表示某类设备的缺陷发生率,项/台; N_i 表示该类设备当期发现的缺陷总数,项; T_i 表示当期该类设备的总数量,台。

根据设备平均缺陷发生率的概念,设备的运行环境可采用统计平均值来近似。根据统计学的原理,通常采用统计区域内设备的平均负载率、平均运行年限、平均运行温度、平均运行湿度、平均污秽等级、平均海拔等,作为本地区设备的运行环境。

$$E_i = \sum (e_i \cdot n_i) / N \quad (9)$$

式中, n_i 表示运行于环境值为 e_i 的设备数量; N 为该类设备总数量。

将历史统计得到的设备运行环境参数平均值和设备缺陷平均发生率进行归一化处理后,构造样本集 (E, P) ,利用支持向量机进行机器训练后,得到设备缺陷平均发生率的预测模型为:

$$P(e) = \sum_{i=1}^k (\bar{\alpha}_i^* - \bar{\alpha}_1) K(e_i, e) + \bar{b} \quad (10)$$

3 变电设备缺陷发生率的预测和应用

对国网四川省电力公司2012年1月至2013年9月变压器的平均缺陷发生率以及变压器的平均运行负载率、平均运行温度、平均运行湿度、平均海拔高度等运行环境进行统计,并作为样本,基于支持向量机理论,选择高斯径向基函数作为核函数,通过适当调整支持向量机的训练参数(本例中选取 $e - \text{SVR}$,核函数 gamma 函数设置取7,损失函数设置选5),建立支持向量机变电设备缺陷发生率回归模型。回归分析得到的变压器缺陷平均发生率与实际缺陷平均发生率结果如图1。

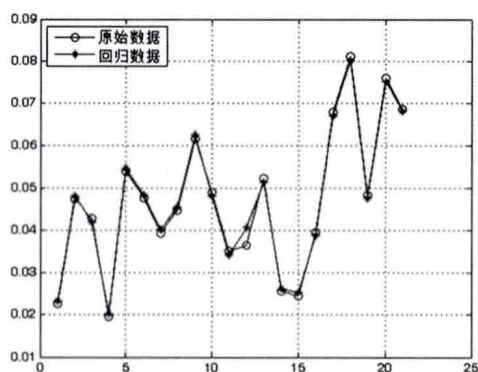


图1 支持向量机对变压器缺陷平均发生率的回归分析

通过图1可以看出,利用支持向量机对变电设备缺陷进行回归分析,大部分回归点可以得到较为理想的结果,回归分析平均方差为0.02%。设备缺陷平均发生率与实际情况的变化趋势基本一致。

根据四川电网的负荷分析和气象分析,得到四川电网的2013年10月设备运行环境参数,代入上述回归模型,得到国网四川省电力公司10月份变压器缺陷平均发生率的预测值,输出如下。

$$\text{Mean squared error} = 0.287\ 408 \text{ (regression)}$$

$$\text{预测数据} = 0.047\ 7$$

根据国网四川省电力公司2013年10月份变压器实际运行缺陷统计,计算得到10月份变压器的实际缺陷平均发生率为0.051 9。回归模型预测值与

实际值相差仅0.42个百分点,回归预测误差为

$$\left| \frac{\Delta p}{p} \right| = \left| \frac{P_{\text{预测}} - P_{\text{实际}}}{P_{\text{实际}}} \right| \times 100\% = 8.1\% \quad (11)$$

因此,该回归模型可以在变电设备运维管理中提供较为准确的参考。

由于设备缺陷发生率是一种概率,实际设备缺陷的发生还受很多随机因素的影响,因此,预测值与实际值之间还存在着一定的偏差,尤其是在设备量较少的地区。

根据全省变电设备缺陷发生率的统计数据得到回归模型,也可以对地市公司设备的运维进行预测和分析。对某一地区设备未来的运维环境进行预测后,代入支持向量机的预测模型式(10),便可以得到该地区设备故障平均发生率,从而可以进一步指导该地区设备的运维。

4 结 论

变电设备由于运行环境复杂、技术更新快,具有参考价值的设备缺陷平均发生率统计样本较少。支持向量机由于在解决小样本条件下机器学习的问题具有较好的应用。因此,利用支持向量机理论,对变电设备运行环境和缺陷平均发生率进行回归分析,建立变电设备缺陷平均发生率预测模型,得到的预测值与实际值较为接近,预测效果较为理想。在给定运行环境下,能够较为准确地预测出设备缺陷的平均发生率,对设备的运行、维护和抢修等管理具有较大的参考价值。

参考文献

- [1] 田英杰. 支持向量回归机及其应用研究 [M]. 北京: 中国农业大学, 2005.
- [2] 刘庆彪, 张步涵, 王凯, 等. 电价预测的自适应支持向量机方法研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(22): 34-39.
- [3] 张华, 曾杰. 基于支持向量机的风速预测模型研究 [J]. 太阳能学报, 2010, 31(7): 928-932.
- [4] 陈沅涛, 徐蔚鸿, 吴佳英. 一种增量向量支持向量机学习算法 [J]. 南京理工大学学报: 自然科学版, 2012, 36(5): 873-878.
- [5] 邓乃杨, 田英杰. 数据挖掘中的新方法——支持向量机 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.

作者简介:

陈义刚(1981),男,工程师,主要从事电力系统管理。

(收稿日期:2013-07-04)

智能识别和主动驱赶的防鸟害装置研究

曹永兴, 丁登伟

((国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072)

摘要: 研制了一种基于智能识别和主动驱赶的超声波智能驱鸟器, 用于防止输电线路遭受鸟害影响。驱鸟装置系统主要由探测模块、电源模块、控制模块和执行模块组成。该装置使用先进的多普勒雷达侦测技术和声音方向传感技术对鸟类进行侦测, 有效防护区域大, 当鸟类进入危险区域时进行有效驱赶。而且装置具有智能学习能力, 能有效地驱赶鸟类, 并防止鸟类的适应能力。

关键词: 输电线路; 鸟害; 超声波智能驱鸟器

Abstract: In order to prevent the transmission line from the threats of the birds, a kind of ultrasonic intelligent bird repeller is developed based on the intelligent recognition and initiative driving. The bird-driving device consists of the detection module, power source module, control module and execution module. The advanced Doppler radar reconnaissance technology and sound direction sensing technology are applied to detect the birds. The effective protection range is quite broad and the birds will be driven once they enter into the danger zone. The device has intelligent learning capability, which can effectively drive the birds away from the transmission line and respond to the adaption capability of the birds.

Key words: transmission line; bird-caused damage; ultrasonic intelligent bird repeller

中图分类号: TM81 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)06-0078-03

近年来鸟害故障已成为电力线路的频发性故障之一, 是影响电网安全的较大隐患之一。如何降低鸟类活动对架空输电线路等电力设备的危害, 促进人与自然、人与鸟类的和谐共处, 已成为电网企业开展架空输电线路运行维护工作所面临的一个新的社会课题。

四川电网地形以山地为主, 架空输电线路杆塔多数处于高山之中, 近年来, 随着经济开发规模的扩大, 林区越来越少, 造成鸟类在繁衍季节越来越依赖架空输电线路杆塔作为栖息地, 导致鸟害越来越严重。据统计, 2002年以来四川电网架空输电线路因鸟害跳闸事故发生了近100次。早期, 在电网规模较小, 鸟害尚不严重的阶段, 采用人员现场喊叫、敲锣、放鞭炮及发现鸟巢立即拆除等措施驱赶鸟类。随着电网规模的逐步扩大, 鸟害程度不断加重, 这种人工驱赶鸟类的方法既费人力又费物力, 而且需要长时间的坚持, 难以有效防治鸟害。

随着科学技术的发展, 电网逐步安装了一些风动式驱鸟器、磁动式驱鸟器、超声波语音驱鸟器和防鸟刺驱鸟器等, 取得了一定的效果。但是, 经过一段时间的现场应用, 发现这种措施存在以下缺点:

1) 虽然在安装点处没有再次发生鸟害故障, 但

在安装点下的绝缘子上仍发现有新鸟粪;

2) 风动式驱鸟器、防鸟刺驱鸟器等使用一段时间后惊鸟效果不大, 原因是鸟对该类驱鸟装置产生了适应性, 若不加以改进, 防鸟害效果将难以为继;

3) 超声波语音驱鸟器使用中会产生音源效应, 不适宜在居民密集区的杆塔上安装使用。

为了弥补此前各种防鸟害设备的运行弊端, 研制了一种基于智能识别和主动驱赶的超声波智能驱鸟器, 用于防止输电线路遭受鸟害影响。该系统采用微波雷达探测, 误报率低, 探测立体角度大, 防鸟害效果显著。

1 智能超声波驱鸟装置的设计与实现

超声波驱鸟是通过放超声波刺激鸟类的神经系统, 使其生理紊乱逃离, 故没有地域性限制, 适合大范围的推广应用。在实际应用中还可通过不断变换超声波频率降低鸟类的适应性。此外, 由于超声波频率高于人耳所能听到的范围, 所以能尽量减少其对人类生活造成的影响。采用定时工作方式的驱鸟装置会加快鸟类对驱鸟装置的适应速度, 采用探测方式可减缓这方面影响。设计的智能超声驱鸟装置

包含探测模块、电源模块、控制模块和执行模块,以下将分别介绍每个模块的工作原理。

1.1 探测模块

研制的智能超声驱鸟装置采用微波多普勒雷达对飞鸟进行探测,原理如图1所示。雷达发射固定频率 f_0 的微波对空扫描,如遇到活动的飞鸟,回波频率与发射波频率出现频率差 f_d ,称为多普勒频率。根据 f_d 的大小,可测出飞鸟对雷达的径向相对运动速度。采用频率过滤方法检测目标 f_d 谱线,可滤除干扰杂波的谱线,从强杂波中分辨出飞鸟目标。所以多普勒雷达具有很强抗杂波干扰能力,能探测出复杂环境背景中活动的飞鸟。 f_d 的计算式为

$$f_d = 2v \times \frac{f_0}{c} \times \cos\theta \quad (1)$$

式中, v 为目标速度; c 为光速, $c = 3 \times 10^8$ m/s; θ 为飞鸟移动方向与微波辐射方向间的夹角。

设飞鸟朝微波辐射方向移动速度为 $1 \sim 3$ m/s,则 f_d 在 $70 \sim 210$ Hz之间。通过对多普勒信号进行选频放大和门限判决后就能获得能够反应飞鸟活动情况的数字脉冲输出,为下一步的单片机驱鸟动作提供依据。

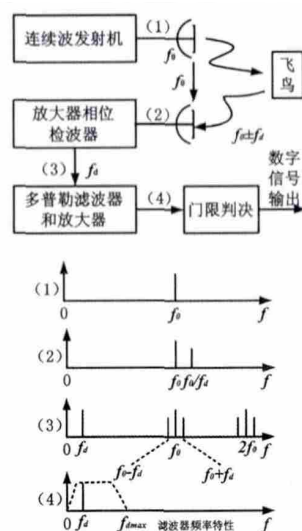


图1 微波多普勒雷达飞鸟探测原理

微波多普勒雷达模块由微波移动传感器和多普勒信号处理电路组成。微波移动传感器采用的是X波段移动传感多普勒模块HB100,它集成了振荡器、混频器、发射和接收天线,仅需提供5V电源便可直接输出毫伏级的多普勒信号。

多普勒信号处理电路如图2所示。主要负责提取、放大、数字化能反应塔杆附近飞鸟活动情况的多普勒信号,再提交给单片机处理。图中,R为微波

移动传感器的额定负载。C2、C5实现了电路各部分的直流隔离,抑制低频波动,C1滤除微波移动传感器高频杂波,从而提取出能反应塔杆附近飞鸟活动情况的多普勒信号。

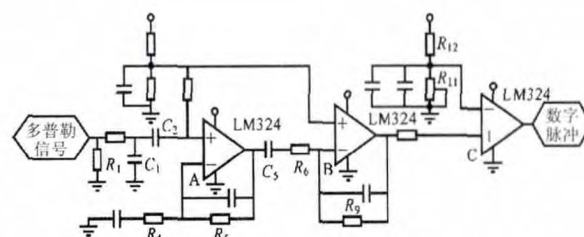


图2 多普勒信号处理电路

由LM324A及相关元件组成第1级放大电路,其增益 $A \approx R_5/R_4 = 1\ 000$;第2级放大器由LM324B及相关电路组成,增益 $B \approx R_9/R_6 = 62$;两级放大增益 $C = A \times B = 62\ 000$,约48 dB。由LM324C及R12,R11组成的电压比较器,把前级放大的信号变换成数字脉冲信号,调整R11可改变探测距离大小。

1.2 控制模块

智能超声驱鸟装置的控制模块由单片机PIC16C54和基本的外围电路组成,主要负责白天/夜间模式选择,接收雷达信号,驱动执行模块工作驱赶飞鸟等。根据白天晚上驱鸟目的的不同,系统设置了两种工作模式。图3为系统工作流程。

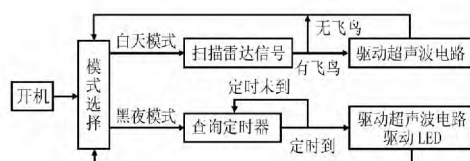


图3 系统工作流程图

白天主要防止鸟类碰撞输电线路及在绝缘子上端停留排泄粪便污染绝缘子等。系统采用主动探测模式工作。微波多普勒雷达主动探测靠近塔杆的飞鸟等活动小目标,单片机在收到活动信号后,产生变频超声波信号。该信号经放大换能电路处理后向塔杆四周播放,驱赶飞鸟。晚上主要是阻止鸟类在塔杆栖息,由于夜间鸟类在塔杆上基本不活动,此时雷达探测关闭,系统切入定时工作状态,以降低功耗。每隔一段时间,单片机驱动超声波换能电路向塔杆四周播放高分贝超声波,驱动强闪光模块闪烁刺眼白光,打断鸟类休息,直至鸟类无法忍受,离开塔杆。

1.3 执行模块

智能超声驱鸟装置的执行模块中超声波放大电路采用由TIP127和TIP122组成的推挽式功率放大

电路,配合专用的超声波换能器,可将单片机发出的具有超声波频率的信号,转换成120 dB以上的超声波播放出来,刺激鸟类神经系统,使其生理紊乱而逃离。强闪光模块由大功率白光LED(3 W)和驱动电路组成。采用大功率场效应管BUZ91A驱动,可通过单片机的高低电平直接控制LED的亮灭,亮度大于300 lm,产生的强光可照亮塔杆附近,恶化鸟类栖息环境,防止鸟类在杆塔上栖息和筑巢。

1.4 电源模块

智能超声驱鸟装置采用太阳能供电。太阳能供电系统由太阳能电池板、控制电路和蓄电池组成。太阳能电池板是供电系统的核心部分,其作用是将太阳辐射能转换为电能,推动电路工作或送往蓄电池中存储起来;控制电路的作用是控制整个供电系统的工作状态,包括太阳能电池板输出电压与蓄电池充电电压(电路工作电压)之间的转换,对蓄电池的过充电和过放电保护等;蓄电池采用免维护铅酸电池作为太阳能电池板的补充,在光照充足时将多余的电量存储起来,在阴雨天等需要的时候再释放出来,保证驱鸟装置系统能持续且稳定地工作。

2 智能超声波驱鸟装置的实际运用

2012年10月,某电业局发生一起典型鸟害引发输电线路跳闸的案例。220 kV某线跳闸,双纵联保护动作,重合成功,选相C相。线路专业技术人员分析了本次跳闸事件,经过对雷电活动、外力破坏、线路通道以及登塔巡查情况的分析,发现本次跳闸是一起鸟害事故,现场如图4所示。



图4 鸟害导致事故的现场图片

经建议该局在该线路杆塔上安装了所研制的智能超声驱鸟装置,装置如图5所示。智能超声驱鸟装置现场安装如图6所示。经过近1年的运行时间,该线路在未发生因鸟害引起的跳闸事故。

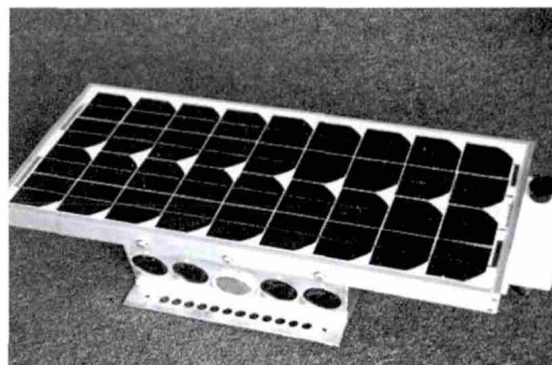


图5 智能超声驱鸟装置



图6 智能超声驱鸟装置现场安装照片

3 结语

成功研制了一种基于微波多普勒雷达的智能超声波驱鸟装置。通过改进传统驱鸟装置的探测和驱鸟方式,使得该系统具有驱鸟效果持续时间长、成本低、可靠性高、免维护等优点,有较好的应用前景。在此基础上,可根据需要为系统加装无线远传控制模块,使其具备提供系统开关、电池电压检测、驱鸟记录查询等远程服务,方便系统的维护和测试。

参考文献

- [1] 易辉,熊幼京,周刚,等. 架空输电线路鸟害故障分析及对策[J]. 电网技术,2008,32(20):95-100.
- [2] 郭伟跃. 美国输电线路和变电站电气设备防鸟害措施[J]. 中国电力,2006,39(8):82-84.
- [3] 杨挺,蔡柏林. 鸟害引起输电线路地线断线的原因分析及对策[J]. 广东电力,2006,19(12):72-75.
- [4] 安光辉,覃朝云,张建军,等. 浅析输电线路防鸟害工作[J]. 华北电力技术,2008,12(1):46-48.
- [5] 高虹亮,马超. 输电杆塔智能防鸟害装置的研发[J]. 三峡大学学报,2012,34(3):56-59.
- [6] 代晓光,杨振伟,谢平,等. 输电线路鸟害防治对策[J]. 广东电力,2011,24(4):47-50.
- [7] 张涛,方宏. 输电线路鸟害综合治理措施分析[J]. 南京工程学院学报,2010,8(4):68-72.
- [8] 李功新. 输电线路驱鸟器的研制[J]. 电网技术,2006,30(3):94-97.

(收稿日期:2013-08-26)

一起典型 35 kV 开关柜复合绝缘击穿 事故分析及整改措施

陈海平

(华能海南发电股份有限公司,海南 海口 570105)

摘 要:35 kV 高压开关柜广泛应用于变电站,其可靠的工作有着至关重要的意义。针对某一 220 kV 变电站 35 kV 开关柜绝缘击穿放电事故,对事故发生、现场检查、原因分析依次进行了详细的介绍和讨论。研究表明,开关柜绝缘隔板结构设计不够完善,特定条件下的长期运行时造成的局部绝缘性能下降,是此次事故的主要原因。最后,针对事故原因提出了有效的整改措施。

关键词: 开关柜; 复合绝缘; 击穿; 放电; 整改措施

Abstract: 35 kV HV switchgear cabinet is widely used in the substations, and its reliability has a substantial significance. An insulation breakdown of 35 kV switchgear cabinet in 220 kV substation is investigated. The accident process, field inspection and primary causes are introduced and discussed respectively. The design defects of the insulating barrier in switchgear cabinet, and the reduction of the partial insulating performance are considered to be responsible for this accident. In the end, the rectification measures are proposed for preventing the occurrence of the same accident.

Key words: switchgear cabinet; composite insulation; breakdown; discharge; rectification measure

中图分类号: TM864 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2013)06-0081-03

0 引 言

35 kV 高压开关柜是电力系统的重要设备之一,其运行状态对电力系统的可靠性有着重大影响。对某 220 kV 变电站 2012 年 7 月发生的一起 35 kV 高压开关柜复合绝缘缺陷导致的事故进行分析,并提出相关整改措施,为预防类似事故再次发生起到一定的作用。

1 开关柜绝缘击穿事故过程

1.1 事故经过

事故发生前,天气阴,变电站 1、2 号主变压器高、中压侧并列运行,35 kV 侧分列运行。事故发生时变电站无操作。2012 年 7 月 19 日 14 时 35 分,2 号主变压器 35 kV 侧发生 A、B 相间短路,20 ms 后发展成三相短路,在故障 822 ms 后主变压器低后备复压过流 I 段 I 时限动作跳 35 kV 分段 310 断路器(事故前 310 断路器处于热备用状态),1 122 ms 后 2 号主变压器低后备复压过流 I 段 II 时限动作跳主

变压器低压侧 312 断路器,切除 3122 隔离开关处的短路故障,故障 1 183 ms 后主变压器差动保护动作,跳开 2 号主变压器高压侧 212 断路器、中压侧 112 断路器和低压侧 312 断路器,1 293 ms 后主变压器重瓦斯保护动作,跳 212、112 和 312 断路器。事故造成 35 kV 312 开关柜损坏和 2 号主变压器停运,未造成负荷损失。

1.2 现场检查情况

对事故现场进行勘察发现事故点位于 35 kV 开关室 312 开关柜 3122 隔离开关静触头接线板处。进入 312 开关柜内详细检查发现,3122 隔离开关静触头附近的连接铜排、绝缘隔板、支柱绝缘子、部分二次接线受损。连接铜排烧出缺口,绝缘隔板表面烧损碳化严重,支柱绝缘子瓷裙炸裂损坏,开关柜内部分二次接线烧损,312 断路器和电流互感器检查未发现异常。

2 故障点的查找和故障过程的分析

2.1 故障点查找和确定

首先,对故障录波图进行分析,排除了保护误动

的可能,并将低压侧电流录波起始部分放大(见图1),可看出在一个周波(20 ms)内A、B相电流大小相同方向相反,可确定低压侧A、B相发生了相间短路,一个周波后发展成了对称的三相短路。

然后,重点对低压侧进行了排查。打开312开关柜后,综合现场情况确定了故障点为35 kV开关室312开关柜3122隔离开关静触头接线板处。

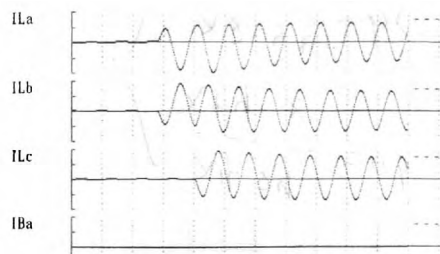


图1 低压侧电流录波图

2.2 故障发展过程的分析

该故障开关柜型号为XGN17-40.5,为国内一家专业开关柜生产厂家,其本次事故开关柜的内部结构如图2所示。

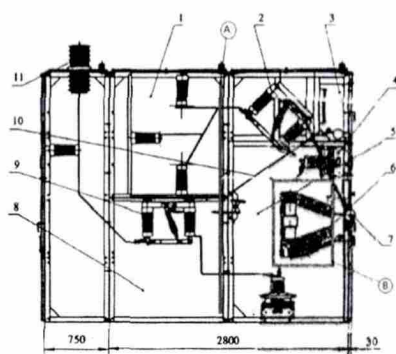


图2 35 kV侧312断路器柜结构示意图

图2中,1为主母线室;2为上隔离开关;3为仪表室;4为电流互感器;5为断路器室;6为真空断路器;7为手操机构;8为电缆室;9为下隔离开关;10为挡板(SMC);11为穿墙套管。

从事故现场情况看,开关柜内部烧损较为严重之处在图中A绝缘板上部母线贯穿位置,母线贯穿部位绝缘板板面熏黑,绝缘板绝缘性能基本丧失,事故中上隔离开关损坏,其余柜内312断路器和电流互感器事后检查未发现异常。

由录波图可知A、B相首先发生相间短路,通过现场发现3122隔离开关静触头接线板处烧熔和A、B相间绝缘板表面沿面放电碳化痕迹,可知,A、B相间短路的起始放电通道为绝缘隔板沿面击穿部位。

A、B相击穿短路到三相短路的发展过程如下

所述:绝缘隔板和绝缘热缩套表面在吸尘和受潮的情况下绝缘强度下降,电场作用下形成A相连接板裸露处-A相开孔处气隙-沿绝缘隔板表面-B相开孔处气隙-B相连接板裸露处的放电通道,导致A、B相击穿短路,迅速导致B、C相之间绝缘降低,形成三相短路,为一起典型的复合绝缘(小空气间隙和固体绝缘材料的表面)引起的设备事故。

3 故障原因分析

3.1 开关柜设计缺陷

图3为绝缘隔板正视图,故障部位内部绝缘由以下几部分组成。

1) 支柱绝缘子,长度400 mm,爬电距离960 mm;2) 导电母排的周围柜体的空气间隔,最小处330 mm;3) 导电母排间的空气间隔,360 mm;4) 导电母排间的绝缘隔板的沿面间隔,352 mm。

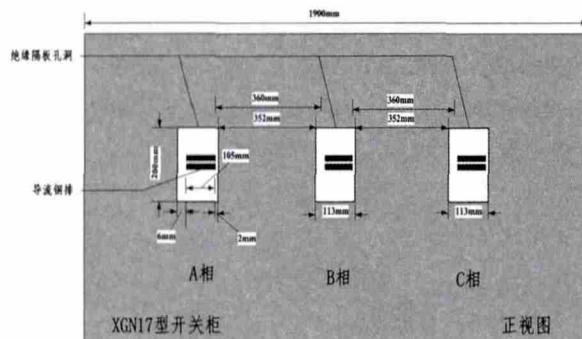


图3 绝缘隔板正视图

XGN17型产品出厂前,全部经过95 kV/1 min的工频耐压试验(含极间和对地耐压试验),满足DL/T 404-2007中第5.103.3非金属隔板和活门的相关条款的试验要求;本次事故开关柜相间最小空气间距达到360 mm,对地实测大于330 mm,带电体至门实测大于330 mm,满足DL/T 404-2007中第5.106对最小空气间隙的要求^[1]。

本案中XGN17型开关柜是采用空气绝缘方式设计,柜体结构中的A处绝缘板是因检修安全而设置,参照相应标准条款发现此处是绝缘最薄弱的地方,其有两点不满足要求:1) 导电铜排穿过绝缘隔板的孔洞与绝缘挡板间的空气间隙极小,靠近放电通道一侧仅为2 mm,DL/T 404-2007《3.6 kV~40.5 kV交流金属封闭开关设备和控制设备》要求不小于60 mm^[1];2) 绝缘隔板相间绝缘所需的沿面爬电距离为352 mm,DL/T 593-1996标准要求不

小于 770 mm^②。

3.2 综合原因分析

通过以上分析认为,该公司生产的 XGN17 - 40.5 产品仅 A 处的绝缘隔板不满足规程规定,尽管存在设计隐患,但仍通过了出厂试验和现场验收试验,为什么 A 处绝缘板在运行 3 年后形成沿绝缘板表面击穿的现象,可从以下方面分析。

1) A 处绝缘板的布置与三相母线相垂直,虽然不增加相间绝缘的绝缘介质,但在特定条件下,如高海拔、表面积尘、空气湿度过大、凝露等影响下,可能会导致绝缘板表面绝缘性能的下降,相当于降低了相间或相对地的空气绝缘距离。

2) 当出现上述特定的情况时,绝缘板可等效为一个接近于地电位或高阻接地的状态,此时,相间电压会全部施加于导体与绝缘板间很小的空气间隙,导致场强相对集中,可能引发局部放电,长期对周围的设备元件电离腐蚀,尤其是长期对有机绝缘件表面产生电晕,使绝缘件老化、绝缘性能迅速下降,积累到一定程度使绝缘件击穿,发生闪络。

综上所述,由于 XGN17 型产品绝缘隔板结构设计不完善,特定条件下的长期运行中因表面凝露、积污和局部放电,使开关柜局部绝缘性能下降,最终绝缘击穿导致本次事故的发生。

4 整改措施

1) 排查开关柜内部导体穿过绝缘隔板的情况,参照 DL/T 404 - 2007《3.6 kV ~ 40.5 kV 交流金属封闭开关设备和控制设备》关于相间组合绝缘的要

求(10 kV 设备应不小于 30 mm,40.5 kV 设备应不小于 60 mm),对绝缘隔板开孔尺寸进行整改。

2) 加强开关柜的运行维护,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。

3) 目前执行的《基建工程项目验收作业标准》对开关柜内穿孔部分的复合绝缘空气间隙无具体的验收要求,仅以通过绝缘试验为验收依据,在验收中未能发现厂家的设计隐患,建议在《基建工程项目验收作业标准》增加对开关柜内复合绝缘空气间隙的验收要求。

5 结束语

通过对这起典型的 35 kV 开关柜复合绝缘事故原因的分析,可认识到: XGN17 型开关柜的设计仍需厂家继续完善并提高产品质量;运行单位在验收环节有必要增加对开关柜内复合绝缘空气间隙的要求;运行单位加强管理与维护工作,做好整改措施,避免再次发生同样的事故。

参考文献

- ① DL/T 404 - 2007, 3.6 kV ~ 40.5 kV 交流金属封闭开关设备和控制设备 ②。
- ② DL/T 593 - 1996, 高压开关设备的共用订货技术导则 ③。

(收稿日期: 2013 - 09 - 27)

(上接第 74 页)

- ① H. Illias, G. Chen, P. L. Lewin. Modeling of Partial Discharge Activity in Spherical Cavities Within a Dielectric Material ②. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2011, 27(1): 38 - 45.
- ② Hazlee Illias, George Chen. Partial Discharge Behavior within a Spherical Cavity in a Solid Dielectric Material as a Function of Frequency and Amplitude of the Applied Voltage ③. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(2): 432 - 443.
- ③ H. A. Illias, G. Chen. Partial Discharge within a Spherical Cavity in a Dielectric Material as a Function of Cavity Size and Material Temperature ④. IET Science,

Measurement and Technology, 2012, 6(2): 52 - 62.

- ④ L. H. Germer. Electrical Breakdown between Close Electrodes in Air ⑤. Journal of Applied Physics, 1959, 30(1): 46 - 51.
- ⑤ 李华春, 章鹿华, 周作春. 应用有限元方法优化应力锥设计 ⑥. 高电压技术, 2005, 31(11): 55 - 58.
- ⑥ 阎照文. 工程电磁分析技术与实例详解 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.
- ⑦ 张榴晨. 有限元法在电磁计算中的应用 [M]. 北京: 中国铁道出版社, 1996.
- ⑧ 刘子玉、王惠明, 电力电缆结构设计原理 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1995.

(收稿日期: 2013 - 08 - 12)

220 kV 内桥主接线开关失灵危害与对策

郭又华

(国网四川省电力公司检修公司, 四川 成都 610041)

摘要: 分析了作为终端变电站的220 kV内桥接线变电站进线开关、桥开关失灵可能带来的危害, 得出了必须配置开关失灵保护的结论。提出了包括失灵保护配置、二次接线在内的解决方案, 给出了失灵逻辑图, 并对其进行了分析。

关键词: 内桥接线; 开关; 失灵

Abstract: The damages of line breaker and bridge breaker failures in 220 kV substation with inner bridge connection which serves as a terminal one are analyzed. The proposal is offered that the breaker failure protection device should be installed. A solution scheme is proposed including failure protection configure and secondary wiring. The failure diagram is also provided and analyzed.

Key words: internal bridge connection; breaker; failure

中图分类号: TM643 **文献标志码:** B **文章编号:** 1003-6954(2013)06-0084-03

近年来,随着负荷密度增大,部分220 kV变电站深入负荷中心,演变为终端站。为节省投资,220 kV电气部分采用内桥接线。由于内桥主接线220 kV母差保护被取消,220 kV开关失去失灵保护。

失去失灵保护带来的问题已逐渐引起工程技术人员的重视。文献[1]讨论了220 kV内桥接线变电站保护基本配置,但只简要分析了合环运行方式下桥开关失灵保护配置,未对桥开关失灵的危害进行分析,对进线开关失灵情况并未提及,且其失灵保护的配置已不能够适应当前电网的要求。文献[2]提及了220 kV内桥变电站开关失灵时可能对主变压器造成的危害,并据此提出了失灵保护配置方案,但笔者认为对开关失灵的危害分析不够全面,尤其是对失灵保护的逻辑分析不够。根据保护整定规程的调整和“六统一”的要求,应重新梳理开关失灵危害,并有针对性地提出解决方案。

1 保护配置与运行方式

图1为一个220 kV内桥变电站与系统接线示意图。1DL为进线1开关,2DL为进线2开关,3DL为桥开关。R1、R2、R3、R4为安装于对应开关处的保护。保护配置通常为:线路全线速动主保护、相间距离I、II、III段、接地距离I、II、III段、零序II、III、IV段。主变压器保护通常包括差动保护、高后备、中

后备、低后备保护。

运行方式有4种。方式1:3DL分位,1DL、2DL合位,220 kV侧开环运行,220 kV投分段备自投;方式2:1DL、2DL、3DL均合位,通过3DL转供负荷;方式3:1DL分位,2DL、3DL合位,进线2带全站运行;方式4:2DL分位,1DL、3DL合位,进线1带全站运行。主接线采用内桥或扩大内桥接线形式的变电站在系统中一般为终端变电站,除特殊运行方式外,一般要开环运行^[3]。

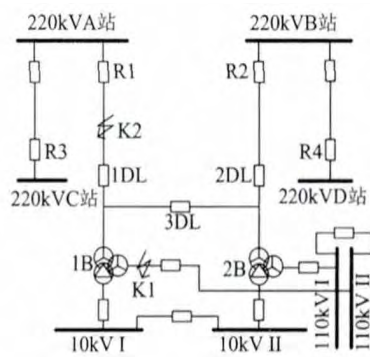


图1 系统接线图

2 开关失灵的危害

2.1 失灵致主变压器热稳定破坏

变压器作为电力系统中的重要电气设备,设计、制造及运行各环节都应注意其安全性。

假设主变压器中压侧套管处K1发生相间故障,

此时主变压器承受非常大的事故过电流。区内故障,主变压器差动保护正确动作于跳主变压器三侧开关。如果桥开关 3DL 和主变压器中、低压侧开关正确跳开,进线开关 1DL 失灵拒动,主变压器后备保护动作也不能使其脱离故障,只有通过安装于进线 1 对侧 A 站保护 R1 的后备保护动作隔离故障。如果发生失灵拒动的是桥开关 3DL,则只有通过进线 2 对侧 B 站保护 R2 的后备保护动作隔离故障。因后备保护带延时动作,所以变压器必然要承受一定时间段内的事故过电流,在此时间段内变压器是否损坏主要取决于变压器的热稳定性。对称短路电流 i 的持续时间,当使用部门未提出其他要求时,用于计算承受短路耐热能力的电流 i 的持续时间为 2 s [4]。

根据继电保护整定配合原则,保护 R1、R2 距离 I 段按本线路全长之 70% ~ 80% 整定,距离 II 段按确保线路末端发生金属性故障有足够灵敏度整定,保护范围不伸出变压器中压侧,距离 III 段按躲线路最大事故过负荷电流并确保本线路末故障有足够灵敏度整定,力争作为相邻线路和变压器的后备保护。因此,距离 I 段、距离 II 段都不会动作,只能等到距离 III 段动作。各地距离 III 段的时间定值整定原则基本相似,四川电网继电保护整定方案要求全网 220 kV 线路后备保护相间和接地距离 III 段按统一时限整定,相间距离 III 段时间取 5.5 s 。

显然,主变压器是不能经受如此长时间事故过电流。不仅会引起变压器绕组过热,还可能造成动稳定破坏,诱发严重的内部故障。

2.2 失灵致全站失压

变电站全站失压是非常严重的事故。全站失压是指在电力系统因故障而导致变电站各电压等级母线电压为零。全站失压不仅可能引起全站一、二次系统崩溃,对外大面积停电,甚至引发电网稳定问题,因此应极力避免全站失压发生。

假设内桥变电站运行方式为方式 2: 1DL、2DL、3DL 均合位,220 kV 侧合环运行,进线 1 和进线 2 为联络线,通过 3DL 转供负荷。

如果进线 1 纵联主保护范围内 K2 点故障,进线 1 纵联主保护动作,进线 1 对侧开关跳开而 1DL 失灵拒动。此时进线 2 将持续通过 3DL 向故障点 K2 注入故障电流,直到进线 2 对侧 R2 处后备保护动作跳开所在开关隔离故障点。由于进线 1 和进线 2 都已跳开失电,内桥站 220 kV 母线均失压。作为终端站的高压侧母线均失压,此时 110 kV 母线、10 kV

母线随即失压,变电站外部的故障导致本站全站失压事故。另外因为联络线被断开,导致局部功率失去平衡,可能发生局部过负荷或低电压等异常状态。

需要指出,主变压器后备保护可能并不会先于 B 站 R2 后备保护动作跳开 3DL 将故障点隔离开来。因为作为城市电网终端变电站,主变压器 110 kV 与 10 kV 侧通常没有小电源点,主变压器高后备保护电流回路来自套管 TA,虽然整定要求高压侧后备保护方向指向系统,但系统侧故障时,若中、低压测母联开关分裂运行,并无故障电流通过主变压器高压侧套管流向故障点,所以主变压器高后备不会动作跳开 3DL 将故障点隔离。即使 110 kV 或 10 kV 分段(母联)开关合位运行(为增大短路阻抗通常处于分位),故障电流通过主变压器阻抗支路分流,后备保护也可能因为灵敏度不足而不动作。

2.3 失灵致越级跳闸

尽管变压器各侧短路电流大于热稳定电流时,各侧设有不大于 2 s 的不经任何闭锁的过流保护,该保护作用于延时跳开变压器各侧开关。但是当主变压器高压侧开关失灵时,仍不得不由相邻线路对侧后备保护动作隔离故障点。由于 500 kV、220 kV 线路保护配置较为完善,主保护均采用双重化配置,所以后备保护按与主保护配合的原则整定,相邻线路的后备保护之间不完全配合。就图 1 举例而言,当内桥站 220 kV 母线故障而 1DL 失灵时,A 站 R1 后备 II 段可能动作、C 站 R3 后备 II 段也可能越级动作,R1 和 R3 后备 II 段也可能存在“接点竞赛”的情况而同时动作。同理,如果发生的是 2DL 失灵,B 站 R2 与 D 站 R4 后备保护也存在类似的动作关系。尤其是零序保护只作为高阻接地的后备保护,在系统运行方式变化时,其保护范围也不稳定,越级跳闸导致停电范围扩大,已有类似事故案例发生。

3 失灵解决方案

鉴于内桥接线变电站一次设备并无安装母差保护的的设备条件,而开关失灵又可能带来严重危害,故应对 220 kV 开关按开关配置独立的失灵保护装置。

3.1 进线开关失灵解决方案

以进线 1 开关 1DL 为例进行说明,2DL 与之类似。在 1DL 处配置一套断路器失灵保护装置。TA 电流取自 1DL 开关电流互感器,即进线 1 线路 TA 绕组,若电流互感器保护级绕组不足,则可串接于故

障录波电流回路之后。线路保护各分相跳闸接点应按相接入失灵保护装置,如果 220 kV 进线备自投装置配有合闸于故障后加速保护,则保护动作跳 1DL 接点应和主变压器电气量保护跳闸接点并联接入失灵保护装置发变三跳开入。

1DL 失灵保护动作后,以第一时限跳 1DL,第二时限跳桥开关 3DL 和本主变压器中、低压侧总路开关,跳闸出口回路均接开关操作箱 TJR 继电器。进线 1 区外故障而 1DL 失灵时,需要远跳对侧开关。线路保护采用光纤电流差动保护时,可将 1DL 开关操作箱 TJR 接点接入线路保护装置远跳开入,通过线路保护发远跳命令跳开对侧开关;在采用允许式纵联保护时,通过 TJR 接点向对侧发允许命令使对侧开关跳闸;采用闭锁式保护时,通过 TJR 接点停信使对侧开关跳闸。

3.2 内桥开关失灵解决方案

内桥开关 3DL 配置一套断路器失灵保护装置,电流回路引自桥开关电流互感器。因内桥开关多为三相联动开关,涉及跳桥开关的保护动作接点均接入失灵保护装置发变三跳启动失灵。如果 220 kV 分段备自投装置配有合闸于故障后加速保护,则保护动作接点同样接入 3DL 失灵保护装置发变三跳启动失灵。失灵保护动作后,第一时限跳桥开关,第二时限跳 1DL、2DL,跳闸出口均接相应开关操作箱 TJR 继电器。

需要指出,如果失灵保护动作后需要闭锁备自投装置,应增设相应的二次回路。

3.3 失灵逻辑

RCS-921A 断路器失灵保护逻辑已经比较完善,只需将其做部分修改以适应内桥变电站主接线的情况,图 2 为失灵逻辑图。逻辑图中“失灵电流高定值动作”表示 A、B、C 三相任一相失灵电流大于失灵高电流定值,“失灵电流低定值动作”则表示 A、B、C 三相任一相失灵电流大于失灵低电流定值,“零序电流满足”表示三倍零序电流大于失灵零序电流定值。

内桥开关适用发变三跳失灵逻辑,进线开关失灵则包括故障相失灵、非故障相失灵、发变三跳失灵 3 个逻辑。对于含有重合闸功能的线路保护,取消线路三相跳闸命令^[6],因此应取消线路三跳启动失灵逻辑。

应根据 TV 的安装位置,具体考虑是将电压回路接入装置。发变三跳启动失灵的低功率辅助判据

必须同时满足过流及低功率因数,任一相电压低于 30% 额定相电压时,退出该相低功率因数判据。



图2 失灵逻辑图

失灵动作经失灵跳本开关时间(第一时限)延时跳本开关,以失灵跳相邻开关时间(第二时限)延时跳相邻开关。

4 结 论

在 220 kV 内桥接线作为终端变电站考虑时,继电保护配置方面,不再配置 220 kV 母差保护。为了避免开关失灵时可能带来主变压器热稳定性破坏、变电站全站失压、保护越级跳闸等问题,应按开关配置失灵保护。失灵保护的逻辑包括故障相失灵、非故障相失灵、发变三跳失灵 3 种情形。进线开关失灵逻辑包括以上 3 种情况,而桥开关失灵逻辑只包括发变三跳失灵,根据线路保护“六统一”规范,摒弃线路三跳启动失灵逻辑。另外如果开关失灵装置不引入电压回路,则不启用失灵低功率因数判据。

参考文献

- [1] 金乐敏,何雪峰. 高压输电线路内桥接线方式的保护配置分析及方案 [J]. 电力系统自动化, 1997(12): 48-50.
- [2] 韩柳,谈顺涛. 220 kV 终端变电所的 220 kV 继电保护配置方案探讨 [J]. 继电器, 2005(11): 74-76.
- [3] 曹琥,汪若慧. 220 kV 变电站避免保护死区设计方案探讨 [J]. 云南电力技术, 2007(4): 29-30.
- [4] GB 1094.5-85, 电力变压器 [S].
- [5] Q/GDW 161-2007, 线路保护及辅助装置标准化设计规范 [S].

作者简介:

郭又华(1979),男,工学硕士,工程师,从事继电保护、电测仪表工作。

(收稿日期: 2013-07-23)

电容式电压互感器暂态特性校验

杨刚¹, 冉子凤¹, 文艺², 闫正³, 李建明³

(1. 国网广元供电公司, 四川 广元 628000; 2. 西华大学电气信息学院, 四川 成都 610039;
3. 国网成都供电公司, 四川 成都 611130; 4. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072)

摘要: 当电力系统中存在雷击或在操作过程时, 其高频暂态过电压会以静电感应和电磁耦合的方式从高压系统传递到低压系统, 这会给二次系统的测量、保护以及其他二次设备的运行造成严重的影响。在电容式电压互感器(CVT)暂态过电压传递特性试验研究和仿真模拟研究的基础上, 对高频过电压在 CVT 中的传递做了校验和分析, 并对传递特性试验和仿真过程遇到的问题做出了归纳总结, 可为过电压在线监测等工作提供借鉴。

关键词: 暂态过电压; 电磁耦合; 电容式电压互感器; 传递特性

Abstract: The high-frequency transient overvoltage will be propagated from the primary side to the secondary side by the effect of electrostatic induction and electromagnetic coupling usually, when the lightning stroke or the circuit breaker switching occurs in power system, which has a serious influence on the operation of monitoring, protection and other secondary equipment in the secondary system. Based on the test and the simulation for transfer characteristic of transient overvoltage in capacitor voltage transformer (CVT), the calibration and analysis for the transfer characteristic of high-frequency overvoltage in CVT are carried out. Finally, the questions during the research of transfer characteristic are summarized, which could provide a reference to overvoltage measurement such as online monitoring.

Key words: transient overvoltage; electromagnetic coupling; capacitor voltage transformer; transfer characteristic

中图分类号: TM866 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)06-0087-04

在进行电力系统暂态过电压在线监测时, 电容式电压互感器(capacitor voltage transformer, CVT)不仅是过电压分压系统的主要组成设备, 也是一次系统和二次系统之间的联接单元, 其暂态特性的响应情况对整个监测系统的测量精确度和可靠性有重要影响。由于 CVT 电磁单元中含有电感、电容等储能元件、铁芯等非线性元件以及高频时杂散电容的存在, 当一次系统中发生雷击或在操作过程时, 产生的暂态过电压通过静电感应和电磁感应作用从 CVT 的高压侧传递到低压侧, 并伴随有剧烈的高频振荡过程^[1]。高频状态与工频状态相比, 高压侧暂态过电压通过电压互感器后的输出电压存在较大差别, 也就是低压侧的电压波形会发生失真现象。所以, 有必要对 CVT 暂态过电压的暂态特性的响应进行研究。

1 CVT 的过电压传递特性

CVT 在正常工作时, 经电容分压单元分压后得到的中压输入电磁单元的一次侧, 其二次侧电压为

一次侧电压按一定变比降低的同频率电压, 电磁单元基本工作原理与变压器相似, 因此, 可以通过对单相变压器绕组波过程理论的分析, 得到 CVT 电磁单元在冲击电压作用下线圈中过电压的传播特性。暂态过电压传播主要包括静电感应、电磁感应和自由振荡 3 个过程^[2], 一般情况下, 这 3 个过程不是同时发生同时消失的, 但总是以某一种过程为主。

1.1 静电感应过程

电压互感器暂态过电压的静电感应过程是一种电容传递方式, 是由于互感器存在绕组匝间、层间电容和对地电容, 暂态过电压通过这些电容以静电传递的方式耦合到互感器的二次侧。静电感应电压为瞬间形成, 它主要取决于互感器的结构和线圈的布置, 是互感器绕组中的初始电压分布。冲击电压作用下, 互感器电感中的电流不能突变, 相当于是断开的。因而整个电压互感器的等值电路可以简化为一个电容链。假定电容参数沿线圈均匀分布, 冲击过电压入侵互感器绕组的电容耦合电路如图 1 所示。图 1 中, C_1 、 C_2 为一、二次绕组的对地电容; K_1 、 K_2 为

一、二次绕组的纵向电容; C_{12} 为一、二次绕组之间的电容。

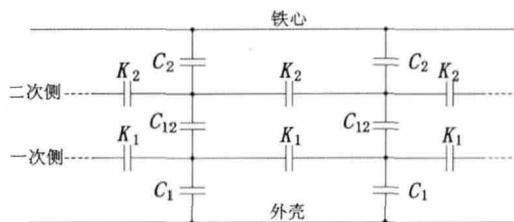


图1 绕组静电感应简化等值电路

1.2 电磁感应过程

在不考虑互感器内部杂散电容时,CVT 可以看作是理想的变压器。流过线圈绕组的电流会产生磁通,并在别的绕组中感应出电压,因而电磁感应电压与绕组间的变比有关,代表着电压互感器中的最终电压分布。由于流过线圈电感的电流不会突变,铁芯存在磁迟滞效应,故二次侧电磁感应电压不能突变,滞后于一次侧电压信号。在冲击电压作用下,铁芯呈高阻态损耗会很大,所以一、二次侧电磁感应电压并不是与变比成正比关系的,该过程主要取决于互感器的匝数比、漏电感和负载阻抗^[4]。变压器电磁感应过程传统集中参数模型如图2所示。

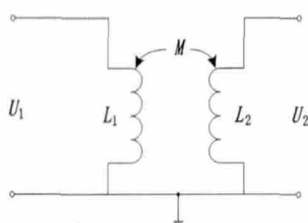


图2 电磁感应过程集中参数等值电路

图2中, U_1 、 U_2 分别为一、二次侧电压; L_1 、 L_2 分别为一、二次侧线圈绕组自感; M 为一、二次侧绕组间的互感。

1.3 自由振荡过程

在冲击电压作用下的 CVT,电磁单元初始电压和稳态电压分布不同,一次侧线圈中将产生自由振荡,该自由振荡过程会感应到二次侧当中,在二次侧产生自由振荡电压。此时,整个电磁部分可等效为电阻、电感、电容的串并联电路。故二次侧输出电压在初始电压和稳态电压之间会出现一个振荡过渡过程,且初始电压分布和稳态电压分布相差越大,振荡就越厉害。一、二次侧自由振荡电压的传递特性主要跟一、二次侧绕组对地电容和绕组的自电感组成的振荡回路有关^[4,5]。

2 暂态过电压试验研究

本次试验施加不同的冲击电压在电容式电压互感器上,并在高压侧和低压侧并接不同阻值的电阻,再通过示波器记录的高、低压侧电压波形来分析不同冲击电压下 CVT 的暂态特性响应状况。

2.1 试验原理

试验冲击电压应施加在 CVT 的高压端子与地之间。试验前,标准互感器的低压端子、电容式电压互感器的低压端子、各二次绕组的一个端子和底座均应可靠接地,高、低压侧波形记录仪采用 Tek DPO 7054 示波器,整个试验原理如图3所示。

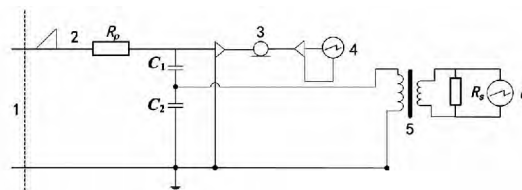


图3 暂态过电压试验原理图

图3中,1为冲击电压发生器;2为引线;3为同轴电缆;5为电磁单元;4、6为示波器; R_p 为阻尼电阻; C_1 为电容分压器高压臂; C_2 为电容分压器低压臂; R_s 为负载电阻。

本次试验用设备主要包括:冲击电压发生器、标准电压互感器、电容式电压互感器、泰克示波器等。ZDI300 冲击接地阻抗测试仪提供所需冲击电压,该装置能够提供最高 2.0 kV 的冲击电压,波前时间为 0.5 ~ 10 μ s; 选用 110 kV 和 220 kV 两种等级 CVT 进行检测; 示波器为泰克示波器 Tektronix DPO 7054,该装置采样率最高可达上百兆,并能同时精确记录 4 个通道的波形。

2.2 试验波形图及结果分析

试验中,先后用冲击电压发生器产生波头时间为 1.4 μ s,幅值为 1 kV 和 500 V 的冲击电压输入电容式电压互感器的高压侧,并分别在电压互感器的高压侧和低压侧并联不同阻值的调压电阻(高压侧为 R_p ,低压侧为 R_s),再用 Tek 示波器同时记录电压互感器高、低压侧的电压波形。示波器记录的过电压响应波形数据见表1。如图4为 220 kV CVT 在 $U_0 = 1$ kV 冲击电压作用下高压侧电压波形和低压侧响应的电压波形;图5为 110 kV CVT 在 500 V 冲击电压作用下高压侧电压波形和低压侧响应的电

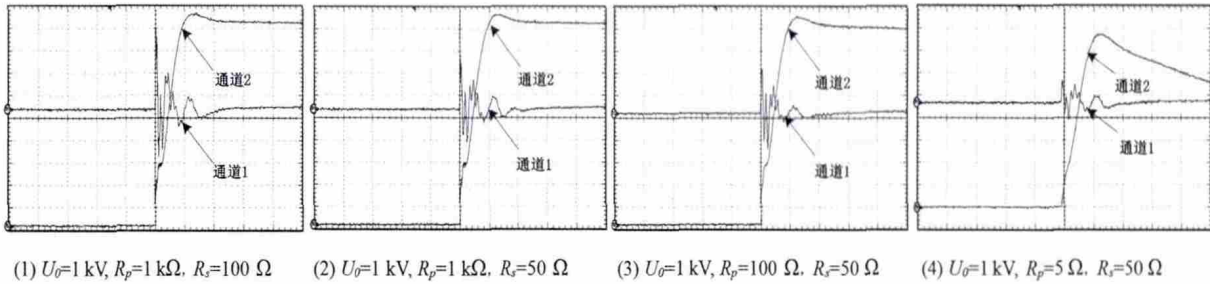


图4 1 kV冲击电压下220 kV CVT高、低压侧电压实测波形

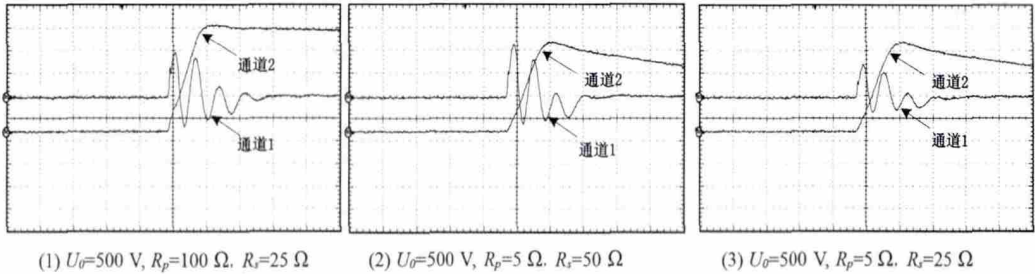


图5 500 V冲击电压下110 kV CVT高、低压侧电压实测波形

表1 暂态过电压响应波形数据记录

电压等级 /kV	原边 电阻 R_p	副边 电阻 R_s/Ω	冲击电压 U_0							
			1 kV				500 V			
			U_p/V	U_s/V	$T_{fp}/\mu s$	$T_{fs}/\mu s$	U_p/V	U_s/V	$T_{fp}/\mu s$	$T_{fs}/\mu s$
220	1 k Ω	100	955	11.7	3.88	65.1	491	3.38	4.08	0.169
	1 k Ω	50	951	7.34	3.88	78.5	490	2.21	4.03	0.37
	100 Ω	50	941	5.93	3.82	87.9	476	1.88	4.03	0.37
	5 Ω	50	779	3.1	3.45	84.3	412	0.94	3.18	0.014
	100 Ω	25	948	16.7	3.85	0.14	481	6.0	3.91	0.523
110	5 Ω	50	783	18.6	3.36	0.16	411	7.02	3.15	0.505
	5 Ω	25	783	13.7	3.29	0.17	411	4.49	3.11	0.537

压波形。图中通道1记录低压侧响应电压波形,通道2记录高压侧电压波形。

从图4、图5的波形记录结果以及表1中数据可以看出,冲击电压经过CVT的转换后波形出现了失真,高压侧电压波形因受引线电感和并联电阻的影响出现了幅值降低和延迟的现象。低压侧响应电压信号与高压侧冲击电压信号同时出现,极性相同;当冲击电压参数和副边电阻 R_s 一定时, R_p 越大, U_p 就越大,波前时间 T_{fp} 亦越长,低压侧输出电压波形振荡变得更剧烈;当冲击电压参数和原边电阻 R_p 一定时, R_s 越大, U_s 就越大,波前时间 T_{fs} 反而越短,但几乎不影响高压侧电压的幅值 U_p 和波前时间 T_{fp} 的大小;在冲击电压和调压电阻相同时,两种不同电压等级的CVT对高压端电压信号的作用不明显,110 kV的CVT的低压侧响应电压幅值 U_s 和波头时间 T_{fs} 均较220 kV大;稳态时,上述各图 U_p 与低压侧输出稳态电压值是按照CVT的额定变比传递的。

3 仿真模拟实验

3.1 CVT的等值电路

为模拟CVT的暂态过电压响应情况,建立了如图6所示的等值电路图,图中包括一个分压单元即高、低压电容串联组成的电容分压器;一个电磁单元,由补偿装置、一次侧和二次侧绕组、理想变压器、励磁支路、谐振抑制支路等组成^[6,7]。 U 为冲击电压; C_1 、 C_2 分别为分压器的高压分压电容和低压分压电容; C_{10} 、 C_{20} 分别为一、二次绕组对地电容; C_{11} 、 C_{22} 分别为一、二次绕组纵向电容; C_c 为分压单元与电磁单元间的耦合电容; R_1 为CVT一次绕组电阻和补偿装置电阻以及电容器等值电阻之和; L_1 为CVT一次绕组漏感和补偿装置电感之和; R_m 、 L_m 分别为CVT电磁单元励磁电阻和励磁电感; R_2 、 L_2 分别为CVT二次绕组电阻和漏感; R_f 为阻尼电阻; C_f 为谐振电容; r_f 、 L_f 为谐振电抗器的直流电阻和电

感; Z_b 为负载电阻^[8]。

3.2 仿真实验结果

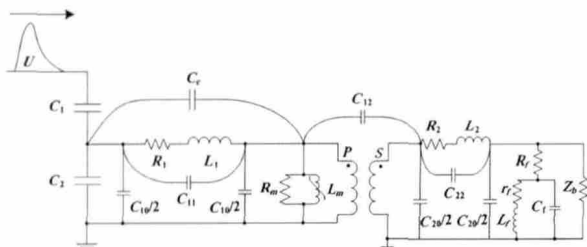


图6 电容式电压互感器(CVT)等值电路图

根据图6建立基于ATPDraw的CVT暂态过电压响应仿真电路模型,通过在一次侧和二次侧并联如同实际试验时的不同阻值调压电阻,并记录高、低压侧的电压波形。其仿真电压波形图如图7、图8所示。

通过对220 kV和110 kV CVT在幅值为1 kV和500 V冲击电压作用下的暂态响应特性的仿真,可以

看出图7和图8的仿真结果与实测结果基本一致。仿真响应结果中没有出现现象实测结果中那样强烈的振荡过程,这是因为CVT中暂态过电压传递时,振荡的形成主要是由于CVT的电磁单元中绕组存在对地电容和自感,加之补偿装置等部件以及一些分布参数造成的,振荡过程是一个及其复杂的过程,其传递取决于所有元件的杂散特性。

4 试验总结及结论

对CVT暂态过电压的传递特性进行了试验和仿真分析,试验过程中遇到了一些问题,现就相关问题做出了归纳总结,以期今后对暂态过电压在CVT的暂态特性校验提供参考。

1) 冲击电压在电磁单元中的传递过程由静电感

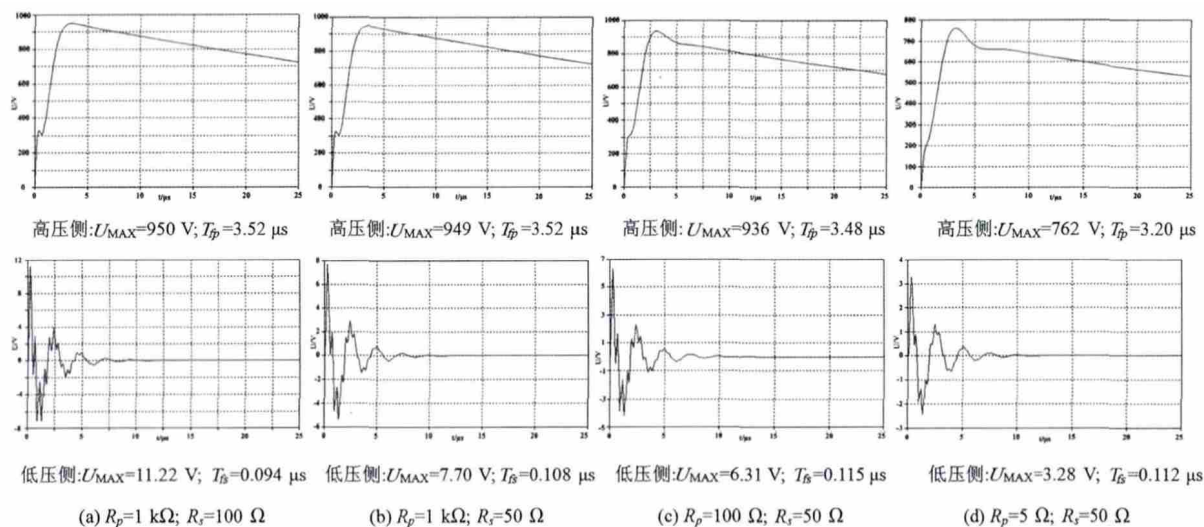


图7 1 kV冲击电压下220 kV CVT高、低压侧电压仿真波形

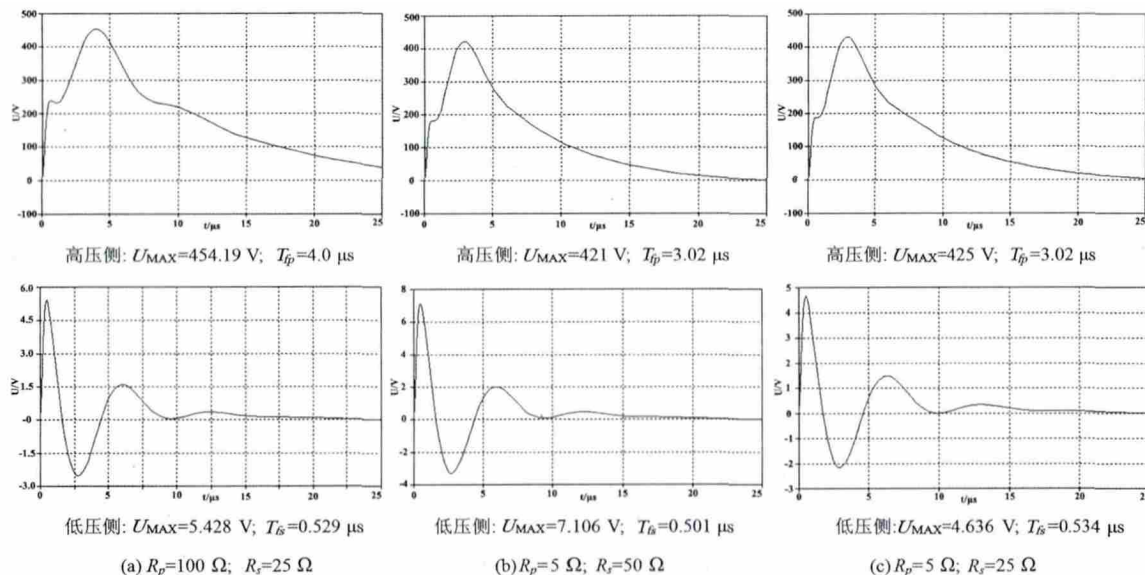


图8 500 V冲击电压下110 kV CVT高、低压侧电压仿真波形

应、电磁感应和自由振荡3个过程组成,所以冲击电压通过 CVT 的隔离变换后,低压侧波形出现了失真,暂态过电压在 CVT 中并不是按其额定变比来传递的。

2) 低压侧输出地电压信号与高压侧冲击电压信号几乎同时出现,极性相同。实测结果表明,高压侧电压幅值与低压侧输出的稳态电压值是按照 CVT 的额定变比传递的。

3) 当冲击电压参数和副边电阻一定时,原边电阻越大,高压侧电压幅值就越大,波前时间亦越长,低压侧响应电压波形振荡越剧烈;当冲击电压参数和原边电阻一定时,副边电阻越大,低压侧响应电压幅值就越大,波前时间反而越短,但对高压侧电压的幅值和波前时间几乎不影响。

虽然, CVT 不能完整地传变高频暂态信号,但低压侧响应波形波头部分的特性与一次侧是一致的。在合理配置 CVT 电路参数的情况下,依然能够使低压侧响应波形满足相关标准的要求,并运用于暂态过电压的在线监测中。

参考文献

[1] 郭克勤,刘翔,陈鹏,等. 电容式电压互感器传递过电

(上接第69页)

由计算结果可知,由于紧凑型线路减小了交流三相线路对直流线路电磁耦合影响的不平衡,交流紧凑型线路要比常规线路对特高压直流线路的电磁影响明显减小。

5 结 论

(1) 交/直流平行架设后,特高压直流线路电压、电流中的工频分量明显增加。超高压交流线路会在平行架设特高压直流线路产生工频感应电压、电流。特高压直流线路换流变压器阀侧产生直流偏磁电流。

(2) 特高压直流线路工频感应电压、电流和换流变压器阀侧直流偏磁电流随着交/直流线路平行架设长度的增加而增大,两者基本呈线性关系;随着交/直流线路接近距离的增加而减小,呈非线性关系。

(3) 并行段土壤电阻率和杆塔接地电阻对特高压直流线路工频感应电压、电流以及直流偏磁电流的影响很小。

(4) 对平行段特高压直流线路的电磁影响,超高压交流紧凑型线路比常规线路明显减小。

参考文献

[1] 陆国庆,何宏明,张军. 交直流输电线路相邻架设或共

压试验研究 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2009, 30(4): 25-28.

- [2] 赵智大. 高电压技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [3] Martinez, J. A; Walling, R; Mork, B. A, et al. Parameter Determination for Modeling System Transients - Part III: Transformers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(3): 2051-2062.
- [4] 姚晓健,蔡祖安,陈红. 电容式电压互感器的高频暂态特性仿真分析 [J]. 湖南电力, 2011, 31(2): 13-16.
- [5] 曾祥君,刘正谊,屈明志,等. 互感器暂态行波传输特性仿真分析与实验测试 [J]. 长沙理工大学学报: 自然科学版, 2004, 1(1): 71-75.
- [6] 王黎明,方斌. 500 kV 电容式电压互感器暂态特性仿真 [J]. 高电压技术, 2012, 38(9): 2389-2396.
- [7] Hassan Khorashadi Zadeh, Zuyi Li. A Compensation Scheme for CVT Transient Effects Using Artificial Neural Network [J]. Electric Power Systems Research, 2008(78): 30-38.
- [8] D. Fernandes Jr, W. L. A. Neves, J. C. A. Vasconcelos. Coupling Capacitor Voltage Transformer: A Model for Electromagnetic Transient Studies [J]. Electric Power Systems Research, 2007(77): 125-134.

(收稿日期: 2013-09-27)

用走廊的探讨 [J]. 高电压技术, 1997, 23(4): 68-70.

- [9] 黎小林,黄琦,唐剑,等. 交流线路对邻近并行直流线路影响 [J]. 中国电机工程学会 2006 无线电干扰和变电站电磁兼容研讨会, 2006.
- [10] 周沛洪,修木洪,聂定珍. 同廊道架设交直流线路的相互影响 [J]. 高电压技术, 2003, 29(9): 5-9.
- [11] 马为民. 换流变压器中直流偏磁电流的计算 [J]. 高电压技术, 2004, 30(11): 48-49.
- [12] 赵松涛. 交流输电线路对并行直流输电线路电磁感应的仿真研究 [J]. 北京: 华北电力大学, 2006: 1-2.
- [13] ± 800 kV 直流输电技术研究 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [14] Tiebing Lu, Songtao Zhaoxiang Cui. Simulation of Electromagnetic Induction on DC Transmission Lines from Parallel AC Transmission Lines [J]. Electromagnetic Compatibility, 2007: 114-117.
- [15] E. V. Larsen, R. A. Walling, C. J. Bridenbaugh. Parallel AC/DC Transmission Lines Steady-state Induction Issues. [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(1): 667-673.
- [16] 曾嵘,唐剑,张波,等. 交直流输电线路并行对换流变直流偏磁影响及对策 [J]. 陕西电力, 2008, 36(9): 1-5.
- [17] 王琦,曾嵘,唐剑. 罗百交流线路对云广 ± 800 kV 直流电磁干扰研究 [J]. 南方电网技术, 2007, 3(1): 27-31.
- [18] 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.

(收稿日期: 2013-07-01)

2013年《四川电力技术》总目录

第1期

- 机电-电磁暂态混合仿真在电网合环分析中的应用研究
..... 胡立锦 常喜强 周茂 等(1)
- 双馈异步风力发电机的并网方式研究及仿真分析
..... 郭大伟 王维庆 张新燕(7)
- 双馈风电机组中 Crowbar 保护综述
..... 魏丽丽 晁勤 袁铁江(12)
- 基于神经网络的风功率预测问题研究
..... 张涛 张新燕 王维庆(16)
- “疆电入川”直流输电电压等级及导线截面选型
..... 唐权 邓盈盈 戴松灵 等(19)
- “疆电入川”对四川电力供应影响及落点分析
..... 孟婧 唐权 杜新伟 等(25)
- 四川省调 OMS 系统继电保护全寿命周期信息管理及统计分析分析模块的研究与开发
..... 王云丽 张烈 申华(29)
- 基于概率统计的新疆电气化铁路负荷特性分析及对地区电网的影响 印欣 张绍洲 刘红丽 等(33)
- 风光储输系统最优容量配比研究
..... 张钟文 曹敦 彭长巍 等(37)
- 对大型风电场接入电网并网方式的思考
..... 史亚娟 王海云 常喜强(44)
- 光伏发电容量可信度分析
..... 周专 姚秀萍 常喜强(48)
- UPFC 单机无穷大系统建模与控制策略研究
..... 邓大磊 王奔 付永良(53)
- 基于支持向量机的电力系统不良数据在线检测辨识与修正
..... 包永金(59)
- 区间组合模型在中长期负荷预测中的应用
..... 徐志向(64)
- 智能变电站二次系统调试技术探讨 赵子涵(70)
- 110 kV 变电站铁磁谐振混沌现象的追踪控制与同步
..... 何波 康积涛 张花芝 等(73)
- 220 kV 电容式电压互感器主电容介质损耗因数测试方法
..... 麻守孝 苏进胜 张云凤 等(77)
- 四川某 220 kV 同塔四回线路电磁环境影响分析及其防护对策 南方 张亚军 姜南希(81)
- 有源电力滤波器的 Matlab 仿真 高勇(84)
- W 炉旋风微油煤粉燃烧器的数值模拟研究与应用
..... 蒲学森 肖宏博 钱锋 等(87)

水轮机调速器负荷异常上升原因分析及处理

..... 唐杰阳 李甜甜 毛成钢 等(92)

第2期

- 基于改进差异进化算法的地区电网无功/电压实时优化控制研究 潘家和 廖丹妮(1)
- 纯电容补偿面临的谐波影响及其解决方法 田园(6)
- 模拟小信号电能表的应用及其检测技术
..... 艾兵 江波 杨华云 等(11)
- 输电线路直流融冰时间的计算和试验验证
..... 范松海 刘馨 聂鸿宇 等(15)
- 基于混合算法的复杂配电系统的可靠性评估
..... 陈嵩峰 宋明玉(18)
- 750 ~ 220 kV 系统短路电流影响因素分析与限制措施
..... 胡立锦 常喜强 周茂 等(21)
- 基于 GPRS 通信的配电网无功补偿系统研究
..... 冷怡 陈晓东 鲍云浮(27)
- 基于奇异点检测的行波单端测距方法研究
..... 孟凡铮 王喜疆(32)
- 考虑相角特征的无死区新型触/漏电保护技术
..... 陈义刚 李浩 范康林 等(35)
- 小波变换在暂态电能质量检测和识别中的应用
..... 潘从茂 李凤婷(40)
- 成都电网自动电压控制系统的建设与运行
..... 刘建 胡启元 林瑞星 等(43)
- 配网自动化条件下的 FTU 优化配置 徐飞(48)
- 偏远地区微网结构探讨
..... 周惟婧 朱鑫 刘俊勇 等(54)
- 用于高电压环境下的光学电压电场传感器
..... 冯运 陈洪波 白欢 等(59)
- 复合绝缘子憎水性检测技术研究进展
..... 贺含峰 陈洪波 白欢 等(63)
- 国网典型设计变电站高低构架出线的防雷保护
..... 张磊 任德顺 刘成立(69)
- 分散式风电接入对地区电网运行影响的研究
..... 孙立成 赵志强 王新刚 等(73)
- 300 MW 机组脱硫系统增容改造 邓启福 朱彬志(77)
- 吸收塔浆液密度高对脱硫系统的影响及控制措施
..... 兰江(80)
- 进口亚临界锅炉饱和蒸汽含钠量超标的原因研究与应用 彭卫红(84)

计及电网负荷的发电机自动励磁动态过程及相关问题

..... 滕予非 丁理杰 张 华 等(87)

进口亚临界机组锅炉燃烧器改造

..... 黄国恩(92)

第3期

考虑削峰填谷激励的电动汽车集中充放电策略

..... 王 豪 刘俊勇 刘友波(1)

基于改进模糊层次分析法SF₆断路器状态评估

..... 王军霞 张彼德 赵金龙 等(5)

四川特高压交直流电网安全运行保障技术框架研究

..... 庞晓艳 李 建 张 蓓 等(11)

综合考虑自励磁和工频过电压的小电网联络线无功补偿

优化策略

..... 张 华 李 旻 丁理杰(15)

分布式电源并网的仿真研究

..... 刘 林 罗 剑 舒 斌(19)

向无源网络供电的VSC-HVDC系统无源控制研究

..... 付永良 王 奔 陈新华 等(24)

TCSC同步信号对抑制次同步振荡的影响研究

..... 刘伟波 康积涛 何 波 等(28)

基于最小负荷损失的自适应备自投策略研究

..... 陈 绩 甄 威(32)

广域继电保护中一种故障判定算法

..... 李运坤 江登笠 周文越(39)

一种带串行接口微功耗A/D转换器的逻辑控制策略

..... 沈 策 文 旭 胡 鑫(42)

550 kV 变压器安装过程中故障原因分析及处理

..... 刘贞超 徐文刚 赵燕梅 等(46)

104 规约在成都电网调度自动化系统中的运用分析

..... 张大伟(49)

考虑多规则约束的统调火电机组合同电量修正策略

..... 何治华 刘友波 刘俊勇 等(52)

对三峡地下电站30号机转子接地保护连续多次动作的行为分析

..... 陈浩森 丁 威 李光耀(57)

源端维护在唐山的研究与应用

..... 董智勇 韩宝民 徐 歆(60)

1 000 kV 变电站雷电侵入波防护分析

..... 张 榆 刘 念 秦 斌 等(64)

500 kV 交流送电网络短路电流研究

..... 吴晓蓉 高 强 郭明阳 等(68)

直流高速真空断路器灭弧方案的仿真研究

..... 高银银 陈民武 方雨茜(72)

500 kV 变电站主变压器低压侧开关分闸回路典型缺陷分析

及处理措施

..... 陈宏元 李凡红 庄秋月(76)

35 kV 小型农村变电站主变压器防止过电压研究

..... 曾家斌 李 昂(80)

油浸式电流互感器的不同缺陷原因对比分析

..... 陈安明 杨 洋 许 强 等(83)

百万千瓦超超临界机组自启停控制系统

..... 龙海云(86)

风力光照LED路灯控制系统的研究

..... 司志泽 陈志军 安典强(91)

第4期

共走廊架设超/特高压输电线路电场分布及走廊优化研究

..... 石超群 朱 军 吴静文 等(1)

负荷频率特性对孤网频率稳定性影响分析

..... 周 专 姚秀萍 常喜强 等(6)

一次调频对电网频率特性影响及频率相关稳控措施研究

..... 胡立锦 杨永全 常喜强 等(10)

调速系统对孤网频率稳定性影响分析

..... 任 华 姚秀萍 常喜强 等(15)

四川特/超高压电网脆弱度分析及应用

..... 李 燕 苟 竞 汪彦含 等(19)

面向多种调度模式的电力交易计划统一编制与管理

..... 许立雄 李 响 刘友波 等(23)

负荷响应机制在美国智能电网中的新模式

..... 周启航 陈 晨 苟 竞(28)

一种跟踪风光互补发电系统计划出力的变时间尺度短期

功率预测方法

..... 李明伟 青 松(32)

智能电网调度技术支持系统构架及调度自动化现状研究

..... 庞晓艳 李 建 梁汉泉 等(37)

配电网电动汽车协调有序充电调度策略研究

..... 李书雄 林明星 余兴祥(40)

计及风力发电并网的配电网潮流优化

..... 程站立 胡 枚 陈世雯(46)

基于PCHD模型的VSC-HVDC系统的L₂增益控制

..... 付永良 王 奔 陈新华 等(50)

基于NSGA-II算法的PSS多目标优化设计

..... 张 利 康积涛 刘 芽 等(55)

220 kV 母线保护系统中母联、分段开关典型死区保护分析

..... 邹 瑜 陈宏元 李凡红 等(59)

继电保护状态检修的研究

..... 宋 柯 何 滔 郑焯文 等(62)

应用于电力系统谐波分析的采样周期自适应方法

..... 周 洲(66)

考虑保护重要度计算环网方向保护配合最小断点集

..... 江登笠 李运坤 周文越(71)

220 kV 输电线路防绕击侧针防护效果研究

..... 张仕名 张先怡 许 安 等(75)

500 kV 内桥接线变电站停电安全浅析

..... 庄秋月 李凡红(80)

变压器电介质频率响应测试系统研制

..... 刘 君 张华强 王 华 等(83)

对一起换流站交流滤波器低端电容器击穿事故分析

..... 冷 怡 陈晓东 鲍云浮(87)

环境湿度对实验室工频电场强度测量结果的影响研究

..... 兰新生 林巧红 刘虹 等(92)

第5期

风机接入对系统阻尼特性影响的研究

..... 申盛召 姚秀萍 王维庆 等(1)

基于ICA-NN的短期风功率预测研究

..... 周专 姚秀萍 王维庆 等(5)

基于热传递的光发射次模块结温计算方法

..... 姜振超 唐杰 黄宏光(9)

500 kV交直流线路雷击特性比较研究

..... 刘守豹 李江陵 王红梅 等(13)

一种三相三绕组变压器的电磁暂态模型研究

..... 王彪 甄威(17)

基于变电站线路出口信息的小水电群等值及参数辨识研究

..... 魏巍 丁理杰 史华勃 等(20)

基于四川电能质量监测系统与改进粒子群算法的负荷模型参数辨识方法研究

..... 丁理杰 滕予非 吴瀚 等(25)

基于铁锂电池的非浮充式变电站直流电源系统

..... 李晶 陈轲娜(30)

智能变电站中光电模块的老化特性实验系统

..... 刘明忠 杨书俭 黄宏光(33)

四川电网负荷特性分析预测

..... 王海燕 任志超 杜新伟 等(37)

TCSC与SVC在电力系统SSR中的应用及经济性比较

..... 吴小刚 袁义桃 康积涛(41)

南瑞继保定子接地保护在锦屏二级水电站的应用

..... 蔡显岗 康娣 季杰 等(45)

变电站直流系统接地点定位新技术及实施

..... 戴平 吴健 龙涛 等(49)

灰色关联度在微网成本-效益中的应用..... 周长特(55)

电力变压器全寿命周期成本模型参量的敏感性分析

..... 舒萍(59)

四川电网移动直流融冰装置设计及现场融冰

..... 杨琳 刘凡 马小敏 等(64)

500 kV变电站主变压器中压侧失灵判据缺陷分析及应对

策略..... 李凡红 肖启繁 邹瑜 等(69)

OPGW多种接地方式综合分析..... 陈超 廖民传(73)

直流输电工程双极协调功能研究..... 刘洋(79)

一种计算架空输电线在均布载荷作用下静力平衡状态的

方法..... 陶然 刘小会(83)

XLPE电缆护层保护器引起护层环流异常分析

..... 杨小兵 苏洪波 王志刚 等(87)

微气象条件对输电线路的影响及防御措施

..... 李大勇 李颖慧(91)

第6期

特高压直流对交流系统稳定性的研究

..... 张东明 姚秀萍 王维庆 等(1)

雷击风力发电机塔筒的电磁干扰分析

..... 程锐 张新燕 白生忠(4)

基于BP-ANN和出力波动特性的光伏系统短期功率预测

模型..... 杨青斌 袁铁江 吐尔逊·伊不拉音 等(9)

特高压交流电网建设进程对四川特高压直流与相关交流断面耦合关系的影响

..... 李旻 周启航 邱丽萍 等(13)

交直流互联系统电压稳定性研究..... 高超峰 康积涛(17)

线路重合闸投退方式的研究

..... 吴桂芳 胡仁祥 冯小萍 等(23)

基于Multi-agent技术的配电网重构研究

..... 陈晓静 孔冰 邓亚文 等(26)

一种线路高频保护防误方法分析及措施研究

..... 梁静 赵青春 于冰 等(29)

基于ADPSS大区电网混合仿真的直流系统辅助控制建模

..... 朱玲 王骅(33)

概率神经网络在母线故障识别中的应用研究

..... 纪叶生(39)

电力系统谐波频谱分析的相位差校正法.....

..... 王涛 邓亚文 李红伟(43)

用电信息采集系统信道建设研究

..... 李赋欣 徐厚东 佟如意(46)

±500 kV换流站直流电流互感器现场校准装置与技术

..... 周一飞(50)

四川居民阶梯电价效果分析及评价体系研究

..... 李红 杜新伟(55)

一种定值在线校核顺序的优化方法

..... 张琼 陈召阳(61)

超高压交流线路对平行架设特高压直流线路的电磁感应

..... 李宝聚 郭雷 张磊(66)

基于有限元法的冷缩电缆终端缺陷形态特征与局部放电

特性分析..... 邓刚 刘丽 方玮 等(70)

基于支持向量机的变电设备缺陷发生率的预测及应用

..... 陈义刚 徐厚东(75)

智能识别和主动驱赶的防鸟害装置研究

..... 曹永兴 丁登伟(78)

一起典型35 kV开关柜复合绝缘击穿事故分析及整改措施

..... 陈海平(81)

220 kV内桥主接线开关失灵危害与对策..... 郭又华(84)

电容式电压互感器暂态特性校验

..... 杨刚 冉子凤 文艺 等(87)



成都市兴名源电器有限公司

成都市兴名源电器有限公司专业生产0.5~35 kV电流、电压互感器，3~35 kV油浸式、干式组合互感器，高低压避雷器及绝缘配套件的厂家，是国家电网中标企业。

公司拥有一支技术精湛、工作经验丰富、责任心强的精英团队。公司先后构建了具有国际领先技术的环氧树脂浇注生产线、自动压力凝胶生产线、真空滤注油生产线，并配备了国内外先进的试验、检验仪器设备。本公司产品全面通过电力工业设备电气质量检验测试中心（武高所）和机械工业第五（西安）计量测试中心站西安高压电器研究所（西高所）的各项检测项目。通过了ISO9001:2008标准体系认证，生产的产品专业、优质、安全、环保。



城市因我而亮丽
诚信、专业、求实、创新

公司地址：成都市大邑县工业集中发展区南区兴业大道66号
联系电话：（028）88269989 88269916